

Entwicklungsrichtungen der Applikation von Kondensatoren

Doz. Dr. sc. nat. H.-D. Langer
Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Physik/EB

1. Einleitende Bemerkungen

Bei einer genaueren Analyse stellt man eine erstaunliche Anwendungsbreite von Kondensatoren im technischen Bereich fest. Im vorliegenden Beitrag soll dies anhand von anschaulichen Beispielen demonstriert werden.

Um eine einigermaßen vielseitige Übersicht zu gewährleisten, wird nach folgenden Gesichtspunkten geordnet:

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

Selbstverständlich sind im konkreten Fall oft mehrere oder alle genannten Merkmale zugleich zutreffend.

2. Schaltungstechnische Verwendung von Kondensatoren

Vor allem auf dem Gebiet der Informationstechnik setzt sich immer durchgreifender das Digitalprinzip durch. Hier und in ähnlichen Anwendungsfällen der Impulsverarbeitung ist der Kondensator ein wichtiges Funktionselement innerhalb logischer Gatterstrukturen.

Die Bilder 1 und 2 zeigen einfache Schaltungen zur Realisierung der Impulsverkürzung bzw. -verzögerung mit Hilfe von Kondensatoren.

satoren. Man nutzt dazu die Lade- bzw. Entladekennlinie $U_C(t)$. Bei Erreichen der Schwellwertspannung $U_S = U_C(T_2)$ bzw. $U_C(t_{V1})$ schaltet das Gatter 2, und man erhält gegenüber dem Eingang E einen verkürzten bzw. verzögerten Impuls am Ausgang A.

Die Schaltung im Bild 3 zeigt den Kondensator als Geber einer Flüssigkeitsfüllstands-Anzeige. Auch in diesem Fall nutzt man die Ladekennlinie. Bei zu niedrigem Füllstand gelangen die Impulse ungestört vom Generator zur Impulsauswerteschaltung. Berührt die Flüssigkeit die Kontaktelektrode, so wird der Kondensator elektrisch wirksam. Seine Aufladung über den Flüssigkeitswiderstand führt zu einer Impulsflanken-Deformation, die die Auswerteschaltung registriert.

Die erwähnten Applikationsfälle sind für die monolithische bzw. Hybridintegration des Kondensators prinzipiell geeignet.

Kleine Abmessungen muß man heute aus verschiedensten Gründen auch bei Bauelementen der Leistungselektronik fordern. Allerdings dominiert hier - abhängig vom Leistungspegel - noch die diskrete Ausführung. Ein Schwerpunkt der Bauform-Weiterentwicklung von Kondensatoren ist u. a. die Minimierung der parasitären Komponenten. So besteht aufgrund ständig steigender Grenzfrequenzen, Anstiegsflanken von Strom (bzw. Spannung) und Stromstärken die Forderung nach Minimierung der parasitären Induktivität.

Ein typisches Beispiel dafür sind Bedämpfungs- und Gatekondensatoren in der Schutzbeschaltung von GTO-Thyristoren (Gate-Turn-Off) bei selbstgeführten Stromrichtern (Bild 4a).

Es hat sich gezeigt, daß die Anforderungen an die Konstruktion (geringe Eigeninduktivität, hohe Spitzenströme, hohe Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten) weit über das hinausgehen, was üblicherweise bei Neukonstruktion bzw. Erzeugnisoptimierung notwendig ist.

Das Spannungs-Strom-Zeit-Diagramm in Bild 4b erläutert die Belastungsverhältnisse am Thyristor und am Bedämpfungskondensator (C_1 in Bild 4a). Demnach übernimmt C_1 den gesamten Strom-Abschaltimpuls des Thyristors (z. B. 2000A) und begrenzt damit die Spannungssteilheit am Thyristor (ca. $500 \text{ V}/\mu\text{s}^{-1}$).

Für beide Bauelemente gelten die gleichen hohen Spannungskennwerte (U_N Nennspannung, U_g periodische Scheitel- bzw. Dauergrenzspannung, U_S nichtperiodische Scheitel- bzw. Spitzenspannung). Der Spannungsanstieg bis zur Spannungsspitze U_L und deren Betrag werden durch die parasitäre Induktivität - insbesondere die des Kondensators - im Bedämpfungskreis bestimmt, die zu minimieren ist (auf $\leq 30 \text{ nH}$).

Bild 5 zeigt mit dem Fall b eine konstruktive Lösung dieser Aufgabe durch die Firma Siemens, BRD, die sich auch für den Kondensator C_L im Steuerkreis (s. Bild 4a) bewährt hat. Neben solchen Maßnahmen wie

- Einsatz selbstheilender, beidseitig metallisierter Kunststoffolie,
- hohe Anforderungen an Randverstärkung, Stirnflächen-Schoop-schichten und Wickelgenauigkeit,

wurde der Wickel entscheidend verändert. Durch den koaxialen Aufbau zweier Teilwickel mit Stirnflächenkontakt entfällt die Eigeninduktivität der Rückleitung, und die der Leitungen zu den Anschlußbolzen wird minimiert. Die quantitativen Änderungen der Induktivitätsbeiträge im Vergleich zum Fall a (Bild 5) zeigt die Darstellung in Bild 6.

Ein Beispiel für die Verwendung von Chipkondensatoren (Tantal-Festelektrolyt, Keramik-Vielschicht) ist der Herzschrittmacher-Hybridschaltkreis der 2. Generation. Die externe Beschaltung des CMOS-Steuerschaltkreises zeigt mit Angabe der Kondensator-Kennwerte Bild 7a. In den folgenden Teilbildern sind die wichtigsten Grundschaltungen der eingesetzten Kondensatoren schematisch veranschaulicht. Die Schalter S_1 sind durch integrierte Transistorschaltungen in CMOS-Technologie realisiert. Bei geschlossenen Schaltern S_1, S_3 (S_2, S_4, S_5 offen) lädt sich der Kondensator C_7 über den Widerstand R_1 auf die Batteriespannung auf (Bild 7b). Man erhält den Stimulationsimpuls mit einer Amplitude vom Betrag der doppelten Batteriespannung bei Schließen von S_2, S_4 (S_1, S_3, S_5 offen). Der Auskoppel-Kondensator

C_3 wird über S_5 und R_2 (S_4 offen) entladen.

Der Kondensator C_{11} puffert die Versorgungsspannung des integrierten Schaltkreises IS (Bild 7c). R_5 und C_{10} bilden eine Glättungsschaltung. Man kann die Welligkeit ΔU , die möglichst klein sein soll, nach der angegebenen Formel abschätzen.

Als Koppelkondensatoren der Verstärkerstufen nach Bild 7d dienen die Kondensatoren C_k ($k = 1$ bis 5). Sie bestimmen maßgeblich die untere und obere Grenzfrequenz (f_{gu} bzw. f_{go}) der nutzbaren Übertragungsfunktion U_A/U_E . Zur Abschätzung von f_{gu} dient die angegebene Formel. R_E ist der Eingangswiderstand der Schaltung. Das Schaltungsprinzip zur Realisierung der Impulsbreiteneinstellung mit Hilfe des Ladekondensators C_6 zeigt Bild 7e. Die Quelle Q_I liefert einen konstanten Strom I (gleiche Ladungsmenge ΔQ pro Zeiteinheit Δt), wodurch aufgrund von $C = \text{konst.}$ die Spannung $U = U_C$ über dem Kondensator linear ansteigt (S offen). Bei Erreichen der Spannung $U_C = U_{SW}$ spricht der Schwellwertschalter SWS an, und die Impulslänge T wird festgelegt. Bei großem Konstantstrom wird die Schwellwertspannung schneller erreicht (s. Diagramm und Formel), d.h. die Impulsbreite ist kleiner als bei geringerer Stromstärke.

Pufferkondensatoren erlangen im Zusammenwirken mit integrierten Schaltkreisen zunehmend an Bedeutung. Bei batteriebetriebenen Schaltkreisen sichern sie aufgrund des im Vergleich zur Batterie geringeren Innenwiderstandes vorteilhafter den kurzzeitig hohen Energiebedarf der im Impulsbetrieb arbeitenden Schaltkreise. Kleinere Spannungseinbrüche fangen Stützkondensatoren C_1 auf, die man heutzutage bereits direkt in das keramische Chipgehäuse integriert (s. Abschnitt 5).

Bei Halbleiterspeichern benötigt man höchstkapazitive (1 bis 100F) Puffer- bzw. Stützkondensatoren, um den Datenerhalt bei Netzspannungsausfall zu sichern. Für diesen Zweck werden vor allem die Doppelschicht-Kondensatoren mit ihren extrem hohen Volumenkapazitäten weiterentwickelt.

Aus Bild 9 geht der prinzipielle Aufbau eines Kondensators von diesem Typ hervor. Es werden die dielektrischen und Isolatoreigenschaften der Grenzschicht Elektrolyt/Festkörper genutzt. An den elektronenleitenden Festkörper lagern sich gemäß Bild 9a

Wassermoleküle sowie gezielt eingebrachte Dotanden - bzw. auch unerwünschte Fremdionen mit positivem Vorzeichen ein, die in Verbindung mit der Oberflächenladung des elektronenleitenden Festkörpers die Doppelschicht (HELMHOLTZ-Schicht) aufbauen. Sie bildet das isolierende Dielektrikum des Kondensators, dessen Elektroden der Festkörper und der Flüssigelektrolyt sind. Durch Einsatz geeigneter Festelektrolyte, z. B. $RbAg_4J_5$, kann man derartige Kondensatoren auch nach dem durchgängigen Festkörperkonzept realisieren.

Zur Abschätzung der erreichbaren volumenspezifischen Kapazität eignet sich die Beziehung

$$c \leq \frac{\pi}{2} \epsilon_r \epsilon_0 \frac{1}{rd}, \quad (7)$$

wobei von der Plattenkondensatorformel ausgegangen wurde. Es bedeuten ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante, d Dicke der Doppelschicht, ϵ_0 Influenzkonstante ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$). Mit r wurde der Radius der als angenommen kugelförmig, in kubisch primitiver Packung vorliegenden Festkörperteilchen bezeichnet (Bild 9b). Mit den Zahlenwerten $\epsilon_r = 40$, $d = 5 \text{ nm}$ und $r = 50 \text{ nm}$ folgt $c \leq 2,2 \text{ Fcm}^{-3}$. (Ein Teil der Kugeloberfläche geht durch den Festkörperkontakt verloren, der für die gut leitende Verbindung und den mechanischen Zusammenhalt der aus den Festkörperteilchen aufgebauten porösen Grundelektrode sorgt. Deshalb der Ansatz mit dem Kleiner-Zeichen.)

Doppelschichtkondensatoren sind polar, d.h. das poröse Festkörpergerüst ist stets die Anode. Die anliegende Spannung beträgt maximal etwa 1,5V. Größere Betriebsspannungen erfordern eine Reihenschaltung.

In Bild 9c ist die mögliche Konstruktion einer praktisch nutzbaren unpolaren 3V-Zelle (gegenpolige Schaltung zweier Grundzellen) schematisch dargestellt. Sie besteht aus zwei Ruß-PreStabletten, zwischen die ein Ionenseparator eingebettet ist, der für die beweglichen Ionen des Elektrolyten durchlässig ist. Zur Kontaktierung der beiden porösen Elektroden dienen Leitgummi-Platten, die in Verbindung mit dem Kunststoffring das Auslaufen des

Flüssigelektrolyten verhindern. Die Anordnung läßt sich bei geeigneter Armierung z. B. in einem hermetisch dichten Metallgehäuse unterbringen. Schaltungen mit kleineren Stützzeiten lassen sich auch mit hochkapazitiven Elektrolytkondensatoren aufbauen. Bild 8t zeigt eine entsprechende, mit diskreten Komponenten realisierte Prinzipschaltung. Bei Ausfall der Eingangsspannung U_E sperrt der Transistor Tr1. Der hochisolierende Kondensator C_R sorgt dagegen für die Durchsteuerung des Transistors Tr 2 (in der anderen Richtung sperrt die Diode D), und die Energie des Pufferkondensators C steht für den Ausgang zur Verfügung. Wie das zugehörige Zeitdiagramm zeigt, sinkt die Ausgangsspannung U_A nach einer Funktion, die durch den Entladestrom über den Isolationswiderstand des Kondensators selbst und die (im allgemeinen hochohmige) Charakteristik des Verbrauchers bestimmt ist. Bei 5V-Standardspannung ist im allgemeinen noch eine untere Betriebsspannung von etwa 3V vertretbar, d. h. es steht ein nutzbarer Spannungsbereich von 2V zur Verfügung. Dieser in Verbindung mit der Entladecharakteristik bestimmt die nutzbare Stützzeitspanne.

