

Stand und Entwicklungstrends der passiven Bauelemente

H.-D. Langer, KDT, Karl-Marx-Stadt

Mitteilung aus der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Physik, Elektronische Bauelemente

Deskriptoren: Bauelemente, passiv; Materialsubstitution, Technologiesubstitution, funktionelle Substitution; Bauelemente-anpassung; technologische Integration, Anwendungsgebiete; Gebrauchswertsteigerung

Die Entwicklung der integrierten Halbleiterschaltkreise ist heute der absolute Maßstab der elektronischen Innovationsrate. Zur Charakterisierung einiger wichtiger internationaler Trends dient die Zusammenstellung in Tafel I. Der Vorrangstellung der aktiven Bauelemente stehen die außergewöhnliche funktionelle Breite und die Vielfalt der physikalisch-chemischen Effekte der passiven Bauelemente entgegen, die sie traditionell und auch heute noch zunehmend haben bzw. benutzen.

Viele der diskreten passiven Bauelemente unterlagen zwar bereits frühzeitig dem Miniaturisierungstrend, doch blieb ein Nachlauf gegenüber den völlig auf Festkörpermonolithkonzepten beruhenden Bauelementen bestehen. Auf Grund dieser Tatsache fehlte es nicht an Bestrebungen, bestimmte Bauelementegruppen, wie Kondensatoren und Widerstände, vollständig zu substituieren, indem man ihre Funktion überflüssig macht. Obgleich diesem Herangehen ein gewisser rationaler Kern anhaftet, worauf noch einzugehen ist, hat die Praxis beinahe das Gegenteil bewiesen. Das kann man aus dem Umsatzwachstum wichtiger Wirtschaftsmärkte elektronischer Bauelemente ablesen. Im einzelnen erkennt man in den entsprechenden Diagrammen folgendes:

a) (Bild 1a)

- bei annähernd linearer Wachstumsrate haben die passiven Bauelemente noch lange den höchsten absoluten Marktanteil
- die Wachstumsrate der integrierten Schaltkreise ist progressiv
- optoelektronische Bauelemente haben einen bedeutenden absoluten Umsatz erreicht.

b) (Bilder 1 b bis 1 d)

- der relative Anteil passiver Bauelemente (trotz geringfügiger Abnahme bei Festwiderständen und -kondensatoren) ist annähernd konstant
- integrierte Schaltkreise (einschließlich Hybridschaltkreisen) und optoelektronische Bauelemente zeigen ansteigende Tendenz
- eine rückläufige Tendenz verzeichnet man bei diskreten Halbleiter- und Röhrenbauelementen.

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 Rechen-, die Energiequellen- und die Sensortechnik sowie andere Richtungen zunehmend spezialisierte Anforderungen. Dadurch werden z.T. ungeahnte Innovationsimpulse gerade in bezug auf passive Bauelemente ausgelöst. So

stellt die Solarzelle nicht nur neuartige schaltungstechnische Anforderungen, etwa im Sinne von Stabilisierschaltungen zur Kompensation von Lichtintensitätsschwankungen bzw. von Wandler- und Steuerschaltkreisen (z.B. beliebige Frequenz, beliebige Spannungspegel, andere Energieformen) für Motorantriebe, sondern es leiten sich auch eindeutige Kriterien für die Einzelbauelemente ab (vgl. Abschn. 2.1.).

Traditionell kommt der Fortschritt elektronischer Bauelemente für jedermann sichtbar in der Heim- und in der Kfz.-Elektronik zum Ausdruck. Es zeichnet sich in breitem Stil der künftige Einsatz von Mikroprozessorsteuerungen z.B. für Video-, Radio- und Telefonsysteme unter Nutzung der Digitaltechnik ab. Die Palette der Neuerungen reicht von reparaturfreundlicher Gerätegestaltung und Verbesserung der Service-Leistungsfähigkeit über Videotext, Bildschirmtext, Videokassetten- bzw. Videoplatten-Geräte, Tasten- bzw. Bildtelefon bis hin zu Flachbildschirm- und Taschenfernsehgeräten bzw. vollelektronischen fotografischen Geräten.

Der Übergang von Wechselstrom- auf Gleichstrom- bzw. Impulsbetrieb reduziert z.B. den spezifischen Wechselstrom-Abschirmaufwand, doch ist gerade das Problem der Unterdrückung von Störspannungen in Betriebsnetzen (Verzerrungen, Flackeranteile, Störimpulse) durchaus noch nicht zufriedenstellend gelöst. Schwerpunkte der daraus resultierenden Weiterentwicklung auf dem passiven Sektor sind u.a. integrierte R-, RC- bzw. RCL-Schichtnetzwerke (z.B. aktive RC-Filter) sowie Hybridschaltkreise, deren Spektrum bereits heute beispielsweise bis zu kompletten Dickschicht-Empfängerschaltkreisen reicht. Die diskreten Bauelemente müssen klein, verlustarm, frei von parasitären Komponenten und zuverlässig sein. Diese Aufgabe erfüllen künftig aus mikroelektronischer Sicht nur leiterplatten- bzw. hybridgerechte Bauelemente in integrierter bzw. Chipbauforn.

Was heute noch als Präzisionsmerkmal gilt (z.B. Widerstandstoleranz $\pm 1\%$ im $k\Omega$ -Bereich), wird in naher Zukunft, z.B. für Schaltnetzteile der Heimelektronik, eine normale Anforderung sein. Demgegenüber werden Schichtschaltungen wegen der entwicklungs-fähigen lithografischen Strukturierverfahren und des Laserstrahl-Funktionsabgleichs erhöhten Anforderungen genügen können (z.B. Parametertoleranz $< \pm 0,1\%$, Temperaturkompensation von RC-Strukturen, Frequenzstabilität $< \pm 0,1\%$). Zur verbalen Einschätzung des Entwicklungstrends bei passiven Bauelementen kann man folgende Gesichtspunkte heranziehen: Die Substitution betrifft Materialien, Technologien und die Funktion selbst. Bauelemente paßt man an Verdrahtungsträger an, oder es findet ein Angleich im Rahmen einer Technologie mit erhöhtem Integrationsgrad statt. Neue Anwendungsgebiete stellen spezifische Anforderungen oder entstehen auf der Grundlage bisher ungenutzter physikalischer Effekte. Ein weiterer Entwicklungstrend resultiert aus erhöhten

Fortsetzung von Seite 400

führen technische Neuerungen, die durch den Einsatz der Mikroelektronik zustande kommen, nicht zwangsläufig zu einer Bereicherung der Arbeitsinhalte. Technische und ökonomische Gründe können diesem Anliegen zumindest zeitweilig entgegenstehen.

Folgende Gesichtspunkte sind bei der gesellschaftlichen Beherrschbarkeit der Mikroelektronik im Sozialismus zu berücksichtigen:

- Die Mikroelektronik ist Bestandteil des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, der sich in unserer Gesellschaftsordnung auf der objektiven Grundlage sozialistischer Macht- und Eigentumsverhältnisse vollzieht.
- Mikroelektronik als bedeutsames Element revolutionierender Produktivkraftentwicklung löst Neues in der Technik, in der

materiell-technischen Basis, auf dem Gebiet der Arbeits- und Lebensbedingungen, im Kultur- und Geistesleben usw. aus.

— Die Mikroelektronik und alle Probleme ihrer technischen Nutzung können im Sozialismus beherrscht werden, weil Schöpferertum, Tatendrang und Entwicklungsfähigkeit der werktätigen Menschen eine wichtige Potenz bei der Lösung dieser Aufgabe ist.

— Die Probleme, die die Entwicklung der Mikroelektronik mit sich bringt, treiben den wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt voran.

