Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 53 (1962)
Heft: 18

Artikel: Die Beurteilung der Kontaktwerkstoffe für elektrische Schaltgeräte
Autor: Rieder, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916969

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Beurteilung der Kontaktwerkstoffe für elektrische Schaltgeräte

Von *W. Rieder*, Baden

621.3.066.6.001.4 : 621.316.542

Es wird der Versuch unternommen, die Anforderungen, welche an einen Kontaktwerkstoff gestellt werden, möglichst exakt zu analysieren und zu untersuchen, ob und wie die wesentlichen Materialeigenschaften berechnet und gemessen werden können. Da die technischen Forderungen einander vielfach ausschliessen, kann es einen idealen Kontaktwerkstoff grundsätzlich nicht geben. Jedes «gute» Material ist ein Kompromiss. Eine systematische Untersuchung der speziellen Anforderungen an den Kontaktwerkstoff seitens der Konstruktion und des Betriebes sowie eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der gebräuchlichen Materialien sollen dem Praktiker die Werkstoffwahl erleichtern, aber auch zeigen, welche grundlegenden Fragen noch beantwortet werden müssen.

On se propose d'analyser aussi précisément que possible les conditions auxquelles les matériaux de contact doivent répondre. En plus on veut si on peut calculer et mesurer les propriétés les plus importantes, et déterminer la méthode à suivre. Comme souvent les exigences techniques sont contradictoires, il n'existe pas de matériaux de contact idéals. Tout matériau considéré «bon» représente un compromis. Pour l'homme de la pratique, une analyse systématique des exigeances spéciales que doit remplir le matériau de contact par des paramètres de construction et de service, ainsi qu'une vue générale des propriétés essentielles, peut faciliter son choix. D'autre part ça lui permet de voir les problèmes fondamentaux restants encore à résoudre.

1. Die Werkstoffeigenschaften und deren Messung

Um für einen bestimmten Schalter das am besten geeignete Kontaktmaterial zu wählen, muss man die an den Werkstoff gestellten Anforderungen klar formulieren und die wirklichen Materialeigenschaften genau kennen.

Es wäre wünschenswert, die technischen Forderungen (geringer Kontaktwiderstand, hohe Schweiss- und Abbrandfestigkeit usw.) auf Grund bekannter Zusammenhänge auf möglichst wenige, gut messbare physikalische Grundeigenschaften des Stoffes zurückzuführen (z. B. spezifischer Widerstand, Dichte, Härte, Schmelzpunkt). In diesem Sinne werden im Folgenden die in Tabelle I zusammengestellten Forderungen und die zu ihrer Befriedigung erforderlichen Grundeigenschaften diskutiert.

1.1 Geringer Kontaktwiderstand

Ein hoher Kontaktwiderstand erwärmt die Schaltstücke sowie die anschliessende Strombahn und Isolation; er bedingt grosse Leiterquerschnitte zum Ableiten der Kontaktwärme [1][1]) sowie temperaturbeständige Isolierstoffe, wodurch das Gerät vergrössert und verteuert wird. Vor allem gefährdet eine hohe Temperatur den Kontakt selbst, weil sie vehemente Oxydation und Heisskontaktbildung (1.2) oder ein Verschweissen der Schaltstücke (1.3, 1.5) verursachen kann.

Die Berechnung des Kontaktwiderstandes R aus der Kontaktkraft F und den Werkstoffeigenschaften ϱ (spezifischer Widerstand), σ (spezifischer Hautwiderstand monomolekularer Schichten), H (Härte) bzw. E (Elastizitätsmodul) und m (Längsquerdehnungsverhältnis, Poisson-Konstante) ist möglich, sofern die Kontaktflächen nur von je einer monomolekularen Hautschicht bedeckt sind, welche sich in Luft auch auf den edelsten Metallen bildet [2]:

$$R = \underbrace{\frac{\varrho}{2\,r_a}}_{R_e} + \underbrace{\frac{'\sigma}{\pi\,r_a^2}}_{R_h} \qquad (1)$$

(r_a Radius der leitenden Kontaktfläche, R_e Engewiderstand, R_h Hautwiderstand).

Bei rein elastischer Verformung der Kontaktfläche ist:

$$r_a = \sqrt[3]{\frac{3}{2} F k_f \frac{1-m^2}{E}} \qquad (2)$$

(Formfaktor $k_f = r_1 r_2/(r_1 + r_2)$ für Kugelkalotten mit den Krümmungsradien r_1 und r_2; für gleiche gekreuzte Zylinder ist $k_f = r$, dem Zylinderradius).

Bei rein plastischer Verformung ist:

$$r_a = \sqrt{\frac{F}{\pi H}} \qquad (3)$$

Aus diesen Zusammenhängen folgen unmittelbar die Forderungen bezüglich der Grundeigenschaften a...d der Tabelle. Der spezifische Hautwiderstand σ beträgt ziemlich unabhängig vom Metall wenige $10^{-8}\ \Omega\ \mathrm{cm}^2$.

Bildet sich bei unedlen Metallen eine mehr als monomolekulare Makrohautschicht aus chemischen Verbindungen des Metalls oder auch aus anderen (organischen) Verunreinigungen, dann wird der Kontaktwiderstand über den nach Gl. (1) berechneten Wert hinaus erhöht. Obwohl die Makrohautschichten in der Regel Halbleiter sind, so ist ihre Leitfähigkeit praktisch doch belanglos, weshalb sie mechanisch zerstört werden müssen.

Diese Zerstörung ist umso schwieriger, je dicker und fester die Hautschicht ist [2, 3, 4]. Sofern die Hautschicht nicht durch eine selbstreinigende Bewegung des Kontaktes zerstört wird, muss dies durch plastische Verformung der Kontaktfläche beim Schliessen geschehen. Bei hinreichender plastischer Deformation treten in der Kontaktfläche Hautschichtrisse auf, in welche das fliessende Metall gepresst wird, so dass schliesslich auf einem sehr geringen Teil der mechanischen Berührungsfläche metallische Kontaktgabe erfolgt.

Solange die Schaltstücke nur elastisch verformt werden, ist die Druckverteilung über dem Radius der (kreisförmigen) Kontaktfläche p durch die Beziehung gegeben:

$$p = p_0 \frac{r_a^2 - r^2}{r_a^2} \qquad (4)$$

(r radiale Koordinate)

wobei

$$p_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi\,r_a^2} \qquad (5)$$

der Maximaldruck im Zentrum der Berührungsfläche ist.

Wenn der nach Gl. (5) errechnete Wert p_0 den Betrag der Fliessgrenze (Härte) H überschreitet, gelten die Gl. (2), (4) und (5) nicht mehr, weil das Material zu fliessen beginnt, sobald der Druck die Fliessgrenze erreicht.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Plastische Verformung erfolgt deshalb sicher, wenn die Kontaktkraft den kritischen Wert:

$$F_p = \frac{2\pi^3}{3} \cdot \frac{H^3}{E^2}(1-m^2)^2 \; k_f{}^2 \qquad (6a)$$

bzw. der Radius der Kontaktfläche den zugehörigen Wert:

$$r_{ap} = \pi \frac{H}{E}(1-m^2)\, k_f \qquad (6b)$$

überschreitet. (Wegen der meistens vorhandenen Oberflächenrauhigkeiten kann man in der Praxis schon bei kleineren Kräften plastische Verformung erwarten — allerdings nicht mit Sicherheit.)

Um schon bei möglichst kleiner Kontaktkraft plastische Verformung zu erreichen, bzw. um bei gegebener Kontaktkraft eine möglichst starke plastische Verformung zu erzielen, soll H möglichst klein, E und m hingegen möglichst gross sein. Ausserdem sollte die Hautschicht dünn und wenig fest sein.

Es ist nun äusserst schwierig, für die mechanischen Eigenschaften (Zerstörbarkeit) der Hautschichten ein brauchbares Mass zu finden, zumal diese durch zahlreiche Parameter beeinflusst werden, wie Oberflächenbearbeitung, Oberflächenverunreinigungen, Wachstumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, atmosphärische Verunreinigungen, Alter der Hautschicht (Wachstumsdauer), Störung des Hautschichtwachstums (Verletzungen durch Betätigung des Kontaktes und durch Schaltlichtbögen). Man muss deshalb den Kontaktwiderstand an Schaltstücken mit Hautschichten, die unter verschiedenen Bedingungen gewachsen sind, bei verschiedenen Kontaktkräften unmittelbar messen und dann das Verhältnis des wirklichen Kontaktwiderstandes zum berechneten Engewiderstand als Hautschichtfaktor des Kontaktwiderstandes f angeben:

$$f = R_{gemessen} : R_{e\,theor.}$$

Dieser Faktor ist natürlich eine Funktion der bereits genannten Parameter sowie der Kontaktkraft, der Kontaktform und der Art des Schliessens des Kontaktes (tangentiale Kraftkomponente, kinetische Energie, Prellen).

