**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

**Band:** 33 (1955)

**Heft:** 3

**Artikel:** Kontaktmetalle und Relaiskontakte : Eigenschaften und vergleichende Untersuchungen

**Autor:** Gerber, T.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-874221

**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:** 12.01.2026

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

Nº 3 - BERN, 1. III. 1955 - JAHRGANG - ANNÉE - ANNO XXXIII

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

# Kontaktmetalle und Relaiskontakte – Eigenschaften und vergleichende Untersuchungen

Von *Th. Gerber*, Bern

537.311.4:621.318.5:620.193.7

**Zusammenfassung.** *Im einleitenden Teil der vorliegenden Arbeit werden einige Probleme, die sich bei Kontaktmetallen und Relaiskontakten stellen, kurz beleuchtet. In drei weitern Teilen wird hauptsächlich versucht, Zusammenhänge zwischen experimentell ermittelten Kontaktwiderständen und den an den Kontakten auftretenden Oberflächenveränderungen aufzudecken. Die durchgeführten Versuche erstrecken sich sowohl auf elektrisch belastete als auch auf stromlos geschaltete Kontakte sowie auf solche, die der Beanspruchung durch Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden.*

**Résumé.** *Dans l'introduction de son article, l'auteur traite succinctement quelques problèmes qui se posent pour les métaux servant à fabriquer les contacts et les contacts à relais. Dans les trois parties suivantes, il s'efforce avant tout de déceler les rapports qui existent entre les résistances de contacts obtenues expérimentalement et les modifications que subissent les surfaces des contacts. Les essais entrepris s'étendent aussi bien aux contacts chargés électriquement qu'à ceux qui sont connectés sans courant, ainsi qu'aux contacts actionnés par des étincelles à haute tension.*

## 1. Einleitung

### *1.1. Problemstellung*

Über die mannigfaltigen Erscheinungen, die an elektrischen Kontakten auftreten, ist man heute dank vielen systematisch durchgeführten Untersuchungen ziemlich gut orientiert. Die Ergebnisse dieser Forschungen sind teils in Einzelveröffentlichungen, teils in zusammenfassenden Werken niedergelegt [1, 2]*). Man könnte deshalb annehmen, dass die Kontaktprobleme, die in der Praxis auftauchen, auf Grund der vorhandenen Forschungsergebnisse leicht zu lösen wären. Doch beweist die Vielzahl der veröffentlichten Arbeiten eher das Gegenteil. Diese befassen sich mit Untersuchungen, die einerseits die Grundlagenforschung, anderseits die Erprobung von Kontaktwerkstoffen betreffen. Dabei besteht das Bestreben, seltene und darum teure Metalle durch wohlfeilere zu ersetzen, die aber trotzdem die notwendigen guten Eigenschaften besitzen müssen. Diese Gesichtspunkte werden ständig sowohl in Europa [3] als auch in den Vereinigten Staaten von Amerika [4] gebührend berücksichtigt.

Den Anstoss zur vorliegenden Arbeit gab vor allem die Tatsache, dass in der einschlägigen Literatur oft widersprechende Angaben über die Eigenschaften und das Betriebsverhalten von Kontakten, die aus ein und demselben Werkstoff hergestellt sind, vorliegen. Ein weiterer Grund ist der, dass man in den letzten Jahren immer mehr zu der Erkenntnis gekommen ist, dass bestimmte Versuche an Kontakten nur einen begrenzten Wert besitzen. Sie liefern fast durchwegs Ergebnisse, die nur für die einmal gewählten Versuchsbedingungen zutreffen und sich deshalb nicht unbeschränkt auf andere Verhältnisse übertragen lassen [5, 6]. Auch ist in diesem Zusammenhang interessant, dass die Ansichten sogar von Kontinent zu Kontinent verschieden sein können [7, 8]. Als Beispiel seien die hier auch noch zur Untersuchung kommenden Gold-Nickel-Kontakte erwähnt, die auf Grund von praktischen Erprobungen ganz verschiedenartig gewertet werden [9, 10, 11]. Schliesslich gibt es noch Gebiete, in denen die Theorien auseinandergehen, so zum Beispiel beim Problem der Fremdschichten, insbesondere der Oxydschichten [12, 13, 14].

Aus diesen Gründen kommt es wohl immer wieder vor, dass unseren Lieferfirmen Relaiskontakte angeboten werden, die sich dann unter Umständen wesentlich ungünstiger verhalten als bisher verwendete.

Zweck der hier durchgeführten Versuche war, an einer grösseren Zahl verschiedenartiger Kontakte Erfahrungen zu sammeln. Das Hauptgewicht wurde dabei auf den Kontaktwiderstand und das Abbrand-

*) S. Bibliographie am Schluss der Arbeit.

verhalten gelegt. Daneben wurden auch Versuche mit stromlos geschalteten Kontakten durchgeführt sowie mit solchen, die rein elektrischen Beanspruchungen durch Funkenentladungen unterworfen wurden. Es sind dies zwei Gebiete, die bisher kaum systematisch bearbeitet worden sind.

Abschliessend sei bemerkt, dass die Verschiedenheit der in der Literatur erwähnten Einzelergebnisse eigentlich verständlich ist, wenn man bedenkt, wie viele Faktoren beim Verhalten der Kontakte zusammenwirken. Abgesehen von der Art des Stromkreises und den Einflüssen, die das Relais entsprechend seiner Konstruktion und Einstellung auf die Kontakte ausübt (Kontaktdruck, Öffnungs- und Schliessgeschwindigkeiten, Schalthäufigkeit, Prellvorgänge, Erschütterungen), treten noch mannigfache äussere atmosphärische Einflüsse hinzu; es sind vor allem Luftdruck, Temperatur und Feuchtigkeit, die eine Rolle spielen können, sowie die in der Atmosphäre vorhandenen Verunreinigungen, insbesondere Schwefel, Schwefelwasserstoff, organische Dämpfe und Staub verschiedener Herkunft.

### *1.2. Überblick über die wichtigsten in der Fernmeldetechnik verwendeten Kontaktmetalle*

Aus der Literatur [15] ist zu ersehen, dass gut die Hälfte der chemischen Elemente entweder rein als solche, als Legierungsbestandteile oder als Zusatz zu gesinterten Kontaktwerkstoffen vorgeschlagen werden. Davon hat sich aber für die Praxis nur eine beschränkte Zahl als wirklich brauchbar erwiesen. Ihre Zahl reduziert sich für das hier interessierende Gebiet nochmals durch Weglassen derjenigen Werkstoffe, die für Kontakte der Schwachstrom- und Fernmeldetechnik ungeeignet sind. Die schliesslich übrigbleibenden Metalle lassen sich entsprechend ihrem chemischen Verhalten in die folgenden vier Gruppen einteilen:

| | |
|---|---|
| *Silbergruppe:* | Kupfer, Silber, Gold |
| *Platingruppe:* | Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium, Platin |
| *Chromgruppe:* | (Chrom), Wolfram, Molybdän, (Uran) |
| *Eisengruppe:* | (Mangan, Eisen, Kobalt), Nickel |

Die nur der Vollständigkeit halber und in Klammern aufgeführten Metalle kommen für Relaiskontakte nicht in Frage. Alle übrigen werden entweder in reiner Form, und sei es auch nur als galvanisch aufgetragene oder plattierte Deckschichten, oder als Legierungs- und Sinterbestandteile verwendet.

In der *Tabelle I* sind die wichtigsten Eigenschaften der hier interessierenden Kontaktmetalle, soweit sie für das Kontaktverhalten von Einfluss sind, zusammengestellt. Die Daten sind aus verschiedenen Tabellen der Fachliteratur entnommen [16, 17, 18, 19, 20]. Die beigefügten Preisangaben beziehen sich auf den gegenwärtigen Materialwert der unverarbeiteten Metalle.

Als Ergänzung zu dieser Tabelle seien in gedrängter Form einige weitere Eigenschaften sowie Hinweise auf Anwendungsgebiete dieser Kontaktmetalle zusammengestellt.

**Silbergruppe**

*Silber (Ag):* Besitzt von allen Metallen den kleinsten elektrischen Widerstand und die grösste Wärmeleitfähigkeit. Silberoxyd ($AgO_2$) hat, entgegen verbreiteten Ansichten, den sehr hohen elektrischen Widerstand von $5 \cdot 10^7\ \Omega$ cm, zersetzt sich jedoch oberhalb 170° C. Silber wird sehr leicht von Schwefel und Schwefelwasserstoff angegriffen, wobei sich schwarzes Silbersulfid bildet, das ebenfalls ein schlechter elektrischer Leiter ist ($5 \cdot 10^3\ \Omega$ cm). Reines Silber ist weich und nur mässig widerstandsfähig gegen das Verschweissen und gegen den Angriff des Lichtbogens. Deshalb werden sehr häufig legierte Silberkontakte verwendet. Grössere Härte wird durch Legieren mit Kupfer erreicht; verminderte Schweissneigung zeigt der Sinterwerkstoff Silber-Nickel. In Europa verbreitet sind ferner Silber-Gold-Kontakte, die sich durch verminderte Materialwanderung auszeichnen.

*Gold (Au):* Sehr weiches Metall, das an der Luft nicht anläuft, jedoch von freien Halogenen angegriffen wird. Meistens wird es legiert verwendet, wobei so viel Gold vorhanden sein muss, dass die Legierung noch oxydationsfest ist. Reine Goldkontakte sind nur bei Spannungen unterhalb 0,5 V und bei Strömen im $\mu$A-Gebiet empfehlenswert.

**Platingruppe**

*Palladium (Pd):* Besitzt ähnliche mechanische und elektrische Eigenschaften wie Platin (s. unten); widerstandsfähig gegen Oxydation und Sulfidbildung. Bei 350° C oxydiert es langsam, das Oxyd zerfällt aber wieder bei 800° C. Palladium wird in reiner Form für Kontakte verwendet, die Ströme von einigen mA bis über 1 A schalten. Daneben wird es mit fast allen Edelmetallen sowie mit Kupfer und Nickel legiert.

*Iridium (Ir):* Sehr hartes und gegen Korrosion widerstandsfähiges Metall. In reiner Form wird es nicht verwendet, jedoch als Legierungsbestandteil zum Härten. 5 bis 30% Iridium erhöhen in Platin dessen minimalen Bogenstrom.

*Platin (Pt):* Hauptmerkmal ist seine Korrosionsfestigkeit. Deshalb, sowie wegen des hohen Schmelzpunktes, ist es ein beliebtes Kontaktmetall. Gegenüber Silber besitzt es aber einen sehr viel höheren elektrischen Widerstand und eine entsprechend geringere Wärmeleitfähigkeit, was, abgesehen vom hohen Preis, zur Folge hat, dass Platin und stark platinhaltige Kontakte nicht für grössere Ströme verwendet werden. Dagegen ist Platin oder Platin-Iridium für Kontakte, die Drücke von wenigen Grammen oder sogar nur Milligrammen aufweisen, sehr geeignet.

**Chromgruppe**

*Wolfram (W):* Besitzt den höchsten Schmelzpunkt und den geringsten Dampfdruck von allen Kontaktmetallen, deshalb ist es auch sehr widerstandsfähig gegenüber Bogen- und Funkenentladungen (Verwendung für eigentliche Unterbrecherkontakte!), oxydiert jedoch dabei; da das Oxyd beständig ist, muss dafür gesorgt werden, dass es mechanisch entfernt wird. Wolfram wird häufig mit Nickel und Silber gesintert.

**Eisengruppe**

*Nickel (Ni):* Wird als unlegiertes Metall nicht für Relaiskontakte verwendet, dient jedoch in zunehmendem Masse als Legierungsbestandteil in Gold- und Silberkontakten.

