

3.2	Kontakte	91
3.2.1	Übersicht	91
3.2.2	Kontaktwiderstand	92
3.2.3	Kontaktbelastung und Kontaktwerkstoffe	95
3.2.3.1	Elektrische Kontaktbelastung	95
3.2.3.2	Mechanische Kontaktbelastung	99
3.2.3.3	Kontaktbelastung durch Umwelteinflüsse	102
3.2.4	Ausführung von Kontaktbauelementen	103
3.2.5	Zuverlässigkeit	107

Tantal-Dünnschichtkondensatoren sind gepolt. Als Grundlektrode dient Tantal, als Dielektrikum Ta_2O_5 und als Deckelektrode Nickelchrom/Gold. Es sind Kapazitätswerte von 47 pF bis 22 nF wirtschaftlich herstellbar, bei einer kleinsten Toleranz von $\pm 3\%$.

Die Temperaturkoeffizienten der Widerstände und Kondensatoren lassen sich so aufeinander abstimmen, daß eine gute Temperaturkompensation und damit eine hohe Frequenzkonstanz der RC-Schaltungen erreicht wird.

Nicht integrierbare Schaltelemente werden, wie bei der Dickschichttechnik, in die Schaltungen eingesetzt.

3.1.5.3 *Dünnschicht-Nickelchrom-Aufdampf-Maskentechnik*

Dieses Verfahren eignet sich für Schaltungen mit besonders hohen Genauigkeiten in Verbindung mit der Forderung nach abgleichbaren Kapazitäten.

Widerstände, Kondensatoren und Leiterbahnen werden durch sechs verschiedene Masken im Hochvakuum auf Glasträger in einem Arbeitsgang aufgedampft. Das Abgleichen der Widerstände aus Nickelchrom auf $\pm 0,1\%$ bzw. $\pm 50\ m\Omega$ erfolgt durch automatisch gesteuerte Mikrogravur.

Die Dünnschichtkondensatoren mit Siliziumoxid-Dielektrikum sind ungepolt. Durch die hohe Leitfähigkeit der Aluminiumelektroden ergeben sich gute Hochfrequenzeigenschaften. Die wirtschaftlich herstellbaren Kapazitäten von 2,2 pF bis 560 pF können auf $\pm 0,1\%$ bzw. 0,05 pF abgeglichen werden. Je cm^2 lassen sich Kapazitäten von max. 10 nF zusammenschalten.

Hybridbausteine können, wie bei den anderen Technologien, eingesetzt werden. Entsprechendes gilt für die Verkapselung.

3.2 Kontakte

3.2.1 Übersicht

Der Begriff *Kontakt* bezeichnet sowohl einen Zustand als auch ein konkretes Bauelement. Kontakte lassen sich grob in *Unterbrecherkontakte* und *ruhende Kontakte* einteilen.

Unterbrecherkontakte (Schalter, Relais) dienen zum Ein- und Ausschalten von Versorgungsspannungen und Signalen. Beim Schließen liegt ein Potentialunterschied zwischen den Partnern, während beim Öffnen ein Stromfluß unterbrochen werden muß. Bei höheren Spannungen und Strömen treten dabei Lichtbögen auf, die zu Abbrand und Materialwanderung führen können.

Ruhende Kontakte (Steckverbinder), wie sie für den Anschluß von gedruckten Schaltungen oder Kabeln verwendet werden, sollten beim Betätigen stromlos sein, um Abrißfunken zu vermeiden.

Kontakte sind beim Öffnen oder Schließen einer mechanischen Verschleißbeanspruchung durch Reibung unterworfen.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich insbesondere auf elektrisch gering belastete Kontakte, die in Geräten der Elektronik und Nachrichtentechnik im Vordergrund stehen. Während bei niedrig belasteten Kontakten der Kontaktwiderstand eine wichtige Rolle spielt, ergeben sich bei den Kontaktstellen der Energietechnik durch Erwärmung, Verschweißung und Abbrand durch Lichtbögen besondere Problemgruppen.

Forderungen an die Kontaktstelle:

- Niedriger und konstanter Übergangswiderstand, auch bei sehr kleinen elektrischen Belastungen (sogenannte «trockene Stromkreise»).
 - Zuverlässige Übertragung, unabhängig von korrosiver Beeinflussung und nach längeren Betriebspausen.
 - Gute Abriebfestigkeit.
- Zusätzlich bei Unterbrecherkontakten:
- Geringer Abbrand bei höheren Schaltleistungen. Geringe Materialwanderung in Gleichstromkreisen.
 - Keine Klebe- und Hafterscheinungen bei empfindlichen Relais.

Zur gleichzeitigen Erfüllung dieser vielseitigen Anforderungen ist kein bekannter Kontaktwerkstoff geeignet.

3.2.2 Kontaktwiderstand

Der Kontaktwiderstand ist ein Maß für die Güte eines Kontaktes. Hier wird als Kontaktwiderstand der Übergangswiderstand im Kontaktbereich bezeichnet. Es ist im Einzelfall zu untersuchen, ob die Leiterwiderstände zwischen dem Kontaktbereich und den Anschlußpunkten (zum Beispiel der Leiterwiderstand des Feder- oder Messerkontaktes) zu berücksichtigen sind.

