

4. Kontaktbauelemente

4.1 Grundlagen

Kontakte sind elektrisch leitfähige Verbindungen, die getrennt und zusammengefügt werden können. Sie kommen vor als Steck- oder Klemmverbindungen, als Schalter und Taster und als elektromagnetisch betätigte Relais (Abb. 4.1).

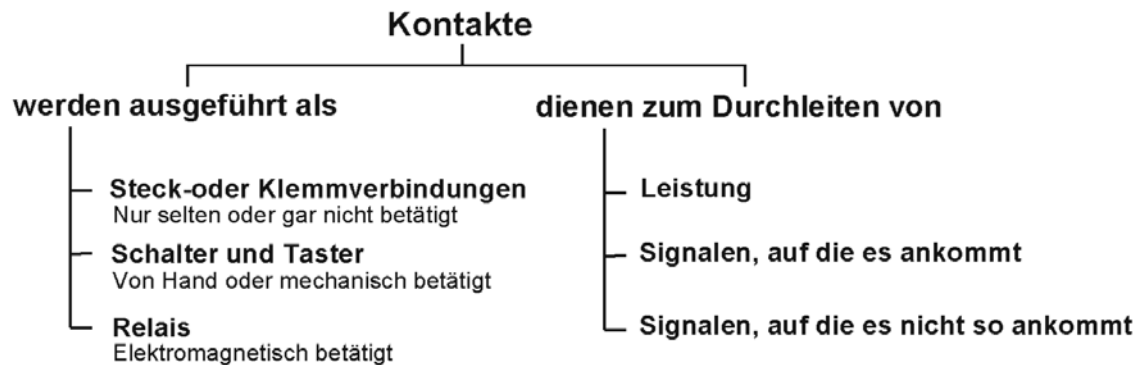


Abb. 4.1 Kontakte.

Kontakte sind die gleichsam klassischen Schaltelemente der Elektrotechnik. Sie haben grundsätzliche Vorteile, die auch heute noch* von Bedeutung sind:

- Kontaktbauelemente sind kostengünstig zu fertigen (mechanische Fertigungsverfahren; keine Halbleitertechnologien),
- einfache, überschaubare Wirkungsweise,
- sehr geringer Übergangswiderstand im geschlossenen Zustand (der geschlossene Kontakt ist ein näherungsweise idealer Leiter),
- sehr hoher Übergangswiderstand im geöffneten Zustand (der geöffnete Kontakt ist ein näherungsweise idealer Isolator),
- sehr großer Bereich von Spannung und Strom; hoch überlastbar,
- ist der Kontakt erst einmal geschlossen, hat er praktisch keine Durchlaßverzögerung ($\ll 1$ ns),
- es spielt keine Rolle, in welche Richtung der Strom fließt; ebenso ist es – wenigstens näherungsweise – dem Kontakt gleichgültig, welchen zeitlichen Verlauf Strom und Spannung haben (Kontakte übertragen Gleichstrom, Wechselstrom, Impulse, Hochfrequenz usw.).

*: Trotz aller Fortschritte der Halbleitertechnologie. Es gibt ein geradezu unüberschaubares Angebot an Kontaktbauelementen, und es kommt immer wieder Neues auf den Markt (vgl. die Internetseiten und Kataloge der Hersteller und Vertriebsfirmen).

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Kontakte schalten vergleichsweise langsam (geringe Schaltfrequenz; Obergrenze bei einigen hundert Hz, im Extremfall wenige kHz),
- Kontakte unterliegen der Abnutzung,
- infolge der mechanischen Bewegung und der elektrochemischen Beeinflußbarkeit der Kontaktoberflächen sind Kontakte vergleichsweise unzuverlässig,
- Kontakte, die Stromflüsse herstellen oder unterbrechen, sind Quellen von Funkstörungen,
- man kann mit Kontaktschaltungen nur eine vergleichsweise geringe funktionelle Komplexität verwirklichen (keine Schaltungsintegration).

Infolge dieser Nachteile ist das Bestreben verständlich, Kontaktschaltungen weitgehend zu vermeiden. Der Ehrgeiz des echten Elektronikers geht dahin, praktisch vollständig "kontaktlose" Schaltungen zu entwickeln. Das ist aber nicht immer möglich. Manchmal sind kontaktlose Schaltungslösungen einfach zu teuer*, und manchmal sind die geforderten Gebrauchseigenschaften nur mit Kontaktbauelementen zu gewährleisten.

*: Beispiel: eine aufwendige Schaltung mit Leistungshalbleitern gegenüber einem kostengünstigen elektromechanischen Relais.

4.1.1 Der Kontakt im Schaltplan

Steckkontakte

Abb. 4.2 gibt einen Überblick über Schaltsymbole für Steckkontakte.

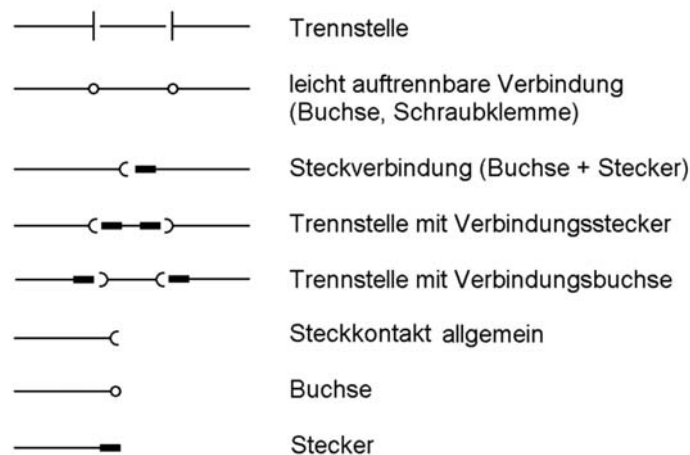


Abb. 4.2 Schaltsymbole für Steckkontakte.

Bewegliche Kontakte

Diese Kontakte werden entweder von Hand oder durch mechanische bzw. elektromagnetische Betätigung umgeschaltet. Gemeinsam betätigte Kontakte bilden einen Kontaktsatz oder einen mehrpoligen Schalter. Abb. 4.3 zeigt Schaltsymbole wichtiger Kontaktanordnungen*.

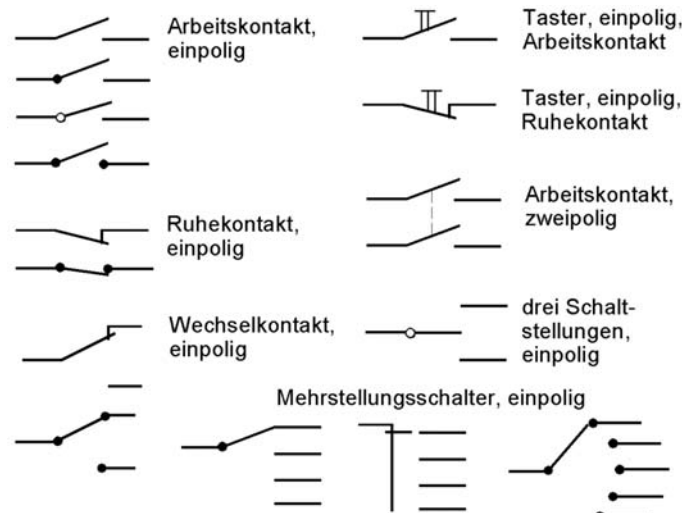


Abb. 4.3 Schaltsymbole beweglicher Kontakte (Beispiele). Es gibt standarderechte und mehr oder weniger ausgeschmückte Darstellungen. DIN EN 60 617 bevorzugt die einfachste Symbolik, läßt aber Punkte oder Ringe zur Hervorhebung des Drehpunkts zu. In vielen Schaltplänen hebt man zudem die Kontaktstellen hervor (z.B. durch weitere Punkte). Typische Varianten sind hier anhand des einpoligen Arbeitskontakts (links oben) dargestellt. Es versteht sich von selbst, daß die Ausschmückungen (mit Punkten usw.) auf alle anderen Kontaktformen anwendbar sind (wie an den Beispielen Ruhekontakt, Wechselkontakt und Mehrstellungsschalter gezeigt).

*: Weitere Beispiele in Abb. 4.7 und 4.77. Zur speziellen Symbolik in den verschiedenen Anwendungsbereichen (Relaisschaltungen, Schaltgeräte, Steuerungstechnik, Installationstechnik usw.) muß auf einschlägige Handbücher, Tabellenbücher und Standards verwiesen werden.