### *1.3. Zusammenhänge zwischen den physikalisch-chemischen Eigenschaften und dem Kontaktverhalten der Metalle*

Die Zusammenhänge zwischen den in der *Tabelle I* gegebenen chemischen und physikalischen Daten und dem Verhalten der Metalle als Kontaktvermittler liegen zum guten Teil auf der Hand. Es gibt aber einige Eigenschaften, über deren Auswirkungen die

**Tabelle I. Einige Eigenschaften von reinen, für Kontakte benützten Metallen**

Chemische und mechanische Daten:
- A Atomgewicht
- $\delta$ Dichte
- $H_v$ Vickershärte

Thermische Daten:
- $t_e$ Entfestigungstemperatur
- $t_s$ Schmelztemperatur
- $\lambda$ Wärmeleitfähigkeit

Elektrische Daten:
- $\varrho_{20}$ spezifischer elektrischer Widerstand bei 20° C
- $\alpha$ Temperaturkoeffizient von $\varrho$ zwischen 0 und 100° C

Thermisch-elektrische Daten:
- $U_e$ Entfestigungsspannung
- $U_s$ Schmelzspannung
- $U_b$ minimale Bogenspannung
- $I_b$ minimaler Bogenstrom

Preis:
- Industriepreis (1954) für die technisch reinen Metalle, bezogen auf 1 cm³

| Metall | chem. Symbol | A | $\delta$ g/cm³ | $H_v$ kg*/mm² | $t_e$ °C | $t_s$ °C | $\lambda$ $\frac{W}{cm \cdot Grad}$ | $\varrho_{20}$ $10^{-6}$ $\Omega$ cm | $\alpha$ $\frac{10^{-3}}{Grad}$ | $U_e$ V | $U_s$ V | $U_b$ V | $I_b$ A | Preis je cm³ Fr. | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Silber | Ag | 107,9 | 10,5 | 30...70 | 150...180 | 960 | 4,18 | 1,59 | —4,1 | 0,09 | 0,35 | 12 | 0,4 | 1.45 | $H_v$ stark von der Bearbeitung abhängig |
| Gold | Au | 197,2 | 19,3 | 20...65 | 100 | 1063 | 3,1 | 2,19 | —4,0 | 0,08 | 0,45 | 12...15 | 0,4...0,5 | 95.— | |
| Rhodium | Rh | 102,9 | 12,4 | 100...140 | — | 1966 | 0,85 | 4,6 | —4,4 | — | — | 13 | 0,8 | 220.— | $H_v$ bis 600 |
| Palladium | Pd | 106,7 | 12 | 35...50 | — | 1550 | 0,7 | 10,8 | —3,7 | — | — | 14 | 0,8...1,0 | 45.— | $H_v$ 200...400 wenn elektrolytisch aufgetragen |
| Iridium | Ir | 193,1 | 22,5 | 170 | — | 2450 | 0,57 | 5,3 | —3,9 | — | — | — | — | 550.— | |
| Platin | Pt | 195,2 | 21,4 | 40...90 | 540 | 1774 | 0,70 | 9,8 | —3,8 | 0,25 | 0,70 | 15...17 | 0,7...1,0 | 290.— | $H_v$ 500...600 wenn elektrolytisch aufgetragen; $\varrho_{20}$ bei reinem Pt: $13{,}5 \cdot 10^{-6}$ $\Omega$cm |
| Wolfram | W | 184,0 | 19,2 | 250...350 | 1000 | 3380 | 1,6 | 5,6 | —4,9 | 0,4 | 1,0 | 15 | 1,0...1,4 | 2.50 | |
| Nickel | Ni | 58,7 | 8,8 | 70...150 | 520 | 1455 | 0,8 | 6,8 | —6,9 | 0,22 | 0,65 | 14 | 0,4...0,5 | —.05 | $\varrho_{20}$ bei reinem Ni: $9 \cdot 10^{-6}$ $\Omega$cm |

Fachleute geteilter Meinung sind, nicht zuletzt infolge der im Abschnitt 1.1. erwähnten mannigfaltigen äusseren Einflüsse, die das Verhalten von Kontakten beeinflussen können.

Das *Atomgewicht* (A) und damit die Stellung im periodischen System bestimmen weitgehend die chemischen Eigenschaften. Unter diesen ist besonders das Verhalten gegenüber Sauerstoff, Chlor und Schwefel wichtig. Die Ansichten, ob elektrisch und mechanisch schwach belastete Kontakte möglichst frei von jeglichen Oxydhäuten sein sollen [21, 22], oder ob diese vielleicht doch gewisse Vorteile hinsichtlich verminderter Haftfähigkeit und verminderter Reibung mit sich bringen [23], gehen noch auseinander. Erwiesen ist aber, dass dünne Molekelhäute einen im Vergleich zum Engewiderstand nur sehr kleinen Hautwiderstand besitzen, da die Elektronen in der dadurch entstehenden quasimetallischen Berührungsstelle infolge des Tunneleffektes kein grosses Hindernis vorfinden. Es scheint, dass bei den üblichen Kontaktdrücken derart dünne Fremdschichten eher vorteilhaft sind. Sie vermindern die Gefahr des Verschweissens und der gefürchteten Stiftbildung [24, 25]. Viele Oxyde zerfallen bei mässig hohen Temperaturen wieder [26], so dass eine gewisse Funkenbildung sogar erwünscht sein kann. Möglicherweise besitzen die dabei entstehenden Dämpfe eine höhere Ionisationsspannung als Luft, was sich wiederum nur vorteilhaft auswirken kann. Theoretische und praktische Untersuchungen scheinen übrigens zu bestätigen, dass neben dem Thomsoneffekt [27] weitere Effekte, die an das Vorhandensein von Fremdschichten gebunden sind, massgebenden Einfluss auf die Feinwanderung ausüben. So tritt der Peltiereffekt nicht nur an den Phasengrenzen von festem und flüssigem Metall in den Schmelzbrücken auf, sondern offenbar auch in den Grenzflächen zwischen Metall und Metalloxyd [28, 29]. Dasselbe gilt für die Entstehung von Thermospannungen an einmetalligen Kontakten mit Fremdschichten [30] und für Erscheinungen, die als Benedicks-Effekte bekanntgeworden sind [31, 32].

Als sicher störend verbleiben, abgesehen von den soeben erwähnten Einflüssen dünner Schichten, einzig die dicken Fremdschichten. Bei geeigneter Materialauswahl können sie aber bei den hier interessierenden Kontakten ganz vermieden werden.

Die *Dichte* ($\delta$) der Kontaktmetalle ist insofern von Bedeutung, als sie den für die Praxis wichtigen Volumenverlust aus der Gewichtsabnahme berechnen lässt.

Die *Härte* ($H_v$) ist von Einfluss auf Zahl und Grösse der wirklichen Kontaktflächen und damit auf die in diesen auftretenden Stromdichten. Davon ist wieder die Temperaturzunahme der Kontakte abhängig, welche ihrerseits die Oxydation beeinflusst.

Für Dauerkontakte mit starker Strombelastung ist grosse Härte nicht erwünscht, da die Zahl der Kontaktflächen klein bleibt [33]. Demgegenüber sind weiche Kontaktmetalle unter anderem anfällig gegenüber Staub; Staubpartikelchen werden dabei durch das Arbeiten des Kontaktes gewissermassen in die oberste, den Kontakt vermittelnde Schicht hineingeknetet, wo sie als störende Fremdkörper die Rolle von Isolatoren übernehmen. Durch Versuche englischer Firmen wurde der Beweis erbracht, dass dieser Vorgang bei harten Metallen (z. B. rhodiumplattierten Kontakten) nicht eintritt [34].

In den letzten Jahren haben hauptsächlich die Untersuchungen von *Holm* und seinen Mitarbeitern gezeigt, welche Bedeutung die *Entfestigungstemperatur* ($t_e$) und die *Schmelztemperatur* ($t_s$) für den Kontaktwiderstand und die Feinwanderung besitzen und welche quantitativen Zusammenhänge zwischen den dazugehörigen *Entfestigungsspannungen* ($U_e$) und *Schmelzspannungen* ($U_s$) bestehen. Die damit verbundenen Erkenntnisse sind von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der bei der Kontaktgabe und -trennung mitspielenden Mechanismen.

Der *spezifische elektrische Widerstand* ($\varrho$) sowie dessen *Temperaturkoeffizient* ($\alpha$) sind für die Stromerwärmung bestimmend, die *Wärmeleitfähigkeit* ($\lambda$) für die Wärmeabfuhr. Was bei der Härte über den Einfluss der Temperatur betreffend die Oxydation gesagt wurde, gilt in vermehrtem Masse auch hier. Kleiner elektrischer Widerstand und grosse Wärmeleitfähigkeit wirken sich somit günstig aus.

Unterhalb einer gewissen, als *minimale Bogenspannung* ($U_b$) bezeichneten Spannung können Ströme von theoretisch beliebiger Stärke unterbrochen werden, ohne dass dabei Lichtbogen entstehen und Grobwanderung eintritt. Entsprechendes gilt für den minimalen *Bogen- oder Grenzstrom* ($I_b$): abgesehen von der Grenze, die durch die Zündspannung des Glimmstromes gegeben ist, kann unterhalb dieser Grenze jede Spannung lichtbogenfrei geschaltet werden. Dies heisst nun aber nicht, dass innerhalb des durch diese Grenzwerte beschränkten Gebietes die Unterbrechung durchaus funkenfrei vor sich geht, auch wenn durch besondere Massnahmen jegliche Selbstinduktivität im Stromkreis vermieden wird. Funkenfreies Unterbrechen ist oberhalb der Schmelzspannung gar nicht zu erwarten.

Ausser diesen hier kurz aufgezählten Materialeigenschaften und empirisch gefundenen Grenzwerten spielen noch viele andere Faktoren eine entscheidende Rolle, doch soll hier nicht darauf eingegangen werden.

## 2. Untersuchungen an elektrisch belasteten Kontakten

### *2.1. Angaben über die untersuchten Kontakte*

In der *Tabelle II* sind die für die Versuche benützten Kontakte nach chemischen Gruppierungen, Legierungs- und Sinterungsverhältnissen zusammengestellt. Wie ersichtlich, befinden sich darunter einige viel verwendete Kontakte. Daneben wurden aber auch Kontakte einbezogen, die für vergleichende

Untersuchungen besonders interessant sind, zum Teil jedoch selten benützt werden.

Die angegebenen *chemischen Zusammensetzungen* wurden auf spektrographischem Wege halbquantitativ auf ihre Richtigkeit geprüft. Zugleich wurde die Reinheit der Metalle und Legierungen untersucht. Wesentliche Verunreinigungen fanden sich nur bei den Silberkontakten Nr. 5 (Titan) und Nr. 6 (Nickel); bei letzterem zeigten sich im Laufe der Versuche verschiedene Eigentümlichkeiten, die offenbar auf diesen Nickelgehalt zurückzuführen sind.

Die mitgeteilten *Vickers-Härtezahlen* ($H_v$) sind mit Hilfe eines Mikrohärteprüfers (angewandte Belastung: 250...500 g*) an den Kontakten selbst ermittelt worden.

### 2.2. *Versuchsbedingungen*

Die Versuchsbedingungen sind absichtlich etwas schwerer gewählt worden als die Bedingungen, denen im allgemeinen die Kontakte im praktischen Betrieb unterworfen werden. Sie liegen aber noch durchaus im Bereich, in dem Relaiskontakte von Schwachstrom-Steuereinrichtungen eingesetzt werden. Die Ergebnisse dürfen deshalb nicht auf Kontakte, die Sprechströme oder ganz allgemein kleine Ströme mit entsprechend niederen Spannungen führen, übertragen werden.

Für die Versuche wurde ein kleines, in Figur 1 sichtbares Relaisgestell verwendet, dessen Relais mit den zu untersuchenden Kontakten ausgerüstet wurden. Die nachfolgende Zusammenstellung enthält alle zur Orientierung notwendigen Daten und Versuchsbedingungen.

*Verwendete Relais:*
Ericsson-Relais,
Kontaktfedern horizontal,
Relais durch Staubdeckel abgeschlossen.

*Art und Anzahl Kontakte:*
sogenannte Ruhe- oder Abhebekontakte,
je 1 Kontakt pro Feder,
Pluskontakt oben, Minuskontakt unten.

*mechanische Einstellungen:*
Federdruck oben: 15 g*,
Federdruck unten: 5 g*,
Kontakte laufen nach (Reinigungswirkung!),
Prellfreiheit nicht gewährleistet,
keine Nachjustierung während der Versuche,
keine Reinigung während der Versuche.

*Daten der Schaltstromkreise:*
Gleichspannung 48 V,
Stromstärke 80 mA,
Stromkreis induktiv,
Strombegrenzung und Induktivität durch Ericsson-Relaisspulen mit eingesetzten Kernen,
Wicklungsdaten: 600 Ω, 13 700 Windungen,
Kupferdraht 0,15 mm, lackiert,
keine Funkenlöschung.

*Schaltungen:*
ungefähr 1 Schaltung pro Sekunde,
im gesamten etwa $10^7$ Schaltungen.

*Klima:*
normale klimatische Bedingungen in einem wenig benützten Raum.

*Anzahl Versuche:*
1 Doppelversuch von jedem in *Tabelle II* angeführten Kontakt.

**Tabelle II. Zusammenstellung der geprüften Kontakte**

| Chemische Gruppe | Nr. | Zusammensetzung | $H_v$ kg*/mm² | Form | Durchm. mm |
|---|---|---|---|---|---|
| *Silbergruppe* | 1 | Ag 100 % | 78 | bombiert | 1,8 |
| | 2 | Ag 100 % | 72 | bombiert | 1,8 |
| | 3 | Ag 100 % | 68 | bombiert | 1,3 |
| | 4 | Ag 100 %, plattiert (auf Cu-Träger) | — | bombiert | 1,9 |
| | 5 | Ag ≈ 100 % + Ti ≈ 0,15 % | — | bombiert | 1,6 |
| | 6 | Ag ≈ 100 % + Ni | 65 | bombiert | 1,8 |
| Silberlegierungen | 7 | Ag/Au 90/10 | 95 | Pluskontakt: flach<br>Minuskontakt: Kegelstumpf | 2,3<br>1,5/1,0 |
| | 8 | Ag/Au 90/10 | 88 | bombiert | 1,6 |
| | 9 | Ag/W 70/30 gesintert | 110 | bombiert | 1,6 |
| Goldlegierungen | 10 | Au/Ni 95/5 | 190 | bombiert | 1,3 |
| | 11 | Au/Ni 95/5 | 190 | bombiert | 1,9 |
| *Platingruppe* | 12 | Pd 100 % | 135 | bombiert | 1,6 |
| | 13 | Pt 100 % (plattiert) | 80 | bombiert | 1,9 |
| | 14 | Pt 100 % (plattiert) | 115 | bombiert | 2,0 |
| Platinlegierungen | 15 | Pt/Ir 90/10 | 215 | schwach bombierter Kegelstumpf | 1,7/1,0 |
| | 16 | Pt/Cu 95/5 («Cupleg») | 270 | bombiert | 1,8 |
| *Chromgruppe* | 17 | W 100 % (auf Ag-Träger) | 500 | flach | 2,0 |
| | 18 | W 100 % (auf Ag-Träger) | 525 | flach | 2,0 |