Für Materialvergleiche kann man einige Parameter leicht normen, indem man beispielsweise festlegt, dass die Hautschicht bei bestimmter Temperatur und Luftfeuchtigkeit (wenig exakt, aber meist hinreichend genau: in einer mitteleuropäischen Schublade) eine bestimmte Zeit (etwa ein halbes Jahr) ungestört wachsen soll, dass (aus messtechnischen Gründen) die Messung an gekreuzten Zylindern eines bestimmten Durchmessers (etwa 8 mm) zu erfolgen hat, dass die Kontakte behutsam, d. h. ohne kinetische Energie und ohne tangentiale Bewegungskomponente, zu schliessen sind und die elastische Nachwirkung abzuwarten ist. Die Messung muss bei verschiedenen Kontaktkräften erfolgen. Als Oberflächenbearbeitung (Reinigung) vor der Alterung ist Schaben am einfachsten und sehr wirklichkeitsnahe, wenn auch nicht ideal, da die Gefahr besteht, dass der Krümmungsradius der Proben verändert, die Oberfläche zerkratzt und verunreinigt wird. Zudem muss der Schaber stets härter sein als die Probe. Schmirgeln ist nicht ratsam, weil das Schmirgelpapier eine sehr fest haftende Hautschicht aus dem Bindemittel der Schmirgelkörner hinterlässt, die nur schwer zu entfernen ist.

Zweifellos wäre schon viel gewonnen, wenn man wenigstens die so zu messenden Hautschichtfaktoren für die wichtigsten Werkstoffe kennen würde [4]. Nicht weniger bedeutend ist auch der Einfluss jener Hautschichten, die durch den Schaltlichtbogen gebildet werden. Entsprechende Messungen sind aber schwierig, weil die Proben durch den Lichtbogen nicht nur lokal entfestigt, sondern auch durch Abbrand und Schmelzperlenbildung in ihrer Form verändert werden.

1.2 Keine Neigung zur Heisskontaktbildung

Hautschichten, deren Wachstum nicht zum Stillstand kommt, deren Wachstumsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zunimmt und die auch bei hohen Temperaturen noch beständig sind, können das plötzliche Entstehen sog. Heisskontakte verursachen. Dieser zwar seltene, aber äusserst unangenehme Effekt besteht darin, dass eine Oxydschicht in die Kontaktfläche eines lange Zeit geschlossenen, stromführenden Kontaktes hineinwächst, wodurch Kontaktwiderstand und Temperatur anfänglich nur langsam erhöht werden, bis infolge der höheren Temperatur auch die Oxydation beschleunigt wird und der Kontakt schliesslich nach langem klaglosen Funktionieren plötzlich entweder seine Leitfähigkeit verliert oder (bei höheren Betriebsspannungen) glüht und schmilzt [5].

Da die Heisskontaktbildung durch jeden Schaltvorgang, ja sogar durch Erschütterung des Kontaktes gestört wird, bleibt sie auf sehr selten betätigte Schalter und auf Schraubverbindungen beschränkt. Wann der Effekt auftritt, hängt von der Kontaktkraft, der Temperatur, der Stromstärke, den Erschütterungen und den atmosphärischen Verunreinigungen ab und kann auf Grund des Hautschichtwachstums bei höheren Temperaturen und der Temperaturbeständigkeit der Hautschicht nur qualitativ abgeschätzt werden.

1.3 Geringe Schweissneigung geschlossener Kontakte

Die Grenzstromstärke des Verschweissens eines ruhenden, stromdurchflossenen Kontaktes kann unmittelbar gemessen werden. Dabei ist folgendes zu beachten:

a) Das bewegliche Schaltstück sinkt beim Erweichen (Entfestigen) und beim Schmelzen des Materials unter dem Einfluss der Kontaktkraft, nach, wobei die Reibung der unvermeidlichen Lager und Führungen sowie die Trägheit der bewegten Massen zu überwinden sind.

b) Bei höheren Stromstärken treten im Kontakt elektrodynamische Kräfte auf, welche der Kontaktkraft entgegenwirken und diese übertreffen können [2]. Auch in der Stromzuführung können Stromkräfte wirksam werden.

Zwei Metallstücke verschweissen auch bei Zimmertemperatur, sobald rein metallische Berührung erfolgt. Die praktisch stets vorhandene Molekelhaut verhindert ein Verschweissen, weshalb die Hautschichten allgemein als Schutz gegen das Verschweissen angesehen werden. Wird jedoch die Kontaktstelle durch Strombelastung bis zur Entfestigungstemperatur erwärmt, dann sinkt der Kontakt unter dem Einfluss der Kontaktkraft nach, die Kontaktfläche wird vergrössert und die sie bedeckende Hautschicht mechanisch beschädigt (zerrissen). Erfahrungsgemäss stimmt die Schweisstemperatur oft mit der Entfestigungstemperatur gut überein [2], kann aber auch durch die thermische Zerstörung (Dissoziation) der Hautschicht bestimmt werden.

Da die kritische Kontakttemperatur bei umso kleinerem Strom erreicht wird, je höher der Kontaktwiderstand ist, der Kontaktwiderstand aber seinerseits wiederum durch eine Hautschicht erhöht wird, kann die prinzipiell erwünschte Hautschicht die kritische Schweiss-Stromstärke (bei gegebener Kontaktkraft) herabsetzen. Der Hautschichtfaktor kann somit für die Schweissgrenze sowohl grösser als auch kleiner als eins sein. Ein schweissfester Kontaktwerkstoff soll deshalb einen geringen Kontaktwiderstand, aber trotzdem eine stabile Hautschicht besitzen und zudem eine hohe Entfestigungstemperatur aufweisen. Auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit ist vorteilhaft, während eine hohe spezifische Wärme kaum ins Gewicht fällt, da der Gleichgewichtszustand innerhalb eines Bruchteils einer Stromhalbwelle erreicht wird [6].

Vor allem wegen der zwiespältigen Rolle der Hautschicht ist es nicht möglich, die Schweissgrenze auf Grund bekannter Werkstoffdaten als Funktion der Kontaktkraft zu berechnen. Die Grenzstromstärke und ihr Hautschichtfaktor müssen deshalb so wie der Kontaktwiderstand mit Hautschicht experimentell als Funktion der Kontaktkraft und der Wachstumsbedingungen der Hautschicht bestimmt werden.

1.4 Geringe Schweissneigung beim Einschalten

In vielen Fällen ist das Verschweissen der Kontakte beim Einschalten viel kritischer als das eben besprochene Schweissen ruhender Kontakte. Beim Einschalten erfolgt schon vor der Berührung der Schaltstücke ein Spannungsdurchschlag, der einen Einschaltlichtbogen einleitet. Dieser Lichtbogen zerstört die Hautschichten der Kontakte, heizt die Schaltstücke vor der Berührung viel stärker auf als der Kontaktwiderstand und schafft so ausgezeichnete Schweissbedingungen. Erfolgt das Schliessen nicht prellfrei, so öffnet der Kontakt nochmals, wobei wiederum ein Lichtbogen entsteht, der ziemlich lange brennt, ehe der Kontakt endgültig schliesst.

Da die Erwärmung der Lichtbogen-Fusspunkte nicht nur von der Stromstärke und Lichtbogendauer sondern auch vom Elektrodenabstand abhängt [7], sind für das Schweissen beim Einschalten folgende Parameter von Bedeutung: die Zündentfernung (EMK der Stromquelle), der Stromverlauf (bei Gleichstrom: Widerstand und Zeitkonstante des Kreises; bei Wechselstrom: Impedanz und Phasenlage; bei Kondensatorentladung: Kapazität und Widerstand), die Schliessgeschwindigkeit (in der Regel nicht konstant), die Prellhöhe und -dauer, sowie die Kontaktkraft.

Es ist also keineswegs einfach, die Schweissgrenze beim Einschalten reproduzierbar zu messen. Die grösste Schwierigkeit bietet dabei sowohl beim Laboratoriumversuch als auch in der Praxis das Prellen. Versuche mit verschiedenen Schaltern sind schon aus diesem Grunde, aber auch wegen der meist nicht hinreichend definierten Stromkreise und Schliessgeschwindigkeiten nicht vergleichbar.

Für sehr kleine Kontaktkräfte (Fernsprechrelais) ist bereits eine prellfreie Versuchseinrichtung zur Messung des Schweissens beim Einschalten vorgeschlagen worden [8].

Seitens des Werkstoffes wird die Schweissgrenze beim Schliessen sicherlich durch die Oberflächenbeschaffenheit (Schlagweite), die Höhe des Kathoden- und Anodenfalles (Austrittsarbeit), Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme, Schmelzwärme und -temperatur und die Eigenschaften des Oxydes sowie jene Daten bestimmt, die das Prellen beeinflussen (spezifisches Gewicht, Härte). Eine Berechnung der Schweissgrenze aus diesen Werten ist jedoch nicht möglich.

1.5 Geringe Schweisskraft

Neben der Schweissgrenze ist auch die Kraft, welche erforderlich ist, um einen verschweissten Kontakt wieder zu öffnen, von erheblicher praktischer Bedeutung. Je nach Konstruktion des Schalters stehen hiefür mehr oder weniger grosse Öffnungskräfte zur Verfügung. Zwar bedingt eine wieder aufgerissene Verschweissung oft störende Veränderungen der Kontaktoberflächen, aber der Schalter bleibt doch noch funktionsfähig. Praktisch interessiert die zulässige Stromstärke bei gegebener Kontakt- und Öffnungskraft. Sie ist durch die Grösse der Kontaktfläche (Kontaktkraft, Härte, Entfestigungs- und Schmelztemperatur), die Hautschicht sowie die Zugfestigkeit und Sprödigkeit des geschweissten Materials bedingt und nicht berechenbar.

Man muss deshalb die Schweisskraft beim Schweissen geschlossener Kontakte als Funktion der Kontaktkraft und der Stromstärke unmittelbar messen, wobei wiederum ein «Hautschichtfaktor der Schweisskraft» zu bestimmen ist. Beim Schweissen schliessender Kontakte ist die Zahl der Parameter entsprechend grösser (vgl. Abschnitt 1.4).

