

VEB Kombinat Elektronische Bauelemente Teltow
Arbeitsausschuß Kondensatoren der Kammer der Technik

VERÖFFENTLICHUNGEN

ZUR

2. TAGUNG

„Roh- und Werkstoffe für Kondensatoren“

22. bis 24. 3. 1983

Herausgegeben von

Doz. Dr. sc. nat. H.-D. Langer

Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt

Sektion Physik/Elektronische Bauelemente

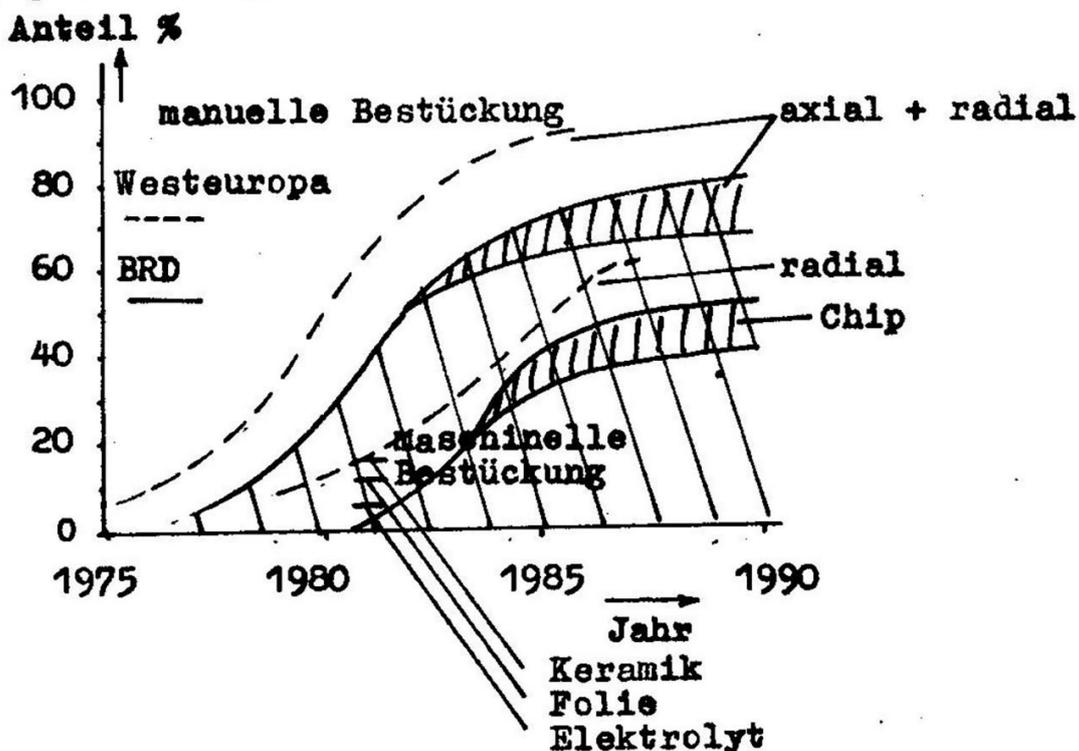
AUSGEWÄHLTE BEITRÄGE DER TECHNOLOGIEFORSCHUNG
ZUR WEITERENTWICKLUNG VON KONDENSATOREN

Dr.sc.nat. H.-D. Langer
TH Karl-Marx-Stadt

1. Einführung

Bei zunehmender Komplexität moderner Gerätekonzeptionen ist ein unaufhaltsamer Anstieg der Bauelementestückzahl pro monolithischem Chip-Schaltkreis, pro Substrat- bzw. Verdrahtungsträgereinheit und damit pro Gerät zu verzeichnen. Es wachsen konform die lohnintensiven Handbestückungs- und Reparaturkosten. Damit konkurriert der durch automatisierte Großserienproduktion im Herstellerbereich stimulierte Abfall der Bauelementepreise.

In diesem Umfeld entwickelte sich in der kapitalistischen Wirtschaftssphäre die ebenso faszinierende wie schonungslose Rationalisierungskonzeption der automatischen Bestückung (vgl. Bild 1).



Internationale Trends der (Anteile am Gesamtumfang der Bestückung) automatischen Bestückung nach Literaturangaben

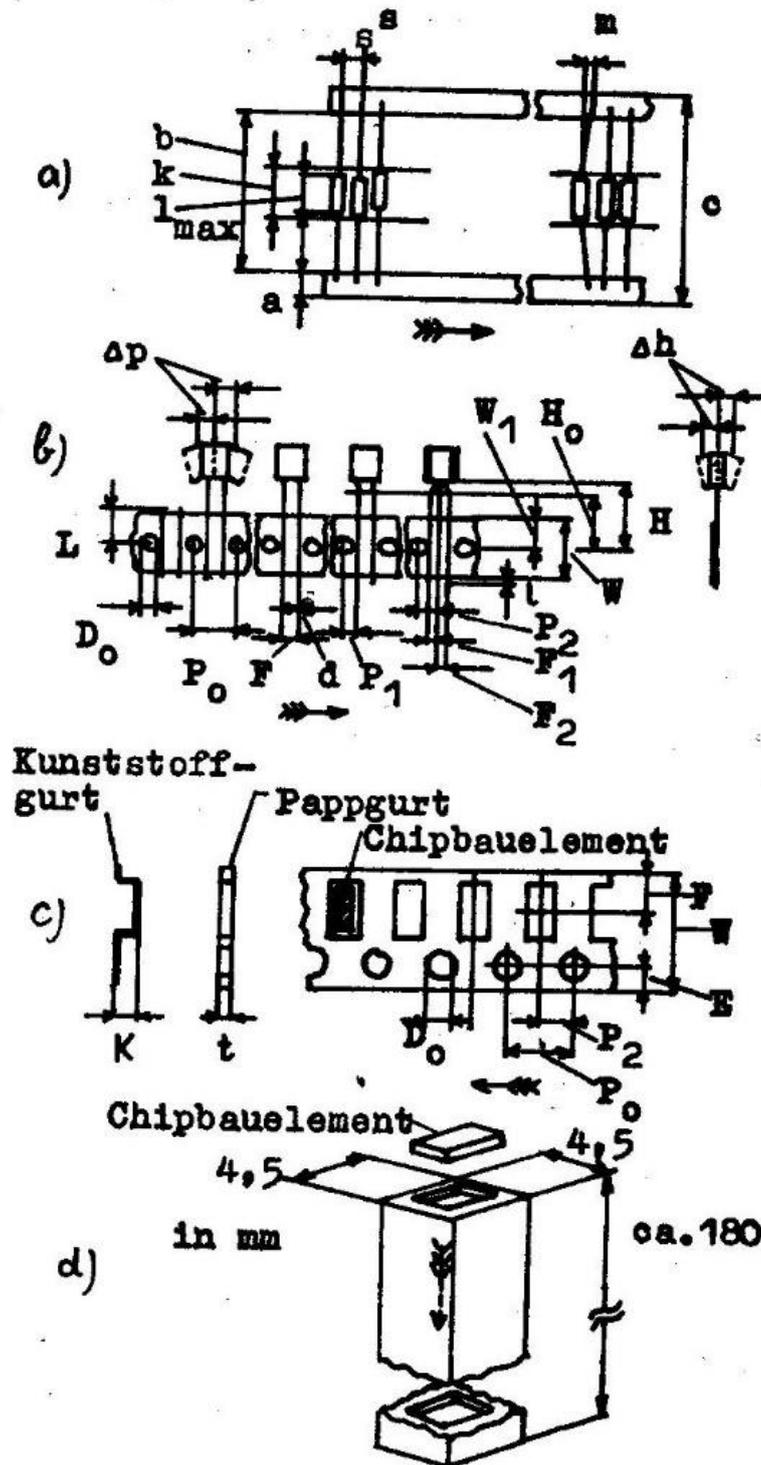


Bild 2: Gurte und Magazine als Hauptelemente der automatisierungsgerechten Konfektionierung (Bezeichnungen und Bemaßung s. Tabelle 1)

a) Gurt für axial

b) Gurt für Radial

c) Gurt für Chip

d) Magazin für Chip

Tabelle 1: Standarddaten von Konfektionierungsbeispielen für die automatische Bestückung (Maße in mm, vgl. Bild (2)):

a) Gurtung axial bedrahteter Bauelemente (IEC 286-1):

Gurtbreite	a	6 ± 1
		9 ± 1
Gurtungsschritt	s	$5 \pm 0,5$
		$10 \pm 0,5$
		$15 \pm 0,75$
		$20 \pm 1,00$
Gurtinnenmaß (bei 6mm Gurtbreite)	b	53 ± 2
		63 ± 2
		73 ± 2
Gurtaußenmaß	c	max. 140
Axiale Lagetoleranz ($k-l_{\max}$)		- 1,4
Radiale Lagetoleranz	m	- 1,2

b) Gurtung radial bedrahteter Bauelemente (IEC-Entwurf):

$W = 18 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0,5 \end{smallmatrix}$	$p = 1,3$	$H_0 = 16 \pm 0,5$
	$h = 2$	$H = 18 \begin{smallmatrix} +2 \\ -0 \end{smallmatrix}$
$W_1 = 9 \begin{smallmatrix} +0,75 \\ -0,5 \end{smallmatrix}$	$F = 5 \begin{smallmatrix} +0,6 \\ -0,1 \end{smallmatrix}$	$L = 11$
$D_0 = 4 \pm 0,2$	$F_1, F_2 = 2,5 \begin{smallmatrix} +0,4 \\ -0,1 \end{smallmatrix}$	$l = 2$
$P_0 = 12,7 \pm 0,3$	$P_1 = 3,85 \pm 0,7$	
	$P_2 = 6,35 \pm 0,7$	

c) Gurtung unbedrahteter Bauelemente (IEC-Entwurf):

Gurtbreite $W = 8 \pm 0,3$	$E = 1,75 \pm 0,1$	
Transportlochdurchmesser	$D_0 = 1,5 \begin{smallmatrix} +0,1 \\ -0 \end{smallmatrix}$	$F = 3,5 \pm 0,05$
Transportlochabstand	$P_0 = 4,0 \pm 0,1$	$t = 1,1$
		K (bauelementabhängig)

Sie stellt sich beim Geräteproduzenten als objektive Auswirkung der Mikroelektronik und Robotertechnik dar und hat jetzt bereits verstärkte innovative Rückwirkungen auf die Basistechnologien beim Bauelementehersteller vorzuweisen.