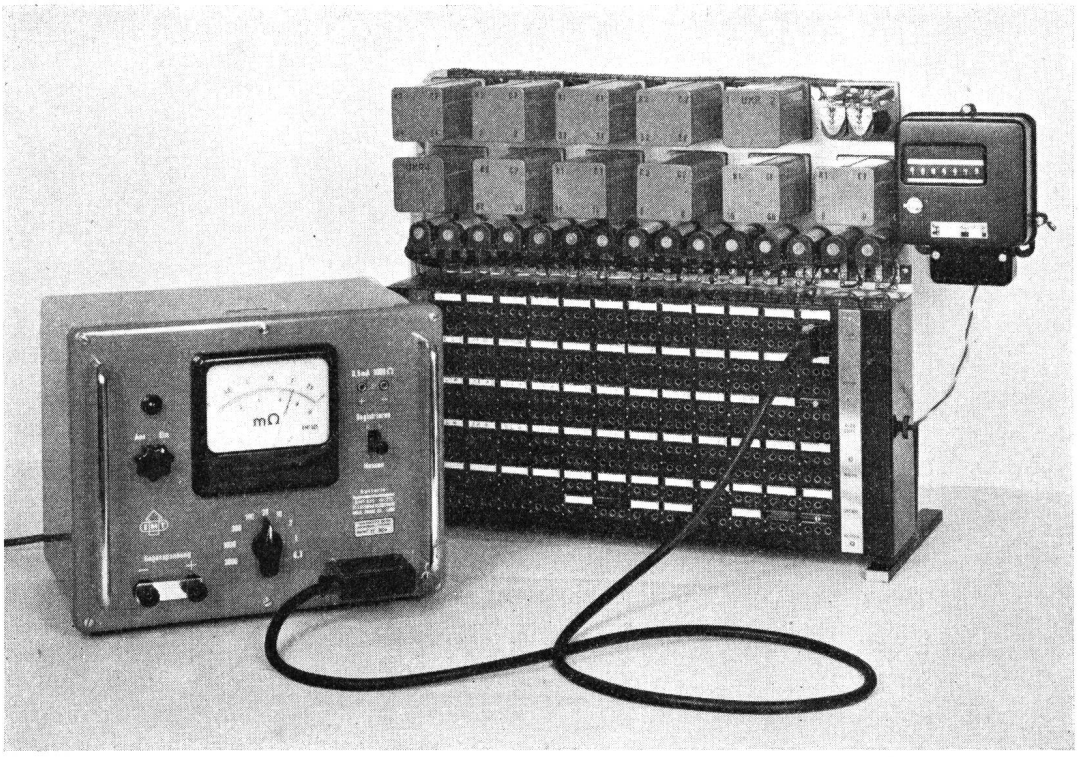



Fig. 1. Benützte Prüfeinrichtung

*2.3. Kontaktwiderstandsmessungen an elektrisch belasteten Kontakten*

Da der Kontaktwiderstand ein entscheidendes Kriterium für die Güte der Kontaktgabe ist, wurde der Hauptakzent auf dessen Bestimmung in Abhängigkeit der Anzahl Schaltungen gelegt. Das benützte Milliohmmeter (vgl. Fig. 1) beruht auf dem Prinzip der Strom- und Spannungsmessung, wobei separate Potentialzuleitungen vorhanden sind. Die Meßspannung beträgt nur einige Millivolt, so dass die Frittschlußspannung auf keinen Fall erreicht wird. Sämtliche hier mitgeteilten Widerstandswerte bedeuten die effektiven, nach Abzug der Federwiderstände verbleibenden Kontaktwiderstände.

Eine Auswahl der erhaltenen Versuchsergebnisse ist in den Figuren 2a bis 2l dargestellt. Zur Veranschaulichung sind ziemlich viele Messpunkte eingetragen; sie bedeuten im allgemeinen die aus den Doppelversuchen erhaltenen Mittelwerte (andernfalls sind getrennte Kurven gezeichnet). Erst bei den grösseren Schaltzahlen stellen sie zugleich Mittelwerte aus verschiedenen aufeinanderfolgenden Messungen dar.

Die Darstellung im doppelt logarithmischen Netz gestattete die Anwendung der linearen Regression und Korrelation. So sind, um einfache objektive Darstellungen zu erhalten, die Regressionsgeraden berechnet und eingezeichnet worden (betrifft nur die längeren geraden Kurvenstücke).

In der *Tabelle III* sind einige zahlenmässige Teilergebnisse von Kontaktwiderstandsmessungen zusammengestellt. Der Einfachheit halber ist in all den Fällen, in denen der Kontaktwiderstand einige Ohm überschreitet, der Kontakt also sehr schlecht ist, der Wert «unendlich» angenommen worden. Die für die angegebenen Bereiche durchgeführten statistischen Berechnungen dienen dazu, die stark streuenden Einzelwerte der Kontaktwiderstände zu beurteilen und in objektiver Weise den Zusammenhang zwischen diesen und der Anzahl Schaltungen zu finden. So gibt das Bestimmtheitsmass B an, welchen Anteil die Änderung der Schaltzahl n auf die Änderung der Kontaktwiderstände hat; der Korrelationskoeffizient r diente zum Prüfen der Abhängigkeit zwischen diesen soeben erwähnten Grössen. Die in der letzten Kolonne der *Tabelle III* wiedergegebene Beurteilung beruht auf der statistischen Sicherheit $S = 99\,\%$, so dass die gemachten Aussagen gemäss den konventionellen Regeln nicht als zufällig zu betrachten sind.

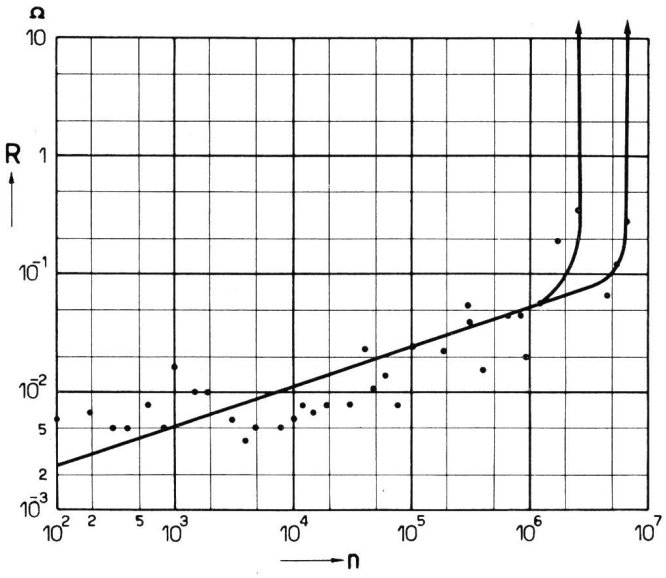
Da zur raschen Orientierung eine einfache Zusammenstellung erwünscht ist, wurde die *Tabelle IV* aufgestellt. Hier sind die Kontakte auf Grund des Verlaufes ihrer Kontaktwiderstände eingereiht. Die angegebenen Werte $n_\infty$ geben dabei die Anzahl Schaltungen an, bei denen die Kontaktwiderstände praktisch auf den Wert «unendlich» angestiegen sind. Die Ursachen des Anwachsens auf diesen Wert werden im folgenden Abschnitt besprochen.

*2.4. Mikroskopische Untersuchungen an elektrisch belasteten Kontakten*

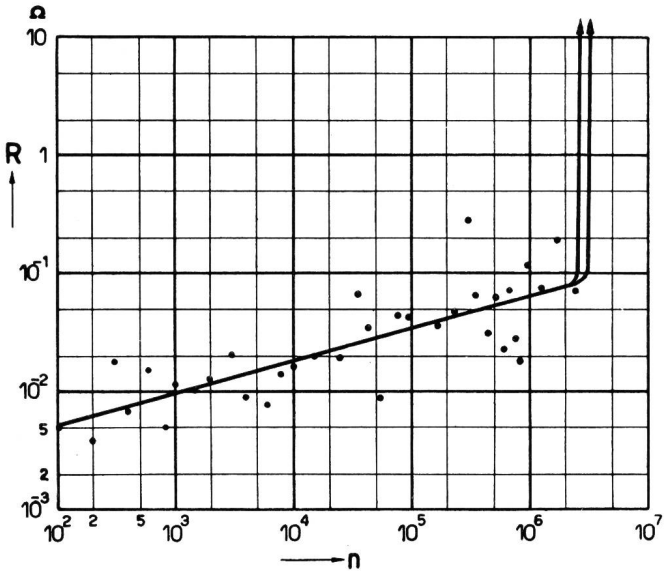
Nach Abschluss der im vorigen Abschnitt besprochenen Versuche ($\approx 10^7$ Schaltungen) wurden die

**Tabelle III. Teilergebnisse von Kontaktwiderstandsmessungen an elektrisch belasteten Kontakten**

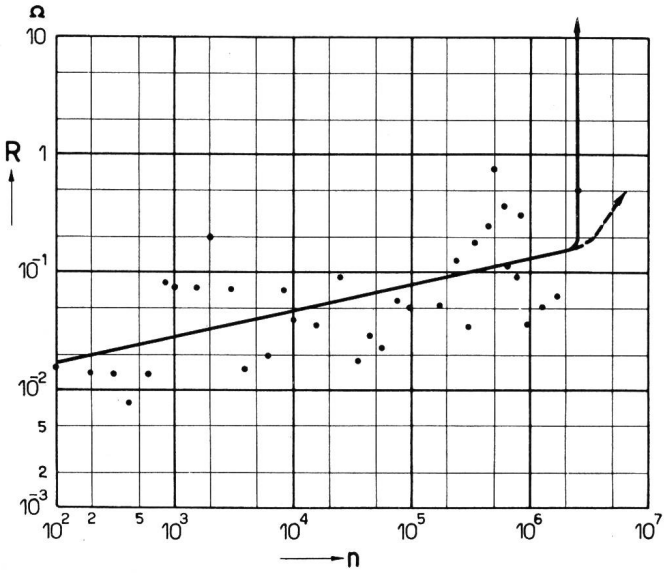
| Kontakt | | Kontaktwiderstände in m $\Omega$ nach n Schaltungen | | | | | | | Statistische Auswertungen | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nr. | Metall | $n \approx 0$ | $n = 10^2$ | $n = 10^3$ | $n = 10^4$ | $n = 10^5$ | $n = 10^6$ | $n = 10^7$ | Untersuchter Bereich | B | r | Einfluss der Anzahl Schaltungen auf den Kontaktwiderstand |
| 1 | Ag | 9 | 8 | 13 | 15 | 10 | 78 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,36 | 0,60 | gesichert |
| 2 | Ag | 20 | 42 | 37 | 44 | 44 | 80 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,25 | 0,50 | gesichert |
| 3 | Ag | 1 | 6 | 11 | 6 | 18 | 59 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,72 | 0,85 | gesichert |
| 4 | Ag plattiert | 9 | 13 | 29 | 37 | 73 | 100 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,69 | 0,83 | gesichert |
| 5 | Ag (+ Ti) | 16 | 13 | 20 | 20 | 31 | 140 | $\infty$ | $n = 10^3 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,70 | 0,84 | gesichert |
| 6 | Ag (+ Ni) | 8 | 16 | 77 | 48 | 75 | 51 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,36 | 0,60 | gesichert |
| 7 | Ag/Au | 14 | 25 | 120 | 130 | 170 | 120 | $\infty$ | $n = 2 \cdot 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,02 | —0,14 | nicht gesichert |
| 8 | Ag/Au | 4 | 5 | 9 | 20 | 41 | 75 | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ | 0,63 | 0,80 | gesichert |
| 9 | Ag/W | 21 | 46 | 580 | 2100 | 7200 | $\infty$ | $\infty$ | $n = 10^3 \ldots 10^6$ | 0,76 | 0,87 | gesichert |
| 10 | Au/Ni | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $n = 0 \ldots 10^7$ | $\approx 0$ | $\approx 0$ | praktisch kein Einfluss |
| 11 | Au/Ni | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | $n = 0 \ldots 10^7$ | $\approx 0$ | $\approx 0$ | praktisch kein Einfluss |
| 12 | Pd | 5 | 4 | 4 | 5 | 6 | 10 | 37 | $n = 10^3 \ldots 10^7$ | 0,74 | 0,86 | gesichert |
| 13 | Pt | 10 | 13 | 6 | 8 | 22 | 11 | 100 | $n = 10^3 \ldots 10^7$ | 0,63 | 0,79 | gesichert |
| 14 | Pt | 5 | 4 | 4 | 6 | 8 | 10 | 100 | $n = 10^2 \ldots 1^6 0 (\ldots 10^7)$ | 0,14 | 0,37 | bis $n = 10^7$ nicht gesichert |
| 15 | Pt/Ir | 11 | 14 | 7 | 11 | 8 | 13 | 32 | $n = 10^2 \ldots 10^6$ | 0,03 | 0,18 | bis $n = 10^7$ nicht gesichert |
| 16 | Pt/Cu | 20 | 18 | 15 | 14 | 14 | 35 | 75 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,45 | 0,67 | gesichert |
| 17 | W | 77 | 300 | 1300 | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$ | — | — | — | Versuchsergebnis: Einfluss sehr gross |
| 18 | W | 140 | 80 | 33 | 200 | 1200 | $\infty$ | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 10^6$ | 0,62 | 0,79 | gesichert |