3. Technologische Nutzung von Kondensatoren

Die meisten modernen technologischen Spezialausrüstungen enthalten elektrische bzw. elektronische Steuerungen, die sicher auch noch in fernerer Zukunft nicht auf den Kondensator als einem wesentlichen Funktionselement verzichten können. Das ist aber das weite Feld der in Abschnitt 2 diskutierten schaltungstechnischen Verwendung. Anhand der Beispiele in Bild 10 werden dagegen vom Prinzip her völlig andere applikative Aspekte aufgezeigt. Hier greift eine fundamentale Eigenschaft des Kondensators (z. B. **elektrisches Feld** zwischen den Elektroden) unmittelbar in den Bearbeitungsprozeß ein. So läßt sich z. B. ein Strahl geladener Teilchen (Elektronen, Ionen) im Vakuum mit Hilfe der gekreuzten elektrischen Felder zweier Plattenkondensatoren rasterförmig über das Target führen (Bild 10a). Lädt man ursprünglich neutrale Materiepartikel (z. B. Staubteilchen, Lacktröpfchen) beim Durchtritt durch eine durchlässige Elektrode - meist Auf-

ladung mit Elektronen beim Durchtritt durch die siebartig konstruierte Katode - auf, so kann man auch diese zwischen Kondensatorelektroden manipulieren.

Bild 10b veranschaulicht die auf diesem Prinzip beruhende Reinigung eines Gasstromes. (Die geerdete Anode "saugt" die negativ geladenen Staubteilchen aus dem Gasstrom.) Ähnlich der Staubteilchenablagerung auf der Anode funktioniert die in Bild 10c skizzierte Ablagerung der positiven Lacktröpfchen auf dem zu lackierenden Substrat.

4. Nutzung physikalisch-chemischer Eigenschaften von Bauteilen der Kondensatorkonstruktion

In der Meßtechnik hat der Kondensator als integrierter Bestandteil der aktiven Meßschaltung (z. B. als Normalkondensator, als frequenzabhängiger Bezugsblindwiderstand oder als Meßwertaufnehmer) schon immer eine große Rolle gespielt. Dieses Bauelement konnte auch bei der Entwicklung der modernen mikrocomputerkompatiblen Sensortechnik Schritt halten bzw. in verschiedenen Applikationsbereichen dieser Technik sogar den Fortschritt mitbestimmen.

Man kann zeigen, daß der Kondensator - Sensor beispielsweise dem entsprechenden induktiven Bauelement auf manchen Gebieten (z. B. Robotertechnik) aufgrund besserer Integrationsfähigkeit, aber auch aufgrund besserer Selektivität, höherer Empfindlichkeit, niedrigerem Energiebedarf, überlegen ist. Am bemerkenswertesten ist die unmittelbare mikroelektronische Kompatibilität, die z. B. in Form des Schichtkondensators, des Schottky-Kondensators, des pn-Kondensators und vor allem des MIS-Kondensators zum Ausdruck kommt (s. Abschnitt 5).

Nicht zu unterschätzen ist jedoch auch die große Bedeutung des Kondensator-Sensors im Leistungs- und Höchstleistungsbereich. Das Sensorkonzept geht von der Nutzung der Eigenschaftsreaktion beliebiger Bestandteile der Kondensatorkonstruktion auf äußere Einwirkungen aus, die sich letztlich in der Änderung

eines (oder mehrerer) Hauptkennwertes des Kondensators (insbesondere der Kapazität) auswirkt, was elektronisch ausgewertet wird. Die Auswertung erfolgt wahlweise analog oder digital. Für beide Fälle sind in Abschnitt 2 Beispiele zu finden.

Um allen Anforderungen an moderne Sensorbauelemente im Sinne des Primärwandlers gerecht zu werden, ist die Entwicklung optimierter Spezialkonstruktionen unumgänglich. Deshalb erfolgt die Entwicklung und Produktion von kapazitiven Sensoren in der Regel beim Hauptanwender, seltener beim traditionellen Kondensatorhersteller, was umso mehr den Erfahrungsaustausch erfordert.

Die Zweckmäßigkeit dieser Herangehensweise wird besonders dann deutlich, wenn man begreift, daß es heute auf die Bereitstellung kompletter Sensorsysteme ankommt, in denen Primärwandler (z.B. kapazitiver Sensor), Sensorelektronik (analoge bzw. digitale Signalaufbereitung), rechentechnische Datenaufbereitung und -speicherung vereint sind. Darüberhinaus beinhaltet das Sensorsystem die Meßfehleranalyse und Datenkorrektur sowie die Meßinformationsausgabe bis hin zur Kopplung an entsprechende Aktuatoren. Dem Integrationstrend sind heute noch keine Grenzen gesetzt. Eine entsprechende schematische Darstellung zeigt Bild 11. Der Trend geht selbstverständlich in der Mikroelektronik in Richtung auf Einchip-Lösungen, deren gegenwärtig fortgeschrittenste Beispiele den Primärwandler, die Sensorelektronik, den Mikroprozessor und weitere periphere Funktionen bereits enthalten.

In Tabelle 1 sind zur Erläuterung des Begriffes kapazitiver Sensor (im Sinne Primärwandler) einige typische Eigenschaftskorrelationen in Verbindung zum physikalischen Effekt genannt. In der letzten Spalte findet man einige der dazu bekannten Bauelemente-Lösungen aufgeführt. Die folgenden Beispiele dienen der näheren Erläuterung des Prinzips.

Q (E), s. Bild 12:

Das elektrische Feld eines beliebigen felderzeugenden Objektes greift im Rhythmus der horizontalen Pendelbewegung der beweglichen Elektrode in das Luft-Dielektrikum des Plattenkondensators durch und führt zu entsprechend periodischen "Ladungs-

verschiebungen auf den Platten, die man über dem Widerstand R als periodische bzw. Impulsspannung U_A registriert.

E (Q) s. Bild 13:

Bei einem typischen MIS-Kondensator verzichtet man auf die metallische Gateelektrode und ersetzt sie durch einen Elektrolyt (geg. in Verbindung mit einer Hilfselektrode), dessen Ionenkonzentration (z. B. H^+ , positive Metallionen der Salzlösung, positive Fremdionen) interessiert. Nach Abdecken der Leitbahnen sowie der Source- und Drain-Kontakte mit einem Abdeckisolator, der gegen den Elektrolyt resistent sein muß, benetzt der Elektrolyt ein ausgewähltes Gebiet des Gateisolators über dem Kanal in der n-Wanne. Damit erfolgt eine von der Art der Ionen und von deren Adsorptionsgrad auf dem Feldoxid abhängige Steuerung des Source-Drain-Stromes I_{SC} , der zur Auswertung gelangt.

K (E), S. Bild 14:

Zur Messung hoher Gleichspannungen eignet sich der Plattenkondensator mit eingebauter schwenkbarer Platte, die auf gleichem Potential wie die eine der fixierten planparallelen Platten liegt. Die Anziehungskraft der entgegengesetzt geladenen Platten, die z. B. gegen die geeichte Kraft einer Spiralfeder F zur Plattenauslenkung und deren Analoganzeige führt, ist ein Maß der anliegenden Hochspannung.

P (E), s. Bild 31:

Flüssigkristallanzeigen (LCD-liquid crystal display) beruhen auf der Tatsache, daß die Polarisation P der Moleküle im Flüssigkristall von der anliegenden Feldstärke abhängt und einfallendes Licht spezielle Streueffekte (z. B. dynamischer Streueffekt) erfährt. In diesem Sinne ist der Flüssigkristall-Kondensator, mit dem dieses Prinzip technisch umgesetzt wird (vgl. Abschnitt 5), einer der bekannten Typen (s. auch Bilder 20 und 30) von kapazitiven Strahlungssensoren.

C (A/d), s. Bild 15:

Bei Bildplatten nutzt man kapazitive Wirkprinzipien zur Informationsabtastung. Eine Variante der VHD-CED (VHD - video high density, CED - capacitance electronic disc) zeigt Bild 15 a. Die Videosignale sind spurförmig als Vertiefungen codiert in einer leitfähigen PVC-Platte "eingeschrieben", die als eine Kondensatorelektrode dient. Die Spur wird mit Hilfe der flächig metallisierten (2. Elektrode) Diamant-Abnehmernadel abgetastet, indem die Videoplatte rotiert.

Man nutzt die impulsartigen Kapazitätssprünge, die durch die Geometrieänderungen der Bildplattenelektrode (äquivalent der Änderung des Verhältnisses von Kondensatorfläche A zu Dielektrikumdicke d beim Plattenkondensator) in der Spur hervorgerufen werden, wobei sich Lochtiefe, Fläche bzw. Abstand der Vertiefungen zur Codierung eignen. In einer anderen Ausführungsvariante (Bild 15b) nutzt man den variablen Böschungswinkel einer Rille (Spur der Bildplatte), in der die beidseitig metallisierte Abnehmernadel gleitet, zur Codierung bzw. zum Einschreiben und Auslesen.

C (d):

Metallisiert und kontaktiert man in geeigneter Weise eine elastische dielektrische Folie (z. B. Gummi; s. Bild 16) beidseitig, so steht ein sehr einfacher kapazitiver Druckmesser zur Verfügung. Die Kapazität als Maß für den Druck ist von der Dicke d des elastisch deformierten Dielektrikums abhängig.

Die Abhängigkeit der Kapazität vom Elektrodenabstand verwendet man zur Messung hoher Gleichspannungen, indem man diese in eine leichter verarbeitbare Kleinsignal-Wechselspannung wandelt.

Ein entsprechendes Prinzip zeigt Bild 17. C_{var} ist ein Schwingkondensator, dessen eine bewegliche Elektrode in periodische Schwingungen versetzt wird (Frequenz der Ausgangswechselspannung). R_1 bestimmt die Ladezeitkonstante mit. C filtert Gleichspannungsanteile im Sekundärkreis aus. Die über R_2 abfallende Wechselspannung wird über den Operationsverstärker OV zum Ausgang geführt.

C (φ_{rel}):

Zum Feuchtenachweis über die Feuchteabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante muß das Dielektrikum des kapazitiven Feuchte-sensors für den Wasserdampf leicht zugänglich sein. Dafür sind planare Kammkondensatoren (Bild 18) besonders gut geeignet. Als Dielektrikum wirkt hauptsächlich der dielektrische Schichtstreifen zwischen streifenartigen Elektroden, der der Luftfeuchtigkeit frei zugänglich ist. Bei Al_2O_3 als Sensor-Dielektrikum hat man allerdings die notwendige hohe Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit sowie die gewünschte Kennlinienlinearisierung des Zusammenhanges zwischen Kapazität und relativer Luftfeuchtigkeit φ_{rel} nur durch Ionenbeschuß nach der Schichtabscheidung erreicht, wie das Diagramm in Bild 18 schematisch zeigt. Um Alterungsprozessen, z. B. durch Ionendiffusion aus dem Substrat, entgegenzuwirken, wird dieses mit einer als Diffusionsbarriere wirkenden Passivierungsschicht bedeckt.

Piezoelektrizität (elektro-akustische Kopplung):

Der Streifenkondensator hat als sogenanntes Interdigital-Bau-element in der akusto-elektronischen Oberflächenwellen-Technik (AOW) große Bedeutung erlangt. Genutzt wird dabei die elektro-akustische Kopplung zwischen dem Schichtdielektrikum, das im elektrischen Wechselfeld zwischen den Streifenelektroden polarisiert wird, und dem piezoelektrischen Substrat (z. B. einkristallines $LiNbO_3$ mit speziell gewählter Orientierung). Degenerierten akustischen Wellen breiten sich vorzugsweise auf der Substratoberfläche aus und stehen damit der Weiterverarbeitung zur Verfügung. Umgekehrt ist die Wandlung der akustischen Oberflächenschwingungen in elektrische Wechselspannungssignale möglich, wenn sie in den Kammkondensator einlaufen. Daher lassen sich mit ihm als Sender bzw. Empfänger ganze Ak-tor-Sensor-Systeme auf einem Substrat realisieren. Im einfachsten Fall hat man eine Verzögerungsleitung.

Bild 19 zeigt die Möglichkeit einer Weiterentwicklung, indem das verzögerte Signal zusätzlich amplitudenmoduliert wird. Die AOW-Technik steht erst am Anfang. Durch geeignete Struk-

turierung, Materialauswahl und auf dem Substrat integrierte periphere Elektronik stehen viele Entwicklungswege offen, die auch in Richtung der integrierten Funktionalelektronik führen.

