

RATIONELLE BEANSPRUCHUNG VON KONTAKTEN, EINIGE KONSTRUKTIVE MASSNAHMEN UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN*

Von

J. EISLER

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate, Technische Universität,
Budapest

(Eingegangen am 23. November, 1965)

1. Einleitung

Im folgenden behandelt der Verfasser zunächst einige in Ungarn aufgetauchte oder aufgeworfene und diskutierte Vorstellungen darüber, was man von einem zeitgemäßen Kontakt zweckmäßig fordern kann, ferner mehrere bereits angewendete bzw. ins Auge gefaßte Konstruktions- und Untersuchungsmethoden. Seine Auseinandersetzungen können trotz bester Absichten von einer gewissen Subjektivität nicht vollständig frei sein. Es muß ihm auch als Mangel angerechnet werden, daß er sowohl zufolge seiner Vorbildung als auch im Hinblick auf den Charakter seiner Tätigkeit im Unterricht und in der Industrie gewohnt ist, die Kontakte nicht für sich allein, sondern stets gemeinsam mit ihrer Anwendung zu betrachten. Hieraus ergibt sich von selbst, daß es ein unverzeihlicher Fehler seinerseits wäre, wenn er sich — besonders vor dieser Versammlung — z. B. in metallurgische Probleme einmischen würde.

2. Die Forderungen an Kontakte

Diese sind auf den einzelnen Gebieten offenbar verschieden, sie weichen aber voneinander auch je nach den Eigenheiten des Anwendungsgebietes ab. Zur besseren Übersicht soll versucht werden, die Forderungen nach den wichtigen Anwendungsgebieten zu gruppieren. Vielleicht darf der Verfasser mit Ihrer Nachsicht rechnen, wenn er seine Aufzählung mit der Starkstromtechnik beginnt, doch ist die Begründung hierfür darin zu erblicken, daß *gewichtsmäßig* aller Wahrscheinlichkeit nach hier mehr Werkstoff verbraucht wird.

Für dieses Gebiet ist es kennzeichnend, daß die Bedeutung des Übergangs- oder — richtiger — des Engewiderstandes hier deshalb kleiner ist, weil der am Kontakt entstehende Spannungsabfall um mehrere Größenordnungen unter der Betriebsspannung liegt; außerdem ist auch die am Übergangswiderstand auftretende Joulesche Wärme als Verlust belanglos.

* Vortrag an der Internationalen Tagung über elektrische Kontakte, Graz 1964.

Hier kommen im Grunde genommen dreierlei Kontakte zum Einsatz.

Zur ersten Gruppe gehören die *festen* Kontakte. Diesen wurde bisher nicht übermäßig viel Beachtung beigemessen, obgleich sie, sowohl vom theoretischen als auch vom praktischen Gesichtspunkt aus gesehen, sehr interessant sind, besonders dann, wenn es sich um Kontakte aus zwei verschiedenen Metallen und um verhältnismäßig starke Ströme handelt. Wegen der bekannten Schwierigkeiten der Kupfer-Aluminium-Verbindungen sowie der schlechten Erfahrungen mit den cupalartigen Lösungen hat man in Ungarn schon vor einem Jahrzehnt Zwischenstücke entwickelt, die auf pulvermetallurgischem Wege oder durch das kalte Pressen zweier Metalle hergestellt wurden. Der eine Nachteil, mit dem sie behaftet sind, besteht darin, daß sie verhältnismäßig kostspielig sind, der andere hingegen darin, daß sich die Zahl der Übergangsstellen um eine erhöht. Im übrigen stellen sie aber eine ideale Lösung dar. Nach neueren, äußerst sorgfältig durchgeführten, aber noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen läßt sich das Schoppieren der Übergangsstelle mit Kupfer selbst dann sehr vorteilhaft anwenden, wenn es sich um einen Übergang von Aluminium auf Aluminium handelt. Besondere Probleme ergeben sich bei den von sehr starken Strom durchflossenen festen Kontakten, bei denen der Strom z. B. einer rechtwinkligen Wegänderung unterworfen ist. Hier stößt die Berechnung des Übergangswiderstandes bereits auf erhebliche mathematische Schwierigkeiten.