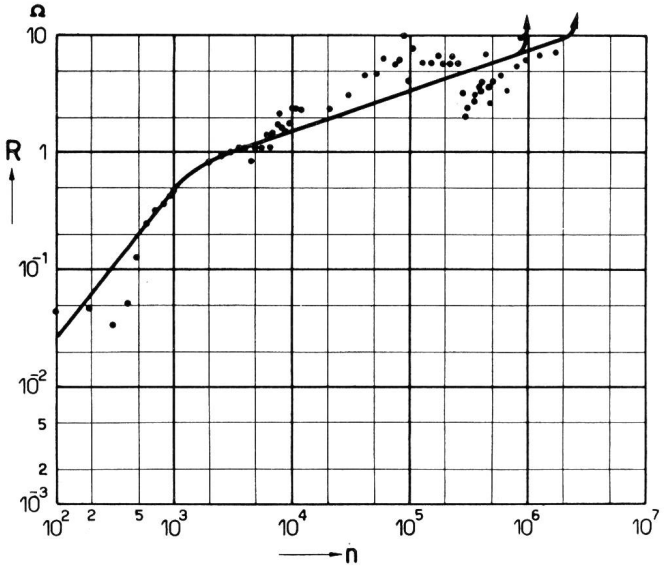

a) Silberkontakte Nr. 3



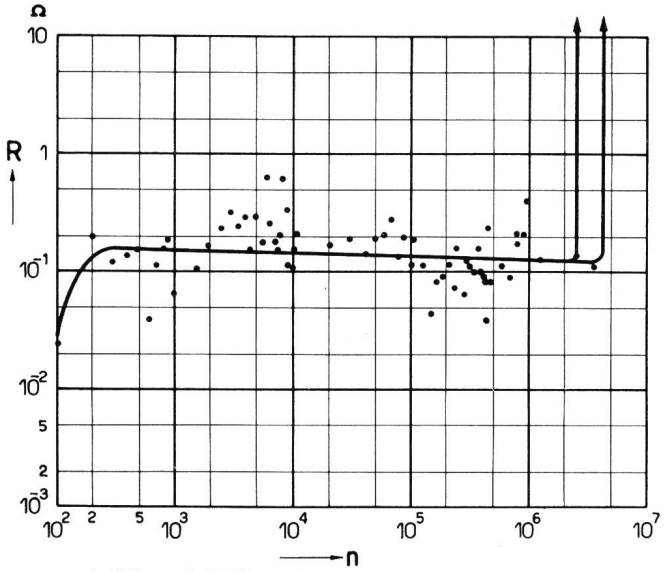

d) Silber-Gold-Kontakte Nr. 8



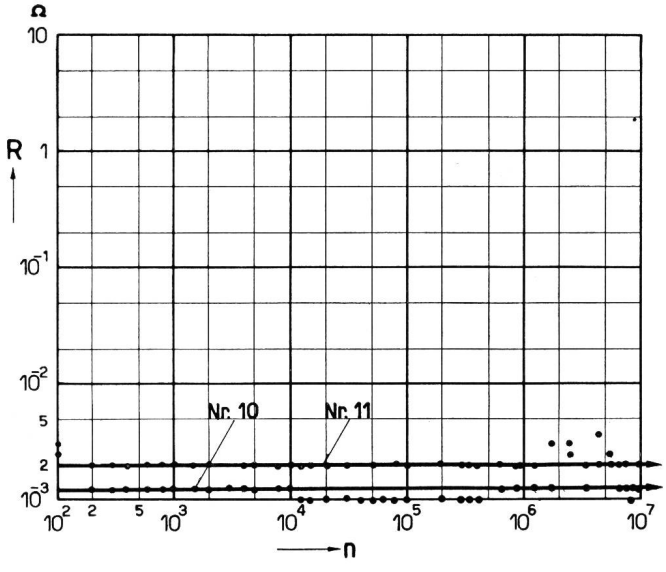

b) Silberkontakte Nr. 6




e) Silber-Wolfram-Kontakte Nr. 9

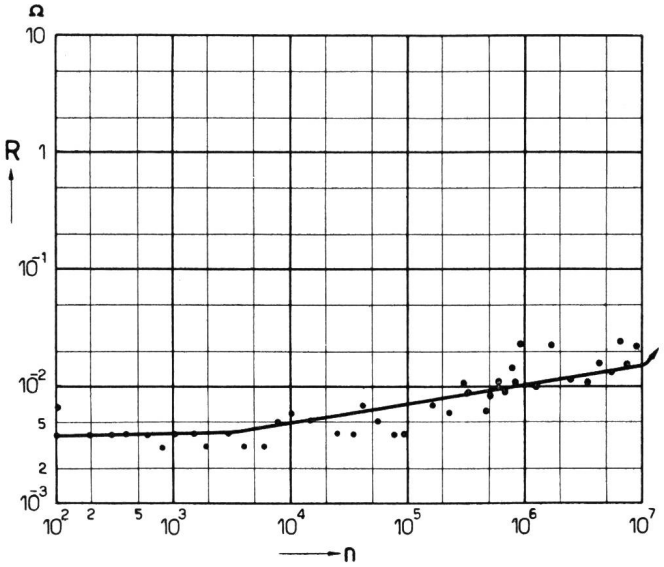



c) Silber-Gold-Kontakte Nr. 7

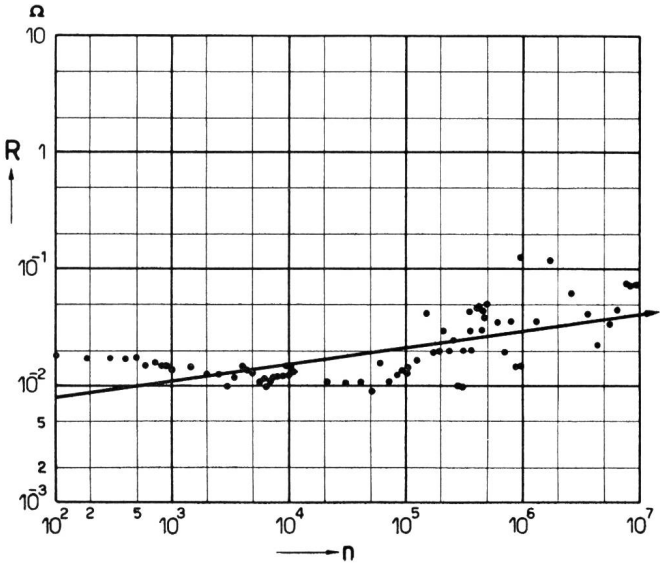



f) Gold-Nickel-Kontakte Nr. 10 und 11

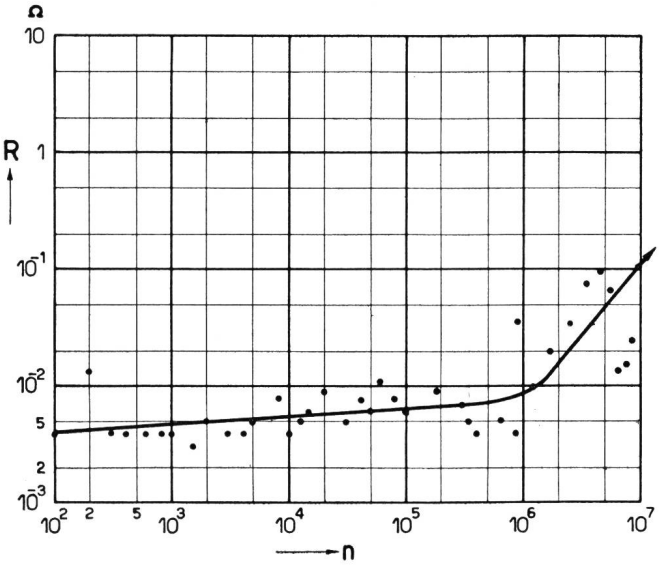
Fig. 2. Kontaktwiderstände von elektrisch belasteten Kontakten



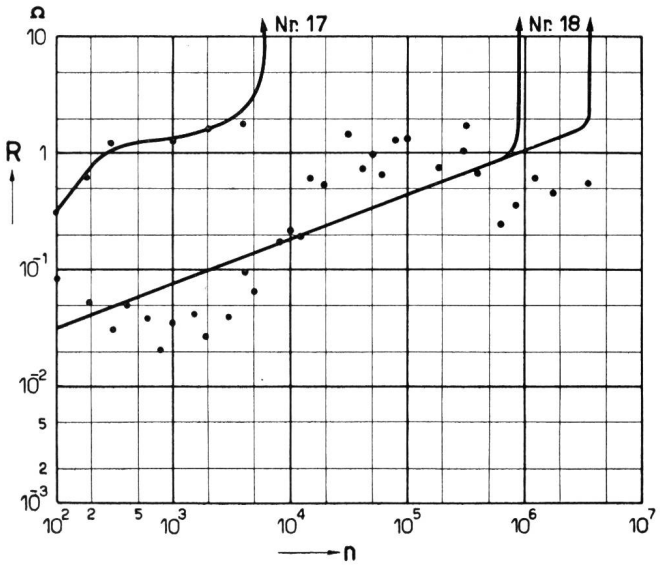

g) Palladiumkontakte Nr. 12



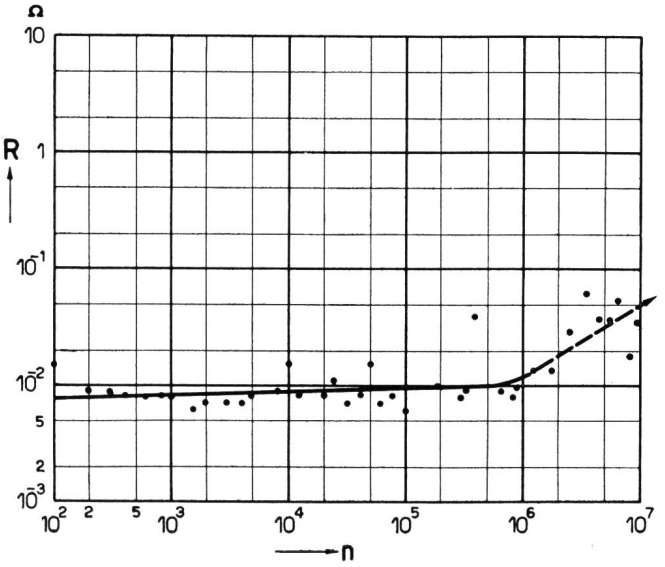

k) Platin-Kupfer- («Cupleg»-) Kontakte Nr. 16




h) Platinkontakte Nr. 14




l) Wolframkontakte Nr. 17 und 18




i) Platin-Iridium-Kontakte Nr. 15

**Tabelle IV. Einteilung der elektrisch belasteten Kontakte nach dem Verlauf ihres Kontaktwiderstandes**

| Nr. | Kontakt-metalle | $n_\infty$ | Verlauf des Kontaktwider-standes unterhalb $n_\infty$ |
|---|---|---|---|
| 10, 11 | Au/Ni | $>10^7$ | konstant |
| 12...16 | Pd, Pt, Pt/Ir, Pt/Cu | $>10^7$ | leicht bis mässig steigend |
| 1...6; 7, 8 | Ag; Ag/Au | $\approx 10^6$ | mässig steigend; Nr. 7 (Ag/Au): $R \approx$ konst. $\approx 120$ m $\Omega$ |
| 9 | Ag/W | $\approx 10^6$ | stark steigend |
| 17, 18 | W | $10^4...10^6$ | stark steigend |