NaK 8936

Prof. Dr. sc. phil. Eberhard Jobst, Prorektor für Gesellschaftswissenschaften, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 9010 Karl-Marx-Stadt, P 5 F 964

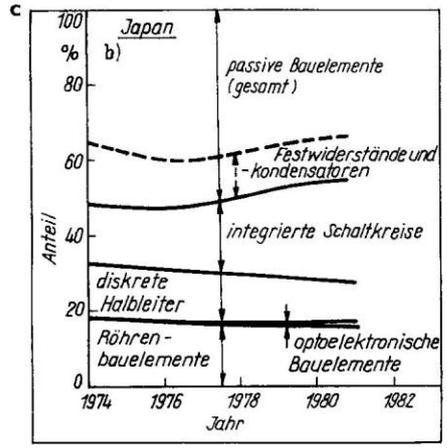
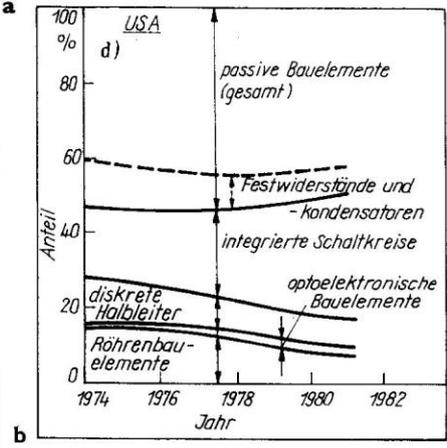
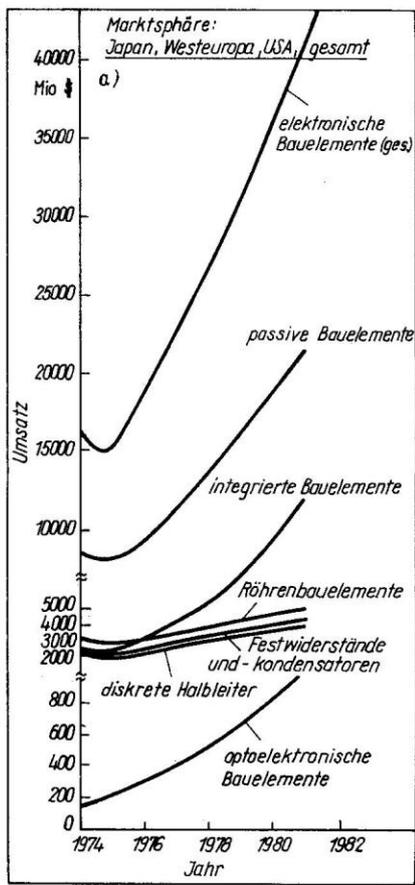


Bild 1. Bauelementumsatz und -umsatzanteile westlicher Marktsphären

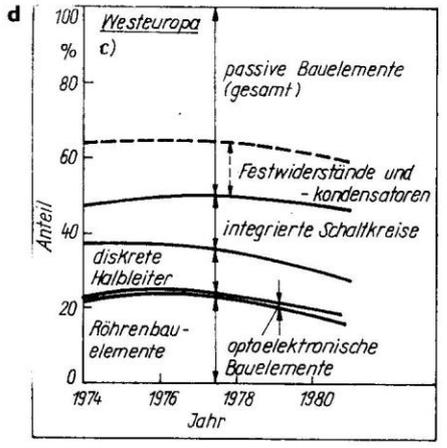


Bild 2. Entwicklung der spezifischen Oberfläche bei Anodenrohstoffen und -halbzeugen sowie am Bauelement bei Elektrolytkondensatoren mit flüssigem und festem Elektrolyt

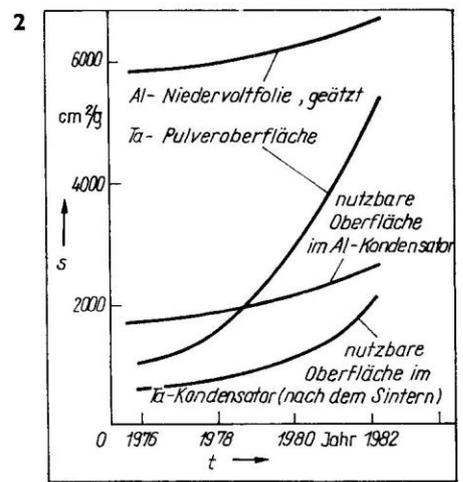
Gebrauchsansprüchen in Form erweiterter Parameterbereiche bzw. erhöhter Zuverlässigkeit. Die erwähnten innovativen Richtungen sollen nachfolgend an Hand von Beispielen erläutert werden.

1. Substitution

1.1. Materialsubstitution

Durch die Miniaturisierung selbst entstehen gegenwärtig die größten Effekte auf dem Gebiet der Materialökonomie. Gerade auf solchen materialintensiven Gebieten wie der Leistungselektrotechnik bis hin zur Höchstspannungstechnik, wo diskrete bzw. in Baugruppen zusammengefaßte passive Bauelemente nach wie vor eine wichtige Aufgabe zu erfüllen haben, wird man durch erhöhte Materialausnutzungsgrade dem angedeuteten Trend Rechnung tragen müssen. Passive Bauelemente nutzen praktisch alle Elemente des Periodensystems. Schwerpunkt nicht nur auf dem passiven Sektor (aber dort doch hauptsächlich) der Elektronik bzw. Mikroelektronik war in jüngster Zeit die Edelmetalleinsparung. Der nicht abgeschlossene Haupttrend ist die Einführung von edelmetallfreien (z.B. NiCr-Cu für Keramik-kondensatoren, NiCr-Al-FeNi für Dünnschichtnetzwerke) bzw. edelmetallarmen Mehrschichtkontaktsystemen (z.B. NiCr-Pd-1,5 µm Au für Ta-Dünnschichtnetzwerke, Ni-3 µm Pd-0,2 µm Au für Steckverbinder). Auch bei Dickschichtpasten (edelmetallfrei: z.B. Polymerpasten, Cu-Paste; edelmetallarm: z.B. CdO-RuO₂-Pasten) ist dieser Substitutionstrend erkennbar und hat zu Neuentwicklungen auf dem passiven Sektor geführt (u.a. Potentiometer mit leitenden Polymerschichten als Widerstandsbahn).

Die Preise für Edelmetalle werden z.T. künstlich hochgehalten. Es gibt daneben zahlreiche Rohstoffe mit begrenzter Verfügbarkeit, deren Preise ebenfalls stark gestiegen sind und denen auf Grund ihres relativ hohen Verbrauchs für passive Bauelemente gleichrangige volkswirtschaftliche Bedeutung zukommt. Als Beispiel sei Tantal genannt, das mit einem maximalen Verunreinigungsgrad von etwa 50 ppm neben Aluminium den Basiswerkstoff von Elektrolytkondensatoren ausmacht. Es geht auch hier um die Erhöhung der Materialausnutzungsgrade. Bild 2



zeigt am Beispiel der gewichtsspezifischen Oberfläche s von porösen Al- bzw. Ta-Anoden, daß noch eine zu große Diskrepanz zwischen prinzipiell verfügbarer und im Bauelement nutzbarer Oberfläche besteht.

Abgesehen davon, daß sich auch künftig Neuentwicklungen durch Materialsubstitution (z.B. Ta durch Al bei Kondensatoren) anbieten werden, muß sich die Forschung künftig verstärkt der Materialrückgewinnung im Sinne der Aufbereitung für den gleichen Zweck zuwenden.

1.2. Technologiesubstitution

Bewährte Technologien einer Bauelementefamilie wurden schon immer in den Bereich anderer übernommen. Das ist ein Prozeß, der sich auch künftig verstärken wird und den ein entsprechendes Ausrüstungs- und Know-how-Angebot auf dem Markt begünstigt. Einige Beispiele der Technologiesubstitution sind in Tafel 2 genannt.