Als wichtigste Forderung, die an die feste Kontakte gestellt wird, ist die Beständigkeit anzusehen. Ist der Widerstand verhältnismäßig groß, so ist dies ein geringeres Übel, als wenn er sich ändert. Der Anwendungsbereich der festen Starkstromkontakte ist in ständiger Ausweitung begriffen, weshalb eine weitere Verfeinerung der Berechnungsmethoden vielleicht gar nicht unnütz wäre.

Die nächste große Gruppe bilden die beweglichen Kontakte der Schaltgeräte, die *nicht* die Aufgabe haben, Kurzschlußströme zu unterbrechen.

Scheinbar sind die einfachsten Kontakte, die hierher gehören, die Kontakte der *Trenner*, die keinesfalls zur Unterbrechung eines Stromes dienen, mit hin einen Übergang vom festen zum beweglichen Kontakt darstellen. Bei den Trennerkontakten liegen drei hauptsächliche Forderungen vor, und zwar der kleine Übergangswiderstand, die Schweißbeständigkeit und eine gewisse Verschleißfestigkeit. Zwischen der ersten und der letzten dieser Forderungen besteht gewissermaßen ein Widerspruch, weil man zum kleinen Übergangswiderstand prinzipiell eher einen weichen, zur größeren Verschleißfestigkeit hingegen einen harten Werkstoff brauchen würde. Als Ergebnis der bahnbrechenden Arbeit von HOLM ist bekannt, daß der Übergangswiderstand (Engewiderstand) R_e mit der Formel

$$R_e = \varrho \sqrt{\frac{\sigma}{n_{\pi}}} \sqrt{\frac{1}{F}} \quad (1)$$

angegeben werden kann, in der ϱ den spezifischen Widerstand, σ die der Fließgrenze zugeordnete Druckfestigkeit, n die Zahl der Berührungspunkte (Elementarflächen), F die Druckkraft bedeutet. Aus der Formel scheint R_e bei vorgegebener Kraft F um die Größe $\varrho \sqrt{\frac{\sigma}{n}}$ zu steigen. Die Zunahme um ϱ ist eindeutig, der Einfluß von $\sqrt{\frac{\sigma}{n}}$ dagegen läßt sich schon schwieriger beurteilen, weil σ und n voneinander nicht unabhängig sind. Prinzipiell kann man annehmen, daß n beim Herabsetzen von σ zunimmt, die Größe $\sqrt{\frac{\sigma}{n}}$ ist also bei weichen Stoffen kleiner als bei harten. Dies bestätigen allgemein auch die Erfahrungen, doch wirkt gewissermaßen störend, daß ϱ für weichere Stoffe (wie z. B. Kupfer, Silber) zumeist kleiner ist als für harte, ferner daß bei den härteren Stoffen eine größere Kraft anwendbar ist. Die Verhältnisse werden deutlich, wenn man n als grobe Annäherung gleich Eins setzt, und die nach der Hertzschen Formel erhaltene Größe

$$\sigma \cong \sqrt[3]{\frac{FE^2}{r^2}} \quad (2)$$

einsetzt. (r ist der Halbmesser der Kontaktfläche.)

Setzt man diese in Gleichung (1) ein, kann mit Eliminierung von F

$$R_e \cong \varrho \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} \sqrt{\frac{K_1^3 E^2}{\sigma^3 r^3}} \cong \varrho \frac{K_2}{\sigma/E} \quad (3)$$

geschrieben werden. Wirkt auf die Kontakte von hoher Festigkeit eine so große Kraft ein, daß diese Festigkeit ausgenutzt wird, ist es allem Anschein nach denkbar, daß das Endergebnis bei übrigens kleinem spezifischen Widerstand ϱ nicht *wesentlich* ungünstiger ausfallen wird als bei einem weichen Stoff.