2. Internationaler Stand und Entwicklungstrend der automatischen Bestückung

Eine geordnete Bauelementezuführung zur Bestückungsstation ist nicht nur für die automatische Bestückung vorteilhaft, doch ist sie für letztere eine unverzichtbare Voraussetzung. Aus Bild 2 und Tabelle 1 geht der internationale Stand der Standardisierung bei der Bauelemente-Gurtung bzw. -Magazinierung hervor. Es sind dabei axial und radial bedrahtete sowie passive Chip-Bauelemente berücksichtigt worden. (Durch die Einführung von Chipcarriern als moderner Bauform integrierter monolithischer Schaltkreise verwischen die Montageunterschiede passiver und aktiver Bauelemente zusehendst.) Die Gurtabmessungen für axiale Bauelemente sind nach IEC 286-1 verbindlich, in den übrigen Fällen liegen IEC-Entwürfe vor. Nicht entschieden ist bisher, welche der bisher bekannten Konfektionierungsarten (Schüttgut, Magazinierung, Gurt- bzw. Bandverpackung) einen Vorsprung erzielen könnte. Dabei stehen noch prinzipielle Entscheidungen aus, wenn man die unterschiedlichen Möglichkeiten prismatischer und zylindrischer Bauformen berücksichtigt, vgl. Bild 3.

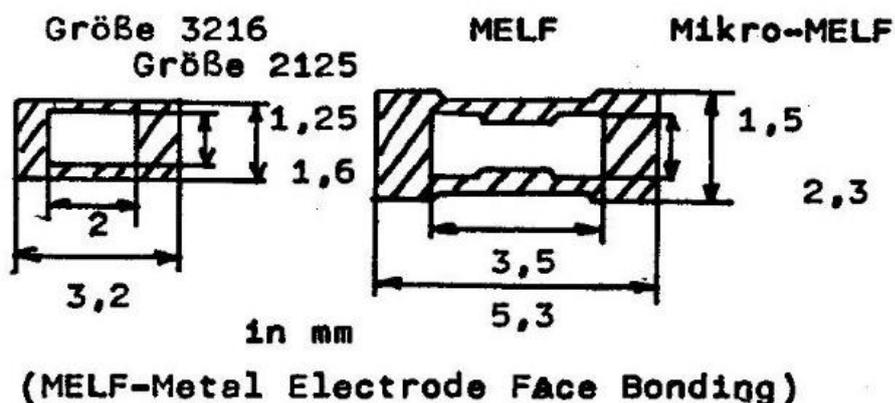
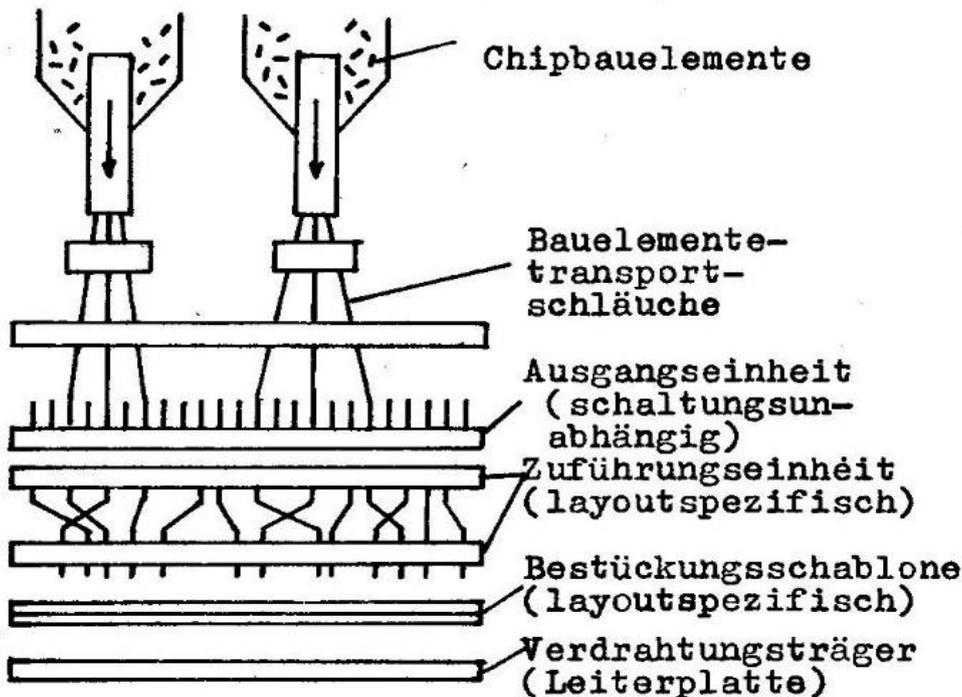


Bild 3: Abmessungsvergleich prismatischer und zylindrischer (MELF) Chipbauelemente /1/

Betrachtet man jedoch die in Tabelle 2 gegebene Wertung des Prinzips der Zuführung zum Bestückungsautomat, so dürfte bei der gegenwärtig noch angebotenen Bauformvielfalt die Verbundzuführung dominieren. Das programmierte Umgurten von unterschiedlich im Anlieferzustand konfektionierten Bauelementen auf ein einheitliches Transportband mit Hilfe eines Sequenzer-Automaten ist Stand der Technik. Die sequenzielle Bestückung nach dem "pick-and-place"-Prinzip (Bauelemente nacheinander aufnehmen und auf den Verdrahtungsträger aufsetzen), wobei die Taktzeit, meist durch die des X-Y-Koordinatentisches bestimmt wird, steht in Konkurrenz mit den Varianten der Simultanbestückung, wofür Bild 4 ein MELF-Beispiel zeigt.

Bild 4:

Prinzip der Simultanbestückung (MELF) /1/



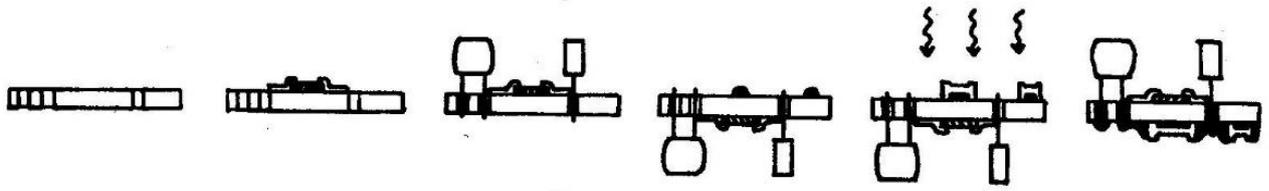
Gerade die Simultankonzeption fordert eine sehr enge Zusammenarbeit von Bauelemente- und Gerätehersteller heraus. Anderenfalls wird man sich für gemischte Bestückungsverfahren entscheiden müssen. Handbestückungsschritte sind dabei keinesfalls ausgeschlossen, vgl. Bild 1.

Heutzutage verliert das Substrat zunehmend seine unilaterale Verdrahtungsträgerfunktion. Es werden beide Seiten genutzt, und - ausgehend von den Erfahrungen der Schicht- bzw. Hybridtechnik - das Einfügen von Schichtbauelementen erhöht die funktionell genutzte Fläche, s. auch / 2 /.