Tafel 1. Trends der Elektronik-Entwicklung

Entwicklungsrichtung	Entwicklungsaspekte und -trends
Halbleiterbauelemente	<p>Kostenreduzierung Entwurf, Fertigung und Bestückung automatisch</p> <p>Vergrößerung der Funktionskomplexität hochdichte Verdrahtungsträger, kundenspezifische Einchip-Lösungen, Mbit-Einchip-Speicher, Gbit-Tischrechner in Modulbauweise auf Basis keramischer Mehrebenenverdrahtungsträger, computergestützte automatische Fertigungsprüfung</p> <p>Innovationsprodukte Realisierung diskreter und integrierter optoelektronischer Funktionen, überproportionale Entwicklung von integrierten Sensorbauelementen, Herstellung zuverlässiger Leistungsbauelemente, umfassende Nutzung hybridtechnischer Lösungen</p> <p>Zuverlässigkeitserhöhung thermokompatible Konstruktion, erhöhte Strebfaktoren</p>
Passive Bauelemente	<p>Miniaturisierung/Kostenreduzierung LSI- und VLSI-Anpassung in Funktion und Bauform, funktionelle Integration auf einem Substrat, Einführung von Schichttechniken in die Bauelementefertigung, Automatisierung von Fertigung und Bestückung</p> <p>Werkstoffentwicklung Optimierung des Edelmetalleinsatzes, breiter Einsatz von neuen Schichtwerkstoff-Strukturen, überproportionale Entwicklung ferroelektrischer und anderer Keramiken</p> <p>Innovationsprodukte integrierte akusto- und magneto-elektronische Bauelemente, Hybridschaltkreise, diskrete und integrierte Sensorbauelemente, Display-Strukturen</p> <p>Zuverlässigkeitserhöhung erhöhter Forschungs- und Entwicklungs-Aufwand vor der Produktionsüberleitung, rechnergestützte Konstruktion, Entwicklung von Kontaktiersystemen mit erhöhter Lebensdauer, rechnergestützte Funktionsprüfung am bestückten Verdrahtungsträger, reparaturfreundliche Konstruktion, erhöhter Selektionsaufwand in der Fertigung</p>
Leistungselektronik	Entwicklung von Leistungselementen mit höherer Belastbarkeit und gleichzeitig gesteigerter Temperaturstabilität bzw. verbesserten Kühlsystemen, Reduzierung der Rückkopplungsstörungen von Versorgungsnetzen, Abmessungsminiaturisierung
Meßtechnik	Mikroprozessorsteuerung/automatische Datenauswertung, Standardisierung, Innovationsprodukte auf der Basis neuer bzw. angepaßter Sensorfunktionen, Meßadapterentwicklung
Regelungstechnik und Prozeßautomatisierung	Entwicklung neuartiger Meßfühler und Industrieroboter, umfassender Einsatz der Prozeßrechner- und Verbindungstechnik mit leistungsfähigerer Hardware, Praxiswirksamkeit kleinerer BMSR-Systeme (u.a. elektronische Kraftfahrzeugausrüstungen, Heimelektronik, Medizintechnik)
Fernmelde- und Nachrichtentechnik	verstärkte Anwendung der Digitalverfahren, Realisierung störungsarmer Codiermethoden (z. B. PCM-Technik), Einführung breitbandiger Übertragungssysteme in Verbindung mit Lichtleitertechnik (40 bis 400 MHz), Entwicklung der exterrestischen Techniken (Satellitenempfang), Umgestaltung der nachrichtentechnischen Heimelektronik, Entwicklung integrierter Signalspeichersysteme

Die Halbleitertechnologie hat eine Reihe weiterer Basisverfahren anzubieten, die bisher im Bereich der diskreten und integrierten passiven Bauelemente nur sehr begrenzt bzw. überhaupt nicht genutzt werden. Dazu gehören

- epitaktische Abscheidung von Schichten mit kontrollierter Real- und Geometriestruktur
- chemische Abscheidung von dünnen Schichten aus der Gasphase
- Dotierung durch Ionenimplantation
- Strukturierung durch Trockenverfahren (Plasma-, Ionenätzen, Elektronen- und Röntgenstrahlolithografie)
- Passivierung mit dünnen Isolatorschichten.

Der innovative Gehalt dieser und anderer anspruchsvoller Verfahren wird in dem Maß zur Geltung kommen, wie die passiven Bauelemente im Zuge der weiteren Miniaturisierung zunehmend auf der Basis von Schichtkonstruktionen realisiert werden.

1.3. Funktionelle Substitution

Eine Substitution diskret realisierter passiver Funktionen (RLC-Funktion, elektromechanische Funktionen) geschieht mit Einführung eines jeden neuen Halbleiter- bzw. Hybridschaltkreises in großem Maßstab. So ersetzen beispielsweise Leistungsschaltkreise zunehmend die Aufgabe diskreter Relais zur Realisierung des Impulsschaltens (einschließlich Gleichstrom). Umwäzand dürften die Auswirkungen auch sein, wenn es gelingt — wie erfolgreiche Anfänge beweisen — in großem Stil bei direktem Netzanschluß die Strom-Spannungs-Versorgungsaufgabe in den integrierten Schaltkreis einzubeziehen. Selbst die Vorstellung vom konventionellen Schaltnetzteil im Hybridschaltkreis ist zugelassen, da der Hybridgerechte Transformator bereits erfunden ist. Der dritte Weg, die Stromversorgung aus miniaturisierten Energiespeichern bzw. -generatoren (Batterien auf Li-Basis, Solarzellen auf Si-Basis), ist längst beschritten bzw. bahnt sich an.

Tafel 2. Einige Beispiele der Technologiesubstitution

Prozeßschritt	Großtechnische Erstanwendung	Sekundäranwendung
Vorfertigung		
Einkristallines Substrat	Halbleiterbauelemente	Solarzellen, akusto-elektrische Bauelemente, piezoelektrische Dehnungsgeber
Beschichtung durch Bedampfen	Dünnschichtnetzwerke	Wickelkondensatoren
Beschichtung durch Hochratezerstäubung	Dünnschichtnetzwerke	elektroakustische Membrangeber und -empfänger (z. B. Kondensatorlautsprecher), magnetoelektrische Geber und Empfänger (z. B. Magnetonköpfe), Mikrowellen-Streifenleiter-Bauelemente
Siebdruck Beschichtung	Dickschichtnetzwerke	Dickschichtthermistoren, -feuchtesensoren, -pH-Sensoren
Fotolithografische Strukturierung	monolithische Halbleiterschaltkreise	akusto-elektrische Oberflächenwellen-Bauelemente, Festkörperdisplays
Laserabgleich	Hybridschaltkreise	diskrete Schichtwiderstände
Endfertigung		
Reflow-Montage	monolithische Halbleiterschaltkreise	passive Chipbauelemente
Automatisierungsgerechte (Bestückung!) Plastumspritzung	monolithische Halbleiterschaltkreise	passive Chipbauelemente

Als Beispiel für den Substitutionstrend diskret passiv/diskret aktiv sei die Hochspannungskaskade genannt, die man in Europa mit metallisierten Wickelkondensatoren bestückt. Japan geht dagegen in der Fernsehtechnik in Richtung Dioden-Transformator-Vervielfacherschaltung voran. Schließlich ist es durchaus üblich, passive Funktionen untereinander zu substituieren, sofern damit gewisse Fortschritte erzielbar sind. Ein aktuelles Beispiel ist die L-Substitution im Filterbereich durch aktive Dünnschicht-RC-Filter (z. B. integrierte Ta-Technik).

Als Beispiel für den Substitutionstrend diskret passiv/diskret aktiv sei die Hochspannungskaskade genannt, die man in Europa mit metallisierten Wickelkondensatoren bestückt. Japan geht dagegen in der Fernsehtechnik in Richtung Dioden-Transformator-Vervielfacherschaltung voran.

Schließlich ist es durchaus üblich, passive Funktionen untereinander zu substituieren, sofern damit gewisse Fortschritte erzielbar sind. Ein aktuelles Beispiel ist die L-Substitution im Filterbereich durch aktive Dünnschicht-RC-Filter (z. B. integrierte Ta-Technik).

2. Bauelementeanpassung

2.1. Anpassung an vorhandene Verdrahtungsträger

Verdrahtungsträger gehören im weitesten Sinne zu den passiven Bauelementen, die durch ihre an moderne, vor allem integrierte Schaltungstechniken angepaßte Konstruktion die Bauformanforderungen an die übrigen elektronischen Bauelemente präzisieren (z. B. Rastermaß, Einbaubedingungen, Verlustleistung, parasitäre Komponenten). Die verschiedensten technisch-ökonomischen Gesichtspunkte haben gerade gegenwärtig zur Herausbildung zahlreicher Verdrahtungsträgervarianten geführt. Man kann annehmen, daß die zunehmende Spezialisierung keiner der neuen Varianten in Zukunft eine Vorrangstellung einräumen wird, wie sie die Leiterplatte hatte (und übrigens noch lange Zeit beibehalten wird).