Da bei den Trennerkontakten die gute Verschleißfestigkeit keinesfalls außer acht gelassen werden darf, sind hier jedenfalls entweder harte Stoffe zu gebrauchen, oder die Kraft muß herabgesetzt werden, indem man parallel geschaltete Kontakte in entsprechender Zahl anwendet. Bekanntlich nimmt damit auch der Gesamtbedarf an Bewegungskraft ab, wobei sich aber der Trenner kostspieliger gestaltet.

Dasselbe trifft auch für die Kontakte *der Installationsschalter*, zylindrische Schalter usw. zu, die unter Druck eine dem Wesen nach gleitende Bewegung ausführen. Bei diesen ist übrigens schon jetzt kein Übel zu verzeichnen, ist doch die Lebensdauer der Installationsschalter schon jetzt befriedigend,

auch haben sie genügend kleine Abmessungen. Das gleiche gilt auch für die *Druckknöpfe* und *Stecker*, die prinzipiell zwar den Charakter von Trennern tragen, bekanntlich aber auch als Schalter benutzt werden. Da hier vom Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit aus keine Gefahr zu befürchten ist, scheint es überflüssig, mit den vorgeschriebenen und meines Erachtens übermäßigen Forderungen zu disputieren.

Ein Gleiches kann aber z. B. von den Kontaktoren-Kontakten nicht behauptet werden, da bei diesen das Streben nach einem gewissen Maximalismus vorzuliegen scheint, was aber die Gefahr in sich birgt, daß die Hersteller der Stoffe gezwungen sind, überflüssige Arbeit zu leisten.

Es dürfte z. B. kaum bezweifelt werden können, daß man eine mit einer Schaltzahl von $10 \cdot 10^6$ bezeichnete Lebensdauer nur sehr selten ausnutzen wird, besonders dann, wenn diese Bedingung auch noch dadurch erschwert wird, daß man außerdem auch eine Schalthäufigkeit von 3000/St vorschreibt. Ein solcher Kontaktor ist wohl als eine schöne Spitzenleistung von Konstruktionsarbeit und Erzeugung anzusehen, erfüllt aber keine so praktische Forderung, daß man sich auf sie in der Großserienerzeugung einrichten sollte. Zur Begründung unserer Behauptung wird es vielleicht genügen zu erwähnen, daß vermutlich nur wenige Motoren instande sein werden, diese in der Regel mit Umkehr verbundene und entschieden als unfreundlich zu qualifizierende Betriebsart wirtschaftlich zu ertragen.

Ein anderes Verfahren, gegen welches energische Einwendungen erhoben werden können, besteht z. B. darin, die Niederspannungs-Motorschuttschalter mit einem Schnellauslöser auszustatten und solcherart mit ihnen unter Umständen die Abschaltung von Kurzschlußströmen zu ermöglichen. Naturgemäß soll von den Kontakten in solchen Fällen gefordert werden, daß sie den damit verbundenen Beanspruchungen gewachsen seien, was ein sehr strenges Postulat darstellt, außerdem aber den Schalter und damit auch die Kontakte überflüssigerweise verteuert. Das Abschalten von Kurzschlüssen ist die Aufgabe der vor dem Motorschutz eingebauten *Sicherung*. Es ist auch zu überlegen, ob selbst dort, wo im übrigen eine Doppelunterbrechung Anwendung findet, der Betrieb der Kontakte nicht damit erleichtert werden soll, daß man zu dem einen Kontaktpaar einen Widerstand in Nebenschluß schaltet, um die Unterbrechung des Betriebsstromes zu erleichtern. Wegen der Strombeeinflussung der vor dem Kontaktor vorgesehenen Sicherung sinkt die Gefahr einer Schweißung der Kontakte erheblich herab, weshalb die Maße der Kontakte verringert werden kann. Durch die Sicherung wird übrigens auch die zur Wartung ohnedies notwendige Trennungsmöglichkeit in einfacher Weise gewährleistet.