In diesem Fall hat man sich den Ablauf der kombinierten Bestückung etwa wie im Bild 5 gezeigt, vorzustellen. Eine Lei-

Tabelle 2: Bewertung der Zuführarten bei der automatischen Bestückung

Art	Vorteile	Nachteile	Eignung
direkt (Schüttgut)	-Massengutlagerung -individuelle Anpassg. Transportsyst. (Bauelement hohe Funktionsautonomie)	hoher -Platzbedarf (Zuführsyst.) -Blockier- risiko	-regelmäßiges Bauelement -große Bauelemente-Mengen
Magazine: Horizontalmagazin (Stangenmagazin, Linearmagazin)	-geringes Blockier- risiko (hohe Zu- verlässigkeit) -kleine Abmessungen -Flexibilität hoch	-geringe Auto- nomie -Risiko der Magazinver- tauschung	-große Flexi- bilität (Klein- serien)
Vertikal- magazin (Stapel- magazin)	-größere Aufnahme- kapazität des Magazins		
Einlege- bänder	-hohe Zuverlässig- keit -auch für größere Bauelemente ge- eignet (z.B. Chip- carrier) -hohe Autonomie -geringe Investi- tionskosten	-hoher Platz- bedarf -großes La- gervolumen (Schütt- gut!)	entwick- lungsfä- hig
Verbund- zuführung	-große Flexibili- tät	-hohe Investi- tionskosten -großer Platzbe- darf	-große/ kleine Mengen pro Bau- elemente- Typ -regelmäß./ unregel- mäßig. Bau- elemente



Verdrahtungsträger vorbereiten

Siebdruck, Einbrennen

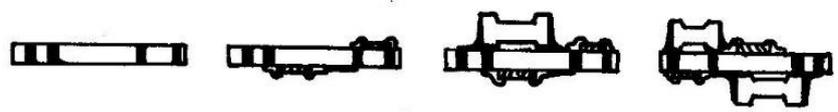
Bestücken bedraht. Bauelem.

Wenden, Kleberauftrag, Chips aufsetzen

Kleber aushärten

Wenden, Schwalllöten

a) Gemischtbestückung



Verdrahtungsträger vorbereiten

Siebdruck, Einbrennen

Chips aufsetzen, Reflow-Löten (hohe Löttemp.)

Wenden, Chips aufsetzen, Reflow-Löten (niedrige Löttemp.)

Bild 5: Beispiele zum Prozeßablauf der automatischen Bestückung

b) Zweiseitige Chipbestückung

terplatte wird zunächst durch Siebdruck mit Leiterbahnen, Durchkontaktierungen und Schichtbauelementen versehen. Nach dem Bestücken mit bedrahteten Bauelementen wird sie gewendet und an den vorgesehenen Stellen mit einer dosierten Klebermenge versehen, auf die später die Chipbauelemente aufgesetzt werden. Das Aushärten des Einkomponentenklebers erfolgt UV-gestützt. Nach erneutem Wenden findet das konventionelle Schwallöten statt. Dabei haben die Chipbauelemente den ungedämpften thermischen Schock zu verkraften. Das zweite Schema in Bild 5 zeigt das modernere Reflow-Montageprinzip, das dann einsetzbar ist, wenn nur mit Schicht- und Chipbauelementen gearbeitet wird. Entscheidend ist dabei die Anwendung von zwei verschiedenen Einbaulöten, deren Schmelztemperaturen um mindestens 20 bis 40 K differieren. Vorteilhafterweise verzichtet man zugunsten des Auftrags einer Lotpaste auf die zusätzliche Kleberpositionierung bzw. -fixierung und nutzt dann den Effekt der Selbstpositionierung durch die Grenzflächenkräfte beim Schmelzen des Lotes.

Tabelle 3: Vergleich von Lötverfahren der automatischen Bestückung

	Gasphasenlöten	Heizstempellöten	Schwallöten
Wärmequellen	Luft/Inertgas (215°C, Fluorinert 3M)	Heizpatrone/ Hohlstempel- führung	Lotschwall
Lot u. Flußmittel	Lotpaste mit Flußmittel (z.B. Siebdruck)	Lotplattierter Verdrahtungs- träger; Fluß- mittel-separat	Flußmittel- auftrag; Lotschwall
Positionierung	durch Paste (Lot)	Stempelposi- tionierung (Lötroboter)	durch Kle- ber (T-be- ständig!)
Produktion	Massendurch- lauf (Reflow) 1..10min ($T_1 > T_2$)	individ. Mon- tage (oder Reparatur) 5s/250°C (Impulslöten)	Massendurch- lauf 5s/250°C

In Tabelle 3 finden sich vergleichende Bemerkungen zu den konkurrierenden, automatisch gestützten Lötverfahren.

Das Heizstempellöten dürfte seine Vorteile vor allem bei Kleinserien, bei Spezial- bzw. Zusatzbestückungsaufgaben und im Reparaturbereich ausspielen. Man hat allerdings auch hierbei beträchtlichen technischen Aufwand zu treiben, wenn es um rationell (trägheitsarm!) und zuverlässig (individuell!) ausgeführte Lötverbindungen geht, wie Bild 6 auszudrücken versucht.

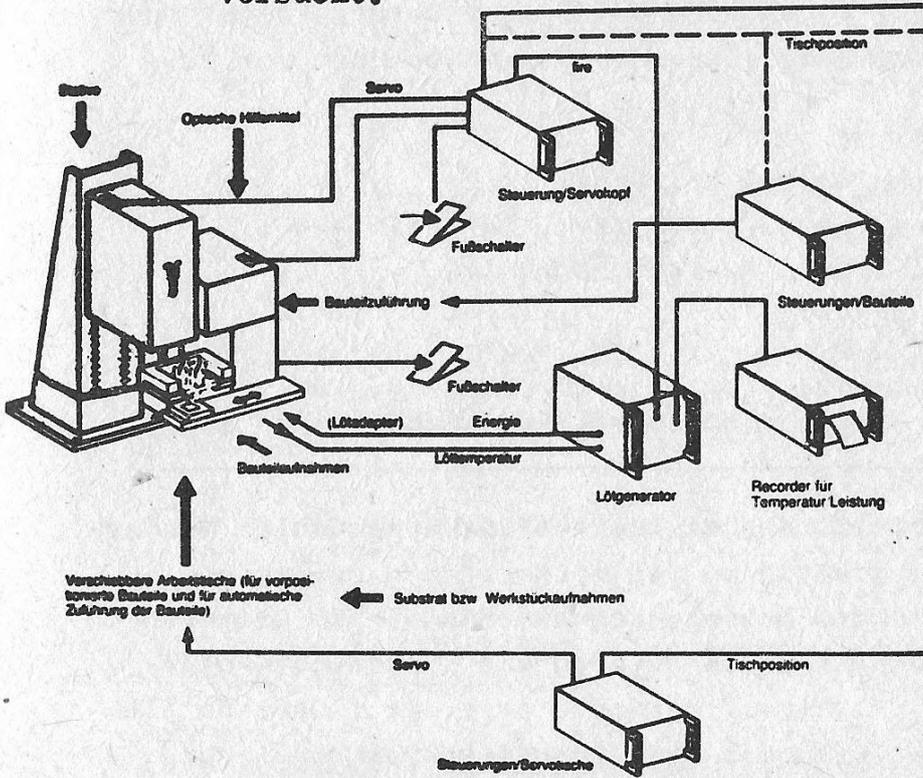
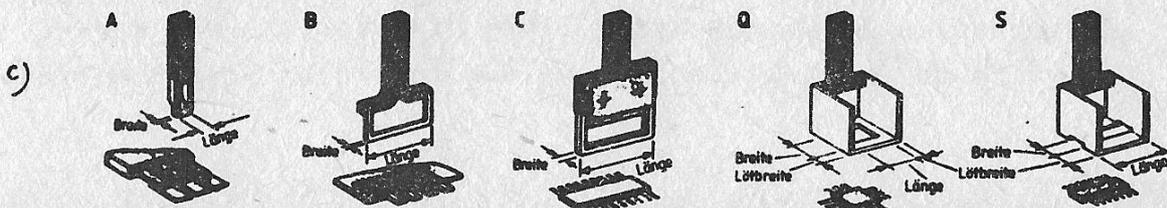
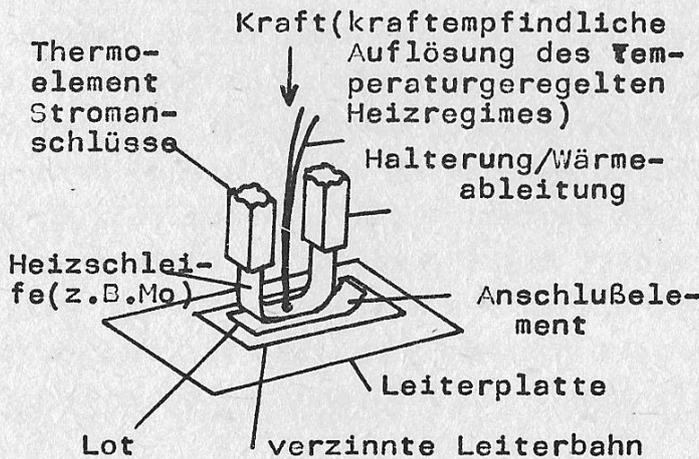


Bild 6:
Prinzip der automa-
tischen Heizstempel-
lötung, vgl. /3/

b) Impulslötadapter



Zusammenfassend sind folgende Anforderungen an die Bestückungseigenschaften elektronischer Bauelemente zu nennen:

- automatisierungsgerechte Konstruktion und Anlieferung,
- geringer Substratflächenbedarf,
- geringe Bauhöhe,
- gute Handhabbarkeit,
- Möglichkeit der Bestückung beliebiger Verdrahtungsträger,
- Möglichkeit der Reinigung und Inspektion nach der Bestückung ,
- geringe Masse,
- gute thermische Charakteristik,
- hohe Zuverlässigkeit (passiviert, hermetisiert),
- Reparierbarkeit bzw. Austauschbarkeit,
- Standardisierbarkeit,
- geringe Kosten.