Der Kontaktwiderstand R_K setzt sich aus dem Engewiderstand R_E und dem Fremdschichtwiderstand R_F zusammen.

$$R_K = R_E + R_F \quad (3.2.1)$$

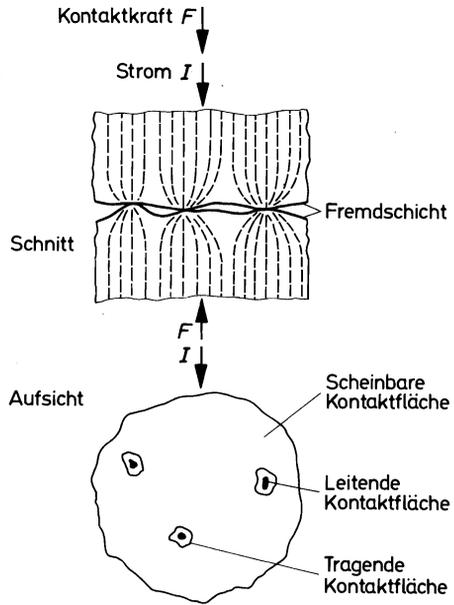
Engewiderstand

Wie Bild 3.2.1 zeigt, ist die Kontaktfläche wesentlich geringer als die gesamte Querschnittsfläche. Kontakte besitzen, selbst im neuwertigen Zustand, bei starker Vergrößerung eine raue Oberfläche. Bei Annäherung berühren sich zuerst die obersten Spitzen und werden elastisch verformt. Die Berührungsflächen vergrößern sich durch Steigerung der Kontaktkraft, außerdem entstehen neue Berührungsstellen. Nach Überschreitung der Druckhärte des Materials setzt plastische Verformung ein, und die Berührungsstellen gehen in größere, makroskopisch sichtbare Kontaktflächen über.

An den Berührungsflächen bilden sich Stromengen mit sehr hohen Stromdichten. Aus dieser Einschnürung der Stromfäden resultiert der Engewiderstand R_E .

Neben der beschriebenen Abhängigkeit von der Kontaktkraft besteht noch eine

Bild 3.2.1 Berührungsflächen und Stromengen geschlossener Kontakte (stark vergrößert dargestellt)



Abhängigkeit des Engwiderstandes von der Spannung am Kontakt. Steigende Spannung erzeugt durch den Stromanstieg eine Temperaturerhöhung an der Berührungsstelle. Der Widerstand steigt mit der Temperatur bis zum Erreichen der materialabhängigen *Entfestigungsspannung* U_E (Größenordnung 0,1 bis 0,4 V). Die Temperatur ist an den leitenden Kontaktflächen so weit gestiegen, daß das Material plastisch wird. Da sich die Kontaktstelle jetzt vergrößert, sinkt der Widerstand.

Wird die Spannung weiter erhöht, steigt der Widerstand wieder an. Beim Erreichen der materialabhängigen *Schmelzspannung* U_S (Größenordnung 0,3 bis 0,6 V) ist die Temperatur an den leitenden Kontaktflächen so hoch, daß der Werkstoff an der Kontaktstelle schmilzt. Dabei nimmt der Widerstand schnell ab.

Der endgültige Wert ist abhängig von der Kontaktkraft, der Oberflächenbeschaffenheit, dem spezifischen Widerstand sowie den elastischen und plastischen Eigenschaften des Kontaktwerkstoffs.

Fremdschichtwiderstand

Die meisten Kontaktwerkstoffe neigen zu chemischen Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre. Dabei entsteht eine Fremdschicht aus den Reaktionsprodukten, die zu einem erhöhten Übergangs- bzw. Fremdschichtwiderstand R_F führt. Ein Stromfluß ist jedoch möglich infolge des quantenmechanischen Tunneleffektes, durch Frittung oder durch mechanische Zerstörung dickerer Fremdschichten durch hohe Kontaktkräfte.

Einmolekulare Fremdschichten bilden einen geringen *Hautwiderstand*, der von Elektronen relativ leicht «durchtunnelt» werden kann. Diese Schichten sind quasimetallisch.

Die *Fremd- oder Anlaufschichten* entstehen überwiegend durch den Sauerstoff

und den Schwefelwasserstoff der umgebenden Atmosphäre. Mit der Zeit und besonders bei höheren Temperaturen wächst die Dicke dieser Anlaufschichten oft ganz erheblich. Dickere Schichten ($> 0,01 \mu\text{m}$) bilden Fremdschichtwiderstände bis zu $10^6 \Omega$, die nur sehr geringe Ströme zulassen. Hier tritt der Tunneleffekt nicht mehr auf.

Die dickeren Fremdschichten können jedoch durch höhere Spannungen durchschlagen werden, so daß eine elektrische Verbindung hergestellt wird. Dabei entsteht in mikroskopischen Bereichen ein lokaler Schmelzfluß, der wieder erstarrt, wenn der Kontaktwiderstand klein genug ist. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Frittung*. Die für einen Durchschlag erforderlichen *Frittspannungen* liegen, je nach Dicke der vorliegenden Fremdschicht, zwischen 0,2 und 5 V.

Durch Tunneleffekt und Frittung lassen sich Fremdschichten auf elektrischem Weg zerstören. Günstiger ist es, Fremdschichten überhaupt zu vermeiden. Neben einer Vergoldung wird auch eine Behandlung mit geeigneten Fetten vorgeschlagen, welche die Bildung von Oxidschichten weitgehend verhindern kann. Diese Maßnahme läßt sich jedoch nur bei staubgeschützten und elektrisch schwach belasteten Kontakten anwenden. Bei einer Lichtbogenbildung würde die Fettschicht verkohlen.

Bei *Unterbrecherkontakten* ist darauf zu achten, daß Kontaktstelle und Abrißfunkenstelle möglichst getrennt sind, da sonst durch Abbrand, Materialwanderung und Oxidbildung zusätzliche Probleme auftreten.

Die Probleme mit Enge- und Fremdschichtwiderstand hängen eng mit der *Auswahl des Kontaktmaterials* und der *Kontaktkraft* zusammen. Steigende Kontaktkräfte ergeben geringere Kontaktwiderstände. Die geringsten Werte lassen sich dabei mit Goldkontakten (und fremdschichtfreien Silberkontakten) erreichen. Für die meisten anderen Kontaktmaterialien liegen die Widerstände um etwa eine Zehnerpotenz höher. Da das Anlaufen von Silberkontakten kaum vermeidbar ist, setzen sich Kontakte mit Hartvergoldung immer mehr durch. Bild 3.2.2 zeigt die typische Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Kontaktkraft für einige Werkstoffe.