4.1.2 Grundbegriffe

Ruhezustand und Arbeitszustand

In Schaltbildern werden Kontakte stets im Ruhezustand dargestellt. Es gilt folgende Zuordnung:

- Ruhezustand: der Kontakt ist nicht betätigt oder er befindet sich in seiner Ruhelage, d. h. in der Stellung, in der die betreffende Wirkung nicht eintreten soll (Beispiel: ein Kippschalter, dessen Hebel nach unten zeigt).
- Arbeitszustand: der Kontakt ist betätigt oder er befindet sich in seiner aktiven Stellung, d. h. in der Stellung, in der die betreffende Wirkung eintreten soll (Beispiel: ein Kippschalter, dessen Hebel nach oben zeigt).

Arbeitskontakt

Im Ruhezustand ist die Verbindung getrennt, im Arbeitszustand geschlossen. Andere Bezeichnungen: Schließer, Einschalter.

Ruhekontakt

Im Ruhezustand ist die Verbindung geschlossen, im Arbeitszustand getrennt. Andere Bezeichnungen: Öffner, Ausschalter.

Wechselkontakt

Ein Wechselkontakt ist ein Verbund aus Ruhe- und Arbeitskontakt. Er hat drei Anschlüsse. Sie seien hier mit A, B, C bezeichnet (Abb. 4.4). Im Ruhezustand besteht eine Verbindung von A nach B (Ruhekontakt), im Arbeitszustand eine von A nach C (Arbeitskontakt). Andere Bezeichnungen: Wechsler, Umschalter.



Abb. 4.4 Der Wechselkontakt. a) im Ruhe-, b) im Arbeitszustand.

Anzahl der Kontaktstellen

Im einfachsten Fall hat das Kontaktbauelement nur eine Kontaktstelle; einer der beiden Anschlüsse ist mit dem beweglichen Schaltglied unlösbar verbunden. Es gibt aber auch Kontaktbauelemente mit zwei Kontaktstellen (Abb. 4.5).

Anzahl der Pole (Poles)

Ein einpoliger Kontakt schaltet eine einzige Verbindung, ein zweipoliger zwei unabhängige Verbindungen usw. (Abb. 4.6) Manchmal spricht man nicht von Polen, sondern von Schaltebenen (es gibt Ein-, Zwei- und Mehrebenenschalter).

Anzahl der Schaltstellungen (Positions)

Es sind zwei, drei und mehr Schaltstellungen möglich.

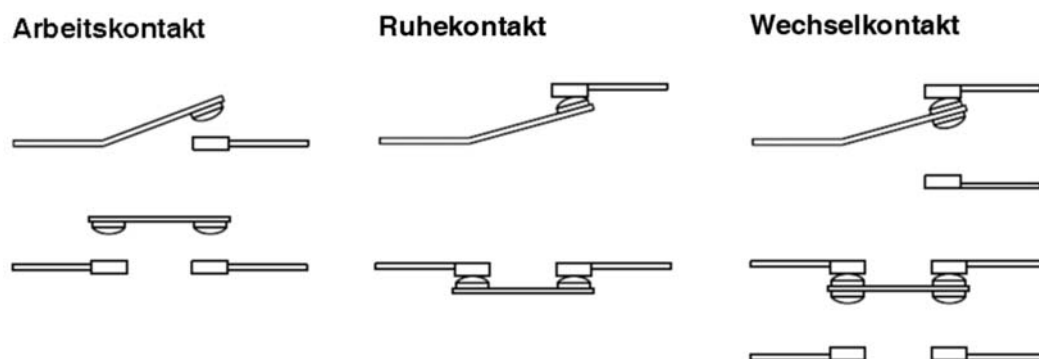


Abb. 4.5 Einpolige Kontakte. Oben mit einer, darunter mit zwei Kontaktstellen.

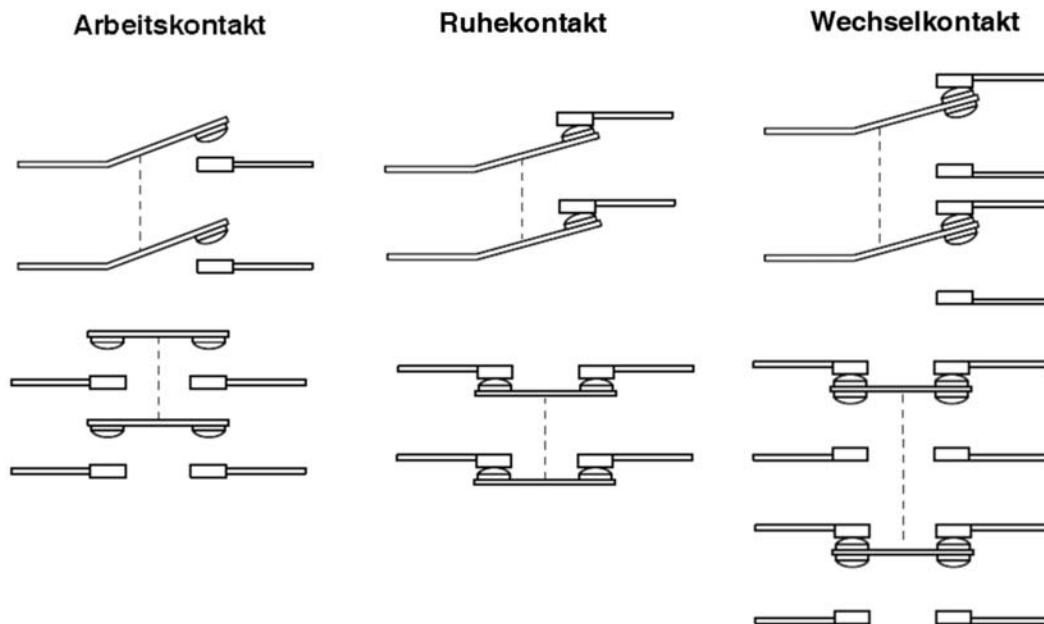


Abb. 4.6 Zweipolige Kontakte. Oben mit einer, darunter mit zwei Kontaktstellen.

Taster und Schalter

Ein Taster kehrt in den Ruhezustand zurück, sobald die mechanische Betätigung aufhört, ein Schalter verbleibt in dem Zustand, in den er durch die letzte Betätigung überführt wurde*.

*: Dies ist die Wirkung aus Sicht der Schaltung. Das jeweilige Verhalten wird aber durch die Mechanik verwirklicht. So gibt es – aus Sicht der Bedienung – Schalter, die wie Taster bedient werden (einfachstes Beispiel: der Druckschalter in der Nachttischlampe) und auch Taster, die beispielsweise wie Kippschalter aussehen, aber nach dem Loslassen zurückfedern.

Kontaktsätze

Kontaktsätze sind Kontaktanordnungen, die mechanisch betätigt werden, z. B. durch einen Elektromagneten (Relais) oder durch Schaltnocken (elektromechanische Programmgeber, Endlagenkontakte usw.). Alle Kontaktanordnungen beruhen auf den vorstehend beschriebenen Grundformen: Arbeitskontakt (Schließer) – Ruhekontakt (Öffner) – Wechselkontakt (Wechsler). Je nachdem, wie die Kontaktfedern angeordnet werden und an welcher Stelle der Betätiger einwirkt, ergeben sich vielfältige Kombinationen, und es lassen sich ungewöhnliche Schaltwirkungen hervorbringen. In der heutigen Anwendungspraxis werden aber zumeist nur die einfachsten Kontaktarten benötigt.

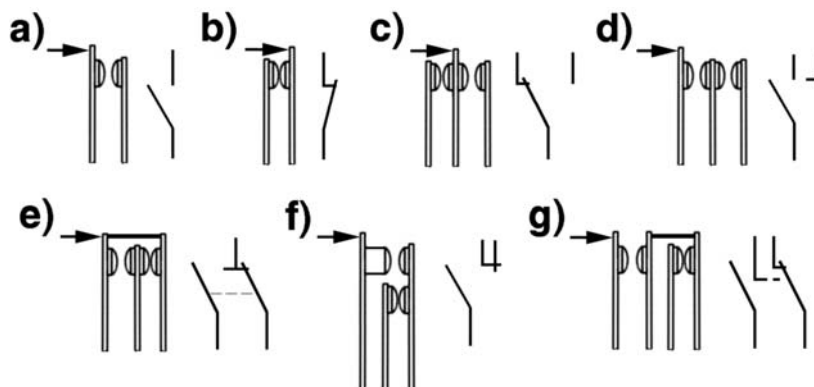


Abb. 4.7 Beispiele von Kontaktanordnungen (nach [4.2]). Rechts neben der bildhaften Darstellung der Kontaktanordnung ist jeweils das Schaltsymbol dargestellt. Die Pfeile deuten an, wo der Betätiger einwirkt. a) Arbeitskontakt; b) Ruhekontakt; c) Wechselkontakt; d) Zwillingsarbeitskontakt (Make-Make); e) Umschaltkontakt; f) Folge-Umschaltkontakt (erst wird die jeweils neue Verbindung hergestellt, dann die bisherige unterbrochen; Make-before-Break); g) Folgekontakt Schließer – Öffner.