3. Einfluß der Integration auf die Entwicklung von Kondensatoren

Die Entwicklungslinie der mikroelektronikkompatiblen Kondensatoren führt eindeutig zu den integrierten Bauformen (Bild 7). Während die entsprechenden technischen Lösungen im Niedervoltbereich bei Kondensatoren mit Kunststoff-Foliedielektrikum und Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyt noch nicht gefunden bzw. praxiswirksam sind (vgl. Abschnitt 3 und /4/), ist bei Kondensatoren mit oxidischem Dielektrikum längst der Durchbruch erfolgt. Bauelemente mit Dünnschichtdielektrikum auf Glas- bzw. reiner Oxidbasis. (z.B. Ta_2O_5) /5/ sind seit mehr als 15 Jahren Grundlage von integrierten RC-Netzwerken der Dünnschicht- und später Dünnschichthybridtechnik. Auf diesem Gebiet liegen umfangreiche Erfahrungen vor, die laufend ergänzt werden (s.z.B. /6/). Der fortgeschrittenste Stand wurde dabei auf dem Gebiet der aktiven RC-Filter, die in das Mikrowellengebiet vorstoßen, erreicht, und es geht zunehmend um die Direktintegration (technologisch, funktionell) von monolithischer und Schichttechnik /2/.

In der Dickschichttechnik sind auf dem Pastensektor große Fortschritte zu verzeichnen. Einen Eindruck von der werkstofflichen Spezialisierung auf den konkreten Anwendungsfall

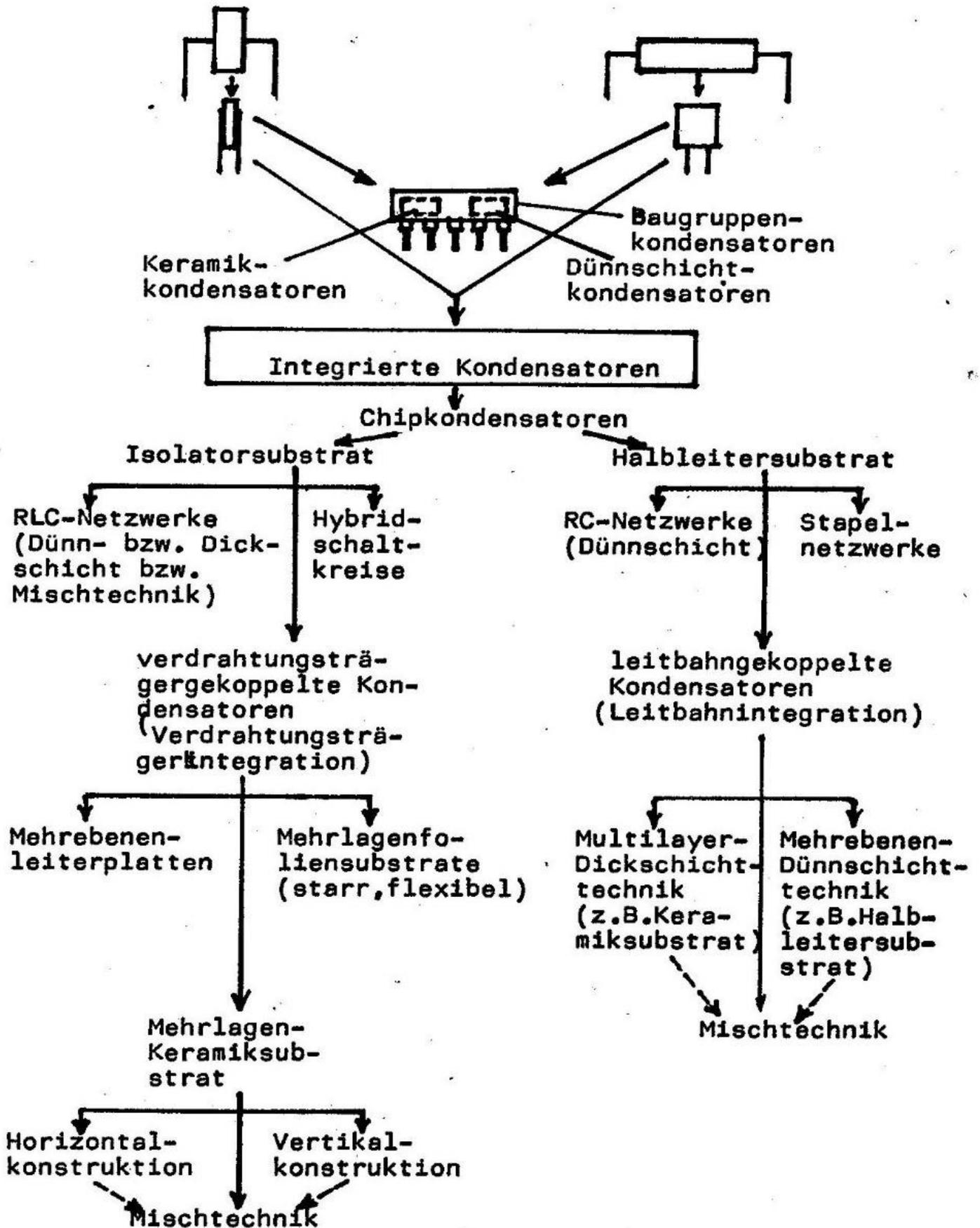


Bild 7: Entwicklungslinie von NV-Kondensatoren

vermittelt Tabelle 4, auf die später noch einzugehen ist (s. auch /7/, /8/, /9/).

Tabelle 4: Kompatible Materialien für integrierte Kondensator-Substrate

	Keramik (ϵ_r)	Metall
<u>Homogene Keramik</u>	Al_2O_3 ($\approx 9,5$)	Mo, W
	Glas-Keramik (≈ 50)	Ag Pd Pb-Sn(infiltriert)
	$BaZrO_3$ (≈ 40)	Mo, W
<u>Heterogene Keramik</u>	HDK Glaskeramik(≈ 50)	NDK Glaskeramik(< 10)
		Ag Pd
	$BaTiO_3$ (≈ 1000)	Porzellan (< 10)
		Pd
	$BaZrO_3$ (≈ 40)	Al_2O_3 (< 10)
		Mo, W

Wie aus dem Entwicklungsschema in Bild 7 hervorgeht, besorgen die Chipkondensatoren den allgemeinen Übergang von den diskreten zu den integrierten Kondensatoren. Dieser ist beim Keramik-Vielschicht- und beim Tantal-Festelektrolyt-Bauelement korrekt vollzogen, ohne daß die physikalisch-technologischen Grenzen auch nur annähernd erreicht wurden. Man darf ein Nachziehen der Kunststoff- und Al-Elektrolytbauelemente erwarten.

In konventionellen Leiterplatten und modernen keramischen Modulen, s. Bild 8, fällt der beträchtliche Anteil von Abblockkondensatoren auf (mindestens 1 pro Schaltkreis im DIL-Gehäuse bzw. Chipcarrier). Mehr noch als diese oberflächliche Feststellung verlangen leistungsfähige VLSI-Schaltkreise einen hohen Entkopplungsgrad im Bereich der Stromversorgungsleiterbahnen bzw. -ebenen, und es sind Verschiebungen bzw. Korrelationen der Spannungspegel infolge steiler bzw. simultaner Schaltvorgänge im Bereich der Informationsträger-Leiterbahnen zu minimieren. Es kommt auf immer kleinere Sig-

nalverzögerungszeiten und Schaltrauschspannungen an, was mit minimierten Induktivitäten und optimierten Kapazitätswerten von schaltungstechnisch gezielt eingefügten Kondensatoren zu erreichen ist.