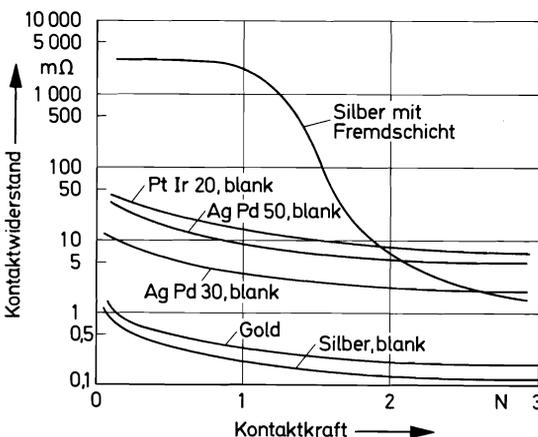


Bild 3.2.2 Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Kontaktkraft

3.2.3 Kontaktbelastung und Kontaktwerkstoffe

Kontakte werden elektrisch, mechanisch und durch Umwelteinflüsse belastet. Die folgenden Betrachtungen gelten besonders für Unterbrecherkontakte. Die Anforderungen an ruhende Kontakte sind, wegen der stromlosen Betätigung, geringer.

3.2.3.1 Elektrische Kontaktbelastung

Die elektrische Kontaktbelastung erfolgt durch Schaltspannung, Schaltstrom und Schaltleistung. Verwendet man Entfestigungsspannung U_E , Schmelzspannung U_S und Lichtbogengrenzspannung U_L (Mindestspannung zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens; $U_L = 10$ bis 15 V, abhängig vom Kontaktwerkstoff) zur Abgrenzung der Leistungsbereiche, so erhält man eine Unterteilung nach Tabelle 3.2.1. Kontakte in elektronischen und nachrichtentechnischen Geräten sind den Bereichen 1 bis 3 sowie dem unteren Teil des Bereiches 4 zuzuordnen.

Bei *trocken schaltenden Kontakten* (dry circuit contacts) liegen die Spannungen unterhalb der Entfestigungsspannung U_E (< 100 mV) und die Ströme im Bereich μA . Es treten keine Veränderungen durch elektrische oder thermische Belastungen auf.

Der *Bereich mit geringer Belastung* (low level contacts) liegt zwischen Entfestigungs- und Schmelzspannung (etwa 100 bis 600 mV) und bei Strömen unter 10 mA.

Im *Zwischenbereich der Belastung* (intermediate level) können im Kontaktspalt bereits Schaltfunken (kurze Bögen, short arcs) auftreten. Die elektrische und thermische Beanspruchung kann zu Veränderungen der Kontaktoberfläche führen.

Im Bereich 4 (low power contacts) treten *stabile Lichtbögen* beim Öffnen auf. In Wechselstromkreisen erlöschen diese im Nulldurchgang der Spannung. Zum erneuten Zünden bei geöffnetem Kontakt reicht die Spannung nicht aus. Es sind erhöhte Anforderungen hinsichtlich Abbrand, Schweißneigung und Materialwanderung (bei Gleichstrom) zu erfüllen. Diese Anforderungen steigen noch in den Bereichen 5 und 6.

Ein *Lichtbogen* ist eine Gasentladung in einer ionisierten Luftstrecke. Beim Trennen der Kontakte fließt der Strom nur durch einen sehr geringen Materialquerschnitt. Durch die hohe Stromdichte wird das Kontaktmaterial an der Berührungsstelle sehr stark erhitzt, wobei es schmelzen und verdampfen kann. Beim Öffnen fließt der Strom weiter über einen Lichtbogen.

Zur Erhaltung stabiler Lichtbögen sind spannungs- und materialabhängige Mindestströme (Bild 3.2.3) erforderlich, bei deren Unterschreitung die Gasentladung erlischt. Der Grenzstrom ist auch noch von der Luftfeuchtigkeit, der Form der Kontakte sowie von deren Sauberkeit abhängig.

Wegen des *Kontaktverschleißes* durch Materialwanderung und Verdampfung sind besondere Maßnahmen zur Lichtbogenlöschung erforderlich. Diese sind an den jeweiligen Lastfall angepaßte Schaltungsmaßnahmen (siehe 5.4.3.2) bzw. konstruktive Maßnahmen an den Schaltern für die Belastungsbereiche 5 und 6.

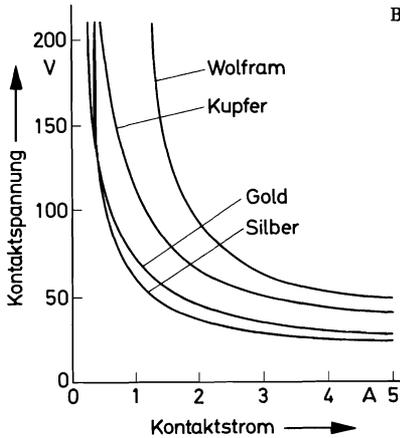
Tabelle 3.2.1 Anwendungsschwerpunkte von Kontaktwerkstoffen