Die Einlagen-, Mehrlagen- und flexiblen Leiterplatten auf Kunststoffbasis dienen der Realisierung der Makrointegration. Der Finalproduzent wird sich im Zeitalter der automatisierten Leiterplattenfertigung und -bestückung bei computergestütztem Chassis-Abgleich- und -Prüfprozeß zwischen diskreter, Baugruppen-, Modul- oder Einplatinen-Konzeption entscheiden müssen. Additive bzw. subtraktive Schichtverdrahtungsstrukturen in Trägerfilmtechnik (vgl. Bild 3) sind zumindest als Alternative zur flexiblen Leiterplatte Stand der Technik. Eine der Bestückungsautomatisierung besonders angepaßte Variante in Form der sogenannten MOP-Technologie (Metal Based

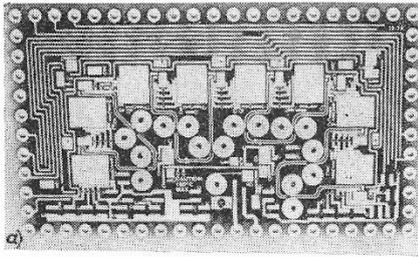


Bild 3. Varianten zum Foliekonzept bei Verdrahtungsträgern (Trägerfolientechniken)
a) Schichtschaltung in Sicufol-Technik
b) MOP-Technologie

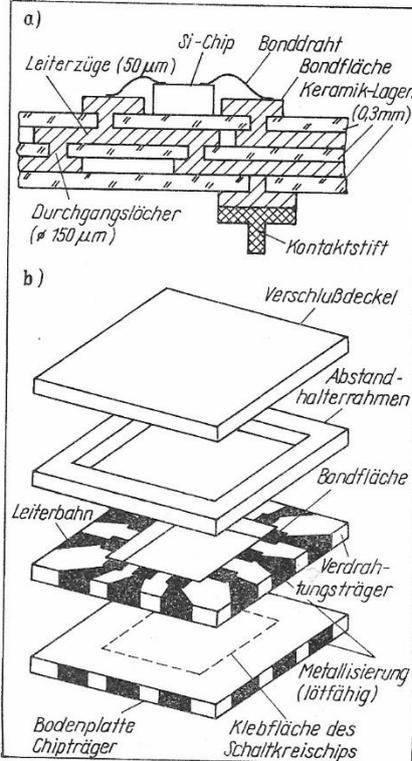
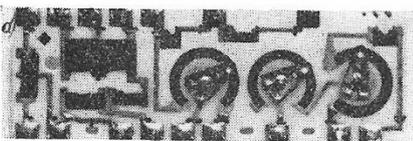
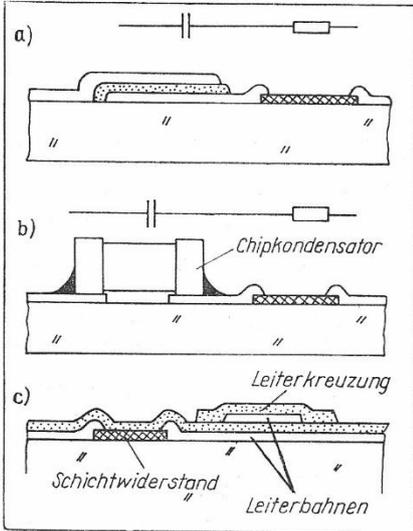
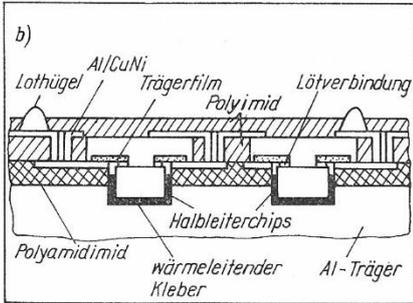


Bild 5. Moderne keramische Verdrahtungsträger (stark schematisiert)
a) Mehrlagenkeramik-Verdrahtungsträger
b) Chipcarrier (Verdrahtungsträger und Gehäuse)

Bild 4. Schichthybridschaltkreise mit passiven Komponenten (s. auch Titelbild)
a) Schichtschaltung
b) Schichtschaltung mit eingesetztem Chipkondensator
c) Schichtschaltung mit Mehrebenenleiterbahnen
d) integrierte Dickschichtschaltung mit Trimpotentiometern auf Keramiksubstrat (VEB Pentacon Dresden/VEB Elektronische Bauelemente Dorfheim)

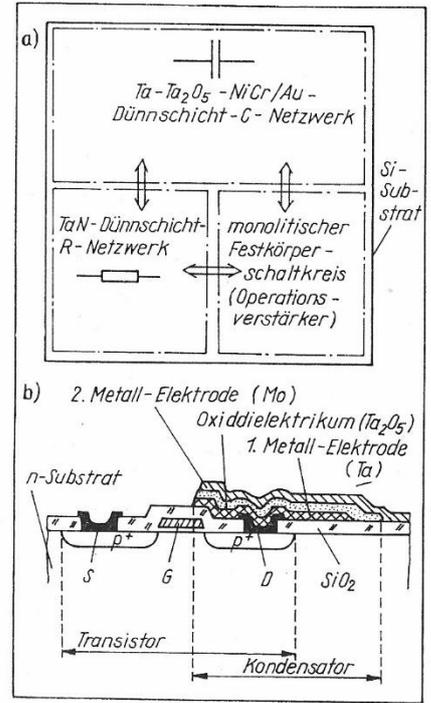


Bild 6. Technologische Integration in Si-Technik (entwicklungsfähige Varianten)
a) Mischtechnik auf Si-Substrat (Dünnschicht-RC-Netzwerk, monolithischer Festkörperschaltkreis)
b) Bauelementestapelung (Erschließung der 2. Bauelementeebene) in monolithischen Festkörperschaltkreisen

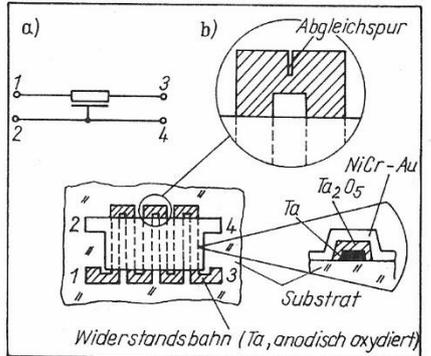


Bild 8. RC-Filter in Schichttechnik
a) Schaltungssymbol; b) verteilte RC-Struktur

Organic Polymer) wurde in Japan entwickelt; Trägerfilm ist hier eine Metallfolie, s. Bild 3 b. Einlagen- und Mehrlagen-Isolatorsubstrate sowie isolatorbeschichtete Metallsubstrate als Träger von Schichtstrukturen und Chipbauelementen entsprechen dem Basiskonzept der Hybridtechnik. Bild 4 zeigt einige Beispiele, die auch auf die Möglichkeiten der Vielschichtverdrahtung in Dick- und Dünnschichttechnik hinweisen. Die nahe Zukunft auf bestimmten Schwerpunktgebieten dürfte jedoch eindeutig den keramischen Mehrlagensubstraten gehören. So bilden etwa 30lagige Substrate (9 cm Kantenlänge), zusammengefaßt in wassergekühlten Modulen, die minimale Volumina einnehmen, als Träger von integrierten Schaltkreisen im Chipcarriergehäuse (Schaltkreisdichte $> 1 \text{ cm}^{-2}$) hochleistungsfähige Rechnerzentraleinheiten von außerordentlich geringen Abmessungen. Es leuchtet ein, daß die erwähnten modernen Verdrahtungsträger-Varianten auch für passive Bauelemente eindeutig den Kurs auf einsetzbare Chipbauelemente bzw. technologisch integrierte Schichtbauelemente festlegen (Bild 5). Auf die herausragende Bedeutung der Chipcarrier als Zwischenträger integrierter Schaltkreise kann hier an Hand einer entwicklungs-fähigen Variante nach Bild 5 b) nur hingewiesen werden. Mehrebenenverdrahtungen in reiner Halbleiter-Planartechnik sowie

zur Realisierung von Mischtechniken auf Halbleitersubstrat (z. B. laterale Integration von Schichtwiderständen bzw. von Ta-RC-Dünnschichtnetzwerken mit planaren Halbleiterschaltkreisen, s. Bild 6 a) haben zentrale Bedeutung erlangt. In diesem Zusammenhang ist die Feststellung bedeutsam, daß nach Angaben der Literatur die Lösung des Verdrahtungsproblems höchstdichter Halbleiterspeicher auf die Anwendung polymerer Isolatorzwischen-schichten (u. a. kondensationspolymerisierte Imide) führt. Polyimide sind auf Grund ihrer herausragenden Eigenschaften (vgl. Tafel 3) auch für andere Verdrahtungsträger und selbst für diskrete passive Bauelemente interessant. Nachdem die praktische Einführung der Mehrebenenverdrahtung bei monolithischen Festkörperschaltkreisen erfolgt ist, kann man mit dem schrittweisen Erschließen der zweiten Bauelementeebene rechnen. Bild 6 b) gibt dazu ein in der Literatur diskutiertes Beispiel an. Sollte sich diese oder eine ähnliche Variante durchsetzen, so dürfte die vorläufig höchste räumliche Konzentration passiver und aktiver Bauelemente möglich sein.