Ladungsgeneration:

Auch die MIS-Kondensatoren sind als Sensorbauelemente von großer prinzipieller Bedeutung. Genutzt werden beispielsweise die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Bauelementeparameter (z. B. Temperaturkompensation, Drucknachweis). Eine perspektivisch interessante Nutzung zum Strahlennachweis bzw. sogar zur Realisierung hochintegrierter Speicherstrukturen wird in Bild 20 schematisch aufgezeigt. Ein fein fokussierter Elektronenstrahl durchdringt zerstörungsfrei die dünne Deckelektrode (Al) und generiert im Schichtdielektrikum (SiO_2) feste Oxidladungen, die den Source-Drain-Strom im n-Kanal (Si-Epitaxieschicht auf p-Si) steuert. Zur Realisierung eines Elektronenstrahlspeichers hoher Bitkapazität ist auf dem Substrat eine MIS-Kondensator-Matrix mit einem entsprechenden Netz von Wort- und Bitleitungen sowie ggf. weiteren Steuerleitungen aufzubauen. Die Gateelektroden-Abmessungen werden durch den Querschnitt des Elektronenstrahls (Durchmesser z. B. 20 nm) bestimmt, der nach dem Prinzip des Vektorscan die Matrix abrastert und dabei Ladungen erzeugt (Einschreiben) bzw. beseitigt (Löschen). Das Lesen des Speichers erfordert eine zusätzliche Ansteuer- und Auswerteschaltung. Ladungsgekoppelte Bauelemente (s. Abschnitt 5) enthalten bei ihrer Verwendung als Strahlungssensoren "Fenster" mit der gewünschten spektralen Empfindlichkeit, durch die die Strahlung eindringt und in der Halbleiterelektrode Ladungsträger generiert.

5. Funktionelle Verkopplung technologisch integrierter Kondensatoren

Die technologischen Möglichkeiten der Halbleiter- und Schichttechnologien sind auch für den Kondensator die Voraussetzung für zwingende Fortschritte in Richtung Miniaturisierung. Dies trifft auch für jeden diskreten Kondensator in der Peripherie der Mikroelektronik zu. In diesem Abschnitt sollen aber vorzugsweise technologisch direkt integrierte Lösungen diskutiert werden, die die funktionellen Anforderungen der Mikroelektronik selbst hervorgebracht haben.

Der Hybridschaltkreis (Bild' 21) ist in diesem Sinne als die Übergangslösung aufzufassen, indem die Chipkondensatoren zwar noch als diskretes Bauelement hergestellt werden, jedoch bei der Bestückung in die Schichtschaltung bereits typische Elemente der Schichttechnik (Oberflächenmontage, lötfähige Kontaktschichtsysteme, Schichtleitbahnen) eingehen. Eine entsprechend angepasste Lösung gibt es auch für die Leiterplatte als Verdrahtungsträger. Im Ergebnis der bisherigen Entwicklung und Optimierung von Dünnschicht-Kondensatoren ist die integrierte Tantaltechnik außerordentlich weit fortgeschritten. Der stärkste Innovationsdruck resultierte dabei aus den steigenden Anforderungen an integrierte aktive RC-Filter. Im Zuge der Optimierung werden großtechnisch werkstofflich äußerst komplexe Schichtsysteme beherrscht, wie das Beispiel in Bild 22 zeigt. Durch die Verwendung von TaAl-Legierungen spart man lithografische Schritte, was eine erstrangige ökonomische Anforderung an die Fertigung von Dünnschichtschaltkreisen ist. Gestapelte, mit unterschiedlichen Verfahren (sputtern, anodisch oxydieren) hergestellte Dielektrikumsschichten erhöhen die Isolationsfestigkeit der Kondensatoren und damit die Schaltkreisausbeute. Einen Kompromiß hinsichtlich Eignung als Kondensator-Deckelektrode und Leitbahn sowie für die Löt- bzw. Bondbarkeit stellt das ternäre Metallisierungssystem dar. (Der Abgleich der Widerstände, z. B. mit Laserstrahl, s. Pfeil in den Schichtschaltungen in Bild 21 und 22, ist Stand der Technik.)

Zukünftig wird man sich mit den gleichen technischen Mitteln verstärkt auch dem Kapazitätsabgleich, insbesondere im Sinne des Funktionsabgleichs, in Dünnschichtschaltungen zuwenden.) Mit der Integration des Kondensators ist stets ein Beitrag zur Minimierung parasitärer resistiver, kapazitiver und induktiver Komponenten geleistet worden, was dem technischen Entwicklungstrend (höhere Frequenzen, Impulsbetrieb, geringere Energieverluste, kürzere Signalverarbeitungszeiten) entgegenkommt. Es sind gerade diese Überlegungen, die z. B. die direkte Integration von Abblockkondensatoren im keramischen Trägergehäuse (Chipcarrier) von integrierten Halbleiterschaltkreisen herausgefordert haben. Die bereits früher vollzogene Zusammenführung von Dickschicht- und Keramiktechnologie wurde dahingehend weiterentwickelt, daß die Dickschichtpaste auf die Grünkeramik strukturiert aufgedruckt wird (erforderlichenfalls in Verbindung mit Durchkontaktierungen) und im nachfolgenden gemeinsamen Sinterprozeß alle wesentlichen Eigenschaften fixiert werden. Damit ist der Weg frei für die keramischen Mehrlagenverdrahtungsträger, zu denen auch die keramischen Chipcarrier gehören. Unter Verwendung z. B. des Werkstoffsystems Al_2O_3 (Keramik) / Mo bzw. BaZrO_3 (Pasten) werden Chipcarrier unterschiedlicher Bauform (Bild 23) mit gehäuseintegrierten Mehrlagenkondensatoren in den Boden- bzw. Deckelplatten, im Rahmen oder unter dem Chip auf der Boderplatte hergestellt. Perspektivisch ist dies auch ein Einsatzgebiet für gehäuseintegrierte Dünnschichtkondensatoren, wenn auch vorerst Abstriche in der erzielbaren maximalen Flächenkapazität notwendig sind. Es gab in der Folge der erfolgreichen Substitution von z. B. Koppel- (C_K) und Überbrückungskondensatoren (C_U), s. Bild 24, in Verstärkerschaltungen zu Beginn der Entwicklung von integrierten Halbleiterschaltungen, als diese die diskreten Schaltungsvorgänger zu ersetzen begannen, eine Euphorie, wonach man sogar die generelle Substitution von Kondensatorbauelementen für möglich hielt. Dies hat sich als Fehlschluß erwiesen. Man muß auch heute noch solchen Auffassungen entgegenwirken, um z. B. volkswirtschaftliche Strukturen in den richtigen Proportionen entwickeln zu können.

Sieht man einmal davon ab, daß z. B. die Nutzung von p-n-, MIS- und Schottky-Kondensatoren in integrierten Schaltungen ein Selbstverständnis der modernen Halbleitertechnologie ist, so ist gerade durch die Zusammenführung von monolithischen Schaltkreisen (z. B. Operationsverstärker) mit integrierten RC-Schaltungen auf einem Si-Chip, wie sie beispielsweise aktive Filter in Silizium-Tantal-Technik (STIC) repräsentieren, ein neuer zukunftssträchtiger Entwicklungsweg der Planartechnologie gefunden worden. In Bild 25 findet sich ein Realisierungsbeispiel. Die Parameter der Dünnschichtbauelemente haben folgende Bedeutung:

C Kapazität, $\Delta C/C$ Kapazitätstoleranz, $\tan \delta$ Verlustfaktor, J_R Reststromdichte, R Widerstand, $\Delta R/R$ Widerstandstoleranz, j maximal zulässige Stromdichte der Widerstandsbahnen. Aus dem Bild gehen auch die relativen und absoluten (s. Maßstab) Flächenanteile hervor, die auf dem Chip für den Halbleiterschaltkreis sowie für die R- und C- Netzwerke entsprechend dem Layout des aktiven Filters benötigt werden.

Bild 26 zeigt schematisch die Herstellungsschritte einer RC-Schaltung auf GaAs. Die Struktur enthält Kapazitäten zur Impedanzanpassung von und zur Filterung (in Verbindung mit dem Widerstand) zwischen aktiven Komponenten, die zusammen eine mittelintegrierte HF-Schaltung aufbauen. Die Schichten werden durch (teilweise reaktives) Sputtern, d. i. AuGe/Ni , Si_3N_4 , Ta_xN_x , NiCr/Au , bzw. anodische Oxydation (Ta_2O_5) aufgebracht und sind zugleich konstruktive Bestandteile der Feldeffekt-Transistoren (AuGe/Ni zur Source- und Drain-Kontaktierung, Si_3N_4 als Feldisolator, NiCr/Au als Gate).

Sehr anschaulich wird die gestiegene Bedeutung des Kondensators in Halbleiterschaltungen durch die Anforderungscharakteristik des höchstintegrierten dynamischen Einchip-Halbleiterspeichers. International vollzieht sich gegenwärtig die großtechnische Realisierung des 1 Chip-Megabit-Speichers (dRAM). Es ist klar, daß mit der 1 Transistor-Zelle die höchste Integrationsdichte erreicht wird. Sie ist daher gegenüber Mehrtransistor-Zellen favorisiert. Aufgrund der geringen Kapazitätsdichte von Sperr-

schichten ist man bestrebt, hochkapazitive Dünnschichtkondensatoren als Informationsspeicher in der Schaltung zu verwenden. Mit der größeren Kapazität ist der Datenerhalt bei Störungen (z. B. bei Einfall von α -Teilchen) besser zu gewährleisten. Die Ausführung der Zelle (Schaltung s. Bild 27 a) mit einem planaren Nebeneinander von Transistor, Kondensator und Zuleitungsmatrix würde jedoch zuviel Halbleiterfläche für die passiven Komponenten verbrauchen, was der Erhöhung der Integrationsdichte zuwiderläuft. Man muß dabei beachten, daß der Übergang zur Mbit-Technologie (1 M, 4 M, 16 M u.s.w.) beim gegenwärtigen Strukturierniveau der VLSI ohnehin die Einführung lateraler Strukturabmaße (z. B. Kanallänge, Leitbahnbreite) im Submikrobereich erfordert. Als Ausweg bietet sich das Erschließen der 2. Bauelementebene an, indem man z. B. den Kondensator gemäß dem Ausführungsbeispiel in Bild 27 b über dem Transistor anordnet. Die Trench-Zelle, die für den 256 kbit-DRAM-Speicher bereits praktische Bedeutung erlangt hat, nutzt im Grunde genommen das gleiche Prinzip, nur weicht man in diesem Fall nach unten aus, indem die Oberfläche einer in die Tiefe des Halbleitersubstrates reichenden Ätzgrube zum Aufbau einer MIS-Kapazität genutzt wird (Bild 27c).

Der Trend nach höheren Betriebsfrequenzen bzw. zum Impulsbetrieb erfordert ein Umdenken bei der Modellierung der Bauelementefunktion auch bei Kondensatoren. Das Modell der lokalisierten Parameter hat in diesem Betriebsbereich nur bedingt Gültigkeit bzw. führt sogar zu falschen Ergebnissen. Bei Behandlung mit verteilten Parametern kommt man den realen Verhältnissen bedeutend näher. Dies hatte technologische Konsequenzen. In der Dünnschichttechnik erlangten Bauelemente mit sogenannter verteilter RC-Struktur (RC-Elemente, Schaltbild s. Bild 28) Bedeutung. Das Strukturbeispiel in Bild 28 zeigt einen Widerstandsmäander zwischen den Anschlüssen 2 und 4, der zumindest unter dem leitenden Belag (z. B. Al) mit den Anschlüssen 1 und 3 mit einer Dielektrikumsschicht (z. B. Ta/ Ta_2O_5) versehen worden ist. Damit bilden ein Widerstand und eine Kapazität nicht nur eine räumlich untrenn-

bare Einheit, mit der eine nahezu vollständige Temperaturkompensation möglich ist ($\text{TKR} > 0$, $\text{TKC} < 0$), sondern man wird dem Konzept der verteilten Parameter viel besser allein durch die Konstruktion gerecht. Mit RC-Elementen in aktiven Filtern (s. Bild 29b) lassen sich - wie in Bild 29c gemäß Literaturangaben veranschaulicht - im Vergleich zu Schaltungen mit diskreten Komponenten (Bild 29a) wesentlich empfindlichere Dämpfungskennlinien realisieren.