Abblockkondensatoren

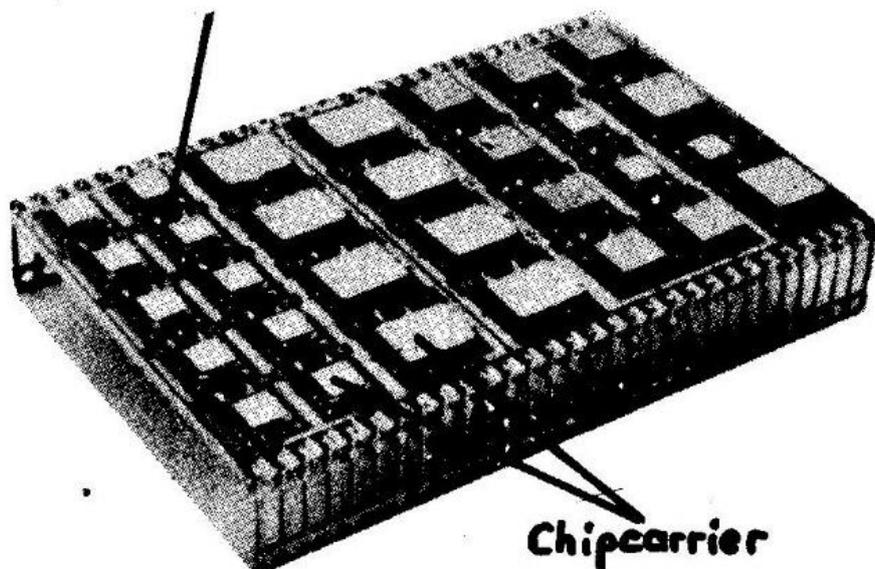


Bild 8:

Chipcarrier-Modul
mit keramischen
Chipkondensatoren
/10/

Dies führt auf eine neue Entwicklungsrichtung der substratgestützten Kondensatoren. Man kann gemäß Bild 7 verdrahtungsträger- und leitbahngekoppelte Varianten unterscheiden, wenn die Trennung nach Mehrebenenleitbahnsystemen in integrierten Schaltkreisen und nach komplexen Leiterzugsystemen in diskreten Verdrahtungsträgern zugelassen ist. (Da man selbstverständlich den Halbleiterchip auch als Verdrahtungsträger und beispielsweise ein Keramiksubstrat mit Schichtbauelementen als Funktionsblock auffassen kann, verwischen die Unterschiede zusehendst.) Der Gedanke der kapazitiven Leitbahnnutzung ist nicht neu, doch erhält er neue Impulse, nachdem die Probleme der technologischen Beherrschung von Mehrebenen-Schichtstrukturen prinzipiell gelöst worden sind. Zum Stand der Technik gehören Multilayer-Dickschichtbauelemente (s. /8/,/9/) ebenso wie die Dünnschicht-Mehrebenenleitbahnsysteme monolithischer Schaltkreise. Damit gelangt auch das Konzept des hochkapazitiven Dünnschicht-Stapelkondensators (nicht zu verwechseln mit dem Einfach-Stapelkondensator in der 2. Bauelementeebene monolithischer Schaltkreise, s. /2/) in greifbare Nähe. Neu ist jedoch nach /11/ die gezielte Ein-

fügung von Dickschichtkondensatoren als Vertikalkonstruktion bzw. die Nutzung von keramischen Mehrlagenkondensatoren und Dickschicht-Multilayerkondensatoren als Horizontalkonstruktion in keramischen Mehrlagen-Verdrahtungsträgern. Man bedient sich dabei der Möglichkeiten, sowohl keramische Folien wie Dickschichten (vgl. Tabelle 4) mit niedriger bzw. hoher Dielektrizitätskonstante nahezu beliebig realisieren zu können. Das Wesen dieser Überlegungen geben die Skizzen in Bild 9 wider. Bild 9 zeigt das Mehrlagensubstrat mit integrierten Mehrlagenkondensatoren (Horizontalkonstruktion, V_i Spannungen) und Mehrebenenschichtsystem für Signalleitbahnen ¹⁾

Die Dreierplattenkonstruktion geht im Detail aus Bild 9b hervor. Weitergehende Varianten sind in den Bildern 9c bis e enthalten, wonach mit HDK-Material gefüllte Durchgangslöcher kapazitiv zu nutzen sind bzw. mit HDK-Schichten bedeckte, metallgefüllte Durchgangslöcher oder metallische Leitbahnen im Inneren des Substrates die Kondensatorfunktion übernehmen. Das Sublaminat in Bild 9f versteht sich als Kondensatorstruktur im Dickschicht-Multilayertechnik (vgl. Tabelle 4) auf keramischem Foliesubstrat (1). Die Sublamine setzt man in ausgestanzte Öffnungen des Mehrlagensubstrates gemäß Bild 9g ein (Vertikalkonstruktion). Das Gebilde wird abschließend zu einem Block versintert. Es trägt auf der Oberseite ca. 100 bis 200 Chipcarrier und auf der Unterseite bis zu 1800 Anschlußstifte. Die Vertikalkonstruktion repräsentiert die optimale Konfiguration für integrierte Kondensatorsubstrate mit minimierten parasitären Induktivitäten.

Der innovative Gehalt der Kombination dünner und dicker Schichten sowie dünner Folien für kapazitive Zwecke ist außerordentlich hoch, wobei werkstofflich (Kunststoff, anorganische isolierende, halbleitende und metallische Werkstoffe der Elektronik) kaum Grenzen auferlegt sind. Ein Vorstoß der Kondensatoren über diesen Weg in den engeren Kompatibilitätsbereich der Mikroelektronik sichert ihnen eine große Perspektive.

¹⁾ Der Begriff "thin film" steht für Dickschicht (20 bis 50µm) zur Unterscheidung von den dicken Folien (0,3mm) des Mehrlagensubstrates.

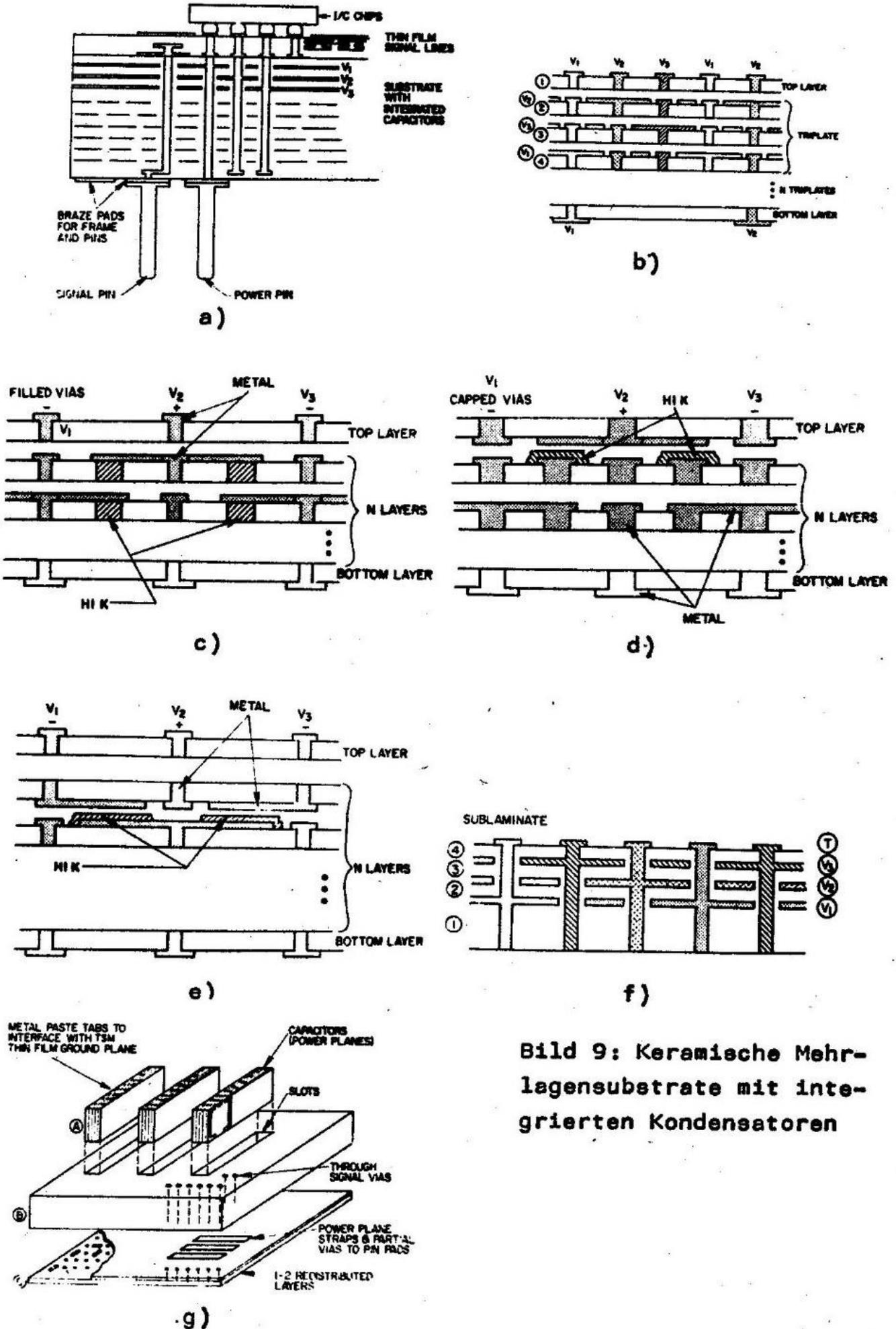
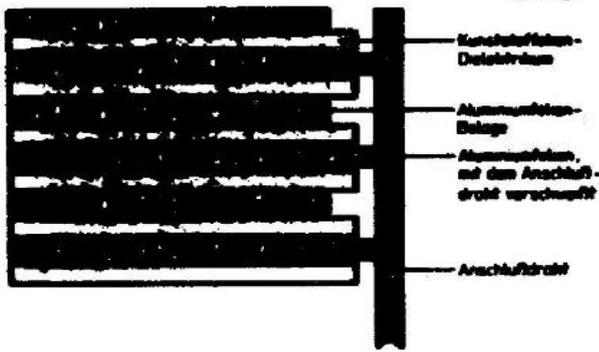