Übersicht über typische englischsprachige Abkürzungen und Bezeichnungen

Die folgenden Bezeichnungen sollte man kennen, um sich im Datenmaterial der Hersteller und in einschlägigen Katalogen zurechtzufinden.

Kontaktformen

Die Kontaktanordnungen werden als Form A, Form B usw. bezeichnet (Tabelle 4.1), wobei eine vorangestellte Zahl die Anzahl der Kontakte angibt.

Bezeichnung	Kontaktanordnung	Bezeichnung	Kontaktanordnung
Form A	Arbeitskontakt (Make)	Form D	Folge-Wechselkontakt, überlappend schaltend (Make, Break; vgl. Abb. 4.7f)
Form B	Ruhekontakt (Break)	Form E	Folge-Wechselkontakt (Break, Make, Break)
Form C	Wechselkontakt, unterbrechend schaltend (Break, Make)	Form F	Zwillings-Arbeitskontakt (Make, Make; vgl. Abb. 4.7d)

Tabelle 4.1 Kontaktformen (Auswahl)*.

*: In der heutigen Praxis sind vor allem Kontakte der Formen A, B und C von Bedeutung. Zu weiteren Kontaktformen, Bezeichnungen und näheren Einzelheiten vgl. [4.3].

Das Bezeichnungsschema der NARM

NARM = National Association of Relay Manufacturers (USA). Polzahl, Schaltstellungen und Kontaktbestückung werden durch eine Folge von Abkürzungen beschrieben.

Polzahl:

- SP = Single Pole (einpölig),
- DP = Double Pole (zweipölig),
- höhere Polzahlen werden in Ziffernform angegeben, z. B. 4P (vierpölig).

Nutzbare Schaltstellungen (Throw)

Die Angabe kennzeichnet, wieviele Stellungen mit Kontakten belegt (also zum Herstellen von Verbindungen ausnutzbar) sind:

- ST = Single Throw; es ist nur in einer der beiden Stellungen ein Kontakt vorgesehen,
- DT = Double Throw; es sind in beiden Stellungen Kontakte angeordnet,
- höhere Anzahlen werden in Ziffernform angegeben, z. B. 6T (sechs Stellungen).

Ruhe-, Arbeits- und Wechselkontakte:

- NC = Normally Closed (Ruhekontakt). Auch: Break (B).
- NO = Normally Open (Arbeitskontakt). Auch: Make (M).
- CO = Change Over (Wechselkontakt). Auch: Break – Make (B–M).

Anzahl der Kontaktstellen

a) Eine Kontaktstelle:

- SM = Single Make (Arbeitskontakt),
- SB = Single Break (Ruhekontakt),
- SM–SB = Wechselkontakt.

b) Zwei Kontaktstellen:

- DM = Double Make (Arbeitskontakt),
- DB = Double Break (Ruhekontakt),
- DB–DM = Wechselkontakt.

Reihenfolge der Abkürzungen

Eine Kontaktanordnung wird folgendermaßen gekennzeichnet:

1. Polzahl (Poles),
2. Schaltstellungen (Throws),
3. Ruhezustand (Normal Position).

Gelegentlich folgt noch eine Break-Make-Angabe für die Reihenfolge der Kontaktbetätigung (Abb. 4.8 und 4.9). Beispiele:

- SPST NO = einpoliger Einschalter (Schließer, Arbeitskontakt). Auch 1 Form A.
- SPST NC = einpoliger Ausschalter (Öffner, Ruhekontakt). Auch 1 Form B.
- SPDT = einpoliger Umschalter (Wechselkontakt). Auch SP CO oder 1 Form C.
- DPST NO = zweipoliger Einschalter. Auch 2 Form A.
- 4PST NO = vierpoliger Einschalter. Auch 4 Form A.
- DPST NC = zweipoliger Ausschalter. Auch 2 Form B.
- DPDT = zweipoliger Umschalter. Auch DP CO oder 2 Form C.
- 4P6T = vierpoliger Auswahlschalter mit 6 Stellungen.

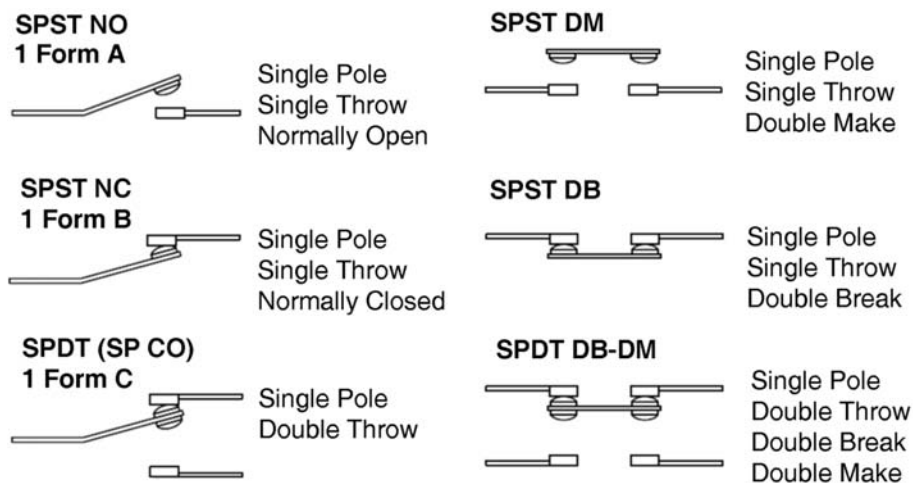


Abb. 4.8 Kontaktbezeichnungen (1). Einpolige Kontakte.

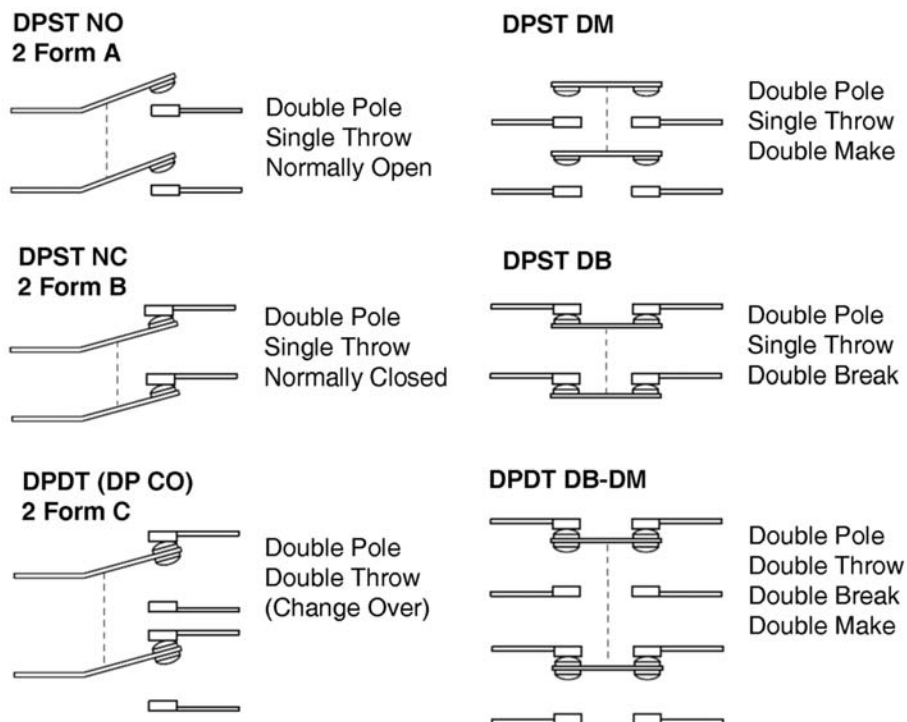


Abb. 4.9 Kontaktbezeichnungen (2). Zweipolige Kontakte.