2.2. Technologische Integration

Die Entwicklungslinie der akusto-elektrischen Bauelemente, die hier als repräsentatives Beispiel angeführt werden soll, führt

Tafel 3. Eigenschaftsvergleich
 verschiedener Elektronik-Werkstoffe
 (E Elastizitätsmodul, σ_B Bruchfestigkeit, α_{th} thermischer Ausdehnungskoeffizient, λ thermische Leitfähigkeit, T_S Schmelztemperatur bzw. obere Einsatztemperatur, ϵ relative Dielektrizitätskonstante, E_D Durchschlagfeldstärke, ρ spezifischer elektrischer Widerstand)

Werkstoff	E 10^2 N/cm^2	σ_B 10^2 N/cm^2	α_{th} ppm/K	λ $\text{J/cm}^2 \text{ sK}$	T_S $^\circ\text{C}$	ϵ	E_D 10^6 V/cm	ρ $\Omega \text{ cm}$
Si	1,6	1200	2,3	1,5	1420	11,7 - 12	0,1	10^5
Al	70	7 - 17	25	2,4	660	-	-	$2,5 - 10^{-6}$
Mo	$(27 - 32) \cdot 10^4$	120 - 200	5,5	1,5	2610	-	-	$36 \cdot 10^{-6}$
Ta	$(19 - 27) \cdot 10^4$	35 - 150	6,5	0,54	2996	-	-	$12,4 \cdot 10^{-6}$
SiO_2	0,7	14	0,3 - 0,5	0,021	1710	3,5 - 4,0	1 - 10	$> 10^{16}$
Si_3N_4	1,6	64	2,5 - 3	0,12	1900	7 - 10	1 - 10	$> 10^{12}$
Al_2O_3	3,7	280	9	0,33	2050	7 - 9	$> 0,1$	10^{14}
Polyester	$(4,5 - 7,0) \cdot 10^3$	22 - 28	0,0013	260	2,9 - 3,6	1,4 - 5,1	$< 10^{18}$	
Polypropylen	$(1,4 - 4,6) \cdot 10^3$	2,2 - 3,5	3,8 - 9	0,0012 - 0,0017	150	2,2 - 2,7	$< 0,5$	$10^{12} - 10^{17}$
PTFE	$(3,5 - 7,0) \cdot 10^3$	1,4 - 3,5	5,5	0,0025	< 400	2,0 - 2,2	< 4	10^{18}
Polyimid	300	3,5 - 17	20 - 70	0,0017	< 500	3,5 - 3,8	1	$10^{16} - 10^{17}$

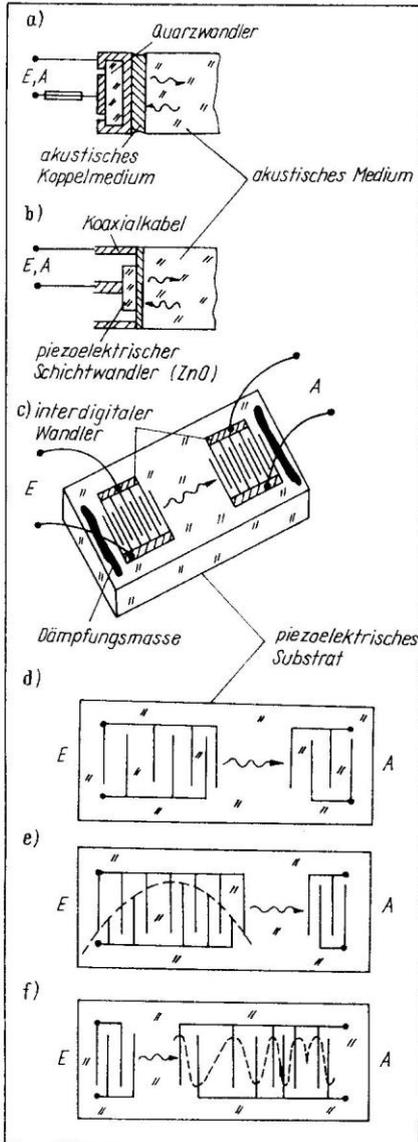


Bild 7
 Entwicklungslinie akustoelektrischer Bauelemente
 a) konventionelles akustoelektrisches Bauelement, (E Eingang, A Ausgang)
 b) Wandlerbauelement mit Dünnschichtkonstruktion
 c) akustoelektrisches Oberflächenwellen-Bauelement
 d) Verzögerungsleitung
 e) Filter
 f) Korrelator

eindeutig von den Volumenschwinger- zu den Oberflächenwellen-Bauelementen, wobei, wie aus Bild 7 hervorgeht, viele Elemente der Substitution (Material: Quarz \rightarrow Lithiumniobat, Technologie: konventionell \rightarrow Schichttechnik) wirksam den Übergang gestalten und bei den sicher noch länger im Angebot verbleibenden Volumenbauelementen zu beträchtlichen Verbesserungen geführt haben. Den entscheidenden Durchbruch brachten die kammartigen Dünnschichtkondensatorstrukturen, die unter der Bezeichnung interdigitaler Wandler bekannt geworden sind. LiNbO_3 -Einkristalle zeichnen sich gegenüber Quarz durch den 10fachen Kopplungsfaktor aus. Oberflächenwellen-Frequenzfilter für die Fernseh- und Kfz-Elektronik ergeben eine beträchtliche Volumenverkleinerung und erübrigen die Trimmfunktion der konventionellen diskreten LC-Filter, da diese Aufgabe in einem Schritt mit der Strukturierung über lithografische Prozesse bei einer Toleranz von weniger als

$\pm 0,1 \mu\text{m}$ übernommen wird. Die Entwicklung geht in Richtung höherer elektronischer Integration auf einem Substrat. So wird man durch Anwendung von Chipbauelementen (z. B. Vorverstärker-Halbleiterschaltkreise) und Schichtbauelementen der Hybridtechnik (z. B. RC-Filternetzwerke) die Funktionskomplexität in Zukunft beträchtlich erhöhen können. Das Angebot an R-Schichtnetzwerken in der DDR und von entsprechenden integrierten RC- bzw. RLC-Netzwerken im Weltmaßstab hat bereits beträchtliche Dimensionen angenommen. Einen hohen Grad technologischer und funktioneller Integration repräsentieren verteilte RC-Netzwerke, z. B. vom Mäandertyp, die mit Hilfe der integrierten Ta-Dünnschichttechnik hergestellt werden. Das Symbol in Bild 8a entspricht der gekoppelten Widerstands-Kondensatorstruktur in Bild 8b. Die praktische Realisierbarkeit solcher Anordnungen basiert ebenfalls auf den verfügbaren lithografischen Strukturieretechniken. Der Präzisionsabgleich erfolgt mit Hilfe des Laser- bzw. Elektronenstrahls (vgl. Bild 8b), wobei eine Temperaturkompensation des RC-Produkts bei hoher Langzeit-Frequenzstabilität im weiten Temperaturbereich möglich ist.