1.6 Hohe Abbrandfestigkeit

Für die Lebensdauer von Schaltkontakten für grössere Leistungen ist deren Materialverlust durch Verdampfen und Verspritzen massgebend.

Der Materialverlust kann durch Wägung der Schaltstücke nach einer bestimmten Schaltzahl gemessen werden. Für den Kontaktabbrand sind (wie beim Schweissen schliessender Kontakte) zahlreiche Parameter der Prüfeinrichtung von Bedeutung: Stromstärke, Betriebsfrequenz des Stromes, Phasenlage des Stromes bei Kontakttrennung, Öffnungsgeschwindigkeit (als Funktion der Zeit), Bogenlänge, Spannung, Widerstand des Stromkreises, Induktivität des Stromkreises, Kapazität des Stromkreises, Wärmekapazität der Schaltstücke, Wärmeableitung, Vorerwärmung der Schaltstrecke (Schaltfrequenz), Bewegung der Lichtbogen-Fusspunkte. Man erhält deshalb mit verschiedenen Schaltern, Stromkreisen und Schaltfrequenzen keine vergleichbaren Resultate.

Die Abbrandbedingungen sind am einwandfreisten definiert, wenn bei unveränderlichem Elektrodenabstand ein Gleichstrombogen durch einen Hochspannungs-(Hochfrequenz-)Impuls gezündet und nach bestimmter Zeit möglichst unstetig (durch Kurzschliessen) wieder unterbrochen wird. Dabei werden aber die sehr wesentlichen Vorgänge bei der Kontakttrennung nicht erfasst. Bei Messungen an wirklichkeitsgemäss öffnenden Kontakten bereitet wiederum die exakte Definition des Bewegungs- und des Stromverlaufes Schwierigkeiten.

Die den Elektroden zugeführte Wärmeleistung ist vom Betrag des Kathoden- bzw. Anodenfalls, von der Temperaturverteilung im Fusspunkt («Fusspunkt-Durchmesser»), der Austrittsarbeit, der Wärmeleitfähigkeit und der Siedetemperatur des Elektrodenmaterials abhängig. Dabei beeinflussen die Materialeigenschaften jene Grössen in so komplexer Weise, dass deren Berechnung praktisch nicht möglich ist.

Die den Elektroden zugeführte Wärmeleistung ist zumindest für den Niederstrombogen in Luft eine durch direkte Messungen bereits bekannte Funktion von Bogenlänge, Stromstärke und Elektrodenmaterial [7]. Sie wird zum Teil durch Wärmeleitung in das Innere der Elektroden abgeführt, zum anderen Teil zum Erwärmen, Schmelzen und Verdampfen des Elektrodenmaterials im Lichtbogenfusspunkt verbraucht. Die abgeleitete Wärme kann bei bekanntem «Durchmesser» des Fusspunktes berechnet, die Temperaturverteilung im Fusspunkt optisch bestimmt werden.

Obwohl also die wesentlichen Zusammenhänge bekannt sind, ist eine quantitative Berechnung des Abbrandes auf Grund der Versuchsbedingungen und der Materialkonstanten doch kaum möglich, zumal der Beitrag des verspritzten Materials schwer zu erfassen ist. Hier bedarf es noch exakter, direkter Messungen.

Jedenfalls sind ein möglichst hoher Schmelz- und Siedepunkt sowie hohe Werte der spezifischen Wärme, der Schmelz- und der Verdampfungswärme (bezogen auf die Volumeneinheit) erwünscht. Das Integral der spezifischen Wärme pro cm^3 (einschliesslich Schmelz- und Verdampfungswärme) von Zimmertemperatur bis zum Schmelz- und Siedepunkt ist wohl ein brauchbarer Hinweis für die Abbrandfestigkeit eines Werkstoffes. Dieses Integral kann für die meisten Metalle aus bekannten Daten berechnet werden, doch dürfte diese Angabe allein kaum genügen, da sie beispielsweise die Flüchtigkeit der Oxyde, die Wärmeleitfähigkeit, den Kathodenmechanismus und das Verspritzen des Metalls beim Ausscheiden gelöster Gase (Spratzen) unberücksichtigt lässt. Weiter ist zu beachten, dass hautschichtfreie Metalloberflächen die Rückgewinnung eines Teiles des verdampften und verspritzten Materials gestattet, soferne dieses nicht oxydiert.

Der Abbrand wird durch das Löschmedium (z. B. Öl, SF_6) stark beeinflusst.

1.7 Geringe Grobwanderung

An Gleichstromkontakten, die kleinere Leistungen (jedoch im Existenzgebiet des Lichtbogens) schalten, beobachtet man eine Materialwanderung von der Kathode zur Anode, die sog. Grobwanderung. Um sie zu eliminieren bzw. klein zu halten, wünscht man hohe Grenzwerte von Strom und Spannung, unter welchen kein Lichtbogen existieren kann, und jedenfalls einen kleinen Grobwanderungskoeffizienten.

Die Lichtbogen-Grenzwerte für sehr kleine Bogenlängen betragen etwa 15 V und 0,5 A und sind ausser vom Elektrodenmaterial auch stark von den vorangegangenen Schaltungen abhängig [2,3]. Dieser Formierungseffekt gestattet nicht die Festlegung exakter Grenzwerte.

Oberhalb der Grenzwerte ist die transportierte Materialmenge proportional dem Energiestrom zur Kathode [2], bei kurzen Bögen also vor allem proportional dem Kathodenfall und der transportierten Ladung. Der Proportionalitätsfaktor γ wurde für einige Stoffe gemessen [2]:

W	Ag	Cu	Au	Pt
$\gamma = 0{,}04$	0,4	0,8	1,1	$1{,}2 \times 10^{-6}$ cm^3/C

Eine theoretische Berechnung wurde nicht versucht. Der Betrag des Kathodenfalls ist offensichtlich belanglos.

1.8 Geringe Feinwanderung

Im Gebiet unterhalb der Lichtbogen-Grenzkurve tritt eine meistens von der Anode zur Kathode gerichtete Materialwanderung — genannt Feinwanderung — auf, die zwar mengenmässig geringer als die lichtbogenbedingte Grobwanderung ist, aber vor allem wegen ihrer Form gefürchtet wird. Es entstehen nämlich oft lange Spitzen, die sich in den komplementären Löchern verhaken und dadurch den Kontakt betriebsunfähig machen können [2].

Während es verhältnismässig leicht ist, die Feinwanderung mengenmässig zu messen, ist es äusserst schwierig, ein Mass für die gefürchteten Formen zu finden [9]. Aber auch die gemessenen Feinwanderungskoeffizienten sind kaum allgemeingültig.

Die Feinwanderung kann verschiedene Ursachen haben: Vor allem ist zwischen der reinen Brückenwanderung und der durch extrem kurzdauernde, instationäre Funkenentladung verursachten Materialwanderung zu unterscheiden, was jedoch in der Praxis oft schwierig sein dürfte. Jedenfalls ist das Problem der Feinwanderung besonders komplex und kann im Rahmen dieses Aufsatzes nur erwähnt werden [2; 3; 10].

1.9 Hohe Wiederzündspannung

In Wechselstromschaltern wird der Lichtbogen in der Regel nicht während einer Stromhalbwelle (gleichstrommässig) unterbrochen, sondern es wird nur das Wiederzünden nach seinem Erlöschen im natürlichen Stromnulldurchgang der Betriebsfrequenz verhindert. Es ist eine paradox erscheinende, aber technisch sehr bedeutsame Tatsache, dass kürzere Bogenstrecken u. U. eine höhere Wiederzündspannung erfordern als längere [11; 12; 13; 14].

Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je niedriger der Schmelzpunkt des Elektrodenmaterials liegt [11]. Die höchste Wiederzündspannung erfordert deshalb Quecksilber, gefolgt von Cd, Zn, Bi, Sb, Pb, Cu, Fe. Bei sehr hoch schmelzenden Stoffen (Kohle, W, Mo), aber auch bei niedrig schmelzenden Metallen, welche sehr temperaturbeständige Oxyde besitzen (Mg, Al, Mn) erfolgt jedoch das Wiederzünden infolge Thermoelektronenemission schon bei extrem geringen Spannungen.

Die Wiederzündspannung (als Funktion der Zeit nach dem Stromnulldurchgang) kann leicht gemessen werden, indem man den Verlauf der wiederkehrenden Spannung oszillographiert und deren Steilheit durch Parallelkapazitäten variiert.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der beschriebene Effekt nur das Wiederzünden kurzer Wechselstrombögen betrifft, den niedrig schmelzenden Metallen also deshalb keineswegs generell eine lichtbogenlöschende Wirkung zuzuschreiben ist.

1.10 Hohe Beweglichkeit der Lichtbogen-Fusspunkte

Um den Abbrand zu verringern und die Lichtbogenlöschung zu forcieren [14], werden in vielen Schaltern die Lichtbogenfusspunkte durch ein Magnetfeld über die Elektrodenoberflächen bewegt. Die hiezu bei gegebenem Elektrodenabstand und Bogenstrom erforderliche Mindestfeldstärke bzw. die erzielte Geschwindigkeit ist hautschicht- und materialabhängig. Folgende Reihung entspricht zunehmender Beweglichkeit [15]:

Ag, Cu, Fe, Al, Messing, Pb, Lötzinn, Ni, Neusilber, Zn, Cd, C. Quantitative Messungen liegen nur für Kupfer, Silber und Wolfram vor [16].