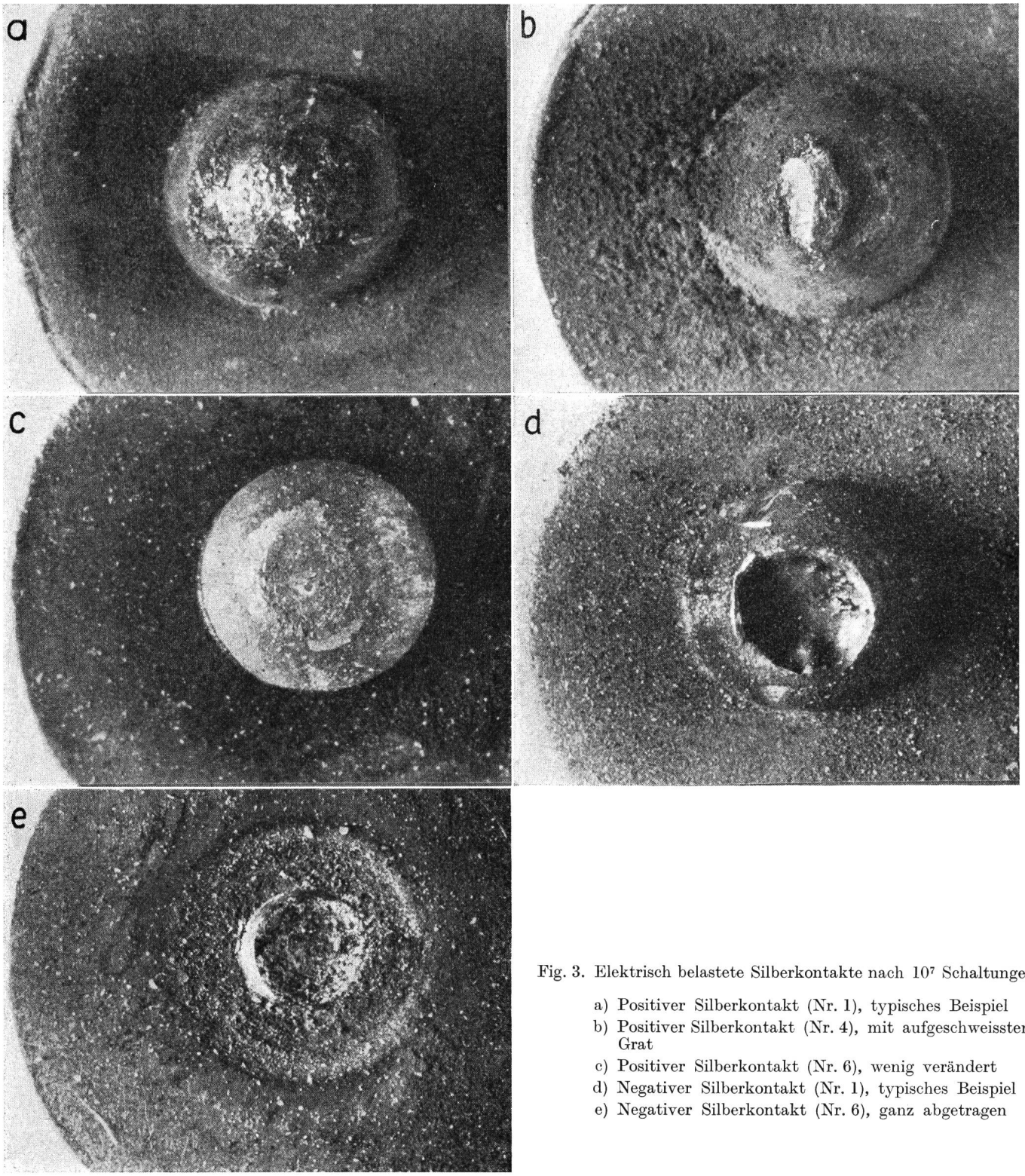



Fig. 3. Elektrisch belastete Silberkontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Silberkontakt (Nr. 1), typisches Beispiel
b) Positiver Silberkontakt (Nr. 4), mit aufgeschweisstem Grat
c) Positiver Silberkontakt (Nr. 6), wenig verändert
d) Negativer Silberkontakt (Nr. 1), typisches Beispiel
e) Negativer Silberkontakt (Nr. 6), ganz abgetragen

Kontakte stereomikroskopisch untersucht mit dem Zweck, qualitative Angaben über die Richtung der Feinwanderung, das Aussehen der Kontaktoberflächen und die zerstäubte Materialmenge zu erhalten. Die Ergebnisse sind in der *Tabelle V* zusammengestellt. Die ausgewählten photographischen Aufnahmen (Fig. 3 bis 8) vermitteln, im Gegensatz zur stereomikroskopischen Beobachtung, nur ein schwaches Bild vom Aussehen dieser oft bizarren Kontaktoberflächen.

Als Ursache des starken Ansteigens einzelner Kontaktwiderstände kann im allgemeinen der kräftige Abbrand, verbunden mit Oxydbildung auf der Kontaktoberfläche, verantwortlich gemacht werden, was hauptsächlich bei den Silber-, den Silber-Gold- und den Silber-Wolfram-Kontakten der Fall ist. Bei den

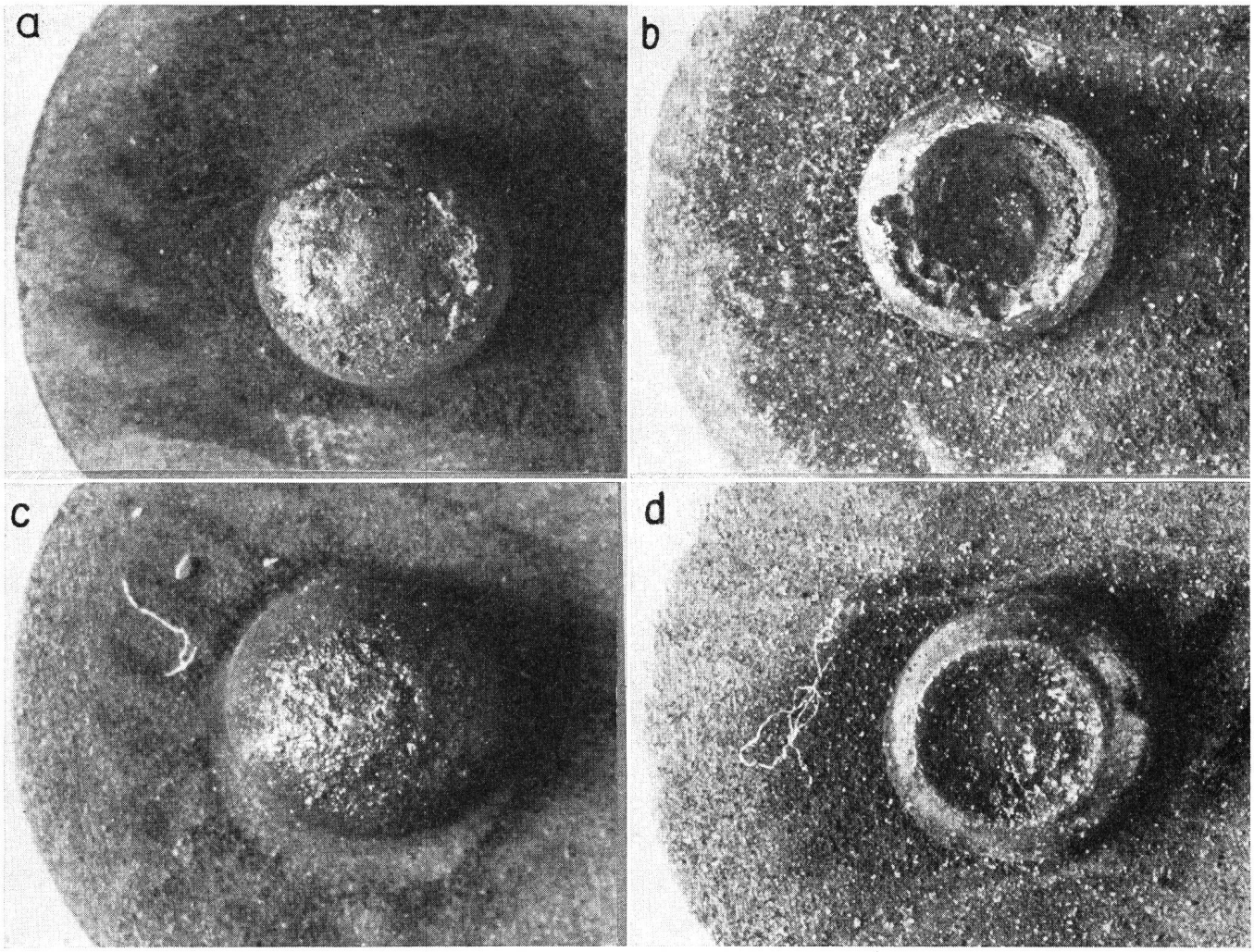



Fig. 4. Elektrisch belastete silberhaltige Kontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Silber-Gold-Kontakt (Nr. 8), typisches Beispiel
b) Negativer Silber-Gold-Kontakt (Nr. 8), typisches Beispiel
c) Positiver Silber-Wolfram-Kontakt (Nr. 9), typisches Beispiel
d) Negativer Silber-Wolfram-Kontakt (Nr. 9), typisches Beispiel

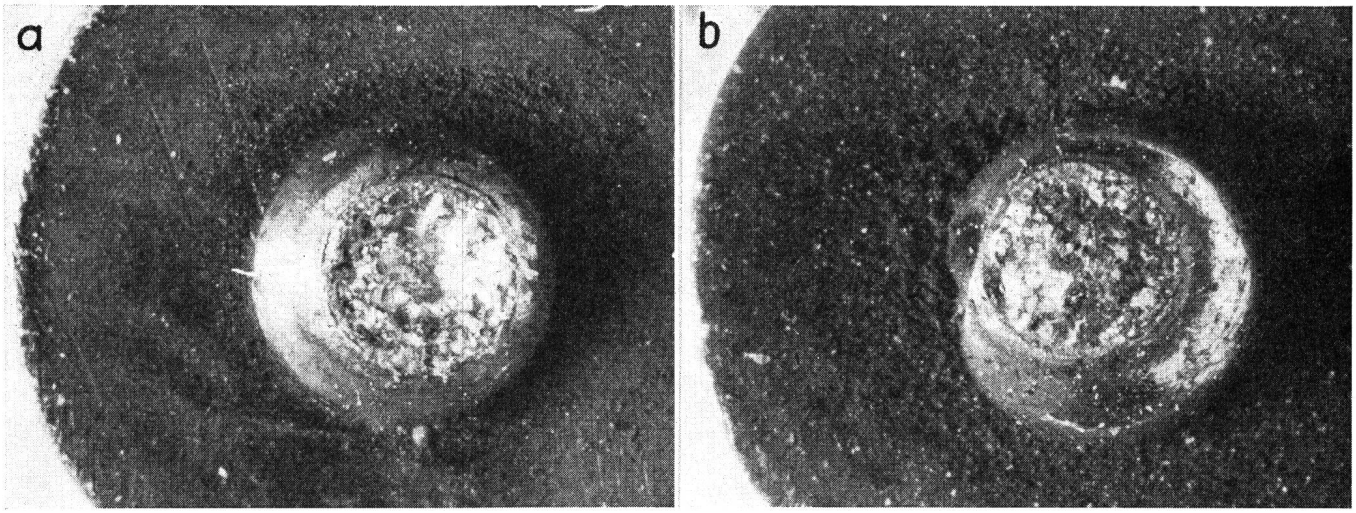



Fig. 5. Elektrisch belastete goldhaltige Kontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Gold-Nickel-Kontakt (Nr. 11), typisches Beispiel
b) Negativer Gold-Nickel-Kontakt (Nr. 11), typisches Beispiel

**Tabelle V. Zustand der elektrisch belasteten Kontakte nach $10^7$ Schaltungen**

| Kontakt-metall | Nr. | Richtung der Material-wanderung | Plus-Kontakt | | Minus-Kontakt | | Zerstäubtes, auf den Federn abgelagertes Material |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Form | Beschaffenheit | Form | Beschaffenheit | |
| Ag | 1 | — → + | Kuppe | ziemlich gleichmässig aufgeschweisstes Metall von blankem Aussehen | tiefer Krater | gleichmässig, mit körnigem, braunschwarzem Oxyd übersät; scharfer Kraterrand, metallglänzend | pulverförmiges, leicht körniges braunschwarzes Oxyd von gleicher Beschaffenheit wie in den Kratern |
| | 2 | — → + | Kuppe | wie bei Silberkontakt Nr. 1 | — | Kontakt vollständig abgetragen | |
| | 3 | — → + | Kuppe | Metall unregelmässig aufgeschweisst, in Form von einzelnen Köpfen | — | Kontakt vollständig abgetragen | |
| | 4 | — → + | Grat | erstreckt sich quer über den ganzen Kontakt, scharfkantig; Gratlinie blank | Krater | wie bei Silberkontakt Nr. 1 | |
| | 5 | — → + | Kuppe | wie bei Silberkontakt Nr. 1 | Krater | wie bei Silberkontakt Nr. 1 | |
| | 6 | — → + | wenig verändert | sowohl Stellen mit aufgeschweisstem blankem Metall als auch solche, wo Abtragung stattgefunden hat | — | bis auf kleinen Überrest ganz abgetragen. Im Gegensatz zu Nr. 1...5 ist im Kraterrest noch blankes, schwammartiges Metall vorhanden | |
| Ag/Au (90/10) | 7 | — → + | schwache Mulde | in der schwach muldenförmigen Abtragung sind einzelne örtliche Erhöhungen von aufgeschweisstem blankem Metall vorhanden | flacher Krater | Kraterwand gleichmässig; Kraterboden aus ca. 50 kleinen Einzelkratern bestehend. Kraterinneres mit körnigem braunschwarzem Oxyd übersät. Metallglänzende Stellen längs des Kraterrandes | braunschwarzes Oxydpulver von gleicher Beschaffenheit wie im Krater |
| | 8 | — → + | wenig verändert | im allgemeinen mehr Metall aufgetragen als abgetragen. Aufgetragenes Metall von blankem Aussehen | tiefer Krater | Kraterwand und Kraterboden gleichmässig, ohne Einzelkrater | |
| Ag/W (70/30) | 9 | — → + | Kuppe | gleichmässig, keine Spitzen, Grate oder dergleichen | Krater | gleichmässig, von körnigem braunschwarzem Oxyd bedeckt, nur wenige Stellen von blankem Aussehen | wenig, braunes locker abgelagertes Pulver |
| Au/Ni (95/5) | 10 und 11 | + → — | Krater | ungleichmässig, mit Rippen, Brücken und Löchern. Material im Krater auffallend glänzend, ebenso der Kraterrand | grosse Kuppe | im allgemeinen gleichmässig halbkugelig, nur einzelne erhöhte oder vertiefte Stellen. Aufgetragenes Metall durchwegs blank und kompakt, keine Oxydationserscheinungen | auf +-Feder sehr wenig Material abgelagert; auf —-Feder ziemlich viel graubraunes, lockeres Pulver |