MIS-Kondensatoren haben in integrierten Ladungstransferschaltungen in den letzten Jahren eine große Bedeutung erlangt. Wie Bild 30 in mehreren Varianten zeigt, bestehen solche Strukturen aus Kondensator-Arrays, die über die gemeinsame Halbleiterelektrode miteinander gekoppelt und taktgesteuert sind. Die Ladung dient als Informationsträger. Sie wird mit Hilfe der äußeren Taktsteuerung über Bahngebiete im Halbleiter von einem der eng benachbarten Kondensatoren (lateraler Elektrodenabstand ca. $1 \mu\text{m}$) zum anderen transportiert bis die Auslesung erfolgt. Entscheidend für den Transportmechanismus ist eine technologisch durch Dotieren eingeprägte und durch die äußere Spannung getaktet modulierte Potentialstruktur in der Halbleiterelektrode. In Bild 30c ist sie schematisch mit richtiger Zuordnung zu den 2phasig geschalteten Elektroden einer oberflächenladungsgekoppelten Struktur angedeutet. Das nach rechts zu transportierende Ladungspaket bilden Minoritätsträger (Elektronen im p-Material). Die Attraktivität der CCD-Bauelemente nimmt entscheidend zu, wenn man bedenkt, daß man die Ladungsträgerkonzentration in der Halbleiterelektrode nicht nur durch Dotierung bzw. äußere Spannungen, sondern auch durch Strahlung, Druck, Temperatur u.s.w. beeinflussen kann und damit typische integrierte Sensorfunktionen zur Verfügung hat. Die technische Nutzung lichtempfindlicher flächenhafter CCD-Matrizen gipfelt gegenwärtig in einem neuartigen Kameraprinzip, das den konventionellen Fotofilm zu substituieren beginnt. Optische Display-Strukturen (s. Abschnitt 4) sind ein weiteres hochaktuelles Anwendungsgebiet technologisch integrierter Schichtkondensatoren. Sie entwickeln sich unaufhaltsam in Konkurrenz mit den konventionellen Bildwiedergaberöhren. Schon länger ge-

nutzt werden Flüssigkristall-Displays (LCD). Ein Ausführungsbeispiel mit Schwarz-Weiß-Kontrast zeigt Bild 31. Die optisch aktive Komponente ist der Flüssigkristall-Kondensator C_{FK} . Wird er über den Transistor Tr angesteuert, so erfolgt eine Polarisierung der Moleküle im Flüssigkristall-Dielektrikum. Der dynamische Streueffekt sorgt für die Kontrastbildung, wobei das Licht gemäß Bild 31a durch den Frontpolarisator ein- und austritt. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit dienen die Polarisatoren und der diffuse Rückseitenreflektor. Die schichtförmigen Elektroden des FK-Kondensators müssen lichtdurchlässig sein, wofür sich In-Sn-Oxid (ITO) eignet, und werden auf durchsichtigem Planarsubstrat (Glas) strukturiert aufgebracht.

Die FK-Display-Technik entwickelt sich sowohl in Richtung immer großflächigerer alphanumerischer Anzeigen als auch immer höher integrierter und damit feiner strukturierter Bildpunktmatrizen, was letztlich auf den großflächigen Farbbilddisplay hinausführt. Bild 31 zeigt Konstruktions- und Layoutdetails eines Bildpunktes in einer Schwarz-Weiß-Matrix. (Ein Farbbildpunkt bestünde sinngemäß aus der Kombination dreier Zellen mit jeweils rot-, blau- bzw. grünempfindlichem Bildpunkt-Kondensator.) In der Zelle sind neben dem FK-Kondensator der Feldeffekt-Ansteuertransistor und ein Speicherkondensator C_S - beide in Dünnschichtbauform ausgeführt - integriert. Dazu gehört noch ein strukturiertes Leitbahn-Dünnschichtnetzwerk mit Kreuzungsisolatoren. Beim Vergleich von Bild 31a mit den Bildern 31b und c ist zu beachten, daß die großflächige Rückseitenelektrode elektrisch leitend mit dem Grundelektroden- (Speicherkondensator) und Drain-Leitbahn-Netzwerk verbunden ist.

Die werkstoffliche Ausführung gemäß Bild 31a entspricht Literaturangaben. Sie ist im konkreten Fall sorgfältig aufeinander abzustimmen, denn die Serienfertigung ist umso wirtschaftlicher, je weniger Werkstoffarten und Lithografieschritte notwendig sind. Am kritischsten ist der aktive Halbleiter im Feldeffekttransistor. Neben poly-CdSe haben amorphes, polykristallines und einkristallines Silizium (SOI-Technologie!) an Bedeutung erlangt. Zur Sicherung der Ausbeute bei wachsenden Display-Abmessungen bedarf es höchster Reinraumanforderungen.

Setzt man anstelle des FK-Kondensators ein lichtemittierendes Bildpunkt-Bauelement, so läßt sich damit ein Display, z. B. Elektrolumineszenz-Display, realisieren, daß vollständig auf dem Festkörperkonzept beruht. Durchgesetzt haben sich bereits Displays mit einer speziellen Kondensatorstruktur, die im Dielektrikum "schwimmend" eine lichtaktive Halbleiterschicht enthält. Ein Beispiel zeigt Bild 32. Durch Anlegen einer Wechselspannung (AC) an die Elektroden - substratseitig durchsichtig - wird im Lichtemitter die Lumineszenz angeregt. Mn-dotiertes ZnS luminesziert im gelben Spektralbereich. Andere Farben sind mit anderen Materialien zu realisieren. Im Unterschied zu LCD_S, die bei Gleichspannungen < 20 V betrieben werden, benötigt man für Elektrolumineszenz-Displays Wechselspannungen von 120 bis 300 V.

Tabelle 1: Beispiele der Nutzung physikalisch-chemischer Eigenschaften von Bestandteilen der Kondensator-konstruktion

Eigenschaft	Effekt	Bauelement
Q (E)	E-Messung	Luftkondensator
E (Q)	Ionennachweis	MIE-Kondensator
K (E)	Plattenanziehung	Hochspannungsmessung
P (E)	Molekulpolarisation (dyn. Streueffekt)	LCD
$C \left(\frac{A}{d} \right)$	kapazitive Informations- abtastung	VHD - Bildplatte

Eigenschaft	Effekt	Bauelement
C (d)	Drucknachweis	"Kapton"-Kondensator
	Wandlung Gleich- Wechselspannung	Schwingkondensator
C (rel)	Feuchtenachweis	Streifenkondensator (ionenimplantiert)
elektroakust. Kopplung	AOW-Generierung	Interdigitalkonden- sator
Ladungs- generation	Strahlennachweis	MIS-Kondensator

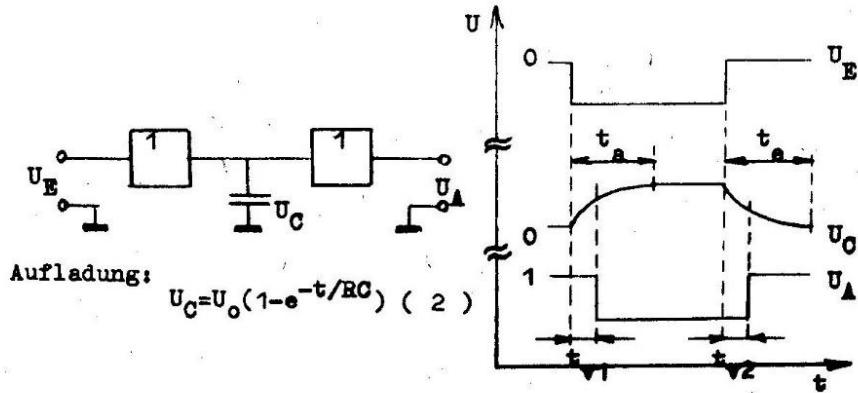


Bild 1 : Impulsverkürzung mit Kondensator-Logik

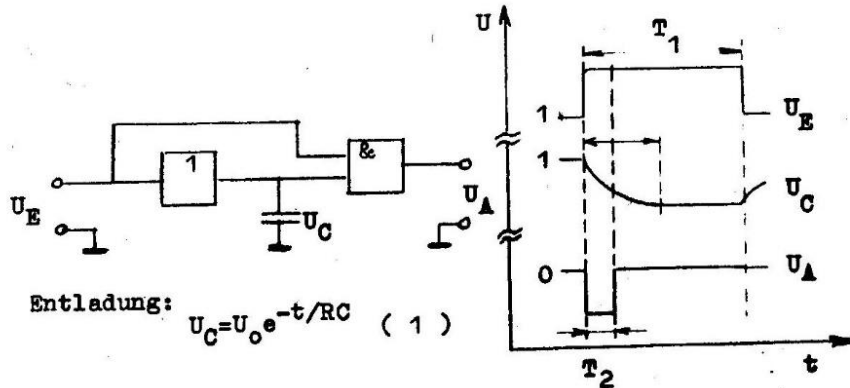


Bild 2 : Impulsverzögerung mit Kondensator-Logik

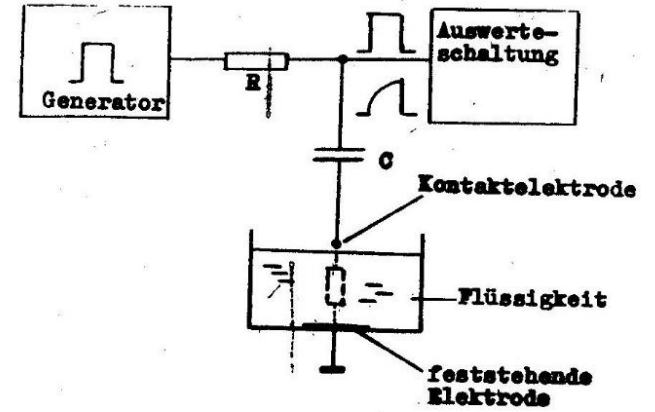
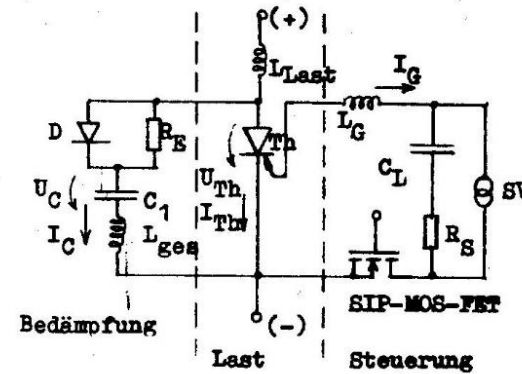
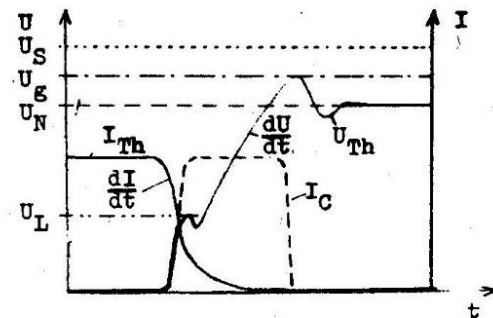


Bild 3 : Kapazitives Füllstands-Sensorsystem



a) Beschaltung eines GTO-Thyristors



b) Hauptkennwerte der Bedämpfungsschaltung

Bild 4 : Leistungskondensatoren für Thyristosteuerungen

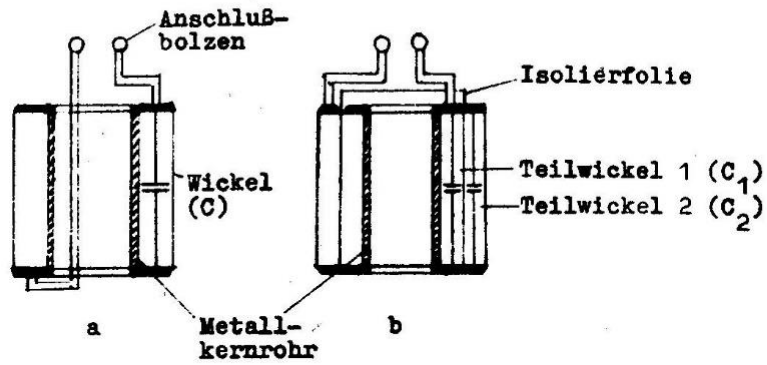


Bild 5 : Konstruktion von Leistungskondensatoren mit kleiner parasitärer Induktivität