Wie bekannt, besteht im Interesse einer Vereinfachung der Konstruktionen die allgemeine Tendenz, die frühere Trennung zwischen dem Kontakt, durch den im geschlossenen Zustand Strom fließt, und dem Kontakt, der den

Bogen unterbricht, aufzuheben, natürlich um den Preis, auf diese Weise *dem gleichen* Kontakt zwei prinzipiell unterschiedliche Aufgaben übertragen zu müssen. Diese Bestrebung kann, besonders bei den großen Schaltern, wirtschaftlich betrachtet, nicht immer als optimal angesehen werden. Eine der Hauptaufgaben des Konstrukteurs ist darin zu erblicken, daß er den Kontakten eine möglichst angenehme Lebensweise sichert und daß er die Lösung der Schwierigkeiten, die auf das prinzipiell nicht richtige oder nicht ausreichend durchdachte Wesen der Konstruktion zurückzuführen sind, nicht dem Metallurgen überläßt, der den Kontaktwerkstoff herstellt. Eines der kennzeichnenden Beispiele derartiger Fehler ist das Prellproblem, dem oft selbst dort nicht abgeholfen wird, wo dies unschwer möglich wäre, doch gehören auch zahlreiche aus der nicht optimalen Formgestaltung der Kontakte stammende sonstige Schwierigkeiten hierher, die zur überflüssigen Überbeanspruchung des Kontaktwerkstoffes führen.

Durch konstruktive Lösungen läßt sich auch erreichen, daß die Bogenunterbrechung keinen Schaden verursacht (entsprechendes Blasen, Deionplatten usw.).

Am ausgeprägtesten treten die Kontaktprobleme *bei den Unterbrechern* in Erscheinung, besonders dann, wenn man die Stromleitung im geschlossenen Zustand und die Bogenunterbrechung auch hier mit einem Kontakt zu lösen wünscht. An dieser Stelle erschiene es, zumindest bei den Unterbrechern, richtiger, wenn man an den Doppelkontakten auch weiterhin festhielte, ja sogar vor den Bogenunterbrecherkontakt während der Unterbrechungsdauer einen *Widerstand* schaltete.

Zu bemerken ist noch, daß das Optimum der Querschnittausgestaltung des am häufigsten verwendeten Linienkontaktes noch nicht ausreichend untersucht wurde, da dessen Berechnung bisher kaum zu überwindende Schwierigkeiten bereitete. Unter Optimum kann man hier z. B. das Minimum an Stoffspesen und der Energiekosten oder die am Übergangswiderstand entstehenden Verluste verstehen, doch kann man sich auch eine andere Berechnungsbasis vorstellen. Die untere Grenze der Linienlänge wird bekanntlich durch die Stoffhärte bestimmt. Aus Festigungsgründen wird dies offenbar auch die Breite der Zulassung sein, während für die Dicke die Stromdichte maßgebend ist. Danach muß für die Ausbreitung der Stromfäden Platz gesichert werden. Es ist klar, daß der Engwiderstand herabgesetzt werden kann, sofern man die Masse des Blocks vergrößert, ebenso klar ist es aber auch, daß hier ein Optimum vorhanden ist. Das Ausmaß der Kühlung ist ebenfalls nicht gleichgültig, weil damit die Temperatur des Blocks und somit auch Widerstand und Verlust verringert werden können. Sehr viel kann man hier kaum einsparen, doch kann unter Umständen auch dieses wenige von Interesse sein.

Bei Festlegung der Forderungen muß man auch darauf bedacht sein, wie groß das Verhältnis des Betriebsstromes zu dem zu unterbrechenden

Kurzschlußstrom zu wählen ist. So z. B. kann ein Kontakt kaum als wirtschaftlich ausführbar angesehen werden, der in einem Unterbrecher Anwendung finden soll, dessen Nennstrom 250 A beträgt, während sich der zu unterbrechende Kurzschlußstrom beispielsweise auf 100 kA beläuft. Es darf nicht zugelassen werden, daß in einer Abzweigung mit einem Nennstrom von 250 A ein so großer Kurzschlußstrom auftritt, aber dies läßt sich auch verhindern.

Die Forderungen weisen andere Merkmale auf, wenn der am Übergangswiderstand auftretende Spannungsabfall mit der Speisespannung des Stromkreises *verglichen* werden kann. Bekanntlich kann die Anwendung von Edelmetallen, zumindest in Form eines Überzuges bei der Erzeugung solcher Kontakte kaum vermieden werden.