1.11 Geringer mechanischer Verschleiss

Auch in mechanischer Hinsicht werden an Kontakte oft erhebliche Anforderungen gestellt. Bei Gleitkontakten, Wälzkontakten und Kontakten mit selbstreinigender Schliessbewegung stört vor allem der unvermeidliche Abrieb, weil der feine Metallstaub die Isolation überzieht und Kriechwege schafft.

Bei Gleitkontakten, Stromabnehmern, Kollektoren usw. ist auch die Reibnug zu berücksichtigen. Sie wird durch die natürlichen Hautschichten wesentlich herabgesetzt [2]. Darüber hinaus wurden aber auch Werkstoffe mit extrem geringen Reibungskoeffizienten sowie spezielle Schmiermittel entwickelt.

Starkstromschalter schliessen oft mit erheblicher kinetischer Energie, wodurch die Kontakte mechanisch verformt (niedergehämmert werden). Spröde Stoffe (W) brechen infolge der starken Schläge u. U. aus.

Im Grossen und Ganzen sind die mechanischen Eigenschaften von untergeordneter Bedeutung, abgesehen von der unangenehmen Eigenschaft des Aluminiums, unter dem Druck von Schraubverbindungen wegzufliessen. Reibungskoeffizient, Härte, Schlagzähigkeit und Abriebfestigkeit sind in diesem Zusammenhang die wichtigsten Grundgrössen.

1.12 Gute Bearbeitbarkeit

Von praktischer Bedeutung ist auch die Forderung nach bequemer und daher billiger Bearbeitungsmöglichkeit mit den üblichen Verfahren. Wenn auch hier nicht der Platz ist, auf diese Fabrikationsprobleme einzugehen, so soll doch darauf verwiesen werden.

1.13 Gute Löt- und Schweissbarkeit

Vorfabrizierte Kontaktbeläge, die auf eine Kupferunterlage gelötet oder aufgeschweisst werden sollen, müssen Eigenschaften aufweisen, wie sie unter 1.3 und 1.4 im Zusammenhang mit dem Kontaktschweissen abgelehnt wurden.

1.14 Geringer Preis

Selbstverständlich soll der Kontaktwerkstoff billig sein. Der Preis wird in allgemein bekannter Weise gemessen und erfahrungsgemäss vom Erzeuger stets angegeben. Er ist auf die Raumeinheit zu beziehen.

2. Der ideale Kontaktwerkstoff

Selbst bei flüchtiger Betrachtung der Tabelle I fällt auf, dass sie verschiedene Widersprüche enthält. Widersprechend sind schon die technischen Forderungen nach geringer Schweissneigung und Schweissfestigkeit und nach guter Schweiss- und Lötbarkeit derselben Kontaktwerkstoffe, wenn sie auf ihrer Unterlage befestigt werden sollen.

Die Widersprüche werden aber noch zahlreicher und verwirrender, wenn man die physikalischen Grundeigenschaften betrachtet, welche erforderlich sind, um die technischen Bedürfnisse zu befriedigen. Man findet da:

a) Einander logisch ausschliessende Forderungen:
   - α) Geringe Härte (grosse Kontaktfläche bei gegebener Kraft, Prellen) — hohe Härte (kleine Schweissfläche, mechanischer Verschleiss);
   - β) Keine Hautschicht (Kontaktwiderstand, Rückgewinnung verdampften und verspritzten Metalls) — feste Hautschicht (Schweissen, Reibung);
   - γ) Temperaturbeständige Hautschicht (Schweissen) — nichtbeständige Hautschicht (Heisskontaktbildung, Wiederzünden infolge Thermoemission);
   - δ) Hoher Schmelzpunkt (Schweissen, Abbrand) — tiefer Schmelzpunkt (Wiederzünden kurzer Bögen);
   - ε) Kleiner E-Modul (grosse elastisch verformte Fläche) — grosser E-Modul (plastische Verformung bei kleiner Kraft).

b) Aus physikalischen Gründen nicht gleichzeitig erfüllbare Forderungen:
   - α) Härte, Elastizitätsmodul, Entfestigungs-, Schmelz- und Siedetemperatur werden gemeinsam durch die Kohäsionskraft der Atome im Kristallgitter bestimmt. Wegen des Schweissens und des Abbrandes werden hohe Entfestigungs-, Schmelz- und Siedetemperatur gefordert, anderseits jedoch wegen des Kontaktwiderstandes gleichzeitig auch geringe Härte.
   - β) Einfach gebaute und ungestörte Kristalle besitzen hohe Leitfähigkeit aber geringe Härte. Metalle mit komplizierter Gitterstruktur oder gestörte Kristalle besitzen notwendigerweise geringere Leitfähigkeit und höhere Härte. Es ist deshalb nicht möglich, ein Metall zu finden, das gleichzeitig hohe Härte und hohe Leitfähigkeit besitzt.
   - γ) Aus ähnlichen Gründen weisen die gut leitenden Metalle (Au, Ag, Cu) einen verhältnismässig tiefen Schmelz- und Siedepunkt (geringe Abbrandfestigkeit) auf, die abbrandfesten Stoffe mit hohem Schmelz- und Siedepunkt (Mo, W, Platinmetalle) jedoch eine schlechte Leitfähigkeit.

c) Aus weniger leicht durchschaubaren Gründen nicht gleichzeitig erfüllbare Forderungen:
   - α) Edelmetalle sind verhältnismässig teuer;
   - β) Wegen ihrer höheren Wiederzündspannung geschätzte niedrigschmelzende Metalle weisen bei magnetischer Blasung oft schlechte Laufeigenschaften auf (besonders Zn, Cd);
   - γ) Wegen ihrer Oxydationsbeständigkeit für Feinkontakte sehr geeignet erscheinende Edelmetalle zeigen starke Feinwanderung.

Dieser kurze und keineswegs erschöpfende Überblick zeigt bereits deutlich, dass es einen idealen Kontaktwerkstoff, der allen möglichen Anforderungen optimal entspricht, aus logischen und physikalischen Gründen weder gibt noch geben kann.

Glücklicherweise gibt es aber auch keinen Schalter, der sowohl als Telephonrelais als auch als 380-kV-Leistungsschalter eingesetzt wird und an dessen Kontakte deshalb in jeder Hinsicht maximale Anforderungen gestellt werden müssen.

Die grosse Verschiedenartigkeit der möglichen Schalterkonstruktionen und Betriebsbedingungen, die uns in der technischen Wirklichkeit entgegentritt, hat vielmehr zur Folge, dass in jedem realen Einzelfall nur wenige (und in verschiedenen Fällen verschiedene) Eigenschaften des Kontaktwerkstoffes im Vordergrund stehen, während andere entweder völlig belanglos oder doch weniger bedeutend sind [17].

Der Schalterkonstrukteur muss deshalb möglichst exakt analysieren, welche Anforderungen ein bestimmter Schalter auf Grund seiner Konstruktion und Verwendung an die Kontakte stellt und welches Material die im besonderen Fall erforderlichen Eigenschaften in sich vereinigt.

Im Hinblick auf diese Aufgabe sollen im folgenden Kapitel die Parameter der Konstruktion und der Betriebsbedingungen eines Schalters diskutiert werden.

Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen [1])

Tabelle I

technische Eigenschaften	Physikalische Eigenschaften
1.1 (—) Kontaktwiderstand	a (—) spezifischer Widerstand b (—) Härte c (—) Elastizitätsmodul (elastische Verformung) d (—) Längsquerdehnungsverhältnis e (—) Hautschicht f (—) Festigkeit der Hautschicht g (+) Elastizitätsmodul (Grenze der plastischen Verformung)
1.2 (—) Heisskontaktbildung	a (—) unbeschränktes Hautschichtwachstum b (—) gesteigertes Hautschichtwachstum bei höheren Temperaturen c (+) Zersetzung der Hautschicht bei höheren Temperaturen
1.3 (—) Schweissneigung geschlossener Kontakte (+ Grenzstrom)	a bis f wie unter 1.1 g (+) Entfestigungstemperatur h (+) Schmelztemperatur i (+) Temperaturbeständige Hautschicht j (+) Wärmeleitfähigkeit
1.4 (—) Schweissneigung beim Einschalten	a (—) spezifisches Gewicht (Prellen) b (—) Härte (Prellen) c (—) Kathodenfall d (+) Austrittsarbeit Kathode e (—) Anodenfall f (—) Austrittsarbeit Anode g bis j wie 1.3
1.5 (—) Schweisskraft	a bis j wie 1.3 bzw. 1.4 (Schweissfläche) k (+) Härte (Schweissfläche) l (—) Zugfestigkeit der Schweiss-Stelle
1.6 (+) Abbrandfestigkeit	a (+) Schmelztemperatur b (+) Siedetemperatur c bis f wie 1.4 g (+) Wärmeleitfähigkeit h (+) spezifische Wärme (pro cm^3) i (+) Schmelzwärme (pro cm^3) j (+) Verdampfungswärme (pro cm^3) k (—) gelöste Gase (Spratzen) l (—) Hautschicht (Rückgewinnbarkeit) m (—) Oxydation bei hohen Temperaturen n (—) Flüchtige Oxyde o Herstellungsverfahren bei Sinterstoffen
1.7 (—) Grobwanderung	a (+) Lichtbogen-Mindestspannung (Kathodenfall) b (+) Lichtbogen-Mindeststrom c (—) Grobwanderungskoeffizient (physikalische Zusammenhänge ungeklärt)
1.8 (—) Feinwanderung	a (—) Thomson-Koeffizient b (—) Peltier-Koeffizient fest — flüssig c (—) Peltier-Koeffizient Metall — Oxyd
1.9 (+) Wiederzündspannung	a (—) Siedetemperatur b (—) Temperaturbeständige Oxyde
1.10 (+) Beweglichkeit der Lichtbogen-Fusspunkte	physikalische Zusammenhänge ungeklärt
1.11 (—) mechanischer Verschleiss	a (+) Abriebfestigkeit b (+) Hautschicht (Reibung, Abrieb) c (+) Härte (Deformation) d (+) Schlagzähigkeit (Sprödigkeit)
1.12 (+) Bearbeitbarkeit	a (—) Härte b (+) Kerbschlagzähigkeit usw.
1.13 (+) Auflöten und -schweissen	wie 1.3 und 1.4 jedoch (+)
1.14 (—) Preis	

[1]) Eigenschaften, die erwünscht sind bzw. möglichst grosse Werte haben sollen, sind mit (+) gekennzeichnet; unerwünschte Eigenschaften bzw. solche, die möglichst kleine Werte haben sollen, mit (—).