**Tabelle V. Zustand der elektrisch belasteten Kontakte nach $10^7$ Schaltungen**

| Kontakt-metall | Nr. | Richtung der Material-wanderung | Plus-Kontakt | | Minus-Kontakt | | Zerstäubtes, auf den Federn abgelagertes Material |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Form | Beschaffenheit | Form | Beschaffenheit | |
| Pd | 12 | + → — | Krater | Kraterinneres im allgemeinen gleichmässig, nur vereinzelt gerippt oder löcherig, aus blankem, leicht körnigem Metall bestehend. Kraterboden von schwarzem Niederschlag bedeckt | schwache Kuppe | im allgemeinen gleichmässig halbkugelig, nur einzelne Höcker. Aufgeschweisstes Metall blank | viel, schwarzes Pulver |
| Pt | 13 | + → — | Krater | scharfkantiger Kraterrand, wie das Kraterinnere aus mattsilberigem Metall bestehend. Viele kleine, tief eindringende Löcher im Kraterboden | Kuppe | ziemlich höckerige Oberfläche, von aufgeschweisstem Metall herrührend. Oberfläche blank | + -Feder: wenig, in Form eines gelbgrünen Belages<br>— -Feder: wenig, in Form von schwarzen Körnern |
| | 14 | + → — | Krater | Kraterinneres von mehr oder weniger grossen Löchern durchsetzt. Kraterrand und Erhebungen im Krater von mattsilberigem Aussehen, Vertiefungen mit schwarzen Körnern übersät | Kuppe | Oberfläche höckerig, aufgeschweisstes Metall zum Teil in Form von ziemlich grossen Zähnen; Oberfläche blank | viel, schwarzes Pulver |
| Pt/Ir (90/10) | 15 | + → — | tiefer, enger Krater | entspricht als Gegenstück genau dem Zahn des Plus-Kontaktes. Kraterinneres von mattsilberigem Aussehen, nur vereinzelte Stellen körnig und schwarz | kräftiger Zahn | Höhe des aufgeschweissten Zahnes ca. 0,5 Millimeter, aus kompaktem glänzendem Metall bestehend. Übrige ursprüngliche Kontaktoberfläche unverändert | mässig, bräunlichschwarzes Pulver |
| Pt/Cu (95/5) | 16 | + → — | enger Krater | entspricht als Gegenstück genau der Nadel des Plus-Kontaktes. Nicht ausgeschlossen, dass sich die beiden Kontakte verkeilen könnten. Kraterinneres von mattsilberigem Aussehen | kurze stumpfe Nadel | Nadel aus körnigem schwarzem Metall bestehend, sich gegen die Basis verbreiternd. Ursprüngliche Kontaktoberfläche unverändert | + -Feder: sehr wenig<br>— -Feder: in einer schmalen Zone rund um den Kontakt ziemlich viel schwarzes Pulver |
| W | 17 | ↑ + → ↑ — | flach | fast ganz abgebaut. Einige flache Erhebungen, Oberfläche graublau und braunrot angelaufen | muldenförmige Vertiefung | sehr stark abgebaut; Oberfläche rauh, blau und braunrot angelaufen | viel, braunschwarzes Pulver |
| | 18 | ↑ + → ↑ — | Furchen und schwache Höhlungen | auffällig sind die parallelen Furchen auf der Seite und in Richtung der Feder. Schwache Höhlungen als Folge des Materialabbaues. Oberfläche graublau und braunrot angelaufen | Furchen, schwache Material-auftragung | parallele Furchen auf der Seite und in Richtung der Feder. Übriger Teil des Kontaktes von aufgetragenem schlackenartigem Material bedeckt | viel, braunschwarzes Pulver |

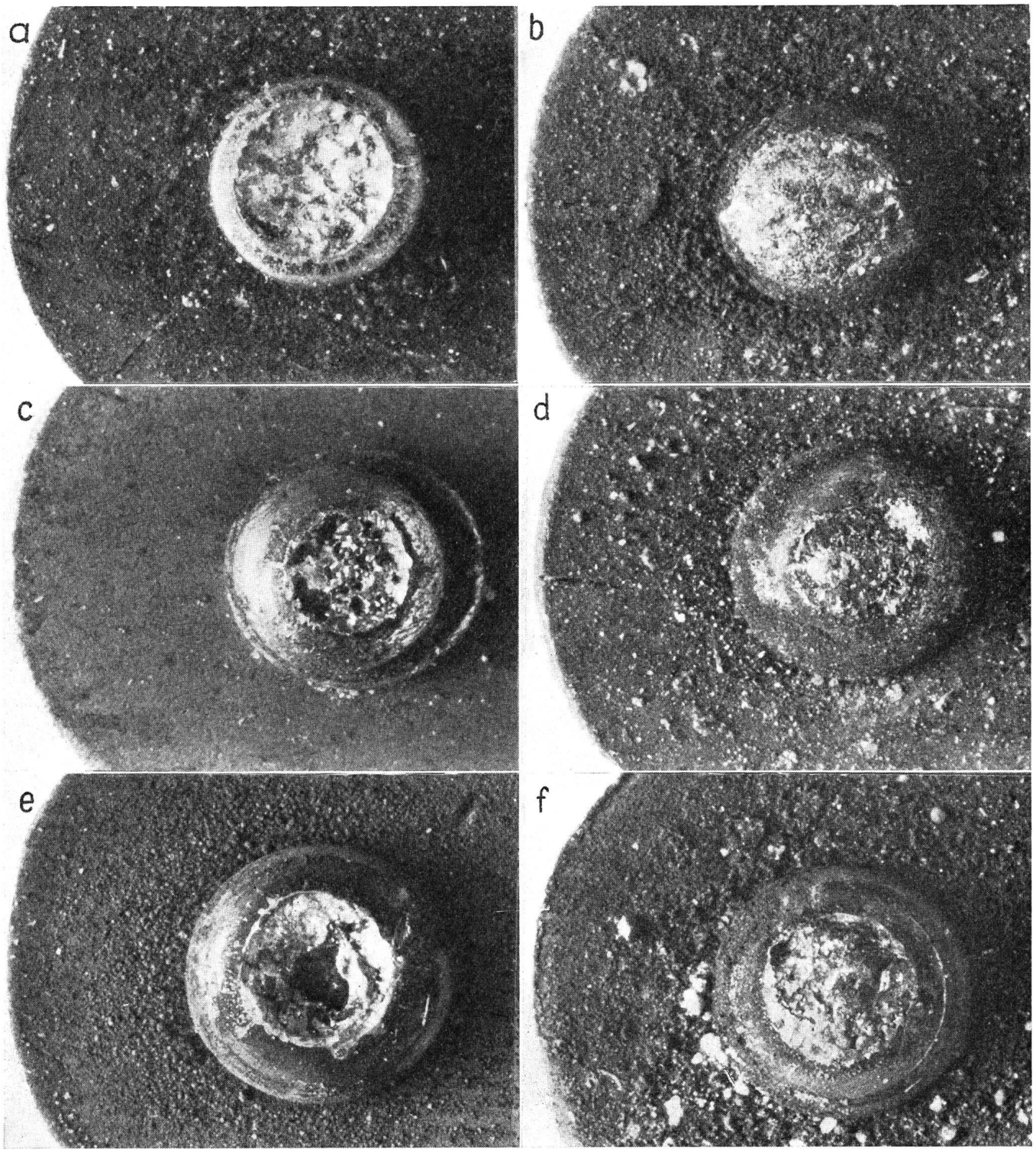



Fig. 6. Elektrisch belastete Palladium- und Platinkontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Palladiumkontakt (Nr. 12), typisches Beispiel
b) Negativer Palladiumkontakt (Nr. 12), typisches Beispiel
c) Positiver Platinkontakt (Nr. 13), typisches Beispiel
d) Negativer Platinkontakt (Nr. 13), typisches Beispiel
e) Positiver Platinkontakt (Nr. 14), mit grossem Krater als Gegenstück zum negativen Kontakt
f) Negativer Platinkontakt (Nr. 14), mit grossem Zahn (in der Mitte schwach sichtbar)

Wolframkontakten ist ebenfalls entweder der Abbrand (Kontakt Nr. 17, s. Fig. 8a und 8b) oder die entstandene Oxydschicht (Kontakt Nr. 18, s. Fig. 8c und 8d) verantwortlich. Bezeichnend ist, dass bei allen Kontakten, die, trotz grossem Abbrand, Kontaktwiderstände unterhalb einem Ohm besitzen, sowohl die Krater als auch die Kuppen aus blankem Metall bestehen, also frei von Oxydationsprodukten sind. Dies

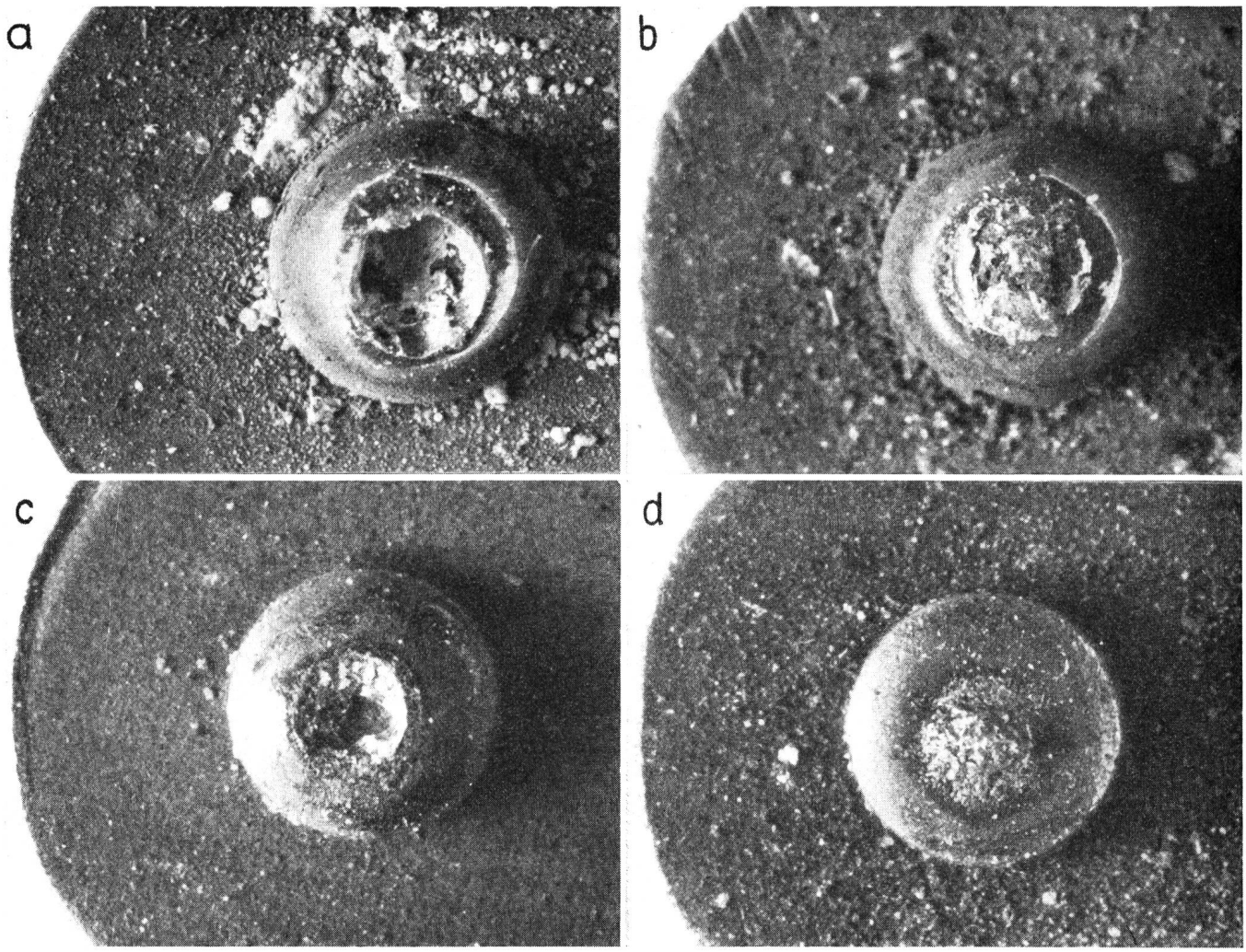



Fig. 7. Elektrisch belastete platinhaltige Kontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Platin-Iridium-Kontakt (Nr. 15), typisches Beispiel
b) Negativer Platin-Iridium-Kontakt (Nr. 15), typisches Beispiel
c) Positiver Platin-Kupfer-Kontakt (Nr. 16), typisches Beispiel
d) Negativer Platin-Kupfer-Kontakt (Nr. 16), typisches Beispiel

betrifft sowohl die Gold-Nickel-, die Palladium- und Platinkontakte als auch die Kontakte aus den entsprechenden Legierungen. Der schon anfänglich grosse Widerstand bei Wolfram ist durch dessen Härte bedingt.

Auf einige Besonderheiten sei hier noch aufmerksam gemacht.

Der *Silberkontakt Nr. 6* zeigt, verglichen mit den übrigen Silberkontakten, eine anormale Materialwanderung: Der Pluskontakt ist nur wenig verändert (s. Fig. 3c), der Minuskontakt dagegen ganz abgetragen (s. Fig. 3e). Zudem befindet sich im Kraterüberrest blankes, schwammartig durchlöchertes Metall. Das von andern Kontakten abweichende Aussehen dieses Silberkontaktes kann nur durch den festgestellten kleinen Gehalt an Nickel erklärt werden. Von diesen, aus einem Restbestand stammenden Kontakten sind leider keine weiteren Exemplare mehr vorhanden.

Bei den *Silber-Gold-Kontakten Nr. 7 und 8* sind sowohl der Minus- als auch der Pluskontakt abgebaut (s. Fig. 4a und 4b). Die Oberfläche des Pluskontaktes ist von ähnlicher Beschaffenheit wie der Pluskontakt von Nr. 6 (s. Fig. 3c): schwache Mulde mit einzelnen aufgeschweissten Stellen. Da also beide Kontakte abgebaut werden, muss neben der Wanderung — → + noch eine Abwanderung ↓ und ↑ auftreten, wobei nicht entschieden werden kann, ob die Vorgänge durch das Schema ↓ → ↑ oder durch — → ↑ zu veranschaulichen sind.