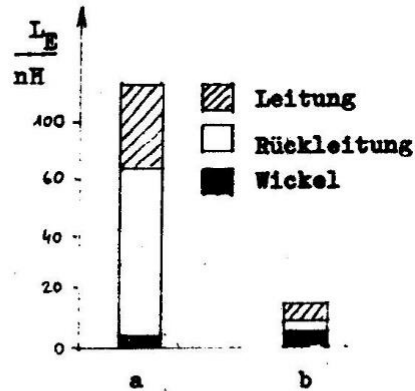
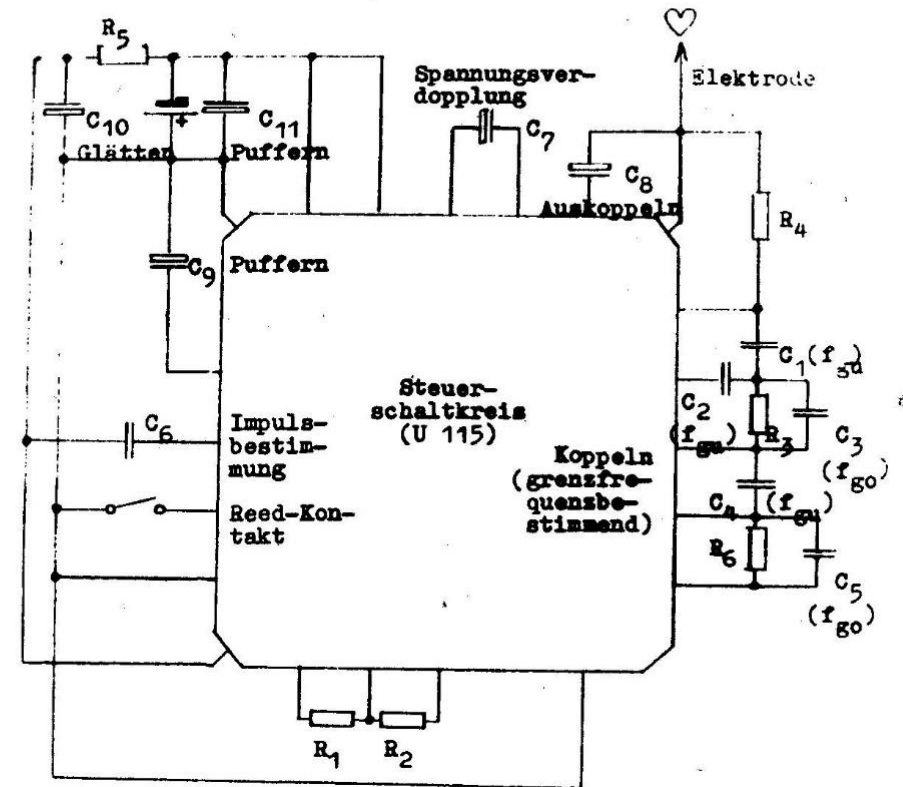
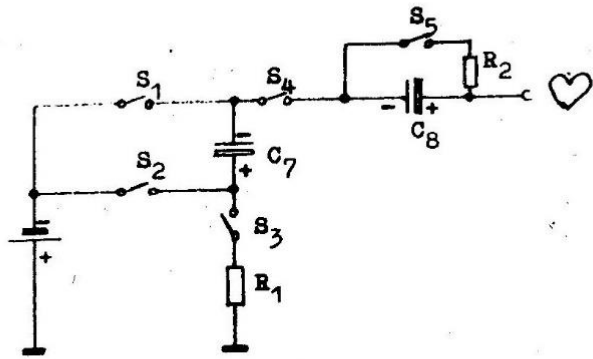


Bild 6 : Vergleich der Induktivitätsbeiträge von Konstruktionselementen der Leistungskondensatoren gemäß Bild 5

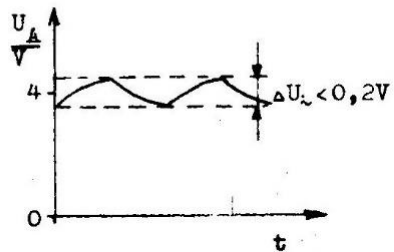
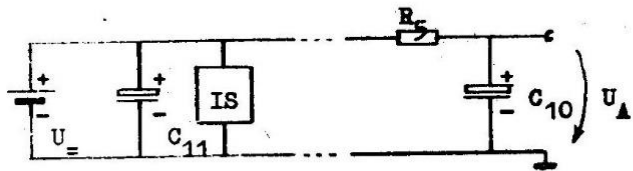


	Keramik	Tantal
C ₁	100nF ± 10%	C ₇ 10 µF ± 20% / 4V
C ₂	100nF ± 20%	C ₈ 10 µF ± 20% / 15V
C ₃	150nF ± 20%	C ₉ 10 µF ± 20% / 4V
C ₄	100nF ± 20%	C ₁₀ 10 µF ± 20% / 4V
C ₅	150nF ± 20%	C ₁₁ 33 µF ± 20% / 4V
C ₆	1,5nF ± 10%	

Bild 7 : P-Wellen-inhibierter Herzschrittmarker ($f_B=75\text{min}^{-1}$)
 a) Schaltung des Hybridschaltkreises mit den passiven Komponenten (Dickschicht-Widerstände, Chipkondensatoren, Reed-Kontakt, Batterie)

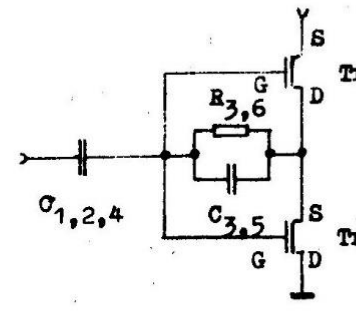


b) Spannungsverdopplerschaltung für Stimulationsimpuls



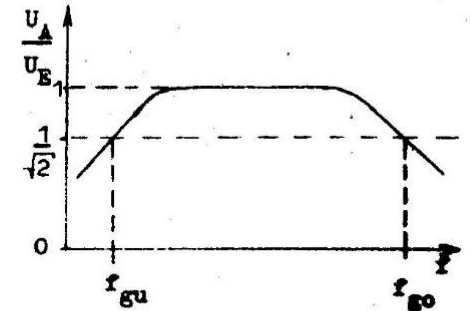
$$\Delta U \approx \frac{U}{4\sqrt{2} f R_5 C_{10}} \quad (3)$$

c) Puffern und glätten der Quellenspannung

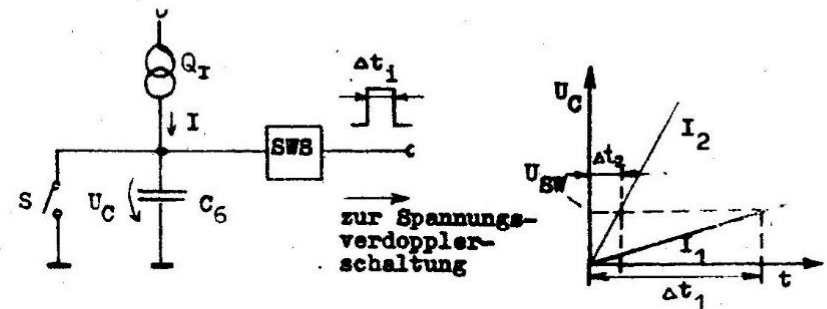


$$f_{Gu} = \frac{1}{2\pi C_K R_E} \quad (4)$$

K = 1, 2, 3

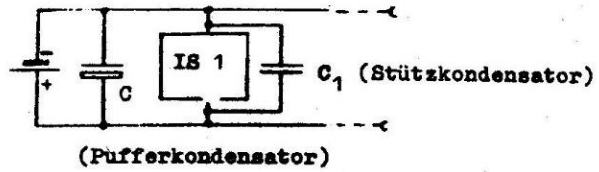


d) Verstärkerstufen

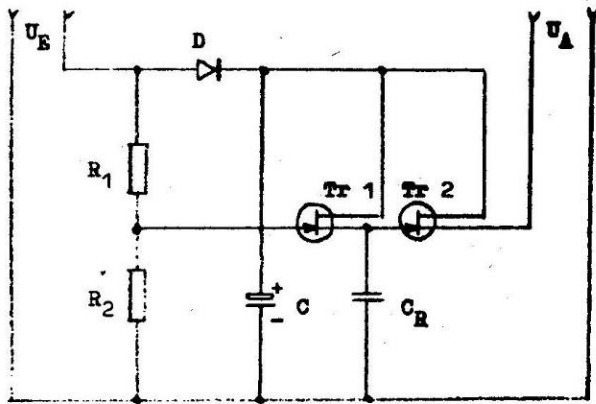


$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (5) \quad \Delta t_1 = \frac{C_6 U_{SW}}{I_1} \quad (6)$$

e) Impulsbreiteneinstellung (für Stimulationsimpuls ca. 0,5 ms)



a) Puffer- und Stützkondensatoren für integrierte Schaltkreise



b) Pufferschaltung mit diskreten Bauelementen

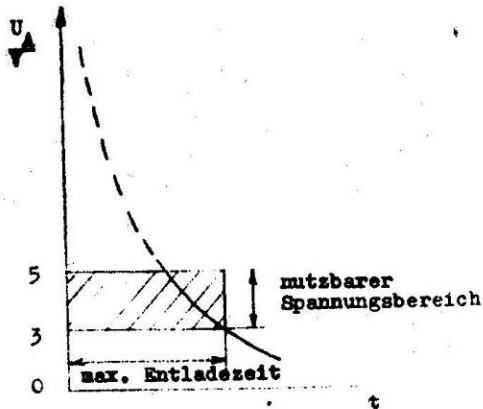
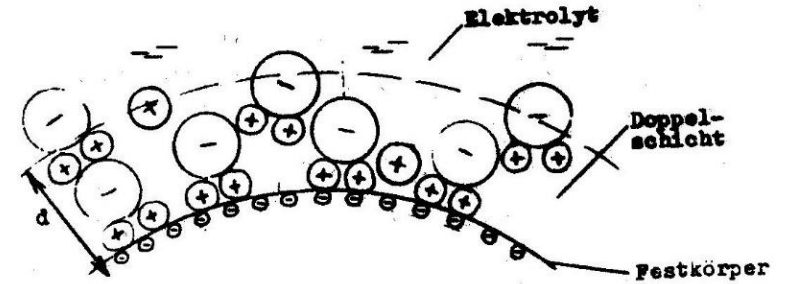
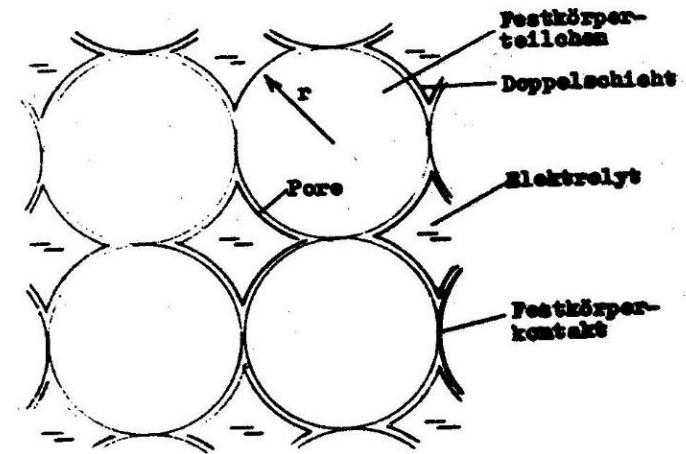