Belastungsbereich	Richtwerte für Spannung und Strom (werkstoffabhängig)	Wichtige Kontakteigenschaften
U_E : Entfestigungsspannung U_S : Schmelzspannung U_L : Lichtbogengrenzspannung		
1. Trocken schaltende Kontakte $U < U_E$	$U < 100 \text{ mV}$ $I < 10 \text{ } \mu\text{A}$	Keine Neigung zur Fremdschichtbildung
2. Geringer Belastungspegel der Kontakte $U_E < U < U_S$	$U = 100 \text{ mV} \dots 600 \text{ mV}$ $I < 10 \text{ mA}$	Keine Neigung zur Fremdschichtbildung
3. Zwischenbereich der Belastung Auftreten kurzer Lichtbögen $U_S < U < U_L$	$U = 0,6 \text{ V} \dots 10 \text{ V}$ $I < 300 \text{ mA}$	Je nach Einsatz: Fremdschichtbildung, Abbrand, Schweißneigung, Materialwanderung möglichst klein
4. Starkstromkontakte, niedrige Leistung ¹ Auftreten stabiler Lichtbögen. In Wechselstromkreisen Selbstlöschung bei Einzelunterbrechung	$U = 10 \text{ V} \dots 300 \text{ V}$ $I = 0,3 \text{ A} \dots 50 \text{ A}$	Geringer Abbrand, geringe Schweißneigung und Materialwanderung
5. Starkstromkontakte, mittlere Leistung ¹ Lichtbogenunterbrechung in Luft durch Doppelunterbrechung, Löschkammern	$U = 300 \text{ V} \dots 1 \text{ kV}$ $I > 50 \text{ A}$	Geringer Abbrand, geringe Schweißneigung und Materialwanderung
6. Starkstromkontakte, hohe Leistung Lichtbogenlöschung in spez. Medien (z.B. Druckluft, Öl, Vakuum)	$U > 1 \text{ kV}$ $I > 100 \text{ A}$	Geringer Abbrand, geringe Schweißneigung und Materialwanderung. Gasfreie Sonderwerkstoffe für Vakuumschalter

¹ In Gleichstromkreisen mit induktiver Last kann die Kontaktbelastung durch Funkenlöschglieder stark verringert werden (s. Abschnitt 3.2.3.1 und 5.4.3.2)
 ×: Anwendungsschwerpunkte der Werkstoffgruppe {×}: Weitere Anwendung mit Nennung bevorzugter Materialien
 Eine fehlende Markierung bedeutet nicht, daß ein Werkstoff für eine bestimmte Anwendung grundsätzlich ungeeignet ist.

Werkstoff			
Silber und Silberlegierungen	Gold und Goldlegierungen	Platin- und Palladiumlegierungen	Verbundwerkstoffe Wolfram, Molybdän
Hauptanwendungen			
Spannungen > 50 V (Gefahr der Deckschichtbildung!)	Kleine Schaltleistungen, hohe Konstanz des Übergangswiderstandes	Geringer Abbrand, geringe Schweißneigung. Sehr konstanter Übergangswiderstand	Sehr hohe Schaltleistungen und Abbrandsicherheit
	×		
	×		
(×)	(×)		
Feinsilber Silber-Palladium	Gold-Nickel Gold-Kobalt		
×	(×)	×	
(×)			×
Silber-Kadmiumoxid			
			×

Bild 3.2.3 Lichtbogengrenzwerte für einige Kontaktmetalle



Die Tabelle 3.2.1 enthält eine Zuordnung häufig verwendeter Kontaktwerkstoffe zu den Belastungsbereichen. Spezifische Eigenschaften der einzelnen Materialien sind in Tabelle 3.2.2 aufgeführt. Die Zusammenstellungen sollen zur Orientierung dienen. Die Auswahl eines Kontaktwerkstoffs für einen speziellen Anwendungsfall sollte, nach Ermittlung der Einsatzbedingungen, in Absprache mit dem Hersteller erfolgen.

Für elektrische Signale mit geringen Spannungspegeln stellt eine Vergoldung die beste Lösung dar, wenn der Preis tragbar ist. Bei Steckverbindern hat, neben dem Gold, galvanisch abgeschiedenes Palladium an Interesse gewonnen. Hier ist jedoch der «Brown-Powder-Effect» (siehe unter 3.2.3.3) zu beachten.

Für geringere Ansprüche, wie in der Konsum-Elektronik (Rundfunk-, Fernsehgeräte), wird Zinn als Kontaktmaterial zunehmend verwendet. Auf eine 3 µm dicke Unternickelung wird eine 8 bis 15 µm starke SnPb-Schicht (2 bis 8% Pb) aufgebracht. Der Kontaktwiderstand ist mit etwa 30 mΩ relativ hoch. Da Zinn sehr weich ist, werden bei Kontaktkräften über 1,2 N Fremdschichten leicht weggeschoben. Wegen des hohen Abriebs sind nur Steckzahlen (Betätigungszahlen) von max. 50 zulässig. Die aufgrund der großen Kontaktkräfte sehr hohe Reibung begrenzt die Polzahl der Stecker bei Leiterplatten auf etwa 30. Ein Problem stellt das Auftreten von *Whiskern* dar. Diese sind lange, haarfeine Einkristalle, die sich insbesondere unter Druck bilden und zu Kurzschlüssen führen können. Durch den Bleizusatz und die Unternickelung wird die Whiskerbildung stark eingeschränkt.

Beim Durchgang eines Stromes I entsteht an jedem Kontakt mit dem Kontaktwiderstand R_K eine Verlustleistung

$$P_V = I^2 \cdot R_K \quad (3.2.2)$$

Hohe Kontaktwiderstände und große Ströme bewirken hohe Verlustleistungen und damit entsprechende Übertemperaturen. Dadurch werden der Kontaktwerk-

stoff und vor allem der Isolierwerkstoff der Kontakthalterung belastet. Die Wärmeabführung von der Kontaktstelle erfolgt überwiegend durch Wärmeleitung (siehe 4.2.3). Für Schalter, Relais und Steckverbinder resultieren daraus maximale Stromstärken, deren Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur vom Hersteller durch eine Derating-Kurve (Bild 3.2.4) angegeben werden.