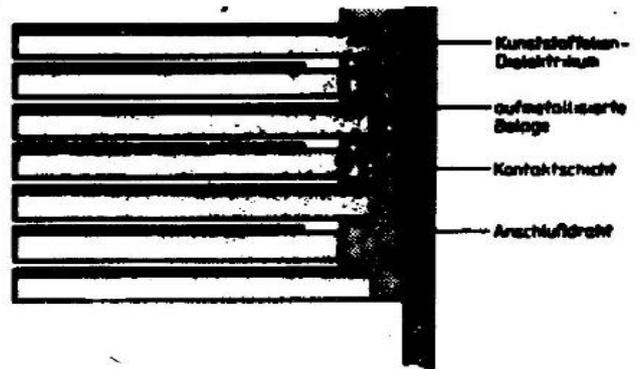
Bild 9: Keramische Mehr-
lagensubstrate mit inte-
grierten Kondensatoren

4. Entwicklungslinien ausgewählter Kondensatoren

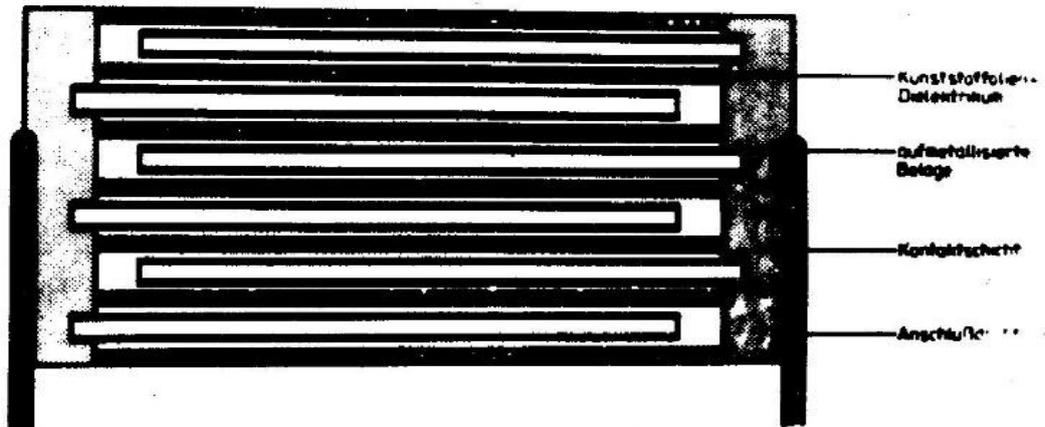
Polymere organische Isolatorschichten sind die Grundlage moderner Mehrebenen-Verdrahtungssysteme in integrierten Halbleiterschaltkreisen geworden. Die entsprechende Technologie wird bis hin zur Mikrostrukturierung beherrscht. Es ist daher nur eine Frage der Zeit, bis das Stapelkondensatorkonzept der Dünnschichttechnik in die technische Realisierungsphase tritt. Obgleich der Lösung dieses Problems im Bereich der Dünnschichtforschung bereits in der Mitte der 60er Jahre - also noch vor der praktischen Einführung des Keramik-Vielschichtkondensators - große Aufmerksamkeit geschenkt wurde, blieben die Erfolge aus. Dabei konzentrierte man sich auf Schichtkondensatoren mit anorganischem, vorzugsweise oxidischem Dielektrikum. Mangels einer ausreichenden Beherrschung der Beschichtungs- und Strukturierungsprobleme sowie der Ferroelektrizität dünner Schichten und aufgrund der damaligen großen Fortschritte der konventionellen Kondensatorgruppen (z.B. Festelektrolytkondensatoren) nahm das Interesse ab. Umso überraschender mag die Tatsache klingen, daß gerade die Kunststoff-Kondensatoren im Vielschicht-Dünnschichtkondensator in absehbarer Zeit das mikroelektronikkompatible Chip- und integrierte Schichtbauelement vorzuweisen haben. Die Entwicklungslinie der Kunststoffkondensatoren führt von Foliewickelkondensatoren mit zunächst metallischen Folieelektroden und später Schichtelektroden (Metallisierung!) über den Foliestapelkondensator in Form des prismatischen Monoblockbauelementes bis zum Vielschichtkondensator auf einem stirnflächenkontaktierten Substrat (vgl. Bild 10a), der sich mühelos gemeinsam mit keramischen und Tantal-Festelektrolyt-Bauelementen in die Reihe der Chipkondensatoren einordnen läßt. Konnte die Firma WIMA, BRD, mit den Wickelvarianten nach Bild 10a bis d unter Nutzung der beidseitigen Metallisierung feldfreier Trägerfolien (Bild 10c) u.a. die Impulsbelastbarkeit und die Selbstheilfähigkeit bedeutend steigern - Z.B. Erhöhung von $\Delta U / \Delta t$ von 18 auf $2400 \text{ V}/\mu\text{s}^{-1}(!)$ - so hat vor allem die Firma Siemens, BRD, zumindest aufgrund von zahlreichen Patentanmeldungen ein weitergehendes



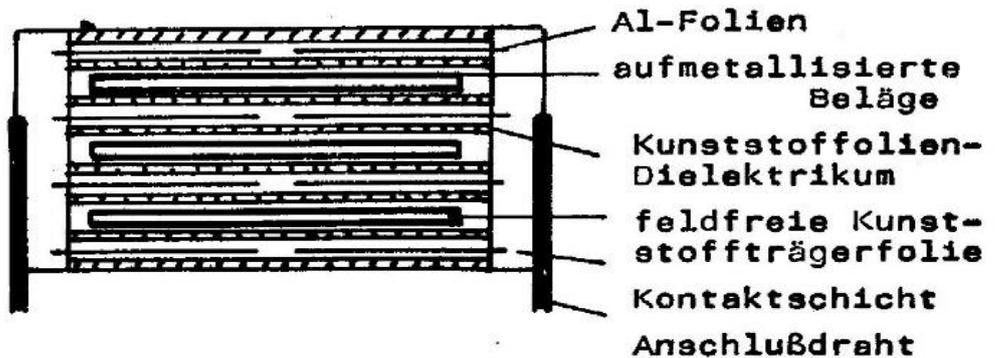
a) Metallfolie-Beläge



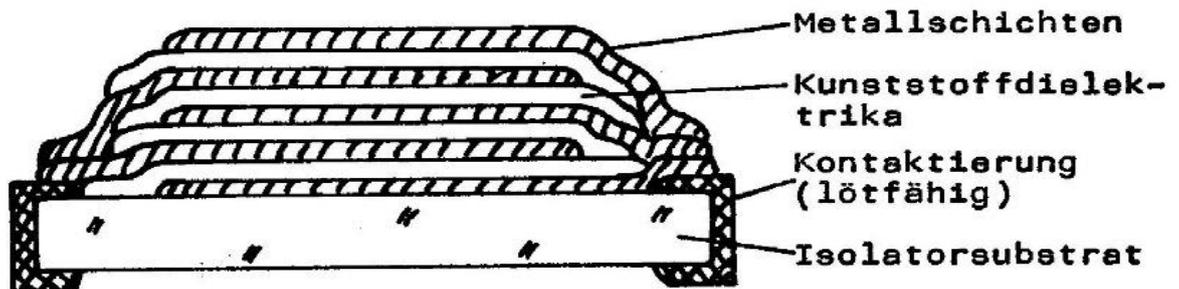
b) metallisierter Kondensator



c) metallisiert (ausheilfähig) mit erhöhter Kontaktsicherheit



d) ausheilfähig für höchste Impulsbelastungen



e) Schichtstapel auf Substrat

Bild 10: Entwicklungslinie der Kunststoffkondensatoren

Alternativkonzept der Stapelkondensatorvarianten entwickelt. Die Foliekonstruktionen unterscheiden sich im Schnittbild nicht prinzipiell von den Skizzen in Bild 10b und c. Der Schichtstapelkondensator nach Bild 10d steht, wie erwähnt, erst am Anfang seiner Entwicklung.