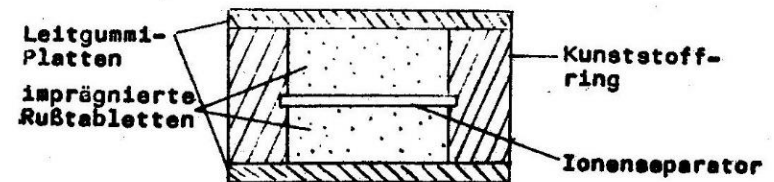
Bild 8 : Prinzipschaltungen für Spannungspufferung



a) Aufbau einer Doppelschicht

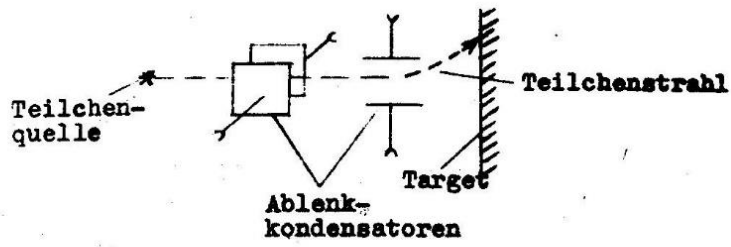


b) Aufbau der Elementarzelle

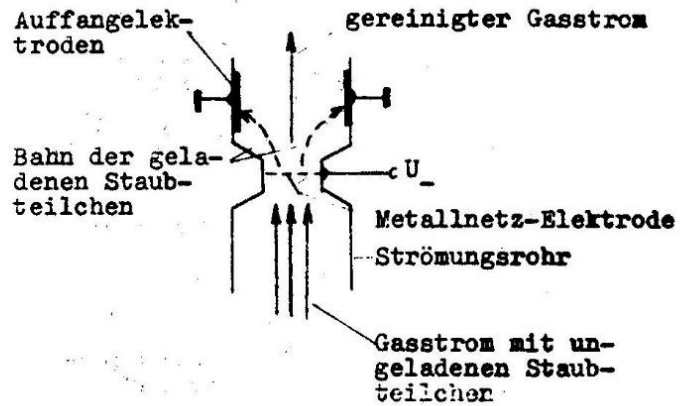


c) Konstruktive Ausführungsform einer ungepolten Grundzelle

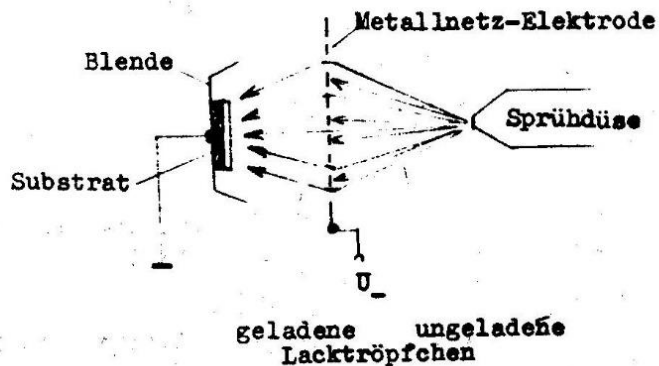
Bild 9 : Prinzipaufbau von Doppelschichtkondensatoren



a) Elektrostatische Strahlablenkung



b) Gasstrom-Reinigung (Partikelbeseitigung)



c) Kapazitive Lackbeschichtung

Bild 10 : Beispiele der Nutzung von Kondensatoren in der Technologie

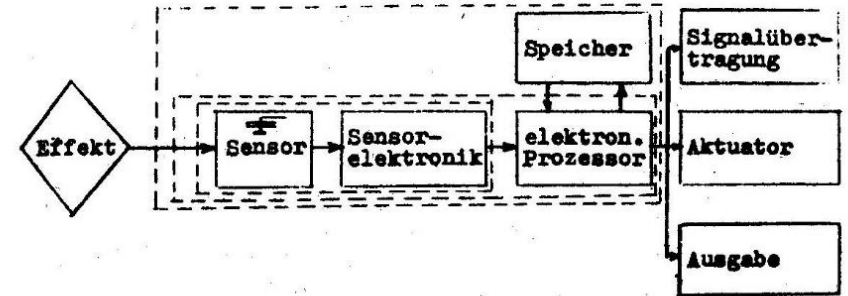


Bild 11 : Struktur eines (kapazitiven) Sensorsystems (Die gestrichelten Einrahmungen kennzeichnen von innen nach außen den Einchip-Integrationstrend.)

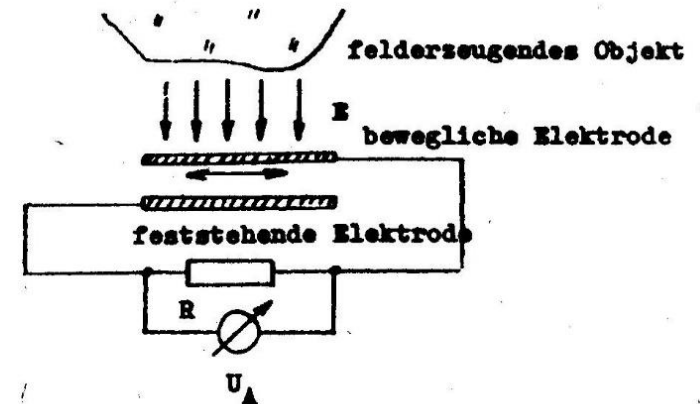


Bild 12 : Kapazitiver Feldstärke-sensor

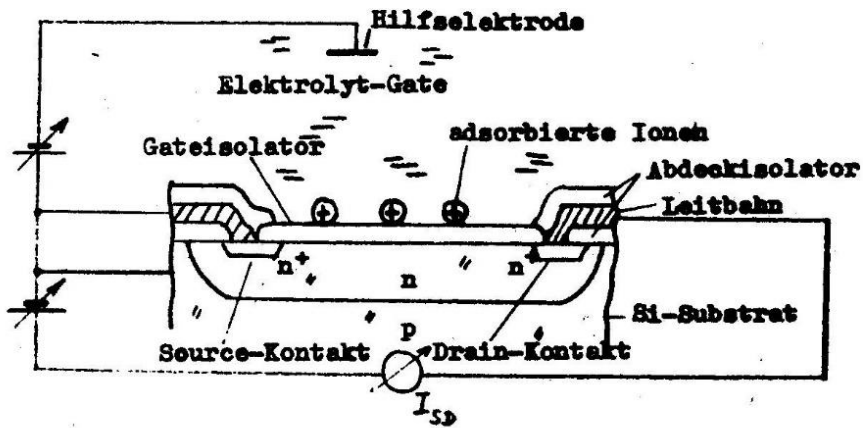


Bild 13 : Ionensensor auf Basis eines Feldeffekt-Transistors mit Flüssigelektrolyt-Gate

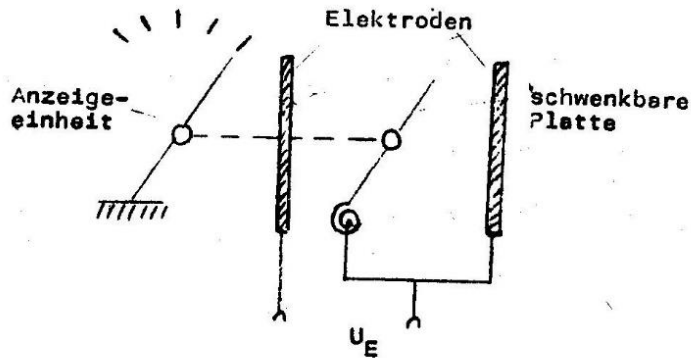
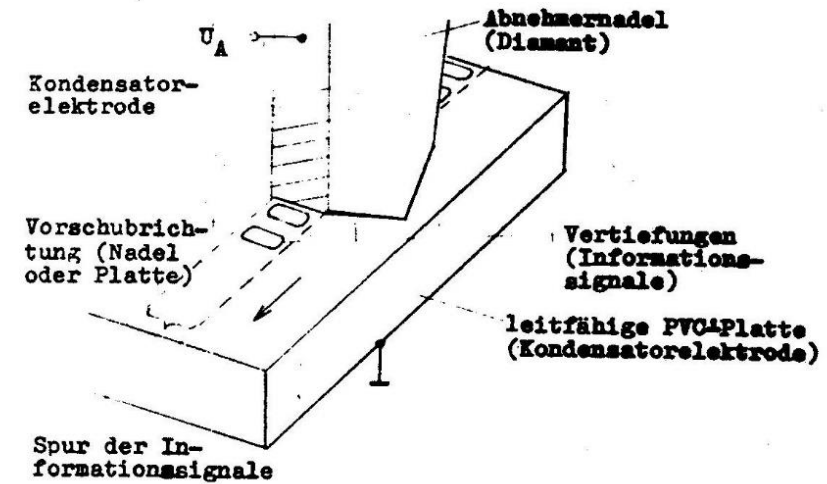
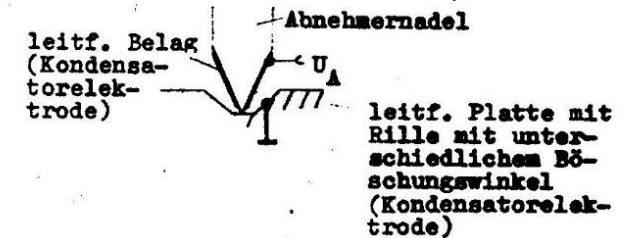


Bild 14 : Hochspannungssensor



a) Bildspeicherung in Form von Vertiefungen in einer leitenden Platte



b) Bildspeicherung in Form variabler Böschungswinkel in einer Rille der leitenden Platte

Bild 15 : Wirkprinzipien der kapazitiven Abtastung von Bildspeicherplatten

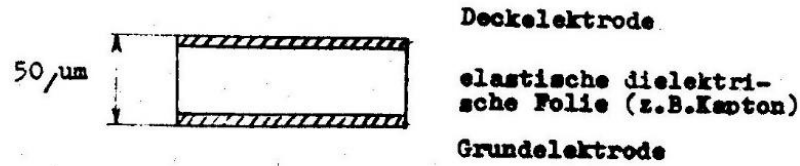


Bild 16 : Kapazitiver Drucksensor

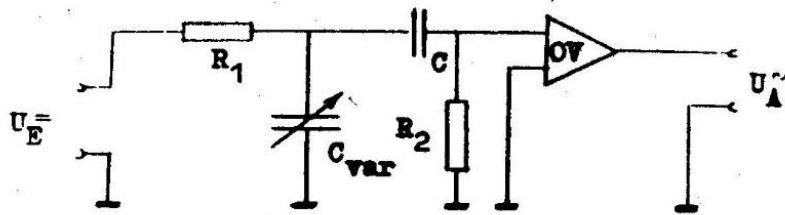


Bild 17 : Schwingkondensatorschaltung zur Wandlung von Gleichspannung in Wechselspannung