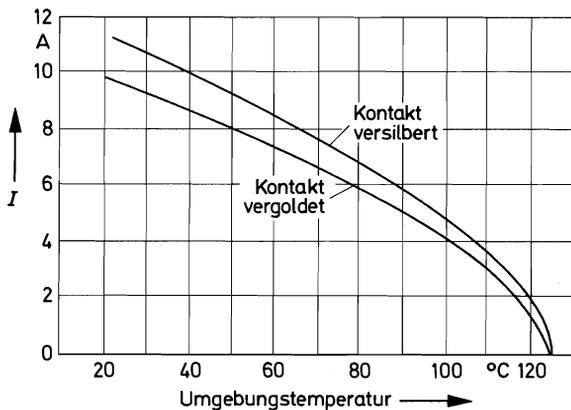


Bild 3.2.4 Beispiel einer Derating-Kurve für einen Steckverbinder

3.2.3.2 Mechanische Kontaktbelastung

Unedle Kontaktwerkstoffe benötigen hohe Kontaktkräfte, um die Fremdschichten durchbrechen oder wegschieben zu können. Dieser *Selbstreinigung* steht das Problem des höheren *Verschleißes* der Kontaktoberfläche entgegen. Kontaktwerkstoffe sollten daher eine möglichst große Härte besitzen.

Bei *Unterbrecherkontakten* tritt der Verschleiß beim Öffnungs- und Schließvorgang auf. Bestimmend sind hierbei Kontaktkraft und Gleitweg. Bei Entladungsercheinungen ist eine hohe Öffnungsgeschwindigkeit erforderlich. Durch hohe Schaltgeschwindigkeiten wachsen jedoch die Kontaktprellungen beim Schließen. Bestimmend für den Verschleiß sind hier die Energie des Lichtbogens und die Prellhäufigkeit. Durch energiereiche Lichtbögen kann der Kontaktwerkstoff partiell bis auf Schmelz- oder Siedetemperatur aufgeheizt werden, wodurch ein Materialverlust auftritt. Außerdem besteht die Gefahr des Verschweißens der Kontaktstücke.

Ruhende Kontakte verschleßen durch die Anzahl der Steck-Trenn-Zyklen. Um den Abrieb und die Steckkräfte niedrig zu halten, sind glatte Oberflächen mit geringer Rauhtiefe erforderlich. Das Mittel der Kontaktschmierung mit geeigneten Fetten kann auch hier anwendbar sein. Die Fettschicht wird dabei durchgedrückt, so daß eine niederohmige Kontaktverbindung entsteht.

Tabelle 3.2.2 *Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen*

Werkstoff	Zusammensetzung	El. Leitfähigkeit	Eigenschaften
		$\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$	
<i>Silber und Silberlegierungen</i>			
Feinsilber	Ag 99,95	60...62	Billigstes Edelmetall, höchste el. Leitfähigkeit. Weich, geringe Schweiß- und Abbrandfestigkeit. Sehr geringe Schwefelbeständigkeit. Neigung zur Materialwanderung bei Gleichstrom. Empfohlener Anwendungsbereich: 6 V...220 V/1 mA...5 A
Silber-Kupfer (Hartsilber)	AgCu 3...28	52...48	Mit steigendem Cu-Gehalt höhere mechanische Festigkeit, aber geringere chemische Beständigkeit
Silber-Palladium	AgPd 30...50	6,4...3,1	Schwefelbeständiger, härter, abbrandfester. Geringere el. Leitfähigkeit. Für Nachrichtentechnik (Telefonrelais). Empfohlener Anwendungsbereich: 6 V...220 V/1 mA...5 A
Silber-Nickel	AgNi 10...40	50...37	Sinterwerkstoff. Hohe Abbrandfestigkeit, geringe Schweißneigung
Silber-Kadmiumoxid	AgCdO 10...15	48...40	Verbundwerkstoff. Geringe Schweißneigung, gute Abbrandfestigkeit bei höheren Schaltleistungen. Günstige Lichtbogenlöschung
Silber-Graphit	2,5...10% Graphit	53...22	Verschweißungssicher, jedoch geringe Abbrandfestigkeit. Gute Gleiteigenschaften, aber leitfähiger Abrieb
<i>Gold und Goldlegierungen</i>			
Feingold	Au	44	Sehr weich, chemisch sehr beständig. Konstanter Übergangswiderstand. Empfohlener Anwendungsbereich: $\mu V \dots 1 V / \mu A \dots 1 A$
Feingold Schichtdicke 0,5 μm			Hauchvergoldung. Lagerschutz gegen Anlaufen. Diffundiert ein
Feingold Schichtdicke 1...2 μm^1			Nicht poren dicht. Für Kontakte ohne korrosive Beanspruchung, z.B. geschützte Kontakte, Unterhaltungsindustrie
Feingold Schichtdicke 2...4 μm^1			Poren dicht. Für leichte korrosive Beanspruchung; normale industrielle Anwendung (Relais, Steckverbindungen)
Feingold Schichtdicke 8...16 μm^1			Stärkere korrosive Beanspruchung, spez. industrielle und militärische Anwendungen
Gold-Silber	AuAg 20	10	Mittlere Härte, gute chem. Beständigkeit. Für niedrig belastete Feinkontakte, häufig betätigte Steckverbindungen. Empfohlener Anwendungsbereich $\mu V \dots 24 V / \mu A \dots 200 mA / max. 5 W$

¹ Günstig mit Unternickelung.