3. Die wirklichen Anforderungen an den Kontaktwerkstoff

3.1 Parameter der Konstruktion

Die im Folgenden besprochenen Daten der Konstruktion sind bei der Werkstoffwahl für einen Schalter vor allem entscheidend.

3.1.1 Funktionsteilung

Die grosse Zahl der einander widersprechenden und von keinem Werkstoff gleichzeitig erfüllbaren Forderungen legt es nahe, statt eines Universalkontaktes, der allen Aufgaben (des Einschaltens, der Stromführung und des Ausschaltens) gewachsen sein muss, zwei parallelgeschaltete Kontakte zu benützen, von denen einer, der Schaltkontakt, etwas später öffnet und früher schliesst und somit den Aus- und Einschaltlichtbogen übernimmt, während der andere lediglich spannungslos schaltet, deshalb keinem Lichtbogen ausgesetzt ist, aber den Dauer- und Kurzschluss-Strom führen soll. Es ist auch möglich, einen einzigen Kontakt so zu gestalten, dass sich die Schaltstücke beim Schalten

aufeinander abwälzen, wobei die erste Berührung bzw. die Trennung stets an einer anderen Stelle (Abbrandspitze) erfolgt als die dauernde Kontaktgabe.

In jedem Falle können zwei verschiedene Werkstoffe eingesetzt werden, von welchen einer vor allem schweiss- und abbrandfest sein, der andere jedoch einen möglichst geringen Kontaktwiderstand aufweisen soll und nur beim Führen hoher Ströme nicht verschweissen darf.

Selbstverständlich erfordern parallele Kontakte und auch Abwälzkontakte einen erheblich grösseren konstruktiven Aufwand als einfache Abhebekontakte, so dass solche Geräte grösser, schwerer und teurer werden.

Der letzte Schritt führt deshalb folgerichtig zur noch weiteren Annäherung des Abbrandkontaktes an den Stromführungskontakt, nämlich zu ihrer Durchdringung, d. h. zur Rückkehr zum Universalkontakt, der jedoch aus einer abbrandfesten und einer hoch leitfähigen Komponente besteht, welche zu einem einzigen Schaltstück zusammengesintert sind. In diesem Falle ist aber die Funktionsteilung von der Konstruktion in den Werkstoff verlagert worden (Abschnitt 4.3).

3.1.2 Kontaktbewegung

Erfolgt das Schliessen des Kontaktes so, dass die Schaltstücke unter Druck aufeinander schleifen und dadurch ihre Hautschichten zerstören, so können — je nach der Intensität dieser Selbstreinigung — Metalle mit mehr oder weniger festen Hautschichten eingesetzt werden. Allerdings ist dann das Abrieb-Problem zu beachten.

3.1.3 Kontaktbewegung während der Stromführung

Grundsätzlich verschiedene Gesichtspunkte sind für ruhende und während des Betriebes bewegte Kontakte massgebend. Im ruhenden Kontakt, der für den Schaltgerätebauer fast ausschliesslich interessant ist, wird die Hautschicht vor allem als störend angesehen, während sie bei den Gleitkontakten der Kollektoren und Stromabnehmer als Schmierschicht eine sehr bedeutende Rolle spielt, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden kann [2].

3.1.4 Kontaktkraft und Zahl der Kontaktpunkte

Eine sowohl für die Konstruktion als auch für die Werkstoffwahl wesentliche Frage betrifft die Zahl der Kontaktpunkte bzw. Parallelkontakte: Soll die verfügbare Kontaktkraft auf einen Punkt konzentriert oder auf mehrere Punkte — und wieviele — verteilt werden?

Vor Beantwortung dieser Frage müssen jedoch noch drei andere Fragen untersucht werden, die gleichfalls Konstruktion (Kontaktkraft) *und* Werkstoff betreffen:

a) Werden die Kontaktflächen elastisch oder plastisch verformt?
b) Dominiert der Haut- oder der Engewiderstand?
c) Muss eine Makrohaut durch plastische Verformung zerstört werden?

Aus Gl. (6) folgt, dass sicher mit plastischer Verformung zu rechnen ist, sobald:

$$r_a > r_{ap} = \pi \frac{H}{E} (1 - m^2)\, k_f$$

bzw.

$$F > F_p = \frac{2\pi^3}{3} \cdot \frac{H^3}{E^2} (1 - m^2)^2\, k_f^2 \qquad (7)$$

ist.

Aus Gl. (1) ergibt sich, dass der Engewiderstand den Hautwiderstand überwiegt, sobald r_a den kritischen Wert r_{ak} übersteigt:

$$r_a > r_{ak} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\varrho} \qquad (8)$$

Die in diesem Zusammenhang interessierenden kritischen Kontaktkräfte sind für die wichtigsten Kontaktmetalle in Tabelle II zusammengestellt:

1. Kritische Werte des Radius der Kontaktfläche r_{ap} und der zugehörigen Kontaktkraft F_p als Vielfaches von k_f (Abschnitt 1.1), bei welchen plastische Verformung einsetzt.

2. Die kritischen Werte r_k und F_k, bei welchen der Energiewiderstand gleich dem Hautwiderstand ist, wobei zur Berechnung der Kontaktkraft angenommen wurde, dass rein plastische Verformung erfolgt.

3. Jene Bedingungen (Kontaktkraft F_1 und Formfaktor k_{f1}), unter welchen die plastische Verformung gerade dann einsetzt, wenn der Haut- gleich dem Engewiderstand ist.

Für $k_f > k_{f1}$ setzt die plastische Verformung erst ein, wenn bereits der Engewiderstand überwiegt, für $k_f < k_{f1}$ erfolgt plastische Verformung, wenn der Hautwiderstand noch grösser als der Engewiderstand ist.

Kritische Daten für die wichtigsten Kontaktmetalle

Tabelle II

Metall	Grenzwert für plastische Verformung		$R_e = R_h$ für		$F_p = F_k$ für	
	r_{ap}/k_f	$\frac{F_p\ [p]}{k_f\ [mm]}$	r_{ak}[mm]	F_k [p] [1])	F_1 [p]	k_{f1} [mm]
Cu	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$	45	0,04	360	260	2,4
Ag	$2{,}2 \cdot 10^{-2}$	68	0,04	330	220	1,8
Au	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	10	0,03	100	60	2,5
Pt	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	31	0,006	9	8	0,5
Pd	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$	36	0,006	8	6	0,4
W	$4{,}3 \cdot 10^{-2}$	1800	0,01	140	110	0,25
Mo	$2{,}0 \cdot 10^{-2}$	150	0,01	60	40	0,5
Ni	$2{,}1 \cdot 10^{-2}$	140	0,008	30	20	0,4

[1]) bei rein plastischer Verformung.

Tabelle II gestattet also die sofortige Beantwortung der Fragen a)...c) und gibt überdies einen Überblick über die Eigenschaften der verschiedenen Metalle.

Nun kann die ursprüngliche Frage nach der Zweckmässigkeit paralleler Kontaktpunkte bei gegebener Kontaktkraft beantwortet werden:

3.1.4.1 $F \ll F_k$, $F \gg F_p$, Molekelhaut. Bei überwiegendem Hautwiderstand ist der Kontaktwiderstand der Kontaktfläche verkehrt proportional. Es ist deshalb gleichgültig, ob eine gegebene Gesamtkontaktfläche auf mehrere Kontaktpunkte verteilt wird oder nicht. Da bei rein plastischer Verformung die Fläche proportional der Kraft ist [Gl. (3)] — und zwar ebenfalls unabhängig davon, ob die Kraft auf einen Punkt konzentriert oder auf mehrere Punkte verteilt wird — bringt eine Unterteilung des Kontaktes bei gegebener Gesamtkraft weder Vor- noch Nachteile.

3.1.4.2 $F \ll F_k$, $F < F_p$, Molekelhaut. Im Bereich elastischer Verformung wächst die Kontaktfläche gemäss Gl. (2) mit der 2/3ten Potenz der Kraft. Die Aufteilung der Kraft F auf n Punkte bringt deshalb eine grössere Gesamtfläche bzw. einen geringeren Gesamtwiderstand [Gl. (1) und (2)]:

$$R = R_h \sim \frac{1}{na^2} \sim \frac{1}{n} \left(\frac{n}{F}\right)^{2/3} \sim n^{-1/3}\, F^{-2/3} \qquad (9)$$

Trotz dieser theoretischen Überlegung dürfte eine Zersplitterung der Kontaktkraft bei kleinsten Kräften

aber nicht zu empfehlen sein, weil dadurch der Kontaktdruck abnimmt und die Störanfälligkeit des Kontaktes (z. B. durch Staub) wächst.