Kontakte aus *Platin und dessen Legierungen* neigen zur Bildung von Zähnen und Nadeln auf den Minuskontakten und den entsprechenden Vertiefungen auf den Pluskontakten (s. Fig. 6f und 6e), was die Gefahr des Hängenbleibens in sich birgt.

Beim *Wolframkontakt Nr. 18* sind, wie bereits in *Tabelle V* vermerkt, auffällige parallele Furchen in Richtung der Feder vorhanden (s. Fig. 8c und 8d). Als Ursache kann das Wandern der Stromübergangsstellen in der Federrichtung während des Abhebe-

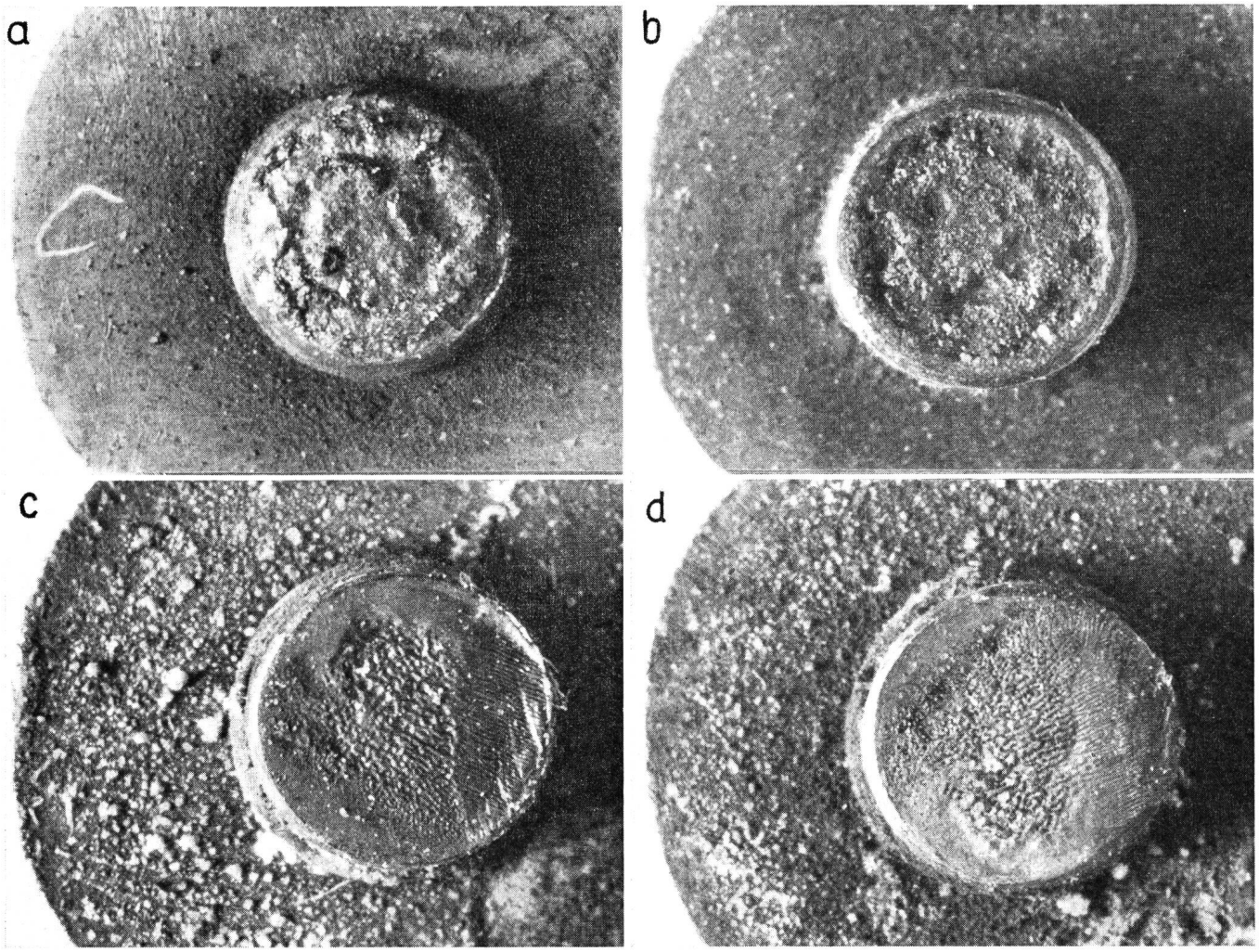



Fig. 8. Elektrisch belastete Wolframkontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Positiver Wolframkontakt (Nr. 17), normaler Abbrand
b) Negativer Wolframkontakt (Nr. 17), normaler Abbrand
c) Positiver Wolframkontakt (Nr. 18), Furchenbildung
d) Negativer Wolframkontakt (Nr. 18), Furchenbildung

vorganges in Frage kommen. Das Zustandekommen dieses Vorganges lässt sich vielleicht durch die Tatsache erklären, dass beim harten Wolfram nur verhältnismässig wenige Stromübergangsstellen vorhanden sind.

Abschliessend sei die bekannte Tatsache festgehalten, dass die Feinwanderung bei Silberkontakten und stark silberhaltigen Kontakten (hier gold- und wolframlegierte) in Richtung — → + verläuft, während die Richtung bei den Metallen der Platingruppe und bei Platinlegierungen (iridium- und kupferhaltige) umgekehrt + → — verläuft. Bei Wolfram ist die Materialwanderung gegenüber dem infolge Oxydation auftretenden Abbrand gering.

## 3. Untersuchungen an stromlos geschalteten Kontakten

### *3.1. Problemstellung und Versuchsbedingungen*

Aus Veröffentlichungen, die das Kontaktrauschen betreffen, geht hervor, dass an stromlos geschalteten und mechanisch nur schwach belasteten Kontakten Widerstände bis zu 100 k$\Omega$ auftreten können [35, 36]. Diese haben ihre Ursache in Fremdschichten. Zu denselben Ergebnissen ist man auch bei Untersuchungen über Thermospannungen an Kontakten, die mit Fremdschichten behaftet sind, gelangt [37]. In diesem Zusammenhang sind ferner Beobachtungen an stromlos geschalteten Eisenkontakten von Interesse. So sind zum Beispiel an derartigen Kontakten, die in der Sekunde 50mal betätigt wurden, nach längerem Betrieb Anlauffarben festgestellt worden. Sie sind auf örtlich sehr starke Wärmeentwicklung als Folge des fortgesetzten Hämmerns zurückzuführen [38].

Auf einem ganz anderen Gebiet, nämlich bei Untersuchungen über die Physik der Reibung, ist ebenfalls festgestellt worden, dass an reibenden Körpern örtliche «Temperaturblitze» bis zu 1000° C vorkommen, deren Dauer weniger als $10^{-4}$ s beträgt [39, 40]. Es ist deshalb durchaus möglich, dass ähnliche Erscheinungen auch an mitlaufenden Kontakten auftreten können.

Eine weitere hier bedeutungsvolle Tatsache besteht darin, dass jeder Kontakt mindestens von einer einmolekularen Fremdschicht bedeckt ist. Diese kann bei genügend grossem Kontaktdruck weggequetscht werden, so dass blanke Stellen entstehen [41], die sich unter Umständen nach dem Loslösen der Kontakte wieder neu bedecken. Es liegt nun im Bereich der Möglichkeit, dass sich diese Vorgänge des Wegquetschens und der Neubildung bei fortgesetzter Betätigung der Kontakte wiederholen, wobei sich die weggedrückten Schichten allmählich anhäufen. Gelangen diese als Folge von Verschiebungen zwischen die sich berührenden Kontaktstellen, so bewirkt ihr grosser Hautwiderstand ein Ansteigen des Widerstandes.

Schliesslich ist noch in Betracht zu ziehen, dass durch das fortwährende Hämmern etwa vorhandener Staub in das Kontaktmetall geknetet wird. Wie im Abschnitt 1.3. bereits erwähnt, müssten besonders die weichen Kontaktmetalle störanfällig sein.

Auf alle Fälle sind die hier möglichen Erscheinungen interessant genug, dass sich Versuche mit strom- und spannungslos geschalteten Kontakten rechtfertigen. Diesbezügliche systematische Untersuchungen sind bis heute kaum durchgeführt worden, da zum Beispiel die mechanischen Abnützungen an derartigen Kontakten gegenüber den viel grösseren elektrisch und thermisch bedingten Veränderungen, die an elektrisch beanspruchten Kontakten auftreten, ganz zurücktreten. Trotzdem ist zu erwarten, dass aus solchen Versuchen Schlüsse gezogen werden können über das Verhalten von elektrisch nur sehr schwach beanspruchten Kontakten. Messungen an Kontakten, die von *Holm* [42] unter Vermeidung von Stoss und Reibung aneinandergelegt wurden, geben keine Anhaltspunkte über das Verhalten von Relaiskontakten, die unter betriebsmässigen Bedingungen arbeiten.

Die Versuchsbedingungen für diese stromlos geschalteten Kontakte sind dieselben wie bei den elektrisch beanspruchten Kontakten (s. Abschnitt 2.2.), abgesehen von der nun fehlenden elektrischen Beanspruchung. Die erhaltenen Ergebnisse sind in ähnlicher Weise wie dort verarbeitet worden und liegen in Form von Widerstandskurven und mikroskopischen Untersuchungen vor.

### *3.2. Kontaktwiderstandsmessungen an stromlos geschalteten Kontakten*

Der Verlauf der gemessenen Kontaktwiderstände ist, in Abhängigkeit von der Anzahl Schaltbewegungen, in den Figuren 9a bis 9n dargestellt. Desgleichen enthält die *Tabelle VI* einige zahlenmässige Teilergebnisse und die statistischen Auswertungen. Schliesslich gibt die *Tabelle VII* eine zu *Tabelle IV* analoge Einteilung der Kontakte gemäss dem qualitativen Verlauf ihrer Kontaktwiderstände.

Der Vergleich zwischen den Widerstandskurven der elektrisch belasteten und der stromlos geschalteten Kontakte fördert einige interessante Einzelheiten zutage. Vor allem fällt auf, dass sich die gegenseitigen Stellungen der Silber- und Gold-Silber-Kontakte einerseits und der Kontakte der Platingruppe anderseits vertauscht haben (vgl. *Tabellen IV* und *VII*). Während elektrisch belastete Silber- und Gold-Silber-Kontakte nach etwa $10^6$ Schaltungen ausfallen, bleiben sie bei stromlosem Betrieb noch nach $10^7$ Schaltungen unter dem 100 m$\Omega$-Wert. Bei den Palladium-, Platin- und stark platinhaltigen Kontakten sind die Verhältnisse gerade umgekehrt: diese sich bei elektrischer Belastung sehr gut verhaltenden Kontakte fallen ohne diese Belastung im allgemeinen entweder nach $10^6$ Schaltungen aus oder zeigen dann zumindest einen starken Anstieg ihres Widerstandes. Dies deutet darauf hin, dass von diesen Kontakten bei kleinsten elektrischen Belastungen nicht unbedingt ein störungsfreies Arbeiten zu erwarten ist.

Auffällig ist auch das offenbar notwendige «Einlaufen» gewisser Kontakte. Es äussert sich darin, dass der Kontaktwiderstand mit zunehmender Anzahl Schaltungen abnimmt. Dies ist besonders bei den Gold-Nickel-Kontakten Nr. 10 und 11 der Fall, tritt interessanterweise aber auch beim Silberkontakt Nr. 6 auf, der durch einen kleinen Nickelgehalt ausgezeichnet ist und schon bei den mikroskopischen Untersuchungen des Abschnittes 2.4. durch anormale Materialwanderung auffiel.