4.1.3 Ersatzschaltungen

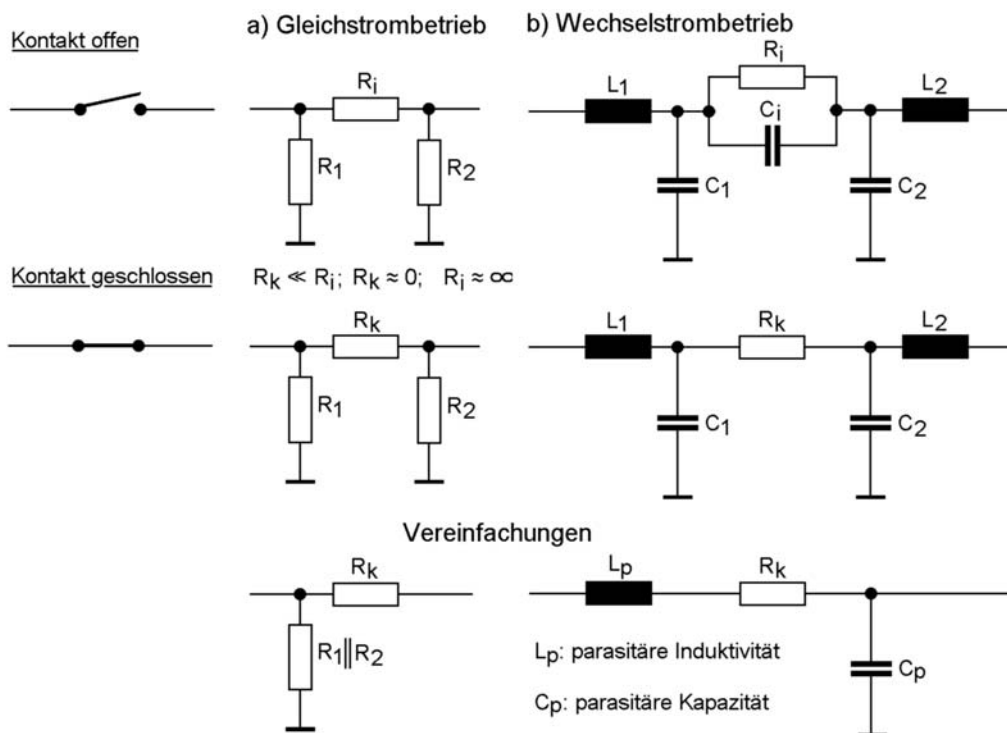
Abb. 4.10 zeigt einfache Ersatzschaltungen für den offenen und für den geschlossenen Kontakt.

Gleichstrombetrieb

Der offene Kontakt ist durch seinen Isolationswiderstand R_i gekennzeichnet, der geschlossene Kontakt durch seinen Durchgangswiderstand (Kontaktwiderstand) R_k . Wenn man es genau nimmt, sind zudem die Isolationswiderstände zwischen den Anschlüssen und der Masse zu berücksichtigen (R_1, R_2). Diese Widerstände können oft vernachlässigt werden – aber nicht immer (Tabelle 4.2).

Wechselstrombetrieb

Die Kontaktkapazitäten können nicht ohne weiteres vernachlässigt werden. Sie wirken sich um so stärker aus, je höher die Frequenz ist. Ein offener Kontakt ist – infolge der Kontaktkapazität C_s – bei hohen Frequenzen keineswegs ein nahezu idealer Isolator. Wenige pF ergeben bei einigen MHz bereits Blindwiderstände im $k\Omega$ -Bereich. Kontakte, die Hochfrequenz schalten oder entsprechende Signalwege miteinander verbinden (Steckverbinder), müssen besonders kapazitätsarm ausgeführt werden. Bei geschlossenem Kontakt – also bei fließendem Wechselstrom – müssen die zudem die Induktivitäten der Zuleitungen (Leitungsinduktivitäten L_1, L_2) berücksichtigt werden. Die Isolationswiderstände gegen Masse sind im Vergleich zu den entsprechenden parasitären Kapazitäten C_1, C_2 zumeist vernachlässigbar.



L_p : parasitäre Induktivität

C_p : parasitäre Kapazität

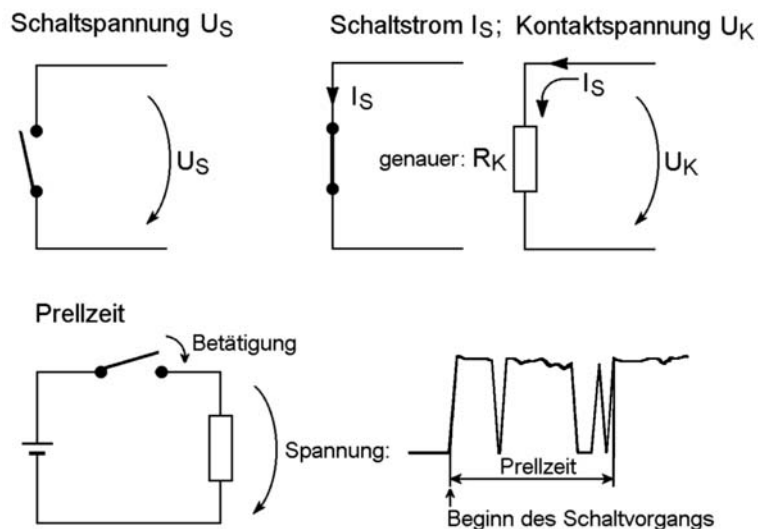
Abb. 4.10 Ersatzschaltungen für Kontakte.

Art des Widerstandes	Größenordnung	nicht zu vernachlässigen ...
Kontaktwiderstand R_K	m Ω	bei hohen Stromstärken
Isolationswiderstände R_i, R_1, R_2	M Ω ...G Ω	<ul style="list-style-type: none"> • bei hohen Spannungen (kV), • in extrem hochohmigen Schaltungen

Tabelle 4.2 Widerstände im Ersatzschaltbild. Manchmal darf man sie nicht einfach vernachlässigen ...

4.1.4 Elektrische Kennwerte

Beim Auswählen eines Kontaktbauelements ist es offensichtlich entscheidend, welche Spannung über dem geöffneten Kontakt anliegt und welcher Strom durch den geschlossenen Kontakt fließt. Diese pauschalen Angaben (Schaltspannung, Schaltstrom) müssen je nach Anwendungsfall durch weitere Kennwerte ergänzt werden (Abb. 4.11).

**Abb. 4.11** Elektrische Kennwerte von Kontakten.

Spannungs- und Stromkennwerte werden typischerweise für Gleichspannungsbetrieb (DC) und Wechselspannungsbetrieb (AC) angegeben. AC-Werte sind hierbei Effektivwerte (RMS). Im Wechselspannungsbetrieb ist die Belastbarkeit oftmals deutlich höher (z. B. maximale Schaltspannung DC = 48 V, AC = 230 V). Näheres dazu in Abschnitt 4.1.6.

Schaltspannung

Die maximale Schaltspannung (U_{Smax}) ist die höchste zulässige Betriebsspannung, die am offenen Kontakt anliegen darf. Andere Bezeichnungen: Spannungsnennwert, Spannungsbelastbarkeit. Die Angabe gilt für eine induktivitätsfreie (rein ohmsche) Last.

Die minimale Schaltspannung (U_{Smin}) ist die Spannung, die am offenen Kontakt wenigstens anliegen muß, um eine zuverlässige Kontaktgabe zu gewährleisten. Bei zu geringer Schaltspannung ist mit einem höheren oder im Betrieb schwankenden Kontaktwiderstand zu rechnen.

Schaltstrom

Genaugenommen ist zwischen drei Stromkennwerten zu unterscheiden, die den Betriebszuständen des Kontakts zugeordnet sind:

1. Einschaltstrom: der Stromfluß, der beim Einschalten hervorgerufen wird. Datenblattangabe: maximaler Einschaltstrom.
2. Dauerstrom: der Strom, der durch den geschlossenen Kontakt fließt. Datenblattangabe: Grenzdauerstrom oder Strombelastbarkeit. Wie groß der Dauerstrom sein darf, wird durch die Wärmeentwicklung im Kontakt bestimmt ($P = I^2 \cdot R_k$). Er ist deshalb üblicherweise stärker als der Strom, der sich rechnerisch aus der Schaltleistung ergibt.
3. Ausschaltstrom: der Stromfluß, der beim Ausschalten getrennt wird. Datenblattangabe: maximaler Ausschaltstrom.