Werkstoff	Zusammensetzung	El. Leitfähigkeit	Eigenschaften
		$\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$	
Gold-Nickel	AuNi 5	7,5	Hohe Härte. Sehr geringe Kontaktkräfte erforderlich. Gegen Materialwanderung beständige Feinkontakte (Relais, Meßgeräte). Empfohlener Anwendungsbereich: $\mu V \dots 24 V / \mu A \dots 1 A$ Sehr hart und abriebbeständig (Schleifkontakte). Geringe el. Leitfähigkeit. Gute Beständigkeit gegen Materialwanderung Mittlere Härte. Sehr hohe chemische Beständigkeit (Relais, Meßgeräte). Sehr teuer Sehr hohe Härte. Plattierte Kontaktfedern u. Kontaktmesser für hochwertige Steckverbindungen, Relaiskontakte. Durch Oxidbildung höherer Übergangswiderstand. Empfohlener Anwendungsbereich: $6 V \dots 80 V / 1 mA \dots 100 mA$ Hohe Härte. Gegen Materialwanderung beständige Feinkontakte. Für trockene Schaltung geeignet.
Gold-Kobalt	AuCo 5	1,8	
Gold-Platin	AuPt 10	8,2	
Gold-Silber-Kupfer	AuAg 25 Cu 5...10	8,2	
Gold-Silber-Nickel	AuAg 26 Ni 3	8,8	
<i>Platin- u. Palladiumlegierungen</i>			
Platin-Iridium	PtIr 5...20	5,6...3,2	Sehr niedriger Kontaktwiderstand, gute Abbrandfestigkeit, sehr hohe chem. Beständigkeit Geringer Übergangswiderstand, verminderte Schweißneigung (z.B. für Zündkontakte) Geringe Schweißneigung und Materialwanderung, hohe Abbrandfestigkeit, chemisch sehr beständig Ähnlich PtNi 8, jedoch höhere Härte. Für Unterbrecherkontakte Sehr geringe Materialwanderung Geringe Schweißneigung. Für Relais-technik
Platin-Ruthenium	PtRu 5...10	3,0...2,3	
Platin-Nickel	PtNi 8	3,3	
Platin-Wolfram	PtW 5	2,3	
Palladium-Kupfer	PdCu 15...40	2,6...3,0	
Palladium-Nickel	PdNi 5	5,9	
<i>Verbundwerkstoffe</i>			
Wolfram-Kupfer	W, Cu	16...24	Für sehr hohe Leistungen und sehr hohe Abbrandsicherheit.
Wolfram-Silber	W, Ag	18...30	
Molybdän-Silber	Mo, Ag	18...24	

Bei ruhenden Kontakten sollten die Kontaktkräfte immer so groß sein, daß sich im Bereich der leitenden Kontaktflächen eine gasdichte, metallische Verbindung bildet.

3.2.3.3 Kontaktbelastung durch Umwelteinflüsse

Sieht man von mechanischen Umweltbelastungen, wie Vibration und Stoß, ab, so werden Kontakte überwiegend durch chemische Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre beeinflusst. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem Klima außerhalb des Gerätes oder Raumes, in welchem sich der Kontakt befindet, und dem Kleinklima in der Kontaktumgebung.

Von außen können durch Industrieabgase insbesondere die schädlichen Bestandteile *Schwefelwasserstoff* H_2S und *Schwefeldioxid* SO_2 in den Bereich der Kontakte gelangen. Schwefelwasserstoff ist praktisch unschädlich für Gold und Goldlegierungen sowie für Platin- und Palladiumlegierungen. Silber hingegen ist sehr empfindlich gegenüber H_2S (Anlaufen des Silbers). Dieser Mangel kann durch Legierung mit mindestens 30% Palladium stark verringert werden. Der Werkstoff AgPd 30 wird zum Beispiel für Fernmelderelais verwendet, die unter erschwerten Korrosionsbedingungen arbeiten müssen. Schwefeldioxid ist praktisch unschädlich für Silber- und Silberlegierungen sowie für Platin- und Palladiumlegierungen. Auf Goldlegierungen kann es jedoch schädigend wirken.

Eine besondere Rolle spielen *organische Dämpfe* aus Isolierstoffen, Lacken (Lösungsmittel), Bodenbelägen, Reinigungsmitteln, Abgasen usw. Diese Ausdünstungen kondensieren auf der Kontaktoberfläche und werden unter Reibbeanspruchung zu festen Schichten polymerisiert. Durch die entstandenen hochmolekularen organischen Verbindungen steigt der Kontaktwiderstand sehr stark an. Eine besondere Neigung zur Bildung eines braunen organischen Kontaktbelages (*Brown-Powder-Effect*) zeigen Palladium-, Platin- und Rhodiumlegierungen. Auch bei AgPd-Kontakten wurden nachteilige Wirkungen festgestellt, während AuAg- sowie AuAgNi-Legierungen relativ beständig sind.

Fremdschichten können auch durch die Zersetzung organischer Dämpfe unter Lichtbogeneinfluß entstehen. Dabei entstehen Verkohlungsprodukte, die die Lichtbogenbildung erleichtern und Verschleiß bzw. Kontaktabbrand vergrößern.

Unedle Kontaktwerkstoffe bilden mit dem Luftsauerstoff Oxide. Während bei Raumtemperatur die dadurch entstehenden Schichten im allgemeinen sehr dünn sind, müssen bei stark erwärmten Kontakten die Fremdschichten durch höhere Kontaktkräfte durchstoßen werden.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Verunreinigung von Kontakten durch *Silikon* zu widmen. Mit ihrer Eigenschaft weiterzukriechen, bei höheren Temperaturen zu verdampfen und alles gleichmäßig zu benetzen, können sie zu unmittelbaren oder später auftretenden Kontaktstörungen führen.

Neben ihrer isolierenden Wirkung können sie Staubpartikel anlagern oder im Schaltfunken zu SiO_2 oxidieren. Silikone sind zum Beispiel in Schmierstoffen,

Wärmeleitpaste (siehe 4.3.5.4), Trennmitteln bei Spritzteilen (Schalter- und Steckergehäuse), Fußbodenpflegemitteln, Hautpflegemitteln und Haarsprays enthalten.

Gegenmaßnahmen:

Zur Vermeidung der Fremdschichtbildung verwendet man bei empfindlichen Relais mit unedlen Kontaktwerkstoffen *hermetische Abdichtung*. Dabei sind für die verwendeten Isolierstoffe besondere Maßnahmen, wie künstliche Alterung (Erwärmen, bis die flüchtigen Bestandteile entwichen sind) oder *Getterung*, erforderlich. Bei der Getterung werden durch spezielle Stoffe Fremdmoleküle gebunden und dadurch an der Fremdschichtbildung gehindert.