Moderne Hybridschaltkreise, die auf Schichtnetzwerken basieren und durch Einbau diskreter und integrierter passiver und aktiver Chipbauelemente komplettiert werden, realisieren die vielfältigsten Funktionen digitaler, analoger, digital/analoger und komplexer Art mit einem bedeutenden Miniaturisierungsgewinn gegenüber Leiterplattenschaltungen. Das Hybridkonzept ist längst nicht ausgeschöpft. Man kann erwarten, daß die nächste Zukunft der breiten Elektronik gerade durch seine Möglichkeiten entscheidend motiviert wird.

Dem Trend zu höheren C- und L-Beträgen bei integrierten Kondensatoren und Induktivitäten kommen die Erfahrungen der Mehrebenenverdrahtung bei Halbleiter- und Schichtschaltkreisen zugute. Der Vielschicht-Dünnschichtkondensator dürfte trotz gegenwärtig noch ungelöster Probleme in absehbarer Zeit praxiswirksam werden.

3. Neue Anwendungsgebiete für Bauelemente

3.1. Neue funktionelle Anforderungen

Die Weltraumtechnik hat inzwischen gute Ergebnisse bei der Nutzung von Solarzellen zur Energieversorgung von Raumflugkörpern erreicht, an die man bei der Suche nach alternativen Energiequellen anknüpfen konnte. Doch stellen die terrestrischen Anwendungsaspekte völlig neue Anforderungen an diese Bauelemente und deren Schaltungstechnik (Wirkungsgrad, Energiewandlung, Realisierung von stationären Leistungen im kW- und mobilen Leistungen im mW-Bereich). Extrem verlustarme Anzeige-, höchstkapazitive Pufferbauelemente (s. Schaltungsbeispiel in Bild 9), Bauelemente mit niedrigen Betriebsspannungen, sind nur einige der daraus abzuleitenden Aspekte für passive Bauelemente.

Etwas zeitgleich, aber im Zuge der schnellen Ausbreitung von Halbleiterfestspeichern, wurde die Frage nach einer temporären Havariesicherung der flüchtigen Speicherdaten aktuell. Dem Netzausfall kann man durch Einsatz von Kondensatoren mit einem sehr großen Produkt aus Kapazität und Isolationswiderstand im kompatiblen Betriebsspannungsbereich ($\leq 5 \text{ V}$) begegnen, die über längere Zeit ($> 30 \text{ min}$) das Unterschreiten eines kritischen Spannungspegels verhindern. Das ist ein Beispiel für etwa gleiche Anforderungen aus unterschiedlicher Anwendersicht (vgl. Pufferkondensator für Solarzellen), wovon die Entwicklung hochkapazitiver Bauelemente wichtige Impulse erhalten hat (s. auch Abschn. 4.1.):

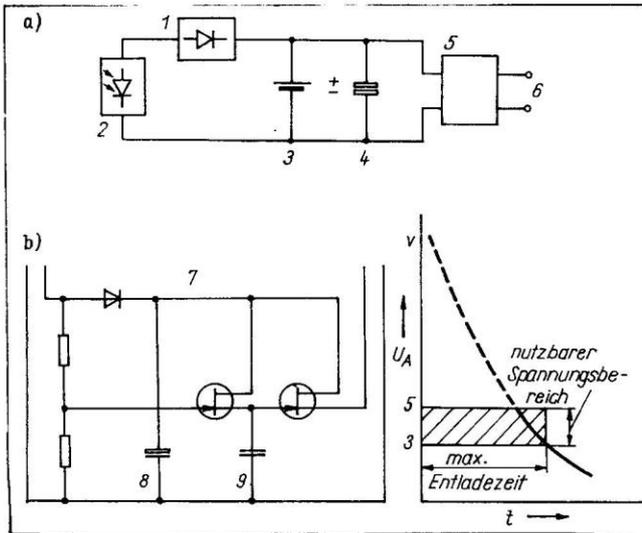


Bild 9. Anwendungsbeispiele hochkapazitiver Kondensatoren

- a) Solarzellen-Schaltung für Motorantrieb
 1 Regulator, 2 Solarzelle, 3 Batterie, 4 hochkapazitiver Pufferkondensator, 5 Motor-Treiber-Schaltkreis, 6 Motor
 b) Überbrückungszeit-Schaltung zum Datenerhalt bei Ausfall der Versorgungsspannung bei Halbleiterspeichern (rechts Entladekurve)
 7 Halbleiter-Speicherschaltkreis, 8 Pufferkondensator, 9 Referenzkondensator

- Goldeapacitor (Japan) 100 F/1,5 V
- RbAg₄I₅-Ionisator (UdSSR) 50 F/0,5 V
- Rb₂Cu₈J₃Cl₇-Doppelschicht-Kondensator (Japan) 50 F/0,6 V
- Elektrochemischer Kondensator (z.B. Aktivkohle-Doppelschicht, USA) > 100 F/< 1,5 V.

3.2. Nutzung neuer physikalischer Effekte

Dabei kommt es nicht ausschließlich auf völlig neu zu entdeckende Effekte an, was natürlich ein wesentlicher Aufgabenteil der Grundlagenforschung ist. Vielmehr geht es auch künftig darum, bekannte Effekte für passive Bauelementefunktionen nutzbar zu machen. Stellvertretend für andere Beispiele seien impulsstrombeheizte Thermodruckköpfe (Bild 10) genannt, die als miniaturisierte Wärmequellen Schichtwiderstände enthalten. Man nutzt den Temperaturkoeffizienten und die hohe Abriebfestigkeit entsprechend konstruierter Dünnschichtstrukturen. Im Sinne der Miniaturisierung wird man einer Verdichtung der Konstruktion durch werkstofftechnologische Maßnahmen den Vorrang geben. Der prinzipielle Weg dazu sei wie folgt beschrieben: Ein Kondensator reagiert z.B. auf Eingangsgrößen X_i (z.B. Spannung U , Frequenz f , Temperatur T) mit den Ausgangsgrößen Y_i (z.B. Serienkapazität C , Serienwiderstand R). Den Sachverhalt $X_i \rightarrow$ Bauelement $\rightarrow Y_i$ kann man mathematisch unter Einführung einer Korrelationsfunktion

Schichtzuleitungen Thermodruck-Schichtwiderstand

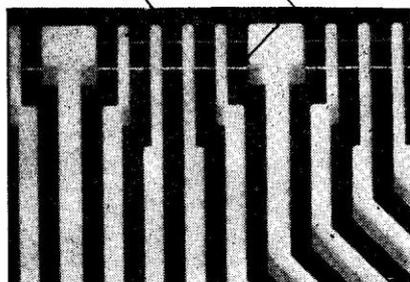
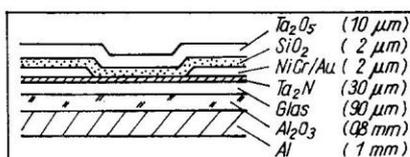


Bild 10

- Dünnschicht-Thermodruckköpfe
 a) Konstruktive Realisierung eines Thermodruckkopfes in Dünnschichttechnik (YEB Kombinat Robotron)
 b) Beispiel einer Thermodruckstruktur in Dünnschichttechnik



$$R_{ij} = \frac{\partial Y_i}{\partial X_j} \quad (1)$$

in die Form

$$Y_i = \sum_j R_{ij} X_j \quad (2)$$

bringen. Gleichung (2) entspricht z.B. einer Taylor-Reihe in linearer Näherung, deren partielle Ableitungen Gl. (1) mit dem Temperaturkoeffizienten α_T und dem Spannungskoeffizienten α_U zusammenhängen. In vielen der in Tafel 5 aufgeführten Bauelemente ist das in Gl. (2) ausgedrückte Konzept der Summeneigenschaften realisiert. Die Bauelementefunktion kann jedoch auch folgendem Reaktionsschema entsprechen:

$$X_i \rightarrow \text{Bauelement} \rightarrow Y_i, \quad (\text{Teil 1}) \quad (3)$$

$$Y_i \rightarrow \text{Bauelement} \rightarrow Z_i, \quad (\text{Teil 2})$$

wobei im allgemeinen eine makroskopische raumzeitliche Trennung der Teilfunktionen 1 und 2 vorliegt. Betrachtet man das Bauelement als Black box, dann liegt die scheinbare Wirkung