In vielen Datenblättern beschränkt man sich auf eine pauschale Schaltstromangabe, die alle drei Betriebsfälle umfaßt.

Der maximale Schaltstrom (I_{Smax}) entspricht dabei dem stärksten Dauerstrom, der durch den geschlossenen Kontakt fließen darf.

Der minimale Schaltstrom (I_{Smin}) ist der Strom, der durch den geschlossenen Kontakt wenigstens fließen muß, um dessen Funktion zu gewährleisten. Ein Kontakt, durch den ein schwächerer Strom fließt, muß als unzuverlässig angesehen werden.

Wo muß der Kontakt mehr aushalten: beim Ein- oder beim Ausschalten?

Das hängt davon ab, welche Last zu schalten ist. Bei rein ohmscher Last ist die Annahme Einschaltstrom = Dauerstrom = Ausschaltstrom in der Praxis typischerweise gerechtfertigt.

Hohe Einschaltströme (Inrush Currents) ergeben sich beim Einschalten von Glühlampen und kapazitiven Lasten (wie beispielsweise Schaltnetzteilen), Elektromotoren, Transformatoren und Wechselstrom-Betätigungsmagneten (einschließlich Wechselstromrelais). Wird eine induktive Last ausgeschaltet, so wird schlimmstenfalls der maximale Betriebsstrom unterbrochen. Es entsteht aber eine Abschalt-Spannungsspitze. Gibt es keine Unterdrückungsmaßnahmen, kann sie mehrere kV erreichen.

Hinweise:

1. Gelegentlich sind für ohmsche und induktive Lasten verschiedene Schaltströme angegeben.

2. Es gibt Kontaktbauelemente mit besonders hoher Einschaltbelastbarkeit (z. B. 100 A für 5 ms bei ansonsten maximal 6 A Dauerstrom).

Schaltleistung

Die Schaltleistung (P_{Smax}) ist die maximal zulässige Dauerleistung, die durch den Kontakt unterbrochen werden darf (dabei wird eine induktivitätsfreie – rein ohmsche – Last angenommen). Näherungswert: $P_{Smax} = U_{Smax} \cdot I_{Smax}$.

Manche Datenblätter nennen zudem eine minimale Schaltleistung (P_{Smin}), die vom Kontakt geschaltet werden sollte, um die Selbstreinigung zu gewährleisten. Die Mindestwerte für Schaltspannung und Schaltstrom ergeben sich dann zu:

$$U_{Smin} = \frac{P_{Smin}}{I_S} ; I_{Smin} = \frac{P_{Smin}}{U_S} \quad (4.1)$$

Prellzeit

Kontakte prellen beim Umschalten. Die Prellzeitangabe (Bounce Time) kennzeichnet das Zeitintervall vom Beginn des Schaltvorgangs bis zum Erreichen des stationären Zustandes (Verbindung sicher hergestellt oder sicher getrennt). Der Wert ist von Bedeutung, um Gegenmaßnahmen (Entprell-Vorkehrungen) richtig zu dimensionieren. Prelleffekte sind vor allem von Bedeutung bei Kontaktbauelementen, die auf Digitalschaltungen wirken oder programmseitig abgefragt werden.

4.1.5 Mechanische und Zuverlässigkeitskennwerte

Lebensdauer

Die Lebensdauer wird meist nicht in Stunden, sondern in Form einer zugesicherten Mindest-Anzahl von Schaltspielen oder Steckzyklen angegeben.

Mechanische Lebensdauer

Diese Angabe beschreibt die Standfestigkeit der Mechanik (Anzahl der Schaltspiele bis zum Ausfall oder Bruch).

Elektrische Lebensdauer

Diese Angabe beschreibt die Lebensdauer der Kontakte unter voller elektrischer Belastung (Anzahl der Schaltspiele bis zur Unbrauchbarkeit durch Kontaktabnutzung).

Beispiele:

- Steckverbinder sind – je nach Qualität – für 20...50, 100...250, 500...1000* oder mehr Steckzyklen spezifiziert,
- preiswerte Netz- und Leistungsschalter gestatten 10^4 ... 10^5 Schaltspiele (unter Vollast),

- in ähnlicher Größenordnung liegen die in elektronischen Geräten üblichen Kippschalter, Drehschalter und Taster (30 000...60 000 Schaltspiele und mehr; je komplizierter die Mechanik, desto kürzer die Lebensdauer),
- die Mechanik hochwertiger Taster und Mikroschalter hält wenigstens 10^7 Betätigungen aus; die elektrische Lebensdauer wird größenordnungsmäßig mit 10^6 Schaltspielen angegeben,
- preisgünstige DIL-Schalter sind für etwa 1000 Betätigungen spezifiziert; hochwertige Ausführungen (die wesentlich teurer sind) für 10^4 und mehr Betätigungen.

*: Die genannten Wertebereiche entsprechen den Anforderungsstufen 1, 2 und 3 gemäß DIN 41612.

Die Lebensdauer kennwerte gelten typischerweise für Betriebsfälle ohne Lichtbogenbildung (ohmsche Last, induktive Last mit Funkenlöschung). Beim Schalten von Wechselstrom verringert sich die Lebensdauer oder die zulässige Schaltleistung mit zunehmender Phasenverschiebung.

4.1.6 Die Schaltvorgänge

Abb. 4.13 veranschaulicht Einzelheiten des Ein- und Ausschaltens. Von besonderer Bedeutung sind (1) das Einschalten bei anliegender Spannung und (2) das Ausschalten bei fließendem Strom. Aber auch das Schalten ohne Spannung oder Stromfluß (man spricht hier bildhaft vom trockenen Schalten) hat seine Tücken.

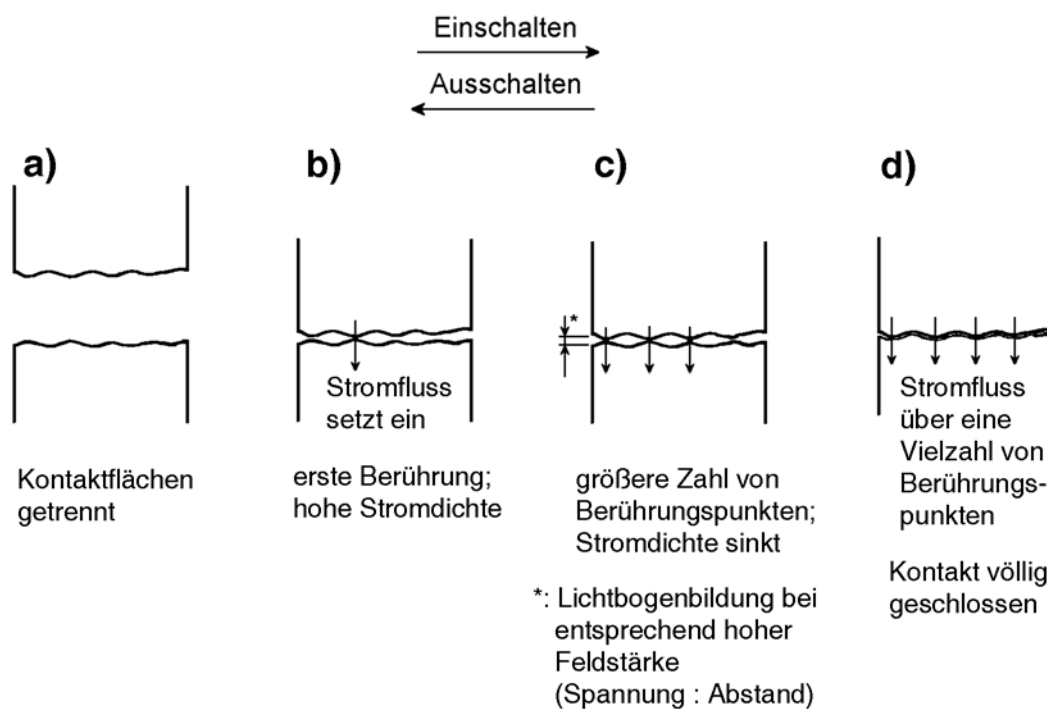


Abb. 4.12 Das Ein- und Ausschalten in Zeitlupe. a) Kontakt offen; b) und c) allmähliches Schließen oder Öffnen; d) Kontakt geschlossen.