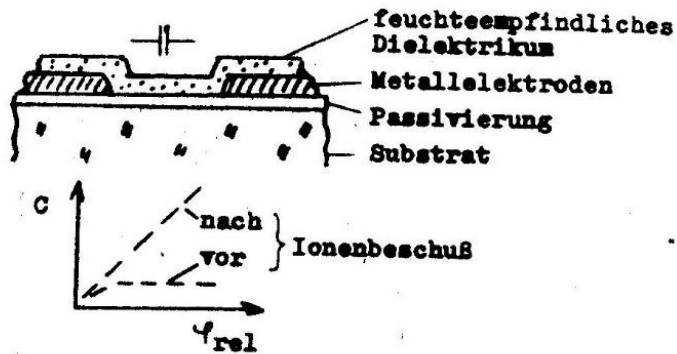


Bild 18 : Kammkondensator als Feuchtesensor

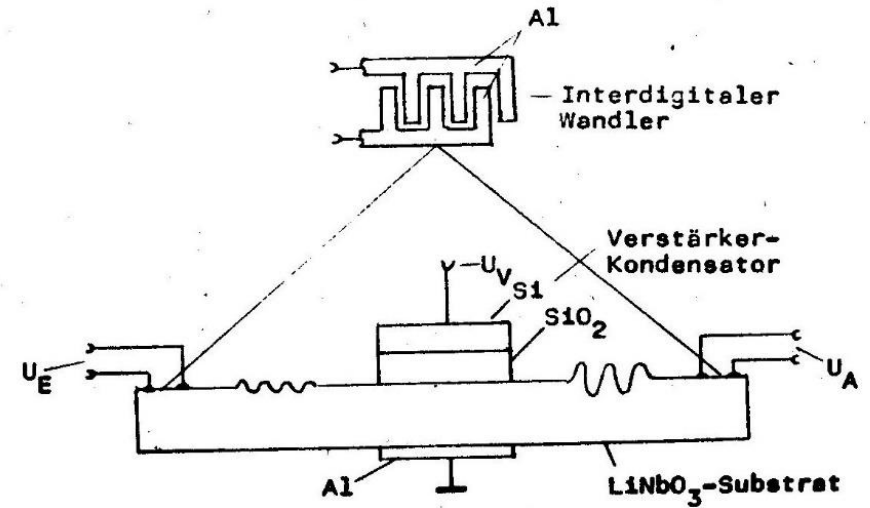


Bild 19 : Akustoelektrischer kapazitiver Oberflächenwellen-Verstärker

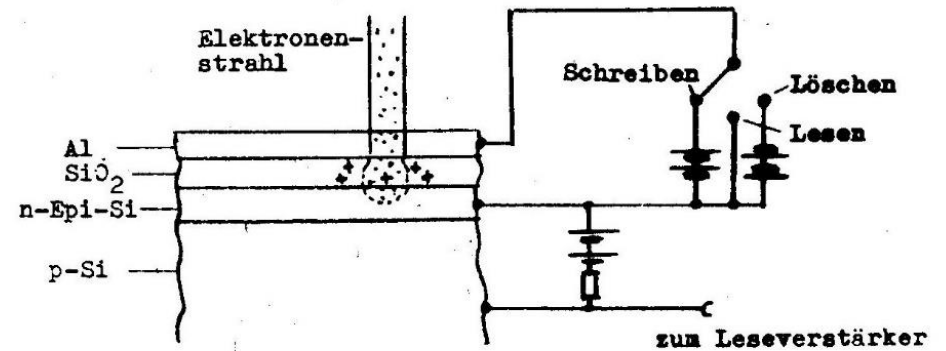
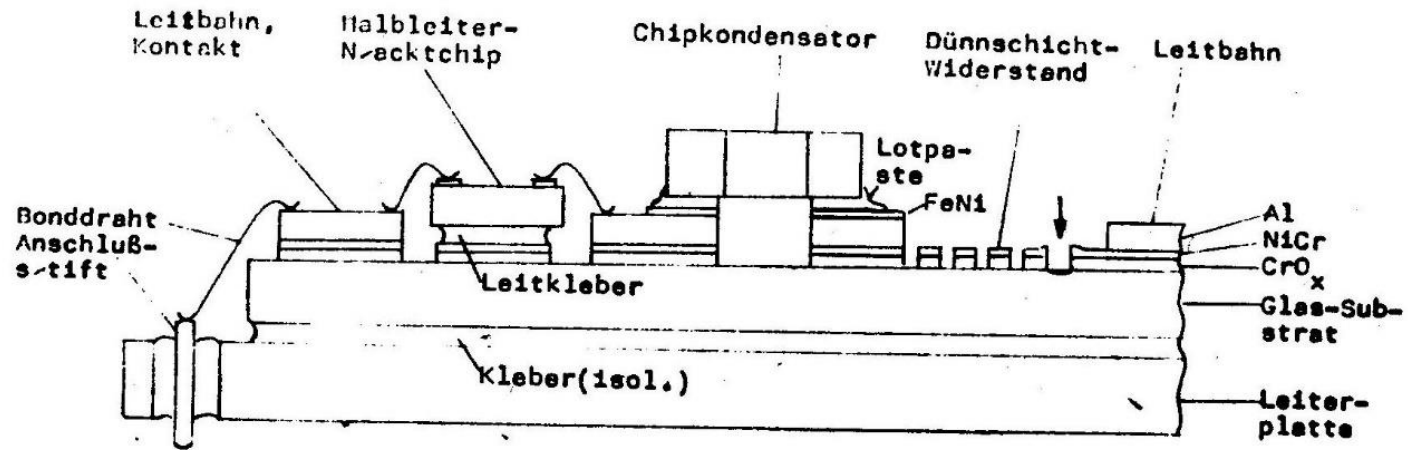
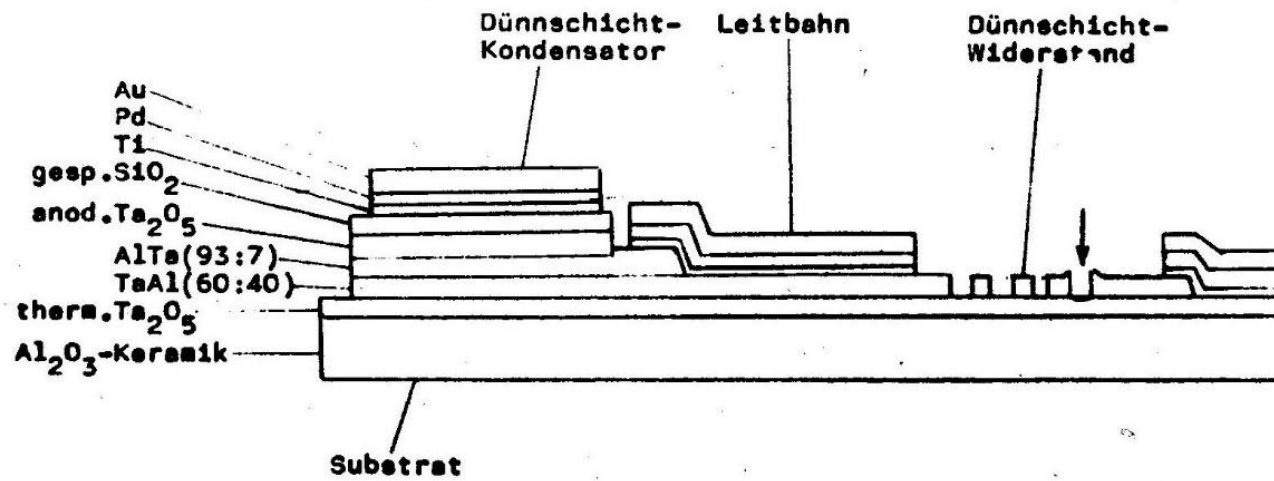


Bild 20 : MIS-Kondensator-Prinzip des Einchip-Elektronenstrahlspeichers



135

Bild 21 : Hybridschaltkreis mit Dünnschicht-R-Netzwerk



136

Bild 22 : RC-Dünnschicht-Netzwerk

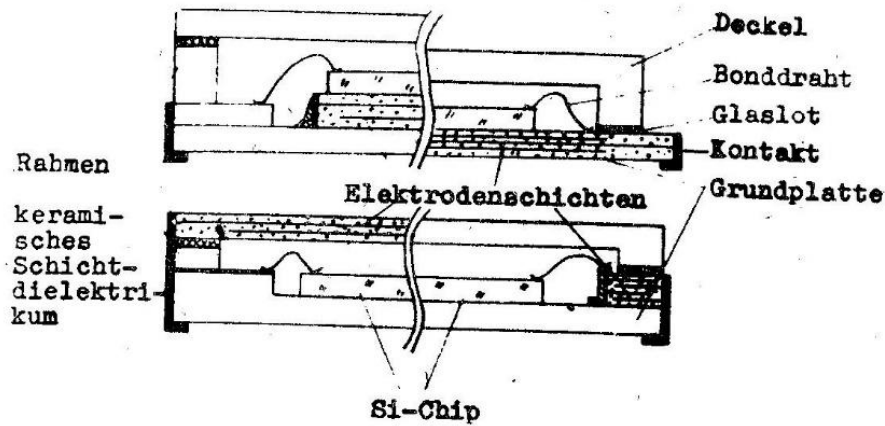


Bild 23 : Varianten von gehäuseintegrierten Mehrlagenkondensatoren (keramische Chipcarrier)

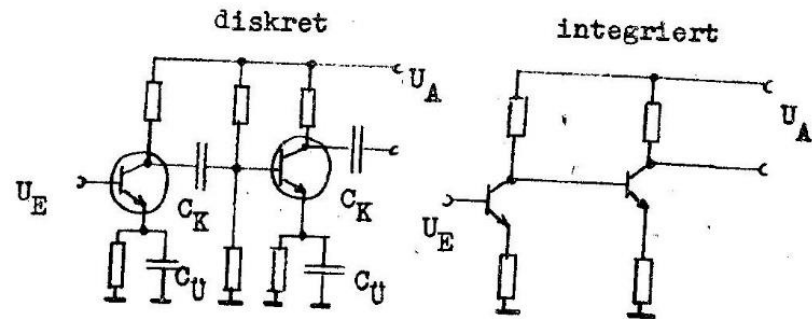


Bild 24 : Substitution von Kapazitäten beim Übergang von diskreten zu integrierten Verstärkerschaltungen

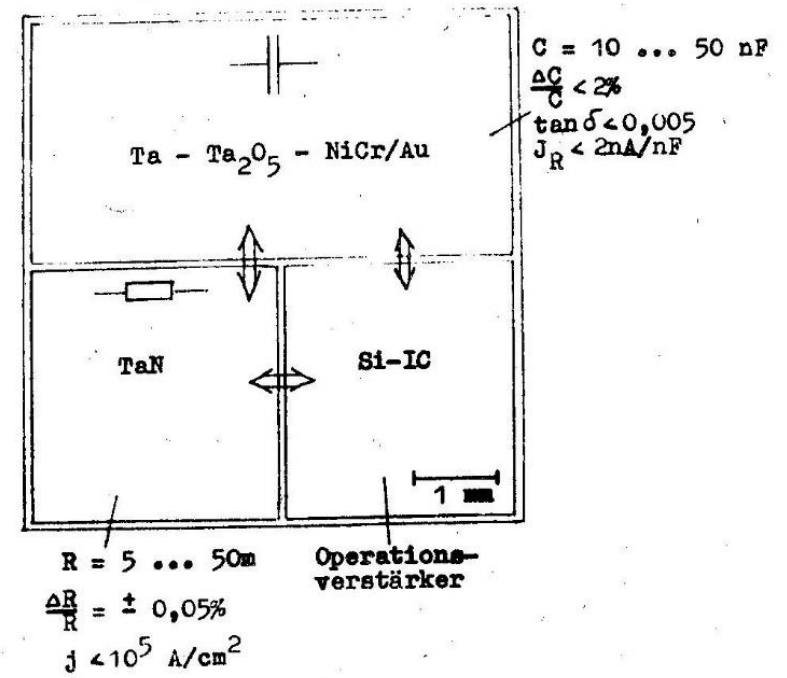


Bild 25 : Aktiver RC-Filter in integrierter Kombinationstechnologie

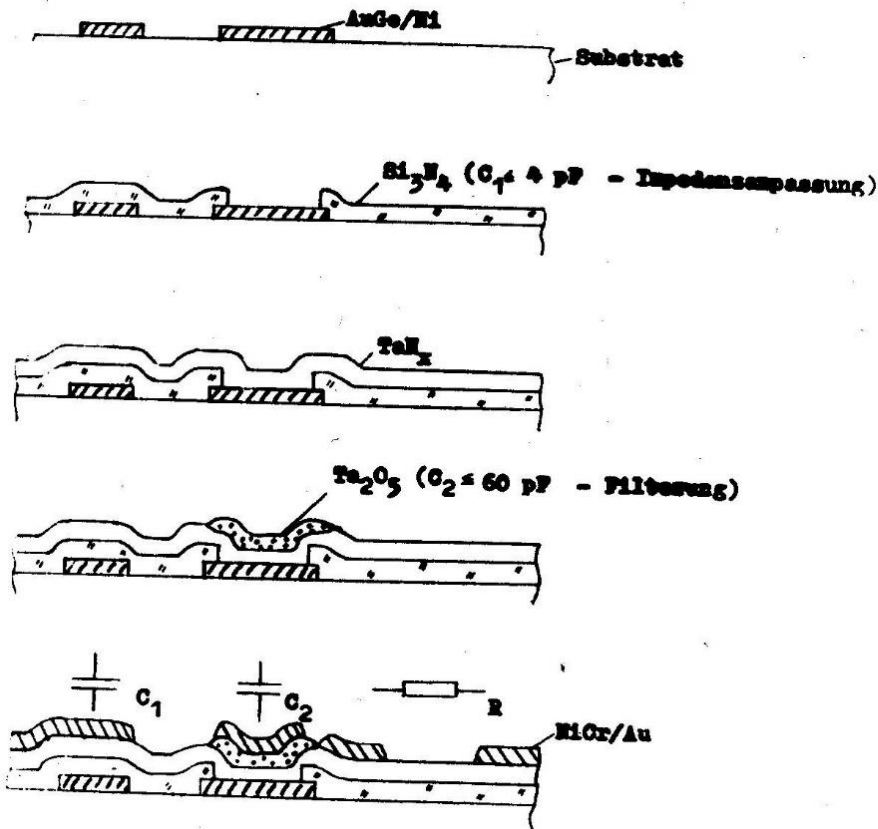
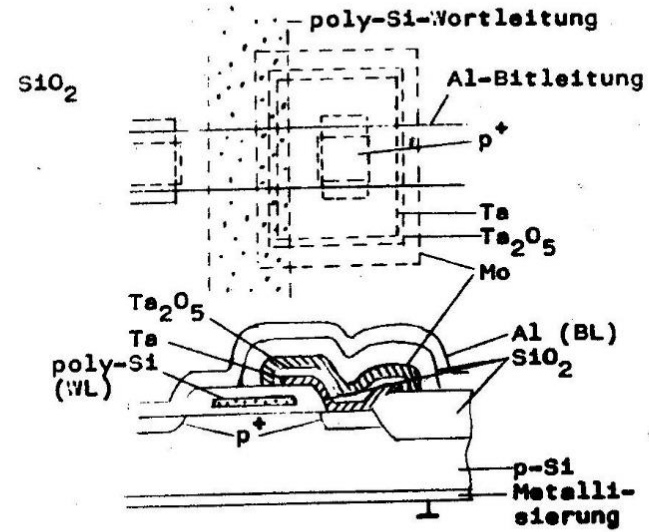
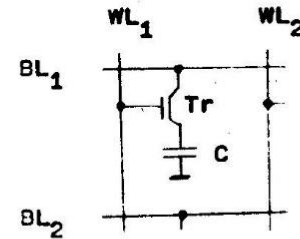