$$X_i \rightarrow \text{Bauelement} \rightarrow Z_i \quad (4)$$

vor, deren Gesamtfunktion jedoch

$$Z_k = \sum_m \sum_j \sum_l R_{kl} T_{lj} S_{jm} X_m, \quad (5)$$

lautet, worin R_{kl} die Korrelationen des X - Y - und S_{jm} die des X - Z -Effekts beschreiben. Die Verknüpfung zwischen den Teilfunktionen 1 und 2 erfolgt durch die Kopplungsfunktion T_{lj} , d.h., die Ausgangsgrößen der Teilfunktion 1 werden über den durch T_{lj} beschriebenen spezifischen Responsemechanismus in die Eingangsgrößen der 2. Teilfunktion transformiert. Das Konzept der Produkteigenschaften nach Gl. (5) läßt sich unter Nutzung spezieller, bekannter Effekte in mikroskopischen Bereichen von Kompositwerkstoffen realisieren. Die Tafel 6 gibt dazu einige Beispiele. Man kann annehmen, daß die technische Umsetzung des Produktkonzepts durch technologische Integration (z.B. Oberflächenwellen-Verzögerungsleitung, magnetoakustischer Dünnschichtspeicher) bzw. mit Hilfe von Kompositwerkstoffen (z.B. Gemisch einer magnetostriktiven mit einer piezoelektrischen Phase zur Realisierung einer magnetoelastischen Funktion) einen Schwerpunkt der perspektivischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem passiven Bauelementesektor mit folgender Wichtung bilden wird:

1. Nutzung von Schichtaggregaten des vertikalen bzw. lateralen Heterotyps (extrem anisotrope Composite),
2. Nutzung isotroper bzw. anisotroper Phasengemische (z.B. baculares InSb-NiSb-Eutektikum für Feldplatten),
3. Ausnutzung von Geometrie- und Dimensionseffekten von Phasengemischen (z.B. reaktiv aufgestäubte NiCr- bzw. CrSi-Schichten für Widerstände und Potentiometer).

4. Gebrauchswerterhöhung

4.1. Erhöhte funktionelle Anforderungen

Es gibt einen Trend zur Sortimentsspezialisierung, der sich u.a. daraus ableitet, daß in vielen Anwendungsgebieten zur Gebrauchswerterhöhung entsprechender Geräte die Bauelemente mit allgemeinen Anforderungen bis in den Grenzbetriebsbereich belastet werden. Auf Grund unvermeidlicher Zuverlässigkeitsprobleme (vgl. Abschn. 4.2.) ergeben sich zunehmend spezialisierte Anforderungen. Das betrifft im Prinzip alle Bauelementeparameter einschließlich der Bauform, wobei sowohl eindimensionale (Erweiterung eines Parameters zu höheren bzw. niedrigeren Werten bei konstanten übrigen Parametern) wie mehrdimensionale Erweiterungen (gleichzeitige Vergrößerung bzw. Verkleinerung mehrerer Parameter) technisch interessant sein können. So resultiert die Entwicklung des Schichtvaristors u.a. aus dem Bedarf von Varistoren für Einsatzspannungen im Bereich von 6,3 bis 20 V.

Ein anderes Beispiel betrifft die Widerstände. Bild 11 vergleicht den Stand bei Draht- und Schichtwiderständen bezüglich Betriebsspannung U_B , Nennwiderstand R_N , Nennleistung N_V , Betriebsdauer t_B , Temperaturkoeffizient α_T , Driftstabilität $\Delta R/R$. Die Haupterweiterungsrichtungen sind durch Pfeile

Tafel 4. Vergleich von Fertigungstechnologien für Sensorbauelemente

Aspekt/Technologie	Si-Technologie	Dünnschicht-Technologie	Dickschicht-Technologie	Polymerfolien-Technologie	Sinter-technologie
Minimale Investitionskosten je Fertigungslinie (in TDM)	> 1000	> 300	> 60	> 50	> 1000
Eignung für Sensorproduktionsstückzahl je Jahr	> 10 ⁵	10 ³ bis 10 ⁴	10 ² bis 10 ⁴	10 ² bis 10 ⁴	> 10 ⁵
Sensorkosten im Rahmen einer Massenproduktion	sehr niedrig	niedrig	niedrig	mittel	niedrig
Sensorkosten im Rahmen einer Kleinserienproduktion	sehr hoch	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Mikroelektronik-Kompatibilität	hoch (chipkompatibel)	hoch (substratkompatibel)	hoch (substratkompatibel)	gering	sehr gering
Miniaturisierungsmöglichkeiten	ausgezeichnet	gut (materialabhängig)	gut	mittel	gering
Herstellung reproduzierbarkeit	niedrig (entwicklungsfähig)	hoch (Abgleich)	hoch (Abgleich)	mittel	niedrig bis mittel
Obere Anwendungstemperaturgrenze	< 120 °C	hoch oder niedrig	hoch oder niedrig (materialabhängig)	niedrig (< 100 °C)	hoch

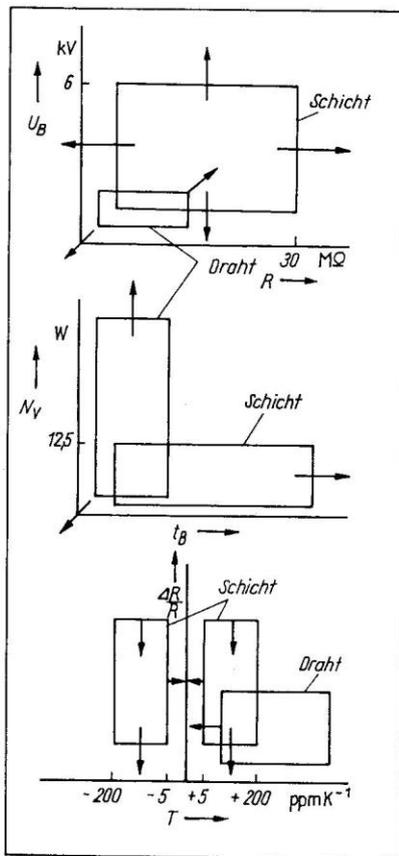


Bild 11 Entwicklungsrichtungen bei Draht- und Schichtwiderständen

Tafel 6. Makroskopische und mikroskopische Wechselwirkungen vom Summen- bzw. Produkttyp als Grundlage elektronischer Bauelemente

Response-Kopplungen vom Typ X - Y bzw. Y - Z (Summentyp)	Response-Kopplungen vom Typ X - Y - Z (Produkttyp)
mechanoelektrisch (Schalter)	elektrothermisch-thermomechanisch
elektromagnetisch (Antenne)	→ elektromechanisch (Hitzdraht)
magneto-resistiv (Feldplatte)	magnetostruktiv-piezoelektrisch
piezoelektrisch (Drucksensor)	→ magnetoelektrisch (magnetoakustischer Dünnschichtspeicher)
elektrostruktiv (Schwingquarz)	piezoelektrisch-elektrolumineszierend
elektrolumineszierend (Lumineszenzdiode)	→ piezolumineszierend (Akusto- oder Drucksensor)
optoelektrisch (Fotowiderstand)	
chemoelektrisch (pH-Sensor)	elektrostruktiv-piezomagnetisch
	→ elektromagnetisch (Tonkopf)
elektrochemisch (Batterie)	piezomagnetisch-magneto-resistiv
thermoelektrisch (Thermistor)	→ piezoresistiv (Akusto- bzw. Drucksensor)

markiert. Erhöhte Präzision, größere Bereiche der Betriebsfrequenz und -temperatur, verbesserte Stabilität, — um nur einige zu erwähnen — sind Erweiterungen, die praktisch für jedes Bauelement gelten.