Der Kontakt beim Ein- und Ausschalten

Ein Kontakt kann nicht wirklich schlagartig geschlossen oder geöffnet werden. Vielmehr kommen beim Schließen zunächst mikroskopisch kleine Punkte nach und nach miteinander in Berührung. Liegt am Kontakt bereits Spannung an, so kommt ein Stromfluß zustande, der das Kontaktmaterial erwärmt. Das kann soweit gehen, daß das Material an den Kontaktpunkten weich wird, schmilzt oder gar verdampft*. Wird der Kontaktwerkstoff weich, so vergrößert sich die jeweilige Berührungsfläche, so daß die Stromdichte wieder sinkt. Bei völlig geschlossenem Kontakt gibt es dann so viele Berührungspunkte, daß beim Fließen des zulässigen Schaltstroms keine übermäßige Erwärmung mehr auftritt. Beim Öffnen eines stromdurchflossenen Kontakts werden mehr und mehr Berührungspunkte getrennt, und die Stromdichte durch die verbleibenden Berührungspunkte steigt zunächst an.

*: Der Effekt tritt bereits bei Strömen im mA-Bereich auf.

Prellen

Die soeben beschriebenen Vorgänge des Öffnens und Schließens wirken sich so aus, daß die Spannung über dem Kontakt (und sinngemäß der durchfließende Strom) für eine gewisse Zeit (Prellzeit) einen pulsierenden oder anderweitig unregelmäßigen Verlauf aufweist. Prellvorgänge treten sowohl beim Schließen als auch beim Öffnen von Kontakten auf.

Mit Ausnahme mancher quecksilberbenetzter Kontakte kann kein Kontakt als wirklich prellfrei angesehen werden. Auch wenn manche Exemplare eines bestimmten Kontakttyps nachweislich nicht prellen (das betrifft vor allem Elastomerkontakte), sollte man sich nicht darauf verlassen. Richtwerte der Prellzeiten: von etwa 1...2 bis ca. 20...30 ms.



Abb. 4.13 Zwei typische Prellvorgänge (nach [4.46]).

Lichtbogen (Funkenbildung)

Ist der Kontakt nicht völlig geschlossen, gibt es sowohl Berührungspunkte als auch Kontaktflächen, die einen gewissen Abstand voneinander haben. Sind die Abstände mikroskopisch klein, so können auch geringe Spannungen beachtliche Feldstärken verursachen. An den ebenfalls mikroskopisch kleinen Berührungspunkten ergeben sich so

hohe Stromdichten, daß die Temperatur bis auf ca. 5000 ° C ansteigen kann. Die umgebende Luft wird ionisiert. Dies kann dazu führen, daß ein Elektronenstrom vom negativen Pol (der Katode) zum positiven Pol (der Anode) fließt – es bildet sich zeitweilig ein Lichtbogen (Funken).

Materialverlust und -wanderung (Kontaktbrand)

Wird ein Kontakt unter Last geschaltet, sind Abnutzungserscheinungen grundsätzlich nicht zu vermeiden. Der Kontaktwerkstoff wandert von einer Kontaktfläche zur anderen. Zudem kann er durch Verdampfen verlorengehen.

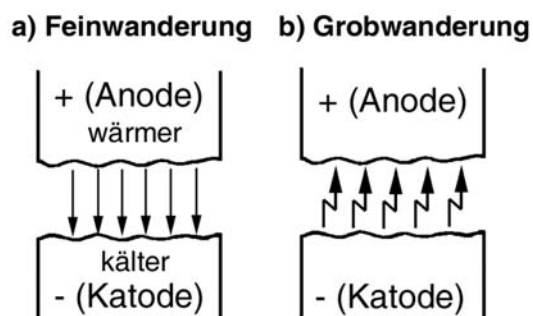


Abb. 4.14 Materialwanderung zwischen Kontaktflächen.

Materialwanderung infolge Erwärmung (Feinwanderung)

Der Kontaktwerkstoff geht von der wärmeren Kontaktfläche auf die kältere über. Wanderungsrichtung: von Plus (Anode) nach Minus (Katode). Diese Materialwanderung findet immer statt, wenn der Kontaktwerkstoff weich wird, also auch dann, wenn sich kein Lichtbogen bildet. Der Kontaktwerkstoff wird immer dann weich, wenn die Schaltspannung größer ist als die Schmelzspannung (Melting Voltage) des Werkstoffs.

Materialwanderung infolge Lichtbogenbildung (Grobwanderung)

Hat ein Lichtbogen gezündet, so wird die Katode wärmer als die Anode. Wanderungsrichtung: von Minus (Katode) nach Plus (Anode).

Die Materialwanderung infolge Lichtbogenbildung (Grobwanderung) überwiegt typischerweise die Materialwanderung infolge Erwärmung (Feinwanderung); das Kontaktmaterial wird von der negativ zur positiv gepolten Kontaktfläche (also von der Katode zu Anode) übertragen.

Bei welcher Spannung bildet sich ein Lichtbogen?

Der pauschale Kennwert ist die sog. Lichtbogengrenzspannung (Arc Voltage) des Kontaktwerkstoffs. Richtwerte*: Kadmium: 10 V, Feinsilber: 14 V, Palladium und Gold: 15 V. Bleibt die Schaltspannung unterhalb der Lichtbogengrenzspannung, so bildet sich kein Lichtbogen. Für höhere Spannungen ist die Lichtbogengrenzkurve (s. weiter unten) des

jeweiligen Bauelements maßgebend.

*: Nach [4.41].

Kontaktfehler als Folge der Materialwanderung:

- es ist soviel Material verschwunden, daß der Kontakt nicht mehr richtig schließt,
- auf dem einen Pol hat sich ein Krater gebildet und auf dem anderen eine Spitze. Es kann vorkommen, daß sich die Spitze im Krater verhakt und somit der Kontakt nicht mehr richtig öffnet.

Verschweißung

Ist der Kontakt geschlossen, so wirkt sich das Abkühlen des geschmolzenen Metalls so aus, daß die entsprechenden Berührungspunkte praktisch miteinander verschweißen. Im Normalfall sind diese Schweißverbindungen aber so schwach, daß sie beim Öffnen des Kontaktes ohne weiteres aufgebrochen werden. Im Fehlerfall (überlasteter Kontakt) kann es jedoch vorkommen, daß die Stellkräfte nicht ausreichen, den Kontakt zu trennen.

Schalten von Gleichstrom

Diese Betriebsweise belastet den Kontakt besonders stark:

- die Polung der Kontaktflächen bleibt gleich, so daß der Kontaktwerkstoff stets in die gleiche Richtung wandert,
- wenn der Kontakt öffnet, so bleibt der Lichtbogen solange stehen, bis der Abstand zwischen den Kontaktflächen hinreichend groß ist.

Ähnliche Verhältnisse liegen vor, wenn Wechselstrom immer während der gleichen Halbwelle geschaltet wird.

Schalten von Wechselstrom

In dieser Betriebsweise wird der Kontakt weniger stark belastet:

- die Polung der Kontaktflächen wechselt ständig, so daß der Kontaktwerkstoff zwischen beiden Flächen hin und her wandert. Der Theorie nach dürften sich somit gar keine Krater und Spitzen bilden.
- ein Lichtbogen bleibt nur bis zum nächsten Nulldurchgang der Wechselspannung stehen. Deshalb genügt zum Verlöschen – verglichen mit dem Gleichstrombetrieb – ein deutlich geringerer Abstand zwischen den Kontaktflächen.
- je höher die Frequenz, desto kürzer die Zeit bis zum nächsten Nulldurchgang, desto eher geht der Lichtbogen aus. Bei höheren Frequenzen darf der Kontakt also stärker belastet werden als bei niedrigeren.

Lastgrenzkurven

Aus den Lastgrenzkurven ist ersichtlich, welche Schaltströme und Schaltspannungen ein Kontakt unter bestimmten Betriebsbedingungen aushält.