3.1.4.3 $F \gg F_k$, $F \gg F_p$, Molekelhaut. Überwiegt der Engewiderstand, dann sinkt der Kontaktwiderstand nur proportional der Wurzel der Kontaktkraft und eine Aufteilung der Kontaktkraft auf mehrere Punkte ist deshalb vorteilhaft.

Bei plastischer Verformung gelten die Gl. (1) und (3):

$$R = R_e \sim \frac{1}{na} \sim \frac{1}{n}\sqrt{\frac{n}{F}} \sim n^{-1/2}\, F^{-1/2} \qquad (10)$$

Voraussetzung ist, dass der Abstand der einzelnen Kontaktpunkte voneinander gross gegen ihren Durchmesser ist, da sie einander sonst beeinflussen. Die Unterteilung ist nicht mehr sinnvoll, sobald im einzelnen Kontaktpunkt der Engewiderstand von der Grössenordnung des Hautwiderstandes wird.

3.1.4.4 $F \gg F_k$, $F < F_p$, Molekelhaut. Bei überwiegendem Engewiderstand und elastischer Verformung wäre die Unterteilung noch günstiger [Gl. (1) und (2)]:

$$R = R_e \sim \frac{1}{na} \sim \frac{1}{n}\left(\frac{F}{n}\right)^{-1/3} \sim n^{-2/3}\, F^{-1/3} \qquad (11)$$

doch dürfte unter diesen Bedingungen — falls sie überhaupt auftreten — eine Verringerung des Kontaktdruckes wegen der Störanfälligkeit des Kontaktes nicht ratsam sein.

3.1.4.5 $F \ll F_p$, Makrohaut. Muss eine Makrohaut durch plastische Verformung mechanisch zerstört werden, so befindet man sich zwar zwangsläufig auch im Gebiet überwiegenden Engewiderstandes, doch ist noch die Abhängigkeit des Hautschichtfaktors von der Kontaktkraft zu berücksichtigen. Wäre dieser Hautschichtfaktor konstant, dann gälten die Überlegungen gemäss 3.1.4.3. Tatsächlich sinkt jedoch der Hautschichtfaktor des Kontaktwiderstandes bei manchen Stoffen in bestimmten Intervallen mit zunehmender Kontaktkraft sehr rasch. Die Entscheidung, ob eine Aufteilung der Kontaktkraft auf mehrere Punkte unter diesen Umständen zweckmässig ist, kann nur auf Grund der empirisch zu ermittelnden Funktion $R(F)$ bzw. $f(F)$ getroffen werden [4].

3.1.5 Öffnungskraft

Je grösser die öffnende Kraft eines Kontaktes ist, umso grössere Schweisskräfte können im Kurzschlussfalle zugelassen werden, ohne dass der Schalter dadurch funktionsunfähig wird. Vermag ein Schalter unter bestimmten Bedingungen nicht mehr den verschweissten Kontakt aufzureissen, so kann u. U. ein Kontaktmaterial geringerer Zugfestigkeit weiterhelfen.

Es ist bemerkenswert, dass die Frage der Öffnungskraft mit der soeben diskutierten Unterteilung der Kontaktfläche zusammenhängt. Die Schweisskraft ist in erster Näherung nur von der Gesamt-Kontaktfläche abhängig. Durch Unterteilung eines Kontaktes mit überwiegendem Engewiderstand bleibt deshalb die Schweissfläche erhalten, während der Widerstand sinkt. Unter Umständen genügt aus diesem Grunde nach Unterteilung der Kontaktfläche bei gleichem Kontaktwiderstand oder auch bei gleicher Kontaktkraft eine geringere Öffnungskraft.

3.1.6 Das Prellen

Es ist bekannt, dass stark prellende Kontakte eher und fester verschweissen als prellarme. Es sei nur darauf hingewiesen, dass dieser Faktor sowohl bei der Beurteilung als auch bei der Wahl des Kontaktwerkstoffes zu berücksichtigen ist.

3.1.7 Verfahren der Lichtbogenlöschung

Werden besondere Massnahmen zur Lichtbogenlöschung ergriffen, so müssen diese natürlich auch bei der Werkstoffwahl berücksichtigt werden. So besteht unter Öl keine Oxydationsgefahr aber hoher Abbrand, während die Anwendung magnetischer Blasung einen Werkstoff wünschenswert erscheinen lässt, auf dem die Lichtbogenfusspunkte leicht beweglich sind. Wird Wechselstrom mit kurzen Lichtbögen unterbrochen (z. B. bei Vielfachunterbrechung), so soll das Kontaktmaterial einen tiefen Siedepunkt aufweisen und kein temperaturbeständiges Oxyd besitzen.

3.1.8 Die Preiskalkulation

Die Preisfrage tritt vor allem dann in den Vordergrund, wenn der Anteil der Kosten für das Kontaktmaterial den Gesamtpreis des Schalters wesentlich beeinflusst. Es wäre aber unrichtig, die Rolle des Preisanteils zu überschätzen. Auch bei hohem Preisanteil muss ein teurer Werkstoff gewählt werden, wenn dies technisch erforderlich ist. Vor allem aber sollte stets im Hinblick auf die Wechselbeziehung Konstruktion — Kontaktwerkstoff die Frage untersucht werden, ob nicht eine Erhöhung des Materialpreises durch eine mögliche Verbilligung der Konstruktion überkompensiert werden könnte und deshalb letzlich wirtschaftlicher wäre. Bei diesen Kalkulationen muss natürlich auch die Schaltstück-Lebensdauer entsprechend berücksichtigt werden.

Besondere Schwierigkeiten bereiten die Sinterwerkstoffe, nicht nur wegen des teuren Herstellungsverfahrens, sondern auch deshalb, weil gesinterte Schaltstücke nicht in der Schalterfabrik herstellbar sind, sondern von einem Metallwerk fertig bezogen werden müssen. Dabei spielt neben der Stückzahl die Form eine grosse Rolle: geringfügige, technisch vielleicht belanglose Änderungen können oft die Herstellung spürbar erleichtern und verbilligen.

3.1.9 Kritische Eigenschaften

Jede Neuentwicklung zeigt bei der Prüfung nach den verschiedenen nationalen und internationalen Vorschriften starke und schwache Seiten. Hat das Gerät nur starke Seiten und besteht es alle Prüfungen beim ersten Vorversuch, dann ist es wahrscheinlich überdimensioniert, zu gross und zu teuer. Zeigt es aber wie jedes normale Kind starke und schwache Seiten, so kann unter Umständen mit dem Kontaktmaterial der nötige Ausgleich vorgenommen werden. Jeder Kontaktwerkstoff ist ja ein Kompromiss, der der speziellen Lage entsprechend geschlossen werden kann und soll.

Praktisch dürften allerdings seltener die kritischen als die unkritischen Eigenschaften die Werkstoffwahl beeinflussen. Hat ein Schalter Schwierigkeiten wegen des Schweissens beim Einschalten, dann interessiert die tiefergelegene Schweissgrenze des geschlossenen Kontaktes nicht, die jedoch bei Leerschaltern wesentlich sein kann. Wird die Kontaktkraft durch die abhebenden Kurzschlusskräfte vorgeschrieben, ist man an einem

geringen spezifischen Widerstand oder an einer geringen Härte oft nur wenig interessiert.

Diese Hinweise sollen nur einmal mehr zeigen, dass die Werkstoffwahl für jede Konstruktion individuell erfolgen muss und dass der Werkstoff, der sich bei einem Schalter als bester bewährt hat, nicht auch für den kleinen Bruder in derselben Serie oder für eine Neuentwicklung, die ihn ersetzen soll, der beste zu sein braucht.

3.2 Die Parameter der Betriebsbedingungen

Ausser den Eigenarten der speziellen Konstruktion sind auch die jeweiligen Betriebsbedingungen für die Werkstoffwahl wesentlich.

3.2.1 Der Dauerstrom

Im Dauerbetrieb kommt es darauf an, dass die Kontakttemperatur so niedrig ist, dass weder das Kontaktmaterial selbst noch die umgebende Isolation gefährdet werden. Wegen der Temperatur-Spannungs-Beziehung [2] erfordert deshalb ein grosser Strom einen geringen Kontaktwiderstand und damit eine grosse Kontaktkraft, während bei kleinen Strömen auch kleine Kräfte genügen.

Diese Tatsache zeigt schon die enge Verknüpfung der Betriebsbedingungen mit den Konstruktionsgrundlagen: die Betrachtungen über den Betriebsstrom lassen sich auf jene der Kontaktkraft zurückführen. Bei unedlen Werkstoffen ist die kritische Oxydationstemperatur (Heisskontaktbildung), bei edlen die Schweissgrenze für die zulässige Stromstärke massgebend, sofern nicht andere Forderungen eine niedrigere Grenze setzen (z. B. elektrodynamische Kräfte).

3.2.2 Der Überstrom

Vielfach wird gefordert, dass nicht nur der normale Betriebsstrom, sondern auch ein grösserer Überstrom längere Zeit geführt werden kann. In diesem Falle kann zwar eine höhere Kontakttemperatur vorübergehend zugelassen werden (im Hinblick auf die Oxydation der Schaltstücke spielen einige Minuten keine Rolle), doch darf keineswegs die Schweissgrenze erreicht werden. Meistens wird deshalb das Schweissverhalten erst bei Überströmen überhaupt interessant.