Eine bedeutende Steigerung der Selbstheilfähigkeit ist insofern inhärent als sich Durchschlagsphänomene jeweils nur in einer Folien- bzw. Schichtebene bis zum völligen Ausfall dieser Lage ausbreiten können. Es sei ferner erwähnt, daß im Zuge der technischen Realisierung dieser Bauelemente neuartige rechnergestützte Abgleichverfahren in der Kondensatorpraxis Eingang gefunden haben, die entwicklungsfähig sind. Beim Elektrolytkondensator liegen differenzierte Entwicklungsforderungen an, von denen einige herausragende wie folgt zu charakterisieren sind:

1. Flüssig-Elektrolytkondensatoren (FLEK) für hohe Betriebsfrequenzen (z.B. Schaltnetzteil-FLEK für $f \approx 100$ kHz)
2. Konstruktive Anpassung der Bauformen an die Erfordernisse der automatischen Herstellung und Bestückung bei Gewährleistung einer hohen Packungsdichte im Verdrachtungsträger:

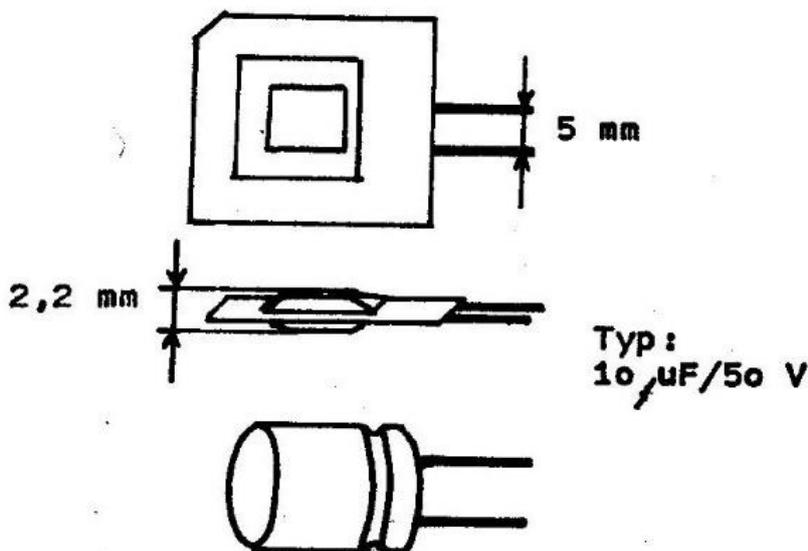


Bild 11:

Japanischer Ai-FLEK
in Flachbauform mit
zylindrischer Ver-
gleichsbaugröße

Bild 11 veranschaulicht hierzu eine in Japan gefundene Lösungsvariante, bei der Wickelkörper nicht im traditionellen zylindrischen Gehäuse, sondern zwischen zwei verschweißten Al-Folien hermetisch verschlossen werden.

3. Erhöhung des Volumenausnutzungsgrades (offene spezifische Oberfläche) bei Tantal-Festelektrolytkondensatoren (Ta-FEK):

Es geht um den Vorstoß in den Bereich der gewichtsspezifischen Ladung $> 20\,000\ \mu\text{Cg}^{-1}$ beim Ausgangspulver und um eine mehr als 70%ige Ausnutzung des entsprechenden

Oberflächenpotentials im Bauelement.

4. Auffindung einer Alternative zum Chipkondensator bei Al-FLEK
5. Annäherung der Reststrompegel von FLEK und FEK an die Werte (nA- und pA-Bereich), die in Form des hohen spezifischen Widerstandes ($> 10^{15}\ \Omega\text{cm}$, vgl. /6/) der Oxidielektrika als potentielle Reserve vorliegen.
6. Reduzierung des Serienwiderstandes bei höchstkapazitiven (pro Volumeneinheit!) Kondensatoren durch konstruktive Maßnahmen und Weiterentwicklung des Katodenmaterials, d.h. der Flüssig- und Festelektrolyte
7. Entwicklung von leistungsfähigen - insbesondere aus der Sicht der Zuverlässigkeit bzw. Temperaturstabilität - Al-FEK-Chipkondensatoren:

Ein Vergleich der Impedanz-Frequenz-Charakteristik von Ta- und Al-FEK in Bild 12 am gleichen Bauelementetyp /12/ weist auf einen prinzipiellen Vorsprung der Al-Bauelemente hin. Dies gilt nicht nur wie in diesem Beispiel für MnO_2 als Festelektrolyt, sondern auch für organische Katodenmaterialien /13/, auf die in /14/ näher eingegangen wird.

8. Entwicklung spannungsfester ultrahochkapazitiver (100 F(!) -Bereich) Elektrolytkondensatoren, u. a. durch bedeutende Reduzierung der dielektrischen Oxiddicke.

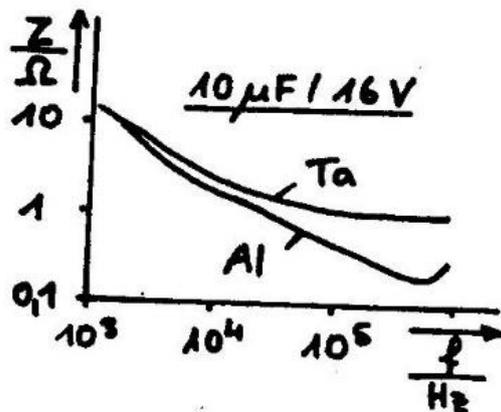


Bild 12:

Vergleich der Impedanz-
Frequenz-Charakteristik
von Ta-FEK und Al-FEK
mit MnO_2 -Festelektrolyt

Die wenigen in diesem Abschnitt angesprochenen Beispiele zeigen bereits, daß Kondensatoren nach wie vor einen Gegenstand von hohem Innovationsgehalt darstellen. Es sind schwierige Aufgaben bis hin zur Grundlagenforschung zu lösen, die an die betroffenen Forscherkollektive in den hochentwickelten Industriestaaten, zu denen auch die DDR gehört, hohe Anforderungen stellen.

Es kann dabei auf einen breiten Fundus von Erfahrungen zurückgegriffen werden. Vor allem kommt es darauf an, die in der DDR vorhandenen verfahrens- und ausrüstungstechnischen Potentiale interdisziplinär zu nutzen.

5. Spezielle technologische Trends

Die spezielle technologische Trendentwicklung läßt sich nach folgenden Aspekten ordnen:

1. Substitution
 - 1.1 Materialsubstitution
 - 1.2 Technologiesubstitution
 - 1.3 Funktionelle Substitution
2. Bauelementeanpassung
 - 2.1 Anpassung an vorhandene Verdrahtungsträger
 - 2.2 Technologische Integration
3. Neue Anwendungsgebiete
 - 3.1 Neue funktionelle Anforderungen

- 3.2 Nutzung neuer physikalischer Effekte
- 4. Gebrauchswertterhöhung
 - 4.1 Erhöhte funktionelle Anforderungen
 - 4.2 Zuverlässigkeitserhöhung

Der allgemeine Entwicklungstrend der passiven Bauelemente unter diesen Gesichtspunkten bei Berücksichtigung spezieller Kondensatorbelange wurde vom Autor kürzlich in /2/ eingeschätzt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden soll.

Kondensatoren bieten, wie praktisch alle elektronischen Bauelemente, Ansatzpunkte in breiter technologischer Front. Man kann sich leicht einen Überblick über die Möglichkeiten schaffen, wenn man davon ausgeht, daß die Weiterentwicklung von Kondensatoren vor allem durch Fortschritte auf folgenden Gebieten profitiert:

- Schichttechnologie,
- Folientechnologie,
- Teilchen- und Sintertechnologie,
- Halbleitertechnologie,
- Imprägniertechnologie,
- Umhülltechnologie.

Tabelle 5 gestattet einen stichwortartigen Überblick über betroffene Konstruktionselemente und Probleme wichtiger Kondensatorgruppen. Es sei auf die zahlreichen Beiträge in diesem Tagungsberichtsband hingewiesen, die sich gerade mit diesen Dingen detailliert befassen.

Es ist selbstverständlich in diesem Rahmen auch nicht annähernd möglich, alle zukunftssträchtigen fundamentalen Verfahren anzusprechen, die perspektivische Bedeutung für die Kondensatorentechnik haben. Doch sei abschließend auf einige Dinge näher eingegangen, die gerade unter dem Aspekt der Miniaturisierung von Kondensatoren durch Einzug der Schichttechnik in das Basistechnologiekonzept große Bedeutung haben dürften:

- a) Laser als Strukturierwerkzeug

Nach /15/ gelang die Reduzierung der Leitbahnstruktur-

Tabelle 5: Technologische Entwicklungsschwerpunkte wichtiger Kondensatorgruppen

Kondensator- gruppe	Kunststoff- kondensatoren	Keramik- kondensatoren	Elektrolyt- kondensatoren	Schicht- kondensatoren	Halbleiter- kondensatoren
Technologie					
Schichttechnologie	polymere Schichtdielektrika, Metallisierung, Stirnflächenkontaktierung	Metallisierung, Kontaktierung	Oxiddielektrika	Schichtdielektrikum, -elektroden, -kontaktierung	Feldoxid, Grenzschichten
Folientechnologie	Papier- und Kunststoffdielektrika, Metallelektroden	Keramikfolien	aufgerauhte Anoden- und Katodenfolien, Papierseparatoren	Substrate (Mehrlagenkeramik, isolatorbeschichtete Metalle, Akustoeinkristalle, Mehrlagenkunststoffe, Verbundlamine)	Halbleiterscheiben
Teilchen-/Sinter- technologie		Keramikpulver	Anodenventilmetallpulver	Dickschichtpasten	
Halbleitertechnologie		Sperrschichten (Korngrenzen, Oberflächen)	Festelektrolyte (MnO_2 , organische CT-Komplexe)	Poly-Si-Elektroden	aktivierte NT-CVD, Mikrostrukturierung, Ionenimplantation
Imprägniertechnologie	nichttoxische Imprägniermittel	Leiterpasten (in Durchgangslöchern)	Betriebslektrolyte, Salzlösungen (MnO_2 , CT-Komplexe)		
Umhülltechnologie	organische Vergußmittel	organische Beschichtungen (elektr.gestützt)	Kunststoffumhüllung (Tauchen)	Kunststoffumhüllung (Tauchen, Passivierung)	Kunststoff-u.anorg. Passivierung)

breiten bei Dickschichten (10 bis 30, μm dick) von 70, μm auf ca. 20, μm und des Durchmessers von Durchgangslöchern von 150 auf ca 20, μm durch Pastenentwicklung (Einsatz spezieller organischer bzw. Glasbinderkomponenten) und Einsatz von Nd-YAG-Impulslasern der Leistungsdichte 10^9 Wcm^{-2} (vgl. Bild 13a).