Für elektronische Geräte mit Kontaktbauelementen werden folgende Maßnahmen gegen den schädlichen Einfluß organischer Dämpfe (aus Materialien im Gerät) empfohlen:

- Ausdünstende Materialien (z.B. PVC) überhaupt vermeiden.
- Ausdünstende Materialien künstlich altern.
- Gekapselte Schaltelemente belüften.
- Möglichst offene Gerätebauweise.
- Wegen der Kriechgefahr keine Substanzen mit niedriger Oberflächenspannung (z.B. Silikonöl) verwenden.

Wird eine Vielzahl von elektrischen Kontakten in geschlossenen Räumen eingesetzt (z.B. Telefonzentralen), so wird empfohlen:

- Für Wand- und Deckenanstriche nur Dispersionsfarben verwenden. Organische Lösungsmittel sind nicht erlaubt.
- Keine Bodenbeläge aus PVC oder Linoleum.
- Bodenreinigung nur mit Seifenwasser. Keine Reinigungsmittel mit organischen Lösungsmitteln verwenden.

3.2.4 Ausführung von Kontaktbauelementen

Üblicherweise verwendet man als Träger ein unedles Material mit guter Formbeständigkeit, bei Kontaktfedern einen Federwerkstoff. Der Bereich der Kontaktstelle, evtl. das ganze Kontaktelement, wird mit dem eigentlichen Kontaktwerkstoff plattiert. Dadurch ist eine Einsparung größerer Mengen von teuren Edelmetallen möglich. Bezieht man die Edelmetallkosten pro Volumeneinheit auf Silber, so erhält man folgende Vergleichszahlen:

Silber	1
Palladium	25
Gold	50
Rhodium	175
Platin	230

Die Abhängigkeit von den Tagesnotierungen des Rohstoffmarktes ist dabei nicht berücksichtigt.

Als *Beschichtungsverfahren* kommen beispielsweise in Frage:

Plattierungen:

- Auf Bänder aus Kupferlegierungen (z.B. CuBe als Federmaterial) aufgewalzte Edelmetallschicht.
- Kaltpreßgeschweißte Metallniete, massiv oder plattiert.
- Aufgeschweißte Kontaktelemente aus Draht.
- Aufgelötete Kontaktelemente.

Galvanische Beschichtungen:

- Gold oder Goldlegierungen.
- Versilberung.
- Verzinnung (für geringere Ansprüche).

Unterbrecherkontakte

Aus der Vielzahl der möglichen und verwendeten Kontakte sollen hier nur zwei Beispiele gezeigt werden. Bild 3.2.5a zeigt zwei verschieden geformte, massive Kontaktniete, z.B. aus Silber. Diese sind durch Vernietung mit dem federnden Trägermaterial verbunden. Massive und plattierte Kontaktniete sind nach [3.24] genormt.

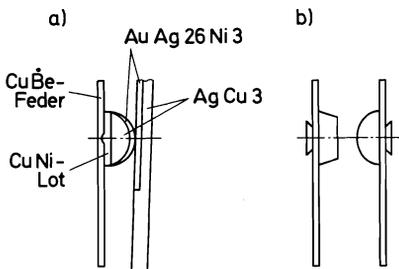


Bild 3.2.5 Beispiele für Unterbrecherkontakte

Die Kontaktoberflächen in Bild 3.2.5b sind mit AuAg 26 Ni 3 plattiert, das für sehr geringe Spannungen und Ströme geeignet ist. Als Grundmaterial wird AgCu 3 verwendet, das hohe elektrische Belastungen erlaubt. Ein CuNi-Lot sorgt für eine gute elektrische und mechanische Verbindung mit der Kontaktfeder.

Steckkontakte

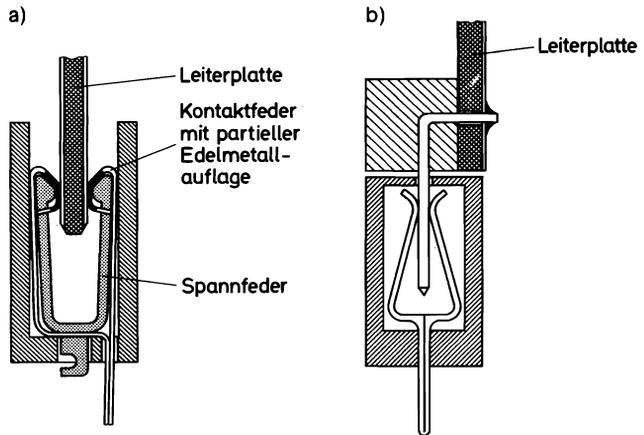
Hier wird nur auf Steckkontakte für gedruckte Schaltungen eingegangen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen direkter und indirekter Steckung.

Bei der *direkten Steckung* [3.26] sind die Steckkontakte (wie die Leiterbahnen) geätzt und mit einer partiell im Kontaktbereich aufgebrachtten Edelmetallschicht

plattiert. Die Leiterplatten werden direkt in die Federkontakte gesteckt. Dabei können, wie in Bild 3.2.6a gezeigt, für hohe Ansprüche Kontaktfeder und Spannfeder konstruktiv getrennt sein.

Bei der *indirekten Steckung* [3.25] wird auf die Leiterplatte eine Stift- oder Messerleiste gelötet und diese dann in eine Buchsen- oder Federleiste gesteckt (Bild 3.2.6b).

Bild 3.2.6 Direkte (a) und indirekte (b) Steckung von Leiterplatten



Vorteile der direkten Steckung:

- Billiger, da die Messerleiste entfällt.
- Kein Biegemoment beim Einstecken.
- Geringerer Platzbedarf.
- Wegfall einer Lötstelle je Steckkontakt.

Vorteile der indirekten Steckung:

- Verantwortlichkeit für die gesamte Steckverbindung liegt bei einem Hersteller.
- Geringere Toleranzprobleme (Dicken- und Breitentoleranz der Leiterplatte), bessere Führung des Steckers, geringere Beanspruchung der Kontaktstelle bei Stoß und Vibration.
- Einheitliche Steckverbinder für verschiedene Leiterplattendicken möglich.