3.2.3 Der Kurzschluss-Strom

Muss ein Kontakt auch kurzschlussfest sein, so darf er bei dem zu erwartenden Kurzschluss-Strom weder verschweissen noch abheben. Die abhebende Kraft [2]:

$$F_a \approx 1{,}5 \cdot U_k \cdot F$$

(U_k Kontaktspannung in V)

ist dem Engewiderstand proportional, weshalb auch aus diesem Grunde möglichst geringe Härte wünschenswert erscheint.

3.2.4 Der Einschaltstrom

Es gibt Schalter, deren Einschaltstrom viel grösser ist als der Dauerstrom (Motorschalter) und deren Schaltstücke hinsichtlich des Schweissens und des Abbrandes vor allem beim Einschalten beansprucht werden. Bei solchen Kontakten ist stets das Schweissverhalten beim Einschalten entscheidend und nicht das Schweissen des ruhenden Kontaktes.

3.2.5 Der Ausschaltstrom und die Stromart

Beim Schalten kleiner Gleichströme macht sich die Materialwanderung oft sehr störend bemerkbar und die Werkstoffwahl wird durch diesen Faktor wesentlich beeinflusst. Bei grösseren Stromstärken sowie bei Wechselstrom interessiert jedoch nur der Abbrand, während die Fein- und Grobwandungseigenschaften völlig belanglos sind.

3.2.6 Die Schalthäufigkeit

Bei grosser Schalthäufigkeit müssen an die Abbrandfestigkeit der Kontakte unter sonst gleichen Bedingungen viel höhere Anforderungen gestellt werden als bei nur gelegentlichem Schalten. Hingegen besteht bei häufig schaltenden Geräten nicht die Gefahr der Heisskontaktbildung.

3.2.7 Die Lebensdauer

Besitzt ein Schaltgerät leicht auswechselbare Schaltstücke und gestattet der Betrieb eine regelmässige oder doch gelegentliche Kontaktrevision, dann muss man die Konstruktion, die Schaltstückgrösse und auch das Kontaktmaterial nicht vor allem auf die Schaltstücklebensdauer ausrichten, sondern kann andere Gesichtspunkte (Preis, Grösse, Gewicht, Kontaktwiderstand usw.) mehr berücksichtigen. Wird jedoch extrem hohe Lebensdauer gefordert, stehen Abbrand bzw. Materialwanderung im Vordergrund.

3.2.9 Die Atmosphäre

Es wäre sinnlos, für Kontakte, die in reiner Luft arbeiten, besonders teure und schlecht leitende Metalle (Pt, Pd) zu verwenden, nur weil diese von gewissen chemischen Substanzen nicht angegriffen werden. Sind die Kontakte jedoch chemisch aggressiven Gasen ausgesetzt, dann muss man entsprechend resistente Stoffe wählen und in anderer Hinsicht Nachteile in Kauf nehmen. Dies gilt vor allem für Schalter in chemischen Betrieben und rauchigen Industriezentren, Akkumulatorenräumen, in Meeresnähe bzw. auf Schiffen usw. Bekanntlich wird das sonst recht günstige Silber durch Schwefelwasserstoff sehr stark angegriffen und muss deshalb oft durch Palladium ersetzt werden, obwohl dieses Metall wesentlich teurer ist, eine grössere Härte und eine viel geringere Leitfähigkeit besitzt.

3.2.10 Die Betriebsspannung

Die Spannung, welche beim Ein- und Ausschalten den Kontakt beansprucht, ist in mancher Hinsicht von Bedeutung. Je grösser die Spannung beim Einschalten ist, umso früher zündet der Einschaltlichtbogen und umso grösser ist die Gefahr des Schweissens beim Schliessen. Im Bereich um 20 V liegt die Lichtbogengrenze, welche die Materialwanderung bzw. den Abbrand natürlich merkbar beeinflusst. Neben der Spannung ist aber in Gleichstromkreisen auch die Induktivität für Materialwanderung und Abbrand massgebend und damit u. U. auch für die Werkstoffwahl von Bedeutung.

4. Eigenschaften der Werkstoffe

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass es zwar keinen idealen Kontaktwerkstoff geben kann, dass aber in der technischen Wirklichkeit auch nie alle möglichen Anforderungen gleichzeitig an das Material

gestellt werden [17]. Um nun für jeden wirklichen Schalter auch den am besten geeigneten wirklichen Kontaktwerkstoff zu finden, muss man vor allem die Eigenschaften der verfügbaren Materialien kennen.

4.1 Reine Metalle

Jene Metalle, die als Kontaktwerkstoffe überhaupt in Frage kommen, können in vier Gruppen eingeteilt werden:

1. Anlaufbeständige Metalle (Au, Pt, Pd, Rh);
2. Metalle hoher Leitfähigkeit (Ag, Cu);
3. Hochschmelzende Metalle (W, Mo);
4. Kompromissmetalle (Ni, Fe).

Kompromissmetalle weisen zwar keine extrem günstigen, aber auch keine besonders ungünstigen Eigenschaften auf und stellen deshalb in mancher Hinsicht brauchbare natürliche Kompromisslösungen dar. Hinsichtlich des spezifischen Widerstandes liegt Nickel zwischen Wolfram und Platin (etwa vierfacher Wert von Kupfer), hinsichtlich des Schmelz- und Siedepunktes weit über Silber und Kupfer nahe dem Palladium (1455 °C, 3380 °C), hinsichtlich der Härte zwischen Kupfer und Molybdän. Nickel ist dank eines dünnen dichten Oxydfilms chemisch ziemlich beständig, soll aber auch zur Heisskontaktbildung neigen. Zudem sind Eisenmetalle gut bearbeitbar und nicht teuer (Ni hat den zehnfachen Volumenpreis des Kupfers).

Manche Reinmetalle besitzen wohl bestimmte erwünschte Eigenschaften in sehr hohem Masse, genügen jedoch in anderer Hinsicht nicht den gestellten Anforderungen, weshalb ihre Anwendung auf mehr oder weniger enge Bereiche beschränkt bleiben muss, bei welchen es vor allem auf eine einzelne Eigenschaft ankommt. Je vielseitiger jedoch die Anforderungen an einen Kontakt sind, desto weniger kann man sich mit den Nachteilen des betreffenden Stoffes abfinden; man ist vielmehr gezwungen, diese Nachteile irgendwie zu kompensieren, selbst wenn dies auf Kosten der günstigen Eigenschaften geht.

4.2 Legierungen

Ein Weg, solche Kompromisse herbeizuführen, ist das Zusammenschmelzen von zwei oder mehreren Metallen. Es ist jedoch nicht möglich, auf diese Weise die erwünschten Eigenschaften beliebiger Metalle einfach zu addieren oder zu mitteln. Erstens sind nicht alle Metalle miteinander legierbar und schon gar nicht in jedem beliebigen Mischungsverhältnis, zweitens zeigen die Legierungen Eigenschaften, die keineswegs dem Mittelwert der Eigenschaften ihrer Elemente entsprechen. Ihre Leitfähigkeit ist beispielsweise stets geringer, desgleichen ihr Schmelzpunkt, während Härte und Entfestigungstemperatur meist höher liegen. Die chemische Beständigkeit wird oft schon durch geringe Beimengungen unedler Metalle stark herabgesetzt.

Die Kompromissmöglichkeiten für Legierungen sind also von vornherein eingeschränkt und zwar in einem wenig erwünschten Sinne, denn jedenfalls muss ein höherer Kontaktwiderstand (bzw. eine höhere Kontaktkraft) in Kauf genommen werden, während eine nennenswerte Erhöhung der Abbrandfestigkeit kaum zu erwarten ist. So ist es auch nicht verwunderlich, dass nur selten Legierungen als Kontaktwerkstoffe Verwendung finden.

4.3 Kontakt-Sinterstoffe

Zwei Metalle können auch anders als durch Zusammenschmelzen (Legieren) kombiniert werden, indem man entweder ihre Pulver mischt und das Gemisch sintert oder aus dem Pulver der höher schmelzenden Komponente ein poröses Sinterskelett herstellt und dieses in der Schmelze der tiefer schmelzenden Komponente tränkt.

In beiden Fällen entstehen keine Mischkristalle mit neuen Eigenschaften, sondern Gemenge der ursprünlichen Komponenten, deren Eigenschaften als solche erhalten bleiben, so dass die Eigenschaften sowohl der Einlagerungs- als auch der Durchdringungsmischkörper aus jenen der Komponenten berechnet werden können [18]. Damit wird nicht nur die bei Legierungen unvermeidbare Erniedrigung der Leitfähigkeit und des Schmelzpunktes umgangen, sondern es können auf diese Weise auch nicht legierbare Metalle sowie Metalle mit Nichtmetallen (Graphit, Russ) oder chemischen Verbindungen (Oxyden, Karbiden) kombiniert werden.

Den Vorteilen der beliebigen Kombinierbarkeit und der Erhaltung erwünschter Eigenschaften der Komponenten (Schmelzpunkt, Leitfähigkeit usw.) stehen allerdings auch Nachteile gegenüber. Vor allem ist das Sinterverfahren, insbesondere das Tränkverfahren, teuer und die Schaltstücke müssen vom Metallwerk in ihrer endgültigen Form bezogen werden; die Eigenschaften der Sinterstücke werden durch das besondere Herstellungsverfahren (Korngrösse des Pulvers, Pressdruck, Sintertemperatur, usw.) beeinflusst und nicht allein durch das Verhältnis der Komponenten bestimmt; die Eigenschaften sind auch von der Pressrichtung abhängig [3].