Tafel 5. Zuordnung elektronischer Bauelemente zu physikalischen Wirkungskategorien

mechanisch	akustisch	elektrisch	magnetisch	optisch	korpuskular	thermisch	chemisch
Schalter	Schwingquarz	Festwiderstand	Spule	Fotowiderstand	Kernstrahlungssensor	Thermoelement	Batterie
Relais	Oberflächenwellenfilter	Festkondensator	Transformator	Solarzelle	Widerstandssensor	Widerstandsthermometer	Feuchtesensor
Potentiometer	Verzögerungsleitung	Varistor	Feldplatte	Festkörperdisplay	Smogsensor	Schmelzsicherung	Gassensor
Drehkondensator	Mikrofon	Josephsonbauelement	Ferritkernspeicher	Glühlampe	Dünnschichtkaltkathode	Thermistor	Ionensensor
Trimmerkondensator	interdigitaler Wandler	Ferroelektrischer Dünnschichtspeicher	Magnetbandspeicher	Glimmlampe	Gasgenerator	Hitzdraht	pH-Dünnschichtsensor
Steckverbinder	Volumenfilter		Relais	Optotaste		Peltierelement	Doppelschichtkondensator
Tastatur	Dünnschichtakustosensor		Magnettonkopf	Bolometer		Thermotaste	Elektrolytkondensator
Kontakt	Lautsprecher		Magnetblasenspeicher	Infrarot		Kaltleiter	
Dehnungsmeßstreifen			Mikrowellendetektor	Infrarot-detektor		Flüssigkeitsniveausensor	
Drucksensor			Dünnschicht-Magnetfeldsensor			Anemometer	
Verdrahtungsträger			Magneto-resistiver Speicher			Dünnschicht-Temperatursensor	
			Hallgenerator				
			Haltastatur				

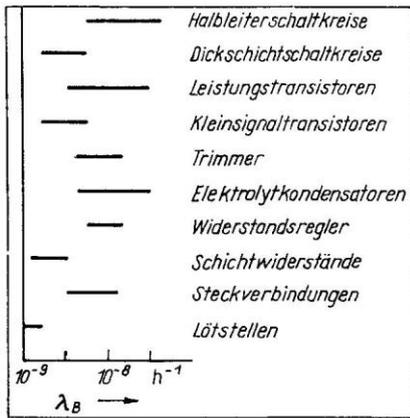


Bild 12
Ausfallverhalten (λ_B : Ausfallrate) verschiedener Bauelemente am Einsatzbeispiel von Farbfernsehgeräten

4.2. Zuverlässigkeitserhöhung

Aspekte der Zuverlässigkeit haben besondere Bedeutung, wenn es um die Gebrauchsbewertung geht. Bleibt man beim Beispiel der Heimelektronik, so wird die Situation in einem Haushalt kritisch, wenn die Spätausfälle der älteren Gerätegeneration mit den Frühausfällen der modernen zusammenfallen. Natürlich gilt das sinngemäß für jede industrielle Anwendung, zumal dann, wenn Bauelemente nicht im Überfluß verfügbar sind!

Es ist eine internationale Erfahrung, daß die Ausfallraten λ_B passiver Bauelemente von Geräten mit hohem Integrationsgrad (z. B. Farbfernsehgeräte, vgl. Bild 12), denen der integrierten Schaltkreise nicht wesentlich nachstehen. Am häufigsten sind Ausfälle durch hohe Betriebstemperaturen.

Zur Vermeidung des Grenztemperaturbetriebes wird man — ausgehend von der Tatsache, daß es Null-Fehler-Produkte nicht gibt — unterschiedliche Maßnahmen ergreifen:

- großzügigere Schaltungsdimensionierung
- Reduzierung der Leistungsaufnahme
- höhere Belastbarkeit der Bauelemente (Streßfaktor $\rightarrow 0,5$)
- verbesserte Kühlung
- Vermeidung von Entwicklungsfehlern.

Gerade dem produktgerechten Entwicklungskonzept mit rechnergestütztem Konstruktionsentwurf wird man künftig immer größere Bedeutung auch bei passiven Bauelementen beimessen müssen. Ein Beispiel für bereits von der Grundkonzeption her zuverlässige Bauelemente sind Potentiometer, bei denen der Abrieb der Widerstandsbahn durch Einsatz von leitfähigem Kunststoff mit extrem glatter Oberfläche auf ein Minimum gesenkt werden konnte.

Der Begriff der Zuverlässigkeit versteht sich nicht statisch. Der dynamische Prozeß des Angleichs an neue technische Anforderungen wird zunehmend auf der Basis solcher physikalischer Kriterien wie Schaltfestigkeit, Wechselbelastbarkeit (bis hin zu extremen mechanischen bzw. klimatischen Belastungen), maximal zulässige Dauergrenzbelastbarkeit, überlagerte Belastung, kurzzeitige Spitzenbelastung (einschließlich Strahlung), minimale Ansprechzeit erfolgen müssen.

Das Anspruchsniveau für Nachweis und Garantie der Zuverlässigkeit und damit die gemeinsame Verantwortung von Bauelemente- und Gerätehersteller werden spürbar steigen. Man ist gut beraten, wenn man sich bereits heute soft- und vor allem hardwaremäßig auf die in den neunziger Jahren zu erwartenden Bedingungen einstellt, weil die verfügbare Meßtechnik am Ende entscheidend ist.

5. Literatur

Nachfragen zur Literatur sind an den Autor zu richten.

Eingegangen am 2. Juli 1982

NaA 8937

Doz. Dr. sc. nat. *Hans-Dieter Langer*, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Physik/Elektronische Bauelemente, 9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 964

Probleme elektrischer Kontakte unter dem Aspekt der Mikroelektronik

H. Höft, KDT, Karl-Marx-Stadt

Mitteilung aus der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Physik/Elektronische Bauelemente

Deskriptoren: Zuverlässigkeit, Einsatzbedingungen, Kontaktwiderstand, Abschaltvorgänge, Glimmentladung, Schauerentladung, zeitbegrenzte Bogenentladung, zeitbegrenzte Glimmentladung

Die Mikroelektronik ergibt für die Kontaktbauelemente folgende Tendenzen:

1. Verminderung der Betriebsspannungen auf nur wenige Volt;
2. Verminderung der Schaltströme auf mA bis nA, zum Leistungsanschluß werden höhere Ströme geschaltet;
3. Merkbare Reduzierung der Induktivitäts- und Kapazitätswerte in den integrierten Schaltkreisen,

damit vermindert sich die Schalteistung durch die Anteile

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2 \text{ und } W_C = \frac{1}{2} CU^2;$$

4. Digitalisierung der Informationsverarbeitung.

Diese Parameteränderungen durch die mikroelektronischen Schaltungen ergeben für Kontaktbauelemente eine Tendenz zu funkenarmen „Trockenschaltungen“ hochohmiger, ohmscher Schaltkreise.

1. Auswirkungen der Mikroelektronik auf die Kontaktbauelemente

Seit 1961 sind integrierte Schaltkreise bekannt. Damit ist das Volumen und die Ausfallrate ganzer z. T. sehr großer Schaltungen

(LSI, VLSI) auf die Werte von nur einem einzigen diskreten Bauelement früherer Generationen gesunken.

1.1. Miniaturisierung

Die Miniaturisierungsforderungen wirkten sich auch auf die Kontaktbauelemente aus, jedoch in einem weit geringeren Maße als sie in der Mikroelektronik realisiert wurden. Das liegt an den begrenzten technischen und ökonomischen Möglichkeiten der Rastervermindernungen auf Leiterplatten und bei Steckverbindern sowie an den notwendigen Abmessungen der Bedienelemente (Tasten und Schalter), die den Aspekten der menschlichen Handhabung entsprechen. Hier sind natürliche Grenzen der Flächen-Miniaturisierung z. B. der Tastenköpfe gesetzt. Bezüglich des Gesamtvolumens insbesondere der aktiven Funktionsteile ist die Forderung nach Miniaturisierung voll gegeben.

1.2. Zuverlässigkeit

Bezüglich der Zuverlässigkeitsforderung scheint für die integrierten Schaltkreise folgende Tendenz zu gelten [10]:

$$\lambda_{BE} \eta_{BE} = \lambda_{IC} \approx \text{const.}$$

η_{BE} Integrationsgrad, λ_{BE} Ausfallrate einer elementaren Funktionseinheit (Bauelemente).

Das ergibt als Mindestforderung für integrierte Schaltungen:

$$\lambda_{BE} = \frac{\lambda_{IC}}{\eta_{BE}} \approx 10^{-12} \dots 10^{-16}/h.$$