Besonders große Schwierigkeiten können sich ergeben, wenn der Strom von Spulen, die an Gleichspannung liegen, mit Relaiskontakten zu unterbrechen ist, ein Umstand, der auch die künftige weitere Verbreitung der Gleichspannung für Steuerungszwecke ev. zu beeinflussen vermag. Da hier die Möglichkeit eines Bogenblasens kaum gegeben sein dürfte, könnte es vielleicht ratsam sein, zu überlegen, ob nicht Doppelrelaiskontakte oder eine verhältnismäßig hohe Spannung und ein Reihenschlußwiderstand Anwendung finden sollten. Dies wäre sowohl vom Gesichtspunkt des Durchschlages der Oberflächenschicht aus als auch hinsichtlich der Unterbrechung des Öffnungsbogens vorteilhaft.

3. Die mit dem Prüfverfahren zusammenhängenden Probleme und einige einheimische Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kontaktwerkstoffforschung haben den Konstrukteur ebenso in die Lage der »embarras de richesse« versetzt wie die Kunststoffforschung, so daß es äußerst schwer ist, für den gegebenen Zweck den bestgeeignet erscheinenden Stoff zu wählen. Die Zahl der Abarten wird noch durch den Umstand erhöht, daß man unterschiedliche Ergebnisse erhalten kann, wenn man einen neuen Stoff nach der alten Technologie oder einen alten Stoff nach der neuen Technologie anwendet. Eben deshalb kommt der optimalen Gestaltung der Prüfverfahren beim heutigen Stand der Entwicklung eine entscheidende Bedeutung zu. Man kann sich aber auch vorstellen, daß man sich zum Vergleich der verschiedenen Stoffe zumindest *identischer* Verfahren bedienen soll, solange hinsichtlich solcher Verfahren kein Übereinkommen erzielt werden kann. Es gibt heute mehrere Apparate, die für die Prüfungen von Stoff und Gestalt der Kontakte geeignet zu sein scheinen, es wäre daher zweckmäßig, sie im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit zu untersuchen und danach eine Methode zu entwickeln, die sich auch normen läßt. Damit wäre ein exakter Vergleich der in der Fachliteratur bekanntgegebenen Ergebnisse ermöglicht, der heutzutage noch manche Schwierigkeiten bereitet.

Eine derartige Einrichtung wurde auch vom Forschungsinstitut der Elektrischen Industrie in Budapest entwickelt, deren wichtigste Kenndaten hier kurz besprochen werden sollen. Sie eignet sich zur gleichzeitigen Prüfung von 6 Kontaktpaaren; die Stromkreiselemente lassen sich im Sinne der Vorschläge IEC 17B ebenso ändern wie die Betätigungszahl je Stunde oder die Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit. Bogenlöschkammern und Bogenblaswicklungen können abgebaut werden. Die Schaltzahl wird von mechanischen und elektrischen Zählwerken ermittelt, womit auch die Möglichkeit der Registrierung einer Schweißung gewährleistet ist. Die Schaltung erfolgt preilfrei, und der magnetische Einfluß der Zuleitungen ist ausgeschaltet. Die Bewegungsrichtung der Kontaktelemente läßt sich dabei ändern.

Die bisherigen Untersuchungen wurden bei 5—150 A, 380/220 V, im Bereich von $\cos \varphi = 0,35-1$ an Kontakten aus Cu, Ag, Ag Cd, Ag CdO und Ag Ni durchgeführt. Die günstigsten Ergebnisse lieferten die Kontakte aus Ag CdO (Zusammensetzungsverhältnis 90/10%). In *Tabelle 1* sind die Angaben an Kontakten enthalten, die aus Ag CdO vom Institut für Eisenforschung in Budapest und im Ausland erzeugt wurden. *Tabelle 2* zeigt den Materialverlust in Abhängigkeit von der Schaltgeschwindigkeit, im Bereich von 5—500 mm/sec. In der Tabelle sind nur die Angaben für jene Kontakte angeführt, die die besten Ergebnisse aufwiesen. Aus den Ergebnissen ging hervor, daß jeder Werkstoffsorte eine optimale Ausschaltgeschwindigkeit zugeordnet ist. Dies läßt sich nach NÉVERI damit erklären, daß die Kontaktfläche durch die von den Metalldämpfen verursachte Druckzunahme verschiedenartig beansprucht wird bzw. dadurch, daß der Druckanstieg die geschmolzenen Metalltropfen auf verschiedene Weise mit sich reißt. Es kann auch vorkommen, daß der Kontakt Ag CdO, der übrigens als besser qualifiziert werden kann, bei einer Schaltgeschwindigkeit um etwa 50 mm/sec eine halb so große Lebensdauer