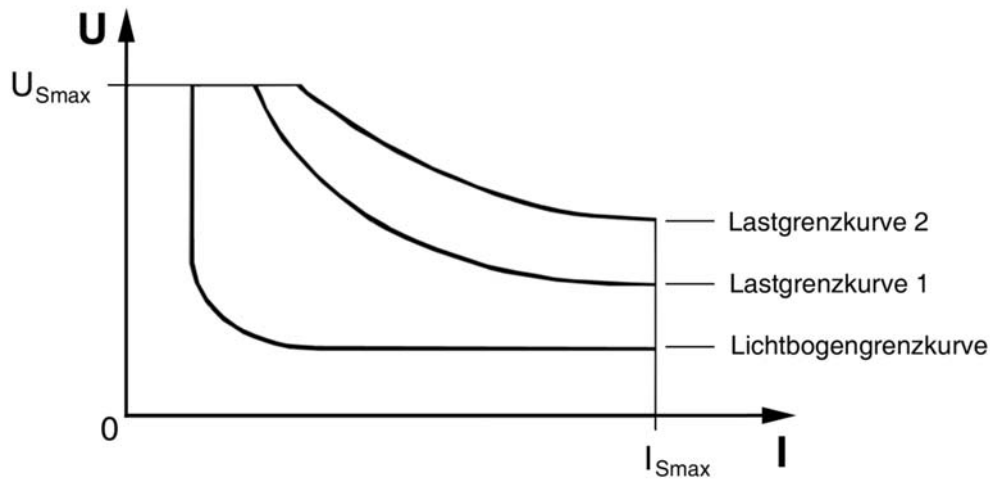


Abb. 4.15 Lastgrenzkurven (Prinzipdarstellung; nach [4.1]).

Lichtbogengrenzkurve

Liegen Schaltspannung und Schaltstrom unterhalb dieser Kurve, so tritt kein Lichtbogen auf.

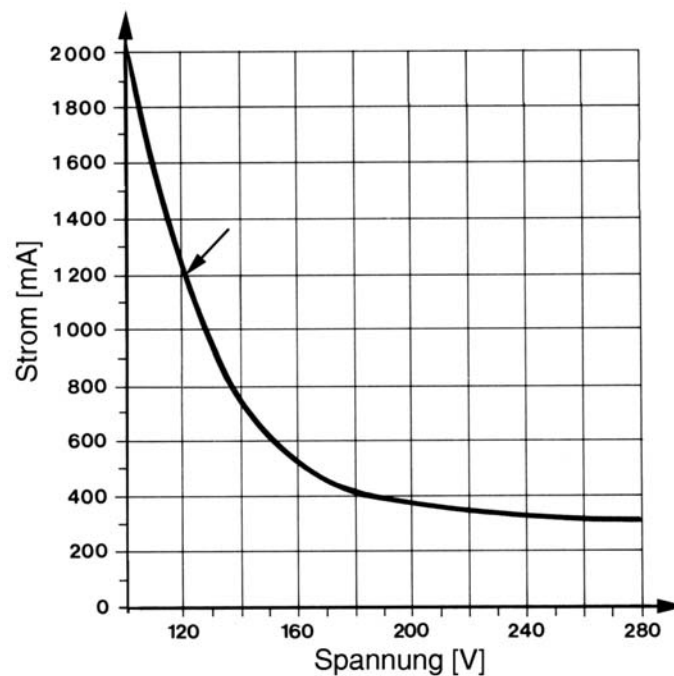


Abb. 4.16 Beispiel einer Lichtbogengrenzkurve (nach [4.2]). Ablesebeispiel (Pfeil): Bei einer Schaltspannung von 120 V dürfen höchstens 1,2 A geschaltet werden, um die Lichtbogenbildung zu vermeiden.

Lastgrenzkurve 1

Liegen Schaltspannung und Schaltstrom unterhalb dieser Kurve, so verlöscht der Lichtbogen, bevor der bewegte Kontakt die jeweils andere feste Kontaktstelle erreicht.

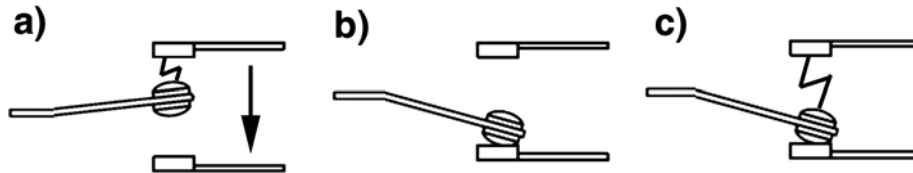


Abb. 4.17 Zur Bedeutung der Lastgrenzkurve 1. Ein Wechselkontakt schaltet um. a) dabei wird zunächst ein Lichtbogen gezogen. b) werden die Bedingungen der Lastgrenzkurve 1 eingehalten, so ist der Lichtbogen sicher erloschen, wenn der bewegliche Kontakt die jeweils andere feste Kontaktfläche erreicht. c) ansonsten kann es vorkommen, daß dann der Lichtbogen noch ansteht und somit eine leitende Verbindung zwischen beiden festen Kontaktflächen gegeben ist.

Lastgrenzkurve 2

Liegen Schaltspannung und Schaltstrom unterhalb dieser Kurve, so ist gewährleistet, daß der Kontakt sicher abschaltet (kein Verschweißen, kein stehender Lichtbogen). Richtwert: Brenndauer des Lichtbogens ≤ 10 ms.

Maßnahmen zu Lichtbogenunterdrückung:

- entsprechende Beschaltung des Kontaktes bzw. der geschalteten Last (Funkenlöschung),
- Wahl geeigneter Kontaktwerkstoffe,
- Betrieb unterhalb der Lichtbogengrenzkurve.

Das trockene Schalten

Trockenes Schalten (Dry Switching) liegt in folgenden Fällen vor:

- es werden niedrige Spannungen (μV ... einige V) und sehr schwache Ströme (μA ...mA) geschaltet,
- beim Schalten liegt keine Spannung über dem Kontakt, und der Stromfluß wird nur bei geschlossenem Kontakt zugelassen (Relaisschaltungen mit entsprechender Taktsteuerung).

Auf den ersten Blick sind dies schonende Betriebsweisen, in denen die Kontakte nur wenig abgenutzt werden (nur mechanischer Verschleiß, keine Funkenbildung und Materialwanderung). Dieser Effekt – Verlängerung der Lebensdauer – tritt jedoch nur dann ein, wenn man Kontaktwerkstoffe verwendet, die keine chemischen Reaktionen mit der Umgebung eingehen (z. B. Gold). Bei Kontakten aus kostengünstigeren Werkstoffen kann sich das trockene Schalten hingegen so auswirken, daß der Übergangswiderstand des

Kontaktes mit der Zeit wächst. Solche Kontakte werden besser unter eine angemessenen Last geschaltet, um die die chemischen Reaktionsprodukte auf den Kontaktflächen zu beseitigen (Selbstreinigung).

Die minimale Kontaktbelastung

Bei den meisten Kontaktwerkstoffen ist eine gewisse Mindestbeanspruchung der Kontaktflächen sicherzustellen, so daß Oxidschichten und andere Ablagerungen gleichsam abgebrannt werden. Diese Selbstreinigung kann durch einen stärkeren Strom bei niedrigerer Spannung oder durch einen schwächeren Strom bei höherer Spannung erreicht werden. Verbindliche Mindestwerte sind aber nur schwierig zu bestimmen (und vor allem: in der Fertigung abzuprüfen)*. Deshalb werden sie nicht immer angegeben. Oft wird es als Selbstverständlichkeit vorausgesetzt, daß man mit einem Schalter "fürs Grobe" keine Ströme im μA -Bereich schaltet und daß man einen Kontakt, der z. B. für 48...230 V vorgesehen ist, nicht dort einsetzen kann, wo es auf μV ankommt. Manchmal sind in den Datenblättern Pauschalangaben zu finden, anhand derer man sich herantasten kann.

*: Es ist eine Kostenfrage. Nicht zuletzt deshalb sind nach militärischen Spezifikationen gefertigte Bauelemente so teuer...