Vor allem sind drei Gruppen von Sinterstoffen von Bedeutung:

1. Reinmetalle W, Mo und Re, die nur im Sinterverfahren verarbeitet werden können.
2. Durchdringungsmischkörper mit Sinterskeletten aus hochschmelzenden Stoffe (W, Mo), welche mit Metallen hoher Leitfähigkeit (Ag, Cu) getränkt sind.
3. Einlagerungsmischkörper auf Silberbasis mit Zusätzen von Kohlenstoff (Graphit, Russ), Oxyden (CdO, SnO), hochschmelzenden Metallen (W, Mo), Eisenmetallen (Ni, Fe) oder Karbiden (WC) zur Erhöhung der Schweiss- oder/und Abbrandfestigkeit.

Nahezu ideale Eigenschaften hat man von Silber-Wolfram-Verbundstoffen erwartet. Die Kombination des Metalls höchster Temperaturbeständigkeit (Abbrandfestigkeit) mit dem sehr edlen Metall höchster Leitfähigkeit erscheint tatsächlich äusserst vielversprechend. Wenn diese Erwartungen nicht voll erfüllt wurden, so liegt dies daran, dass zwar die Metalle Silber und Wolfram nicht mischbar sind, ihre Oxyde sich jedoch zu Silberwolframat verbinden.

5. Werkstoffwahl

Um nun für einen bestimmten Schalter und Verwendungszweck den richtigen Werkstoff zu finden (oder auch erst zu entwickeln), sollte man die Forderungen mit den Werkstoffeigenschaften vergleichen. Man sollte für jeden Schalter und seine Betriebsbedingungen eine Solltabelle der gewünschten Eigenschaften des Kontaktwerkstoffes aufstellen und für jeden Werkstoff die entsprechenden Istwerte kennen. Dann wäre es nicht mehr schwierig, den am besten geeigneten Werkstoff (z. B. mit Hilfe einer Lochkartei) auszuwählen.

Damit hat sich aber der Kreis geschlossen, denn es folgt nun zwangsläufig die Frage, wie diese technischen Forderungen bzw. die Werkstoffeigenschaften gemessen werden sollen, damit der Vergleich ermöglicht wird.

In Abschnitt 1 wurde gezeigt, dass für viele der interessierenden Grössen noch kein befriedigendes Mass gefunden wurde und die interessierenden Daten in den meisten Fällen noch nicht gemessen wurden. Abschnitt 3 hat wohl demonstriert, dass Konstruktion, Werkstoffwahl und Verwendung untrennbar verquickt sind, doch konnte kein Schlüssel zum Ausfüllen der Solltabellen angegeben werden.

Zweifellos ist schon viel erreicht, wenn man sich wenigstens über die qualitativen Zusammenhänge im Klaren ist und dieser Erkenntnis auch praktisch Rechnung trägt, aber es sollte nun auf Grund dieser Erkenntnisse versucht werden, die interessierenden Grössen in zunehmendem Masse auch quantitativ zu erfassen.

Das ist ein sehr umfangreiches Programm, das nicht in wenigen Jahren bewältigt werden kann. Aber durch systematische Untersuchungen wird man sich dem erstrebten Ziel allmählich nähern.

Literatur

[1] *Plechl, O.:* Die Kontaktwärme als Kriterium für die Bemessung der Strombahnen elektrischer Schaltgeräte. Elin-Z. 3(1951)2, S. 53...56.

[2] *Holm, R.:* Electric Contacts Handbook. 3. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1958.

[3] *Keil, A.:* Werkstoffe der elektrischen Kontakte. Berlin. Göttingen, Heidelberg: Springer 1960.

[4] *Millian, K.* und *W. Rieder:* Kontaktwiderstand und Kontaktoberfläche. Z. angew. Phys. 8(1956)1, S. 28...34.

[5] *Rieder, W.:* L'échauffement des contacts sur l'appareillage de couplage et les jonctions de barres omnibus. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 16. Session 1956, Bd. 2, Rapp. 124.

[6] *Hilgarth, G.:* Über die Grenzstromstärken ruhender Starkstromkontakte. ETZ-A 78(1957)6, S. 211...217.

[7] *Rieder, W.:* Leistungsbilanz der Elektroden und Charakteristiken frei brennender Niederstrombögen. Z. Phys. 146(1956)5, S. 629...643.

[8] *Suggs, A. M.:* An Electrical Contact Testing Machine. ASTM Bull. —(1942)119, S. 25...30.

[9] *Merl, W.:* Stoffwanderung an Gold- und Gold-Nickel-Kontaktstücken. ETZ-A 77(1956)7, S. 201...205.

[10] *Zielasek, G.:* Zur Feinwanderung in elektrischen Abhebekontakten. Arch. Elektrotechn. 43(1957)4, S. 249...275.

[11] *Browne, T. E.:* Extinction of Short A-C. Arcs. Trans. AIEE 50(1931)4, S. 1461...1464; Diskussion: S. 1464...1465.

[12] *Rieder, W.* und *P. Sokob:* Probleme der Lichtbogendynamik: Rasche Strom- und Längenänderungen von Lichtbögen. Sci. Electr. 5(1959)3, S. 93...112.

[13] *Rieder, W.* und *H. Schneider:* On the Reignition of A-C. Arcs. Proc. IV. Internat. Conf. Jonization Phenomena in Gases 1959, S. 397...401.

[14] *Jussila, J.* und *W. Rieder:* A-C. Arc Reignition in a Transverse Magnetic Field. Proc. V. Internat. Conf. Jonization Phenomena in Gases 1961, I, S. 1082...1087.

[15] *Ramberg, W.:* Über den Mechanismus des elektrischen Lichtbogens. Ann. Phys. 12(1932)3, S. 319...352.

[16] *Eidinger, A.* und *W. Rieder:* Das Verhalten des Lichtbogens im transversalen Magnetfeld (Magnetische Blasung). Arch. Elektrotechn. 43(1957)2, S. 94...114.

[17] *Rieder, W.:* Die technisch-wirtschaftliche Bedeutung und die Probleme des Schalterbaus. Techn. Rdsch. 53(1961)41, S. 17...19; 45, S. 37...45.

Adresse des Autors:

Dr. W. *Rieder*, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Logische Schaltungen mit Transistoren und Dioden [1])

Von *A. E. Bachmann*, Bern

621.316.31 : 519.1 : 621.382.2/.3

Ausgehend von den logischen Verknüpfungen der Schaltalgebra wird ein einfaches Beispiel mit der Lösung einer logischen Aufgabe besprochen. Daran anschliessend werden zuerst die logischen Grundschaltungen UND, ODER und NICHT, sowie auch einige gebräuchliche erweiterte logische Schaltungen wie NOR-, UND-NICHT-, EXKLUSIVE-ODER-Schaltung eingeführt. Einige kurze Bemerkungen über die Folgelogik, ferner die Arbeitsgeschwindigkeit, Störeinflüsse, Zuverlässigkeit und den Materialaufwand beschliessen den Artikel.

En partant des liaisons logiques de l'algèbre de la commutation, l'auteur discute de la solution d'un problème logique, à l'aide d'un exemple simple. Il passe ensuite aux couplages logiques de base ET, OU et NON, ainsi qu'à quelques couplages logiques plus complexes, tels que NOR, ET-NON, EXCLUSIF-OU. Il termine son exposé par quelques brèves remarques au sujet de la logique séquentielle, de la vitesse de travail, des influences perturbatrices, de la sécurité de fonctionnement et du matériel nécessaire.

1. Einleitung

Ein Schalter kann normalerweise nur offen oder geschlossen sein; ein Flip-Flop kann nur einen von zwei möglichen Zuständen einnehmen; ein Impuls kann in seiner einfachsten Umschreibung nur vorhanden oder nicht vorhanden sein. Die logische Schaltungstechnik beruht deshalb auf zwei streng diskreten Zuständen. Sie ist in ihrem Wesen binär. Auch die Aussagen der Logik sind binär, denn sie können nur «wahr» oder «falsch» sein. Aus diesem Zusammenhang folgt der Name «logische Algebra» für die Schaltalgebra.

Die Algebra der Logik wurde vor mehr als 100 Jahren durch den Mathematiker *G. Boole* [1][2]) begründet. Im Jahre 1938 machte *C. E. Shannon* in seiner Diplomarbeit am MIT Untersuchungen über den Aufbau von Netzwerken mit Schaltern [2]. Er verwendete dazu die Algebra der Logik und wurde so in jungen Jahren der Begründer der heutigen Schaltalgebra.

Die gebräuchlichsten Systeme für logische Operationen (Kombinationslogik) basieren auf dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein eines bestimmten Gleichspannungspegels (DC-Logik) oder eines Impulses (Impuls-Logik). Die einzelnen Grundschaltungen sind bei beiden Systemen ähnlich aufgebaut.

Im folgenden werden vorwiegend Gleichspannungsschaltungen untersucht. Die Umdeutung auf die entsprechende Impulsschaltung ist stets sehr einfach.

2. Schaltalgebra

Die zweiwertige Schaltalgebra [3]...[6] dient zur Abkürzung von Aussagen über den Zustand eines Schaltsystems. Die ternäre Schaltalgebra [7] befasst sich mit jenen Systemen, wo das einzelne Schaltelement drei Zustände einnehmen kann.

2.1 Grundlegende logische Verknüpfungen

Es ist üblich, einfachere logische Zusammenhänge mit Hilfe der sog. Kombinations- oder Wahrheits-

[1]) Nach *E. R. Hauri* und *A. E. Bachmann*, Grundlagen und Anwendungen der Transistoren, Generaldirektion PTT, Bern 1962, Kapitel 13 (gekürzt).

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.