Tabelle I

Gesamtkontaktabbrand (mg) in Abhängigkeit von der Anzahl der Schaltspiele
 $U = 220 \text{ V}$, $I = 45 \text{ A}$, $\cos \varphi = 1$, $d = 4,5 \text{ mm}$, $F = 1000 \text{ pF}$, $v = 100 \text{ mm/s}$

Zeichen	Kontaktwerkstoff	Schaltzahl $\times 10^3$				
		10	20	30	40	50
1.	Ag	3,75	6,5	8,75	11,3	13,7
2.	AgCdO 90/10 Innerlich oxydierte Werkstoffe (Eisenforschungsinstitut)	0,96	1,9	2,84	3,75	4,8
3.	AgCdO 90/10 (ausländisches Material)	1,0	2,0	2,9	3,7	4,6
4.	AgCdO 90/10 Sinterwerkstoff (Eisenforschungsinstitut)	1,2	2,1	3,2	4,0	5,5

Tabelle II

Gesamtkontaktabbrand (mg) in Abhängigkeit von der Ausschaltgeschwindigkeit

 $U = 220 \text{ V}$, $I = 45 \text{ A}$, $\cos \varphi = 1$, $d = 4,5 \text{ mm}$, $F = 1000 \text{ p}$, $S = 50 \cdot 10^3$

Zeichen	Kontaktwerkstoff	Ausschaltgeschwindigkeit mm/s						
		5	10	20	50	100	200	500
1.	Ag	32	20,1	15,3	14,5	13,7	15,4	19,9
2.	AgCd 90/10 Sinterwerkstoff (Eisenforschungsinstitut)	119,9	84,3	40,9	5,7	5,5	6,8	10,4
3.	AgCdO 90/10 Innerlich oxydierte Werkstoffe (Eisenforschungsinstitut)	77,3	65,6	59,2	5,6	4,8	4,7	7,6
4.	AgCdO 90/10 (ausländisches Material)	73,1	44,4	37,6	6,5	4,6	5,1	9,0

aufweisen wird, als ein Kontakt aus Ag. Für Kontakte aus Ag CdO scheinen die um etwa 100 mm/sec liegenden Geschwindigkeiten die vorteilhaftesten zu sein.

Diese Arbeit sowie deren Erweiterung auf die Untersuchung der Abreißkontakte usw. erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Eisenforschung, wo diese Werkstoffe unter der Leitung der Herren Dr. Endre NAGY und Illés KACSÓ hergestellt werden. Dieses Institut befaßt sich auch mit der pulvermetallurgischen Herstellung von Kontakten aus Cu W und Ag W. Im Budapester Forschungsinstitut für Meßinstrumente werden unter der Leitung von Herrn Dr. Ervin LONTAY die Prüfverfahren für Relaiskontakte ausgearbeitet. Im Zusammenhang damit wurde auch schon ein Normvorschlag unterbreitet.

Zusammenfassung

Es wird über Gesichtspunkte, die sich auf die Betriebstüchtigkeit von Kontakten beziehen, sowie über konstruktive Möglichkeiten zur Verminderung der Beanspruchung von Kontakten berichtet. Weiters geht die Arbeit auf Meßmethoden zur Kontrolle des Kontaktverhaltens ein.

Prof. Dr. János EISLER, Budapest XI., Egry József u. 18—20. Ungarn