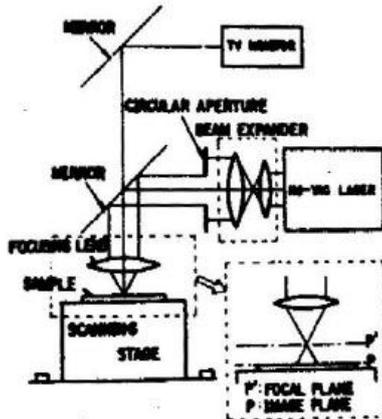
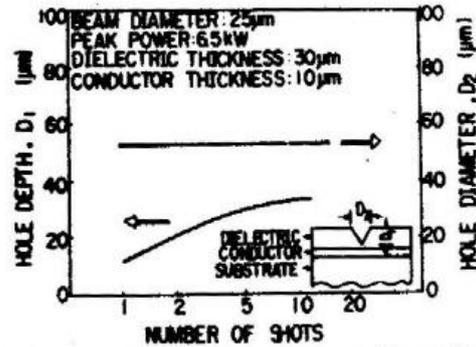


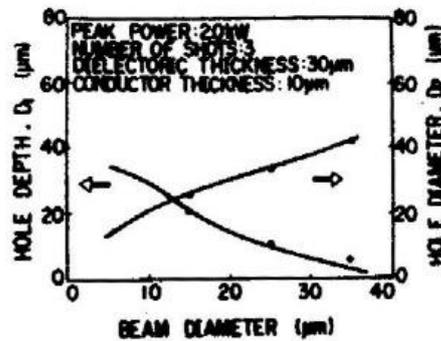
Fig. 13a. Experimental laser system diagram. A substrate is set on plane P in conductor formation and is set on plane P' in via hole formation.



Hole depth and hole diameter evaporated by a pulsed laser beam.

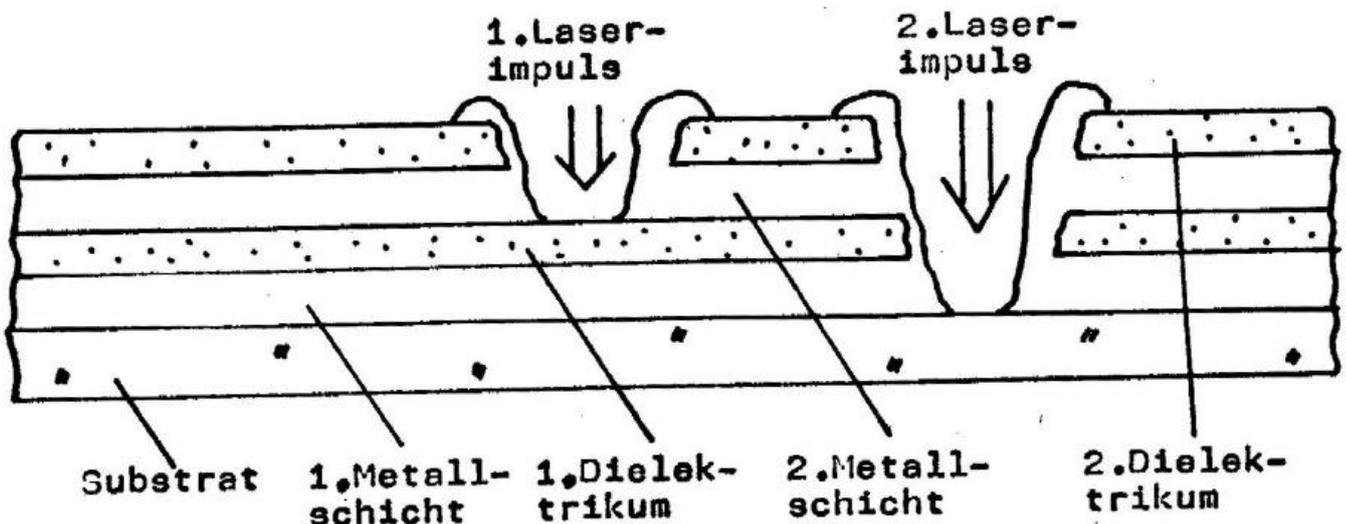
b)

Bild 13:
Laserstrukturierung und
-bohren von Dickschichten



Relationship between pulsed laser beam diameter and hole depth as well as hole diameter.

c)



d)

Das Substrat wird ganzflächig siebbedruckt. Durch Laserbeschuß im Impuls-Raster-Betrieb erfolgt eine chemische Verfestigung der organischen Binderkomponenten im Bereich der Schichtanteile, die beim nachträglichen Ätzen mit einem speziellen organischen Ätzsystem stehen bleiben sollen. Erst danach erfolgt das übliche Pastensintern. Man darf annehmen, daß sich diese Methode zur Strukturierung dielektrischer Dickschichten eignet.

b) Laser als Bohrwerkzeug

Für kapazitive Mehrschichtstrukturen sind Alternativen zur Zusammenfassung von Elektrodenschichten gegenüber dem in Bild 10e dargestellten Prinzip wünschenswert. Dies gelingt durch Laserbohren dielektrischer Schichten. Bild 13b und c zeigt die nach /15/ erzielten Ergebnisse (Lochdurchmesser und -tiefe) unter Anwendung der in Bild 13a skizzierten Laseranlage. Parameter sind die Anzahl der Laserschüsse bzw. der Strahldurchmesser. Das denkmögliche Kontaktierprinzip für Schichtkondensatoren ist in Bild 13d schematisch veranschaulicht.

c) Strukturierung dünner organischer Schichten

Bild 14 zeigt schematisch einen Mehrstufen-Ätzprozeß nach /16/ zur Strukturierung relativ dicker (0,5 bis 5 μm) Polyimidschichten. Eine sehr dünne, nach einem speziellen fotochemischen NT-CVD-Verfahren aufgebraachte SiO_2 -Unterschicht schützt die freizuätzende Leiterbahn beim 1. Ätzschritt. Sie wird dann selektiv entfernt. Eine erneute Zwischenbelichtung mit größerer Maskenöffnung bereitet einen etwas größeren Bereich des Polyimids für den nächsten selektiven Ätzschritt vor. Unerwünschte Unterätzungen bzw. andere Ätzschädigungen bleiben weitgehend aus. Abschließend erfolgt die 2. Metallbeschichtung einschließlich der gut ausgebildeten Hänge am Polyimidrand. Auf diesem Gebiet bereitet die Halbleitertechnik umfangreiches, für Schichtkondensatorbauelemente bzw. -teile nutzbares Material vor.

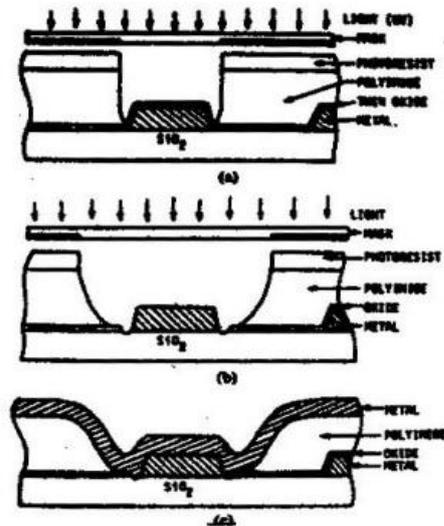


Bild 14: Mehrstufenätzprozess zur Kontaktierung von Mehrebenenleitbahnen

6. Literatur

- | | | |
|------|-------------------|--|
| /1/ | Hein, H. | Siemens Comps. 20 (1982) 123 |
| /2/ | Langer, H.-D. | Nachrichtentechnik/Elektronik 32 (1982) 401 |
| /3/ | | Elektronik 4 (1982) |
| /4/ | Blaschta, F. u.M. | s. in diesem Berichtsband |
| /5/ | Langer, H.-D. | Feingerätetechnik 30 (1981) 358 |
| /6/ | Burghardt, H. | wie /4/ |
| /7/ | Gesemann, H.-J. | wie /4/ |
| /8/ | Thust, H. u.M. | wie /4/ |
| /9/ | Thust, H. u.M. | wie /4/ |
| /10/ | Danielsson, H. | Elektronik 23 (1981) 55 |
| /11/ | Chance, D.A. u.M. | IEEE Trans. CHMT-5 (1982) 368 |
| /12/ | Both, J | nachrichten elektronik 35 (1981) 153 |
| /13/ | Langer, H.-D. | Festkörperelektrolytkondensatoren Akademie-Verlag, Berlin (1982) |
| /14/ | Berger, W. u.M. | wie /4/ |
| /15/ | Ohsaki, T. u.M. | IEEE Trans. CHMT-5 (1982) 382 |
| /16/ | Wade, T.E. | IEEE Trans. CHMT-5 (1982) 516 |