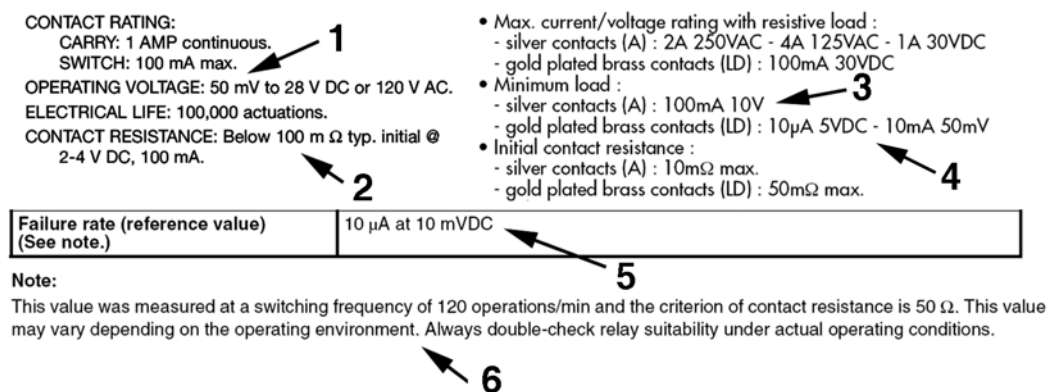


Abb. 4.18 Typische Datenblattangaben. Drei Beispiele, aufs Geratewohl ausgewählt. Die Pfeile zeigen auf Werte und Aussagen, an denen man sich orientieren kann. 1 - 50 mV sollten mindestens geschaltet werden. 2 - wenn man den Kontakt weniger stark belastet, muß man auf Dauer mit einer Erhöhung des Kontaktwiderstands rechnen. 3 - Silberkontakte wollen Strom oder Spannung sehen, sonst werden sie mit der Zeit unzuverlässig. 4 - mit Gold beschichtete Kontakte brauchen nicht viel. Es ist aber keine konstante Schalteistung. 5 - die Werte sind wirklich sehr gering. 6 - dafür gilt es aber, einiges zu beachten ...

Oftmals ergeben die Wertepaare Mindestspannung und Mindeststrom keine konstante minimale Schalteistung. Vgl. Pos. 4 in Abb. 4.18: $10 \mu\text{A} \cdot 5 \text{V} = 50 \mu\text{W}$; $10 \text{mA} \cdot 50 \text{mV} = 500 \mu\text{W}$. Immerhin ist erkennbar, daß dieses Bauelement bei 5 V mit einem nahezu vernachlässigbaren Strom betrieben werden kann, und daß man andererseits auch noch 50 mV schalten kann, vorausgesetzt, es fließt genügend Strom durch den Kontakt. Liegt der

Kennwert des eigenen Vorhabens irgendwo dazwischen, könnte man es zunächst mit linearer Interpolation versuchen. Die 10 mA bei 5 V und die 50 mV bei 500 mW werden vernachlässigt. Damit ergibt sich aus den Endwerten 5 V, 0 μ W und 0 V, 500 μ W ein linearer Abfall von 100 μ W/V. Beispiel: der Kontakt ist an einen Mikrocontroller anzuschalten, der mit 1,8 V betrieben wird. Roh gerechnet ergibt sich eine minimale Schaltleistung P_{\min} für eine bestimmte Spannung $U < 5$ V zu:

$$P_{\min} = 100 \frac{\mu\text{W}}{\text{V}} \cdot (5\text{V} - U)$$

Für $U=1,8$ V ergeben sich 320 μ W und somit ein Strom von rund 178 μ A. Lassen wir also sicherheitshalber das Drei- bis Fünffache fließen (d. h. 0,5...1 mA).

Bei hochwertigen Goldkontakten ist der Mindeststrom normalerweise kein Problem; er darf praktisch = Null sein (trockenes Schalten).

Bei sehr empfindlichen Kontakten läuft es manchmal darauf hinaus, daß vergleichsweise hohe Kontaktwiderstände zugelassen werden*. Vgl. hierzu die Pos. 5 und 6 in Abb. 4.18. Der Hersteller dieses Bauelements bezieht die Mindestangaben lediglich auf einen Lebensdauertest (was bedeutet, daß er sie in der Fertigung nicht fortlaufend prüfen muß ...). Zum Ausgleich empfiehlt er dem Kunden, sein Problem selbst zu lösen (vgl. Pos. 6).

Ist keine Mindeststromangabe bekannt, so schadet es nicht, etwa 1...5 % des zulässigen Schaltstroms anzusetzen (das sind bei typischen Kontakten in Bedienfeldern usw. etwa 1...10 mA).

*: Das ist dann erträglich, wenn nur schwache Stöme fließen, wenn der Kontakt also in einem hochohmigen Stromkreis angeordnet ist Beispiele: (1) Meßstellenauswahl für Spannungsmessung; (2) Eingänge speicherprogrammierbarer Steuerungen. In manchen Fällen kann sogar eine Widerstandserhöhung hingenommen werden, die sich bei trockenem Schalten von Kontakten ergibt, die für diese Betriebsweise an sich weniger geeignet sind.

4.1.7 Kontaktwerkstoffe

Kontaktbauteile sind meist Verbundkonstruktionen. Der eigentliche Kontaktwerkstoff bedeckt lediglich als dünne Schicht die Kontaktfläche. Manche hoch belastbaren Kontakte werden in Sintertechnologie hergestellt.

Werkstoff	Erläuterungen
Silber (Feinsilber; Ag)	Silber ist der beste elektrische Leiter und der am meisten verwendete Kontaktwerkstoff. Kann durch Schwefeleinwirkung anlaufen. Empfehlung: Schaltspannung > 6 V. Silberkontakte neigen zum Verschweißen und zur Materialwanderung. Um die Lagerfähigkeit zu verbessern, haben Silberkontakte oft eine Hauchvergoldung

Werkstoff	Erläuterungen
Silber-Nickel (Ag Ni)	gute Abbrandfestigkeit, geringe Verschweißneigung. Geeignet, um Lasten zu schalten, die Stromspitzen verursachen. Etwas höherer Kontaktwiderstand als Feinsilber
Silber-Palladium (Ag Pd)	gute Abbrandfestigkeit; unempfindlich gegen Schwefel. Etwas höherer Kontaktwiderstand als Feinsilber
Silber-Cadmiumoxid (Ag Cd O)	für große Schaltleistungen (gute Abbrandfestigkeit, geringe Verschweißneigung). Empfohlene Schaltspannung > 12 V. Vorzugsweise in Netzstromkreisen angewendet, wenn bei hohen Schaltleistungen Einschaltstromspitzen auftreten. Nicht für trockenen Betrieb geeignet
Silber-Zinnoxid (Ag Sn O ₂)	für große Schaltleistungen (gute Abbrandfestigkeit, sehr geringe Verschweißneigung). Geringe Materialwanderung bei Gleichstromelastung. Geringe Umweltbelastung. Alternative (RoHS) zu Ag Cd O (das aber auch als RoHS-konform eingestuft ist)
Gold (Feingold, Au)	geringer Durchgangswiderstand; weitgehend unempfindlich gegen Umgebungseinflüsse. Für trockenes Schalten geeignet. Sinnvoller Einsatz auf geringere Schaltleistungen beschränkt (gängige Höchstwerte: 24 V, 200 mA, 5 W); ansonsten Abnutzung zu groß. (Gold wird als galvanischer Überzug von 0,1...10 µm beispielsweise auf Nickel aufgebracht.)
Gold-Legierungen (Gold-Nickel Au Ni, Gold-Silber Au Ag usw.)	härter als Feingold (Au-Ni ist deutlich härter als Au Ag), höhere Abbrandfestigkeit, Weitgehend unempfindlich gegen Industrie-atmosphäre (Schwefel usw.)
Platin (Pt)	sehr widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse, hohe Abbrandfestigkeit. Gut einsetzbar bei mittleren Spannungen und geringen Strömen (z. B. in der Fernschreibtechnik: 60 V; 20... 40 mA). Bei höheren Schaltleistungen Neigung zu Materialwanderung
Palladium (Pd)	gute Abbrandfestigkeit; kostengünstiger als Platin. Einsatz z. B. in der KFZ-Elektrik
Palladium-Kupfer (Pt Cu)	gute Abbrandfestigkeit und lange Lebensdauer. Durchgangswiderstand höher. Einsatz z. B. in der KFZ-Elektrik beim Schalten von Lampen
Rhodium (Rh); Palladium-Nickel (Pt Ni)	chemisch noch widerstandsfähiger als Platin; geringer Durchgangswiderstand. Wird als harte und abriebfeste galvanische Schicht verwendet (z. B. auf Steckkontakten)
Wolfram (Tungsten; W)	höchster Schmelzpunkt aller Metalle; geringe Schweißneigung, hohe Abbrandfestigkeit, korrosionsanfällig. Erfordert hohe Kontaktkräfte. Empfohlene Schaltspannung > 6 V. Anwendung z. B. in Unterbrechern von Verbrennungsmotoren oder als Vorlaufkontaktin hoch belastbaren Relais
Kohle	lichtbogenfreies Schalten hoher Ströme bei niedrigen Spannungen, hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Einflüssen, sehr gute Gleiteigenschaften (selbstschmierend). Anwendung vorwiegend für Schleifkontakte (Kohlebürsten)

Tabelle 4.3 Kontaktwerkstoffe (Auswahl).