Bild 26 : Integrierte RC-Schaltung auf GaAs (Herstellungsschritte)

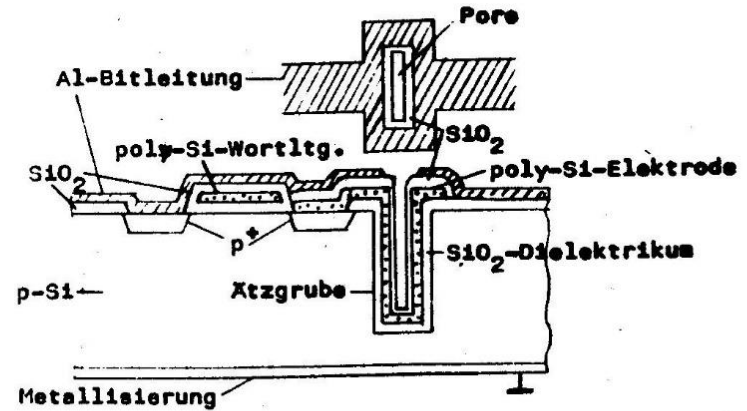


a) Layout der Stapelkondensatorzelle



b) Schaltung der Transistor-Kondensator-Zelle

Bild 27 : Hochintegrierter dRAM-Einchip-Speicher



c) Layout der Thrench-Kondensator-Zelle

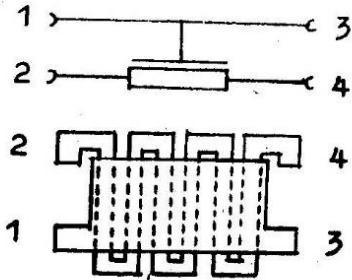
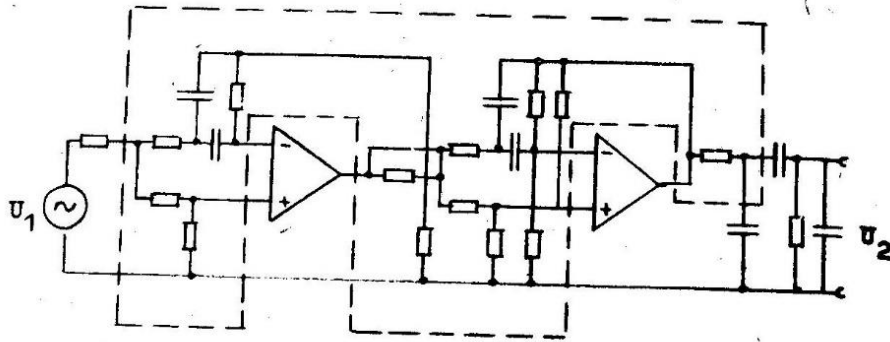
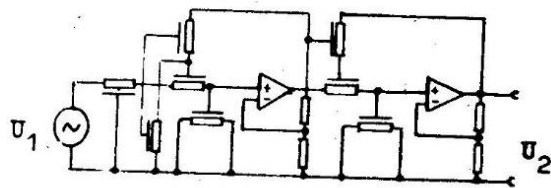


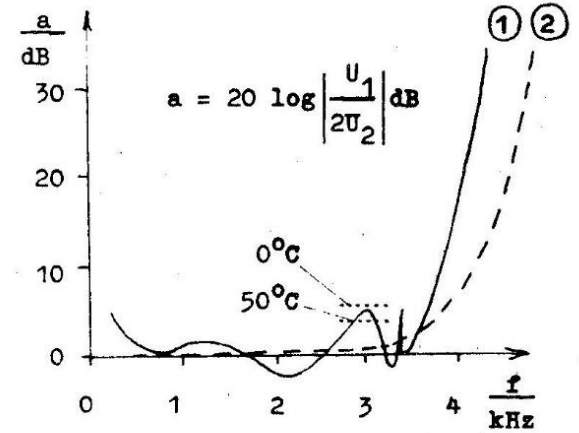
Bild 28 : Schaltbild und Layout einer RC-Struktur



a) Hybridschaltkreis (gestrichelt eingerahmt R- und C-Schichtbauelemente auf dem Substrat)

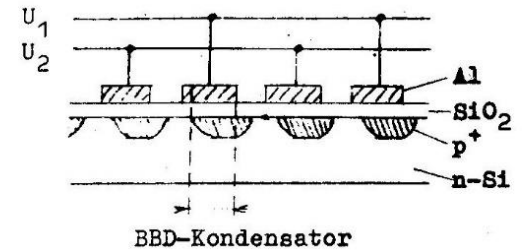


b) Hybridschaltkreis mit RC- und R-Schichtbauelementen

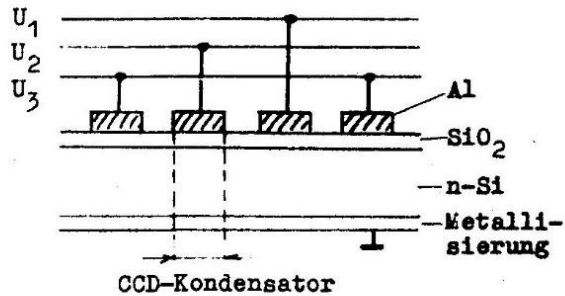


c) Vergleich der Filterkurven nach a), Kurve 1, und b), Kurve 2 (a Dämpfung, f Frequenz)

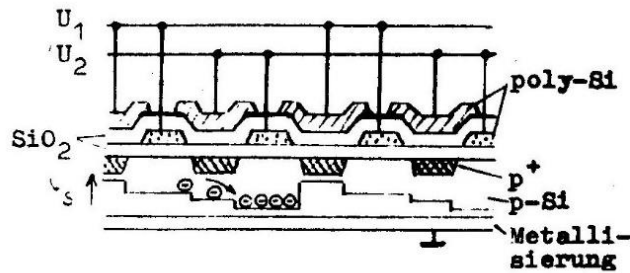
Bild 29 : Schaltungen und Dämpfungscharakteristiken aktiver RC-Filter (Hybridausführungen mit unterschiedlichen Integrationsgraden)



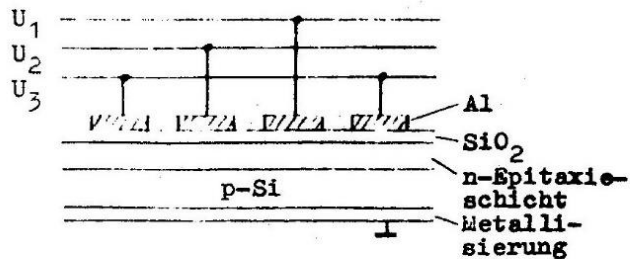
a) Eimerkettenschaltung (Bucket-Brigade-Device, BBD)



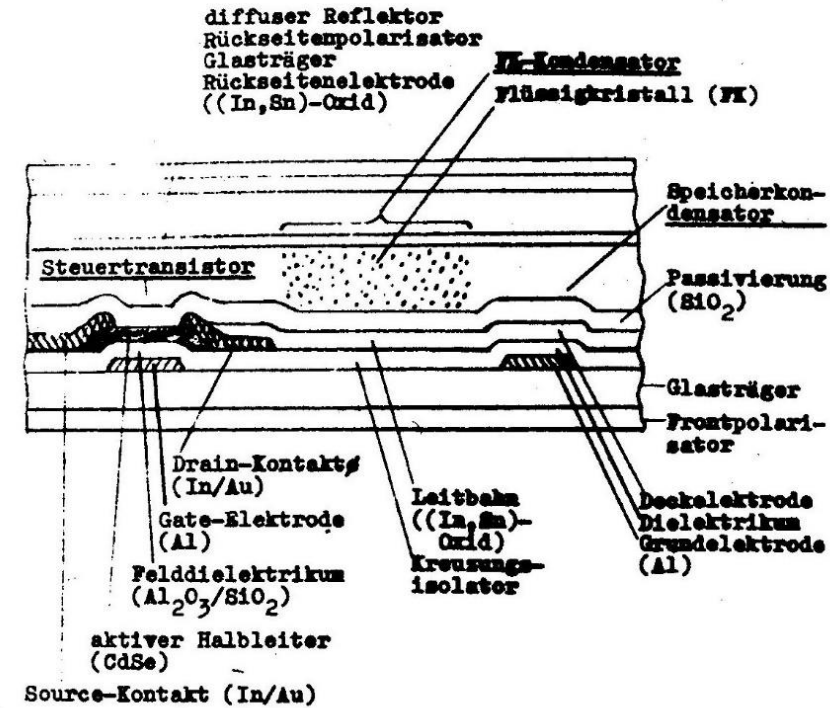
b) 3Phasen-Oberflächenladungsgekoppeltes Bauelement (Surface-Charge-Coupled-Device, SCCD)



c) 2Phasen-SCCD

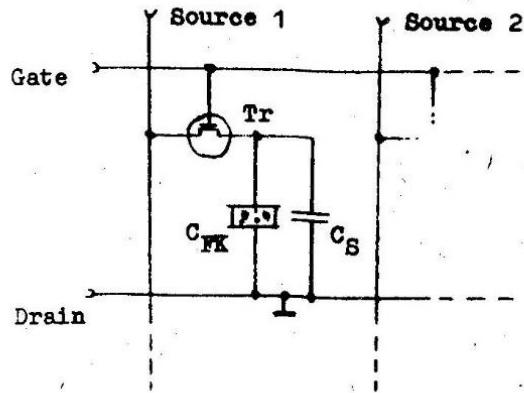


d) 3Phasen-Volumenladungsgekoppeltes Bauelement (Bulk-Charge-Coupled-Device, BCCD)

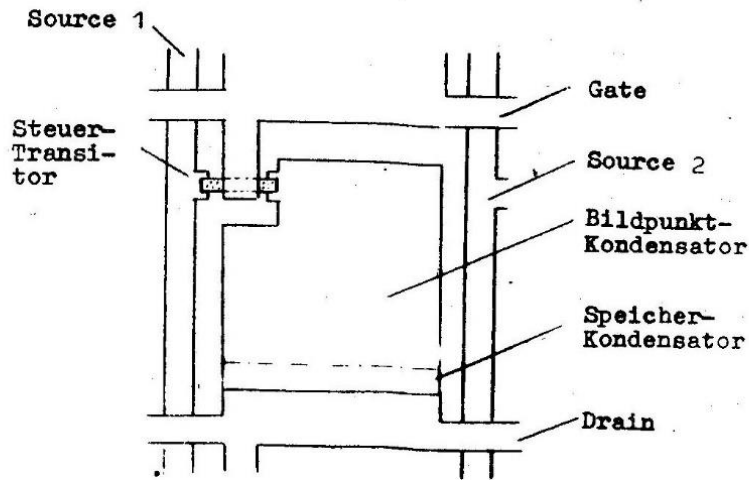


a) Vertikalstruktur einer Bildpunktzelle

Bild 30 : Struktur und Beschaltung integrierter kapazitiver Ladungstransferelemente



b) Schaltung der LCD-Zelle mit Bildpunktkondensator, Ansteuertransistor und Stützkondensator)



c) Layout einer Bildpunktzelle

Bild 31 : Flüssigkristall-Display (Liquid-Crystal-Display, LCD)

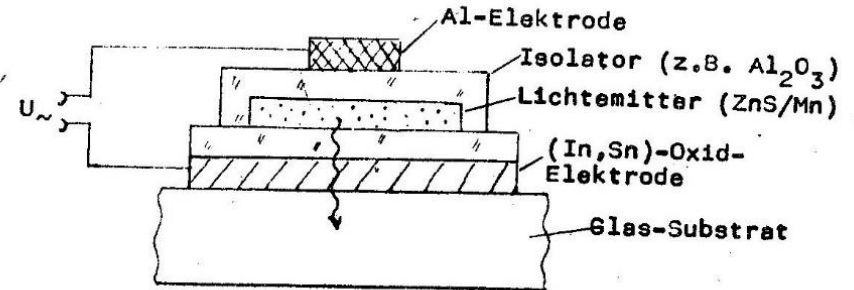


Bild 32 : Bildpunktkondensator eines Lumineszenz-Displays