Zieh- und Steckkräfte bei Leiterplatten

Kontaktkräfte werden üblicherweise durch Federn erzeugt. Die meisten Kontaktfedern besitzen eine lineare Federkennlinie nach Bild 3.2.7. Der Zusammenhang zwischen Federkraft und Federweg wird als Federsteife c bezeichnet.

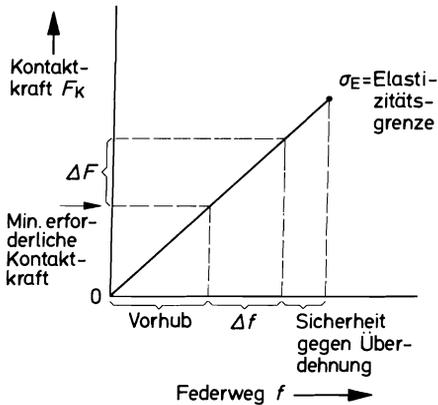


Bild 3.2.7 Kennlinie einer Kontaktfeder

$$c = \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (3.2.3)$$

Zum Erreichen der Mindestkontaktkraft muß die Feder um den Vorhub ausgelenkt oder eine entsprechende Vorspannung vorgesehen werden. Der Federweg Δf entspricht der Dickentoleranz der Leiterplatte bzw. des Messerkontaktes.

Die zum Ziehen einer gesteckten Leiterplatte erforderliche Kraft Z beträgt

$$Z = \mu_0 \cdot F_K \cdot n \cdot m \quad (3.2.4)$$

μ_0 : Haftreibungsfaktor

F_K : Kontaktkraft

n : Anzahl der Pole des Steckverbinders

m : Anzahl der Kontaktstellen am Einzelkontakt

Der Wert des Haftreibungsfaktors liegt im Mittel zwischen $\mu_0 = 0,15$ für gut gefettete vergoldete Kontakte mit geringer Oberflächenrauheit und $\mu_0 = 0,25$ bei ungünstigen Bedingungen.

Für einen Leiterplattensteckverbinder nach Bild 3.2.6a mit 50 Doppelkontakten und einer Kontaktkraft von $F_K = 0,5 \text{ N}$ und $\mu_0 = 0,15$ beträgt beispielsweise die erforderliche Ziehkraft

$$Z = 0,15 \cdot 0,5 \text{ N} \cdot 50 \cdot 2 = 7,5 \text{ N}$$

Die Steckkraft liegt noch höher, da zunächst die Kontaktfeder aufgespreizt werden muß. Durch Anspitzen der Leiterplatte und günstige Formgebung der Kontaktfeder lassen sich die Steckkräfte verringern.

Grundsätzlich sollten Kontaktoberflächen unterschiedlicher Härte gepaart werden, da dieses ein günstigeres Abriebverhalten ergibt.

3.2.5 Zuverlässigkeit

Unterbrecherkontakte und Steckverbinder werden hinsichtlich der Zuverlässigkeitsuntersuchungen häufig als die kritischsten Bauelemente bezeichnet. Diese Behauptung resultiert aus der Tatsache, daß nur sehr wenig Zuverlässigkeitsangaben über Kontaktbauelemente zur Verfügung stehen. Literaturangaben beziehen sich bestenfalls auf Schalter und Steckverbinder allgemein, nicht aber auf bestimmte Typen.

Ausfälle bei Kontakten sind sehr oft keine Katastrophenausfälle (Kurzschluß oder Unterbrechung), sondern resultieren aus einem Ansteigen des Kontaktwiderstandes oder einem Rückgang des Isolationswiderstandes zwischen zwei Kontakten.

Experimentelle Ermittlungen von Ausfallraten sind sehr teuer, und ihr Ergebnis wäre nur mit Einschränkungen auf Zuverlässigkeitsberechnungen übertragbar, da die Verhältnisse im Kontaktbereich (Fremdschicht, Abbrand usw.) kaum den in der Praxis jeweils auftretenden Bedingungen entsprechen werden.

Orientierungswerte liefern Zuverlässigkeitsermittlungen von Kontakten in vorhandenen Systemen. Zwar gilt die daraus ermittelte Ausfallrate nur für einen bestimmten Kontakttyp unter bestimmten Bedingungen in einem bestimmten System; der Wert kann aber für ähnliche Bedingungen zur Abschätzung der Systemausfallrate verwendet werden.

Lebensdauerangaben von Kontaktbauelementen (Tabelle 2.2) sind also noch kritischer zu beurteilen als solche von elektronischen (verschleißfreien) Bauelementen. Aus diesen Gründen geben Hersteller von Schaltern und Steckverbindern im allgemeinen keine ihren Produkten zugeordneten Ausfallraten, sondern nur zulässige mechanische Schaltspiele bzw. Steck-Trenn-Zyklen an.

3.3 Verbindungen

Moderne Großrechenanlagen und große elektronische Systeme besitzen bis zu 10^6 elektrische Verbindungen, von denen sich im allgemeinen mehr als 90% auf gedruckten Schaltungen befinden. Die restlichen sind Einzelverbindungen mit Drähten. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Verfügbarkeit müssen die einzelnen Verbindungen sehr niedrige Ausfallraten besitzen. Der Wert $\lambda = 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ je Verbindung sollte auf jeden Fall unterschritten werden. Verbindungen lassen sich in solche mit und solche ohne Wärmezufuhr unterteilen.

Verfahren mit Wärmezufuhr sind das Löten und das Schweißen. Lötverfahren werden überwiegend für die Verbindung der elektronischen Bauelemente mit den Leitern der gedruckten Schaltungen eingesetzt. Beim maschinellen Löten können dabei sämtliche Lötstellen einer Leiterplatte in einem Arbeitsgang ausgeführt werden. Das Schweißen hat große Bedeutung in der Fertigung von Bauelementen.