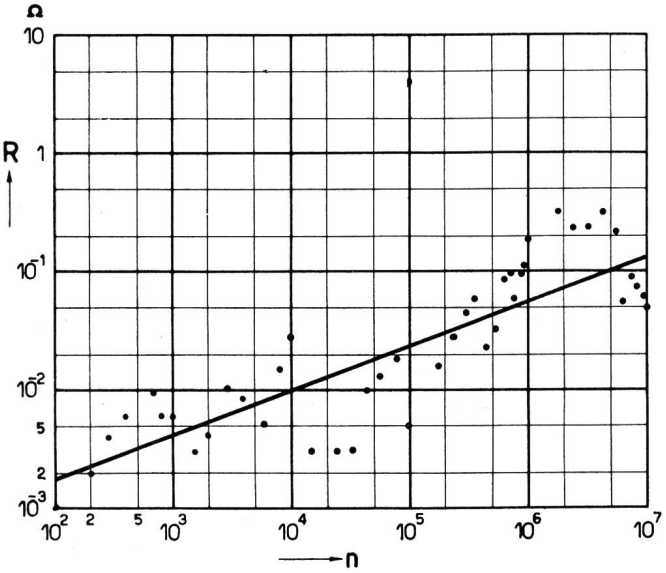
Am bedeutungsvollsten ist aber die Tatsache, dass der Kontaktwiderstand bei vielen elektrisch unbelasteten Kontakten über grosse Bereiche höher ist als bei belasteten. Dies trifft besonders bei den Gold-Nickel- (Nr. 10 und 11), Palladium- (Nr. 12) und Wolframkontakten (Nr. 18) zu, etwas weniger stark zum Teil auch bei den Platin- und den Platin-Iridium-Kontakten (Nr. 14 und 15). Dadurch wird die bereits früher (s. Abschnitt 1.3.) angetönte Vermutung, dass durch die Funken eine Reinigung bewirkt wird, bestätigt. Dabei ist nicht nur an die Zersetzung der

**Tabelle VII. Einteilung der stromlos geschalteten Kontakte nach dem Verlauf ihres Kontaktwiderstandes**

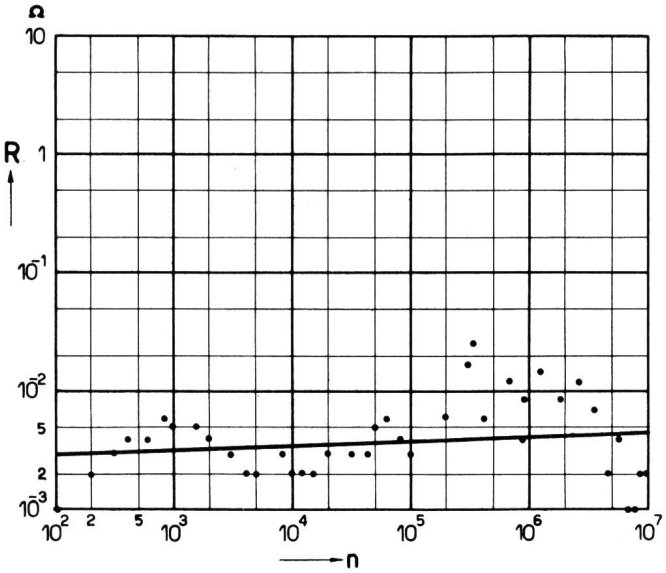
| Nr. | Kontaktmetalle | $n_\infty$ | Verlauf des Kontaktwiderstandes unterhalb $n_\infty$ |
|---|---|---|---|
| 10, 11 | Au/Ni | $>10^7$ | schwach fallend (Nr. 11 nach $n = 10^6$ mässig steigend) |
| 13 | Pt | $>10^7$ | leicht steigend |
| 1...4, 6; 7...9 | Ag Ag/Au,Ag/W | $>10^7$ | im allgemeinen leicht bis mässig steigend; Besonderheiten bei Ag-Kontakten Nr. 3 und 6 |
| 12, 14 15, 16 | Pd; Pt, Pt/Ir, Pt/Cu | $10^6...10^7$ | praktisch konstant (Nr. 14, Pt: leicht steigend) |
| 18 | W | $10^4...10^6$ | mässig steigend |

**Tabelle VI. Teilergebnisse von Kontaktwiderstandsmessungen an stromlos geschalteten Kontakten**

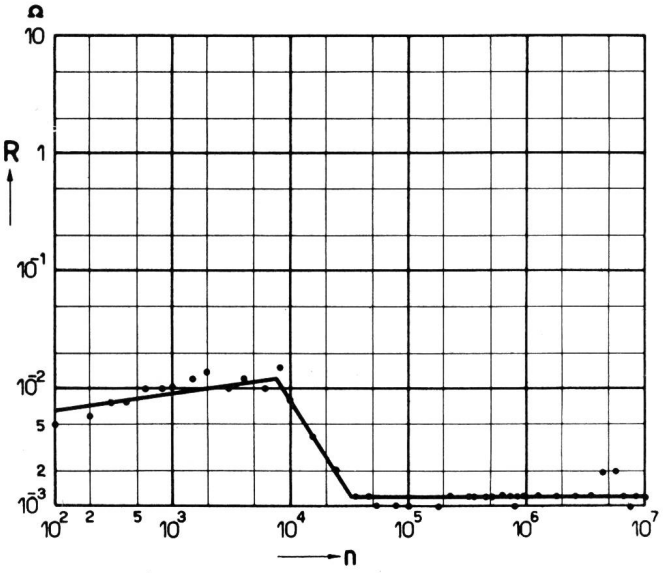
| Kontakt | | Kontaktwiderstände in m$\Omega$ nach n Schaltbewegungen | | | | | | | Statistische Auswertungen | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nr. | Metall | $n \approx 0$ | $n = 10^2$ | $n = 10^3$ | $n = 10^4$ | $n = 10^5$ | $n = 10^6$ | $n = 10^7$ | Untersuchter Bereich | B | r | Einfluss der Anzahl Schaltbewegungen auf den Kontaktwiderstand |
| 1 | Ag | 1 | 1 | 5 | 16 | 14 | 190 | 48 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,75 | 0,87 | gesichert |
| 2 | Ag | 1 | 1 | 2 | 3 | 19 | 48 | 150 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,89 | 0,94 | gesichert |
| 3 | Ag | 1 | 1 | 5 | 2 | 4 | 15 | 3 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,04 | 0,18 | nicht gesichert |
| 4 | Ag plattiert | 1 | 1 | 3 | 4 | 9 | 9 | 22 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,66 | 0,81 | gesichert |
| 6 | Ag (+Ni) | 4 | 5 | 11 | 9 | 0 | 1 | 1 | $n = 10^2 \ldots 10^4$ | 0,45 | 0,67 | bis $n = 10^4$: knapp gesichert; oberhalb $n = 3 \cdot 10^4$ kein Einfluss |
| 7 | Ag/Au | 3 | 3 | 5 | 34 | 12 | 8 | 55 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,43 | 0,66 | gesichert |
| 8 | Ag/Au | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 46 | 180 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,84 | 0,92 | gesichert |
| 9 | Ag/W | 2 | 3 | 5 | 4 | 8 | 19 | 20 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,56 | 0,75 | gesichert |
| 10 | Au/Ni | 5 | 3 | 7 | 3 | 3 | 3 | 2 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,28 | —0,53 | gesichert |
| 11 | Au/Ni | 5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 37 | 4 | $n = 10^2 \ldots 2 \cdot 10^5$ | 0,94 | —0,97 | gesichert |
| 12 | Pd | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | 320 | $57/\infty$ | $n = 10^2 \ldots 3 \cdot 10^5$ | $\approx 0$ | —0,02 | nicht gesichert |
| 13 | Pt | 7 | 4 | 7 | 12 | 18 | 21 | 12 | $n = 10^2 \ldots 10^7$ | 0,37 | 0,61 | gesichert |
| 14 | Pt | 6 | 6 | 10 | 13 | 12 | $\infty$ | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 3 \cdot 10^5$ | 0,40 | 0,63 | gesichert |
| 15 | Pt/Ir | 10 | 10 | 6 | 15 | 15 | 15/1700 | 15/2000 | $n = 10^2 \ldots 10^6$ | 0,03 | 0,16 | nicht gesichert |
| 16 | Pt/Cu | 36 | 25 | 30 | 27 | 38 | 28 | 29 | $n = 10^2 \ldots 7 \cdot 10^6$ | 0,01 | —0,10 | nicht gesichert |
| 18 | W | 620 | 240 | 530 | 690 | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$ | $n = 10^2 \ldots 10^6$ | 0,55 | 0,74 | gesichert |



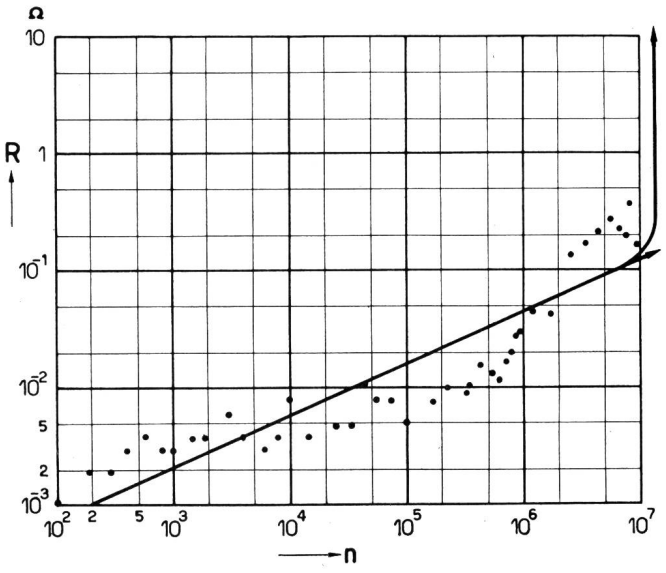

a) Silberkontakte Nr. 1



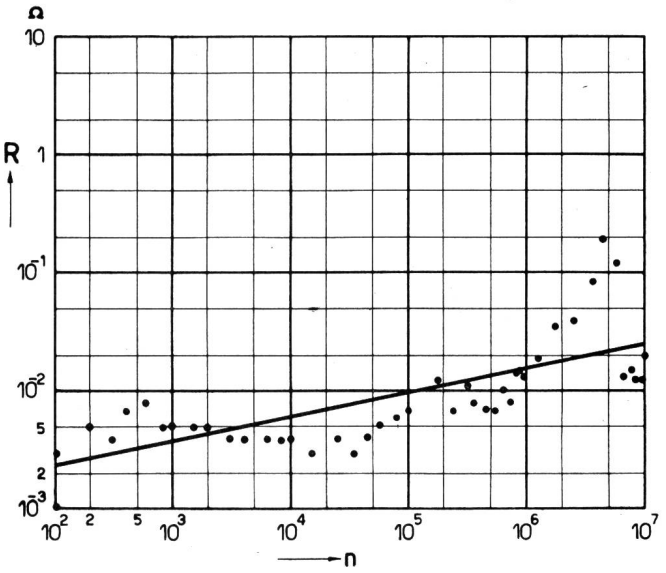

b) Silberkontakte Nr. 3



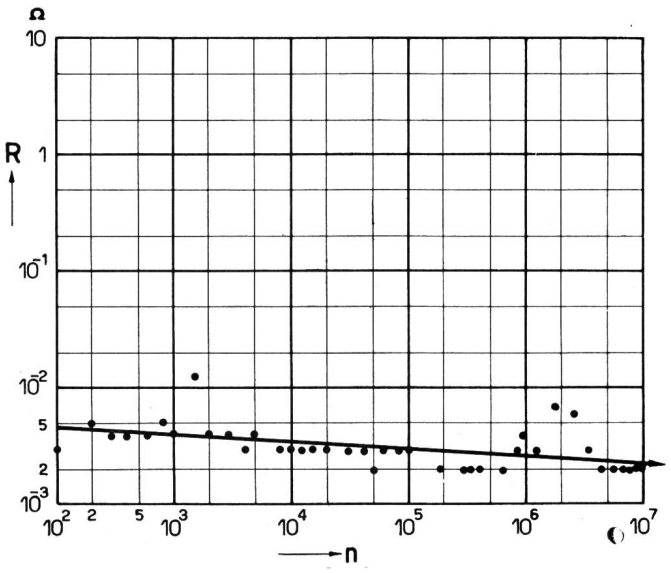

c) Silberkontakte Nr. 6




d) Silber-Gold-Kontakte Nr. 8

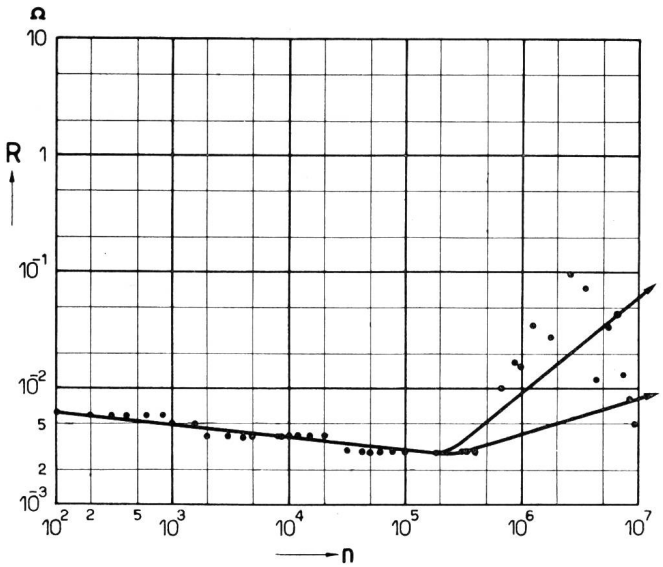



e) Silber-Wolfram-Kontakte Nr. 9

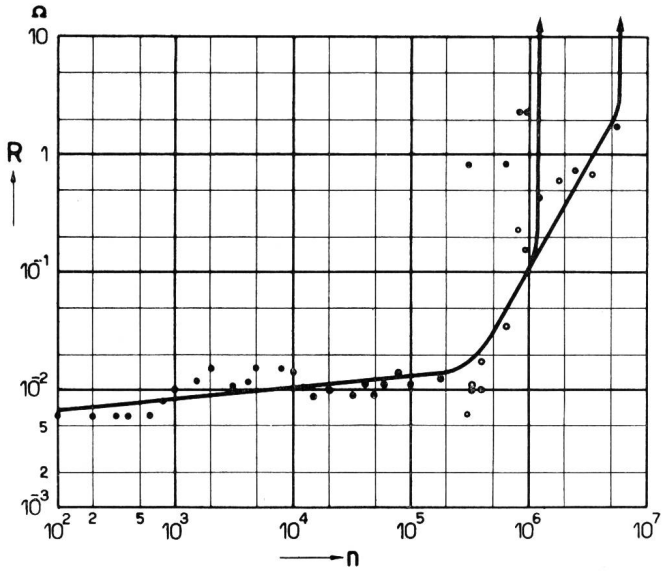



f) Gold-Nickel-Kontakte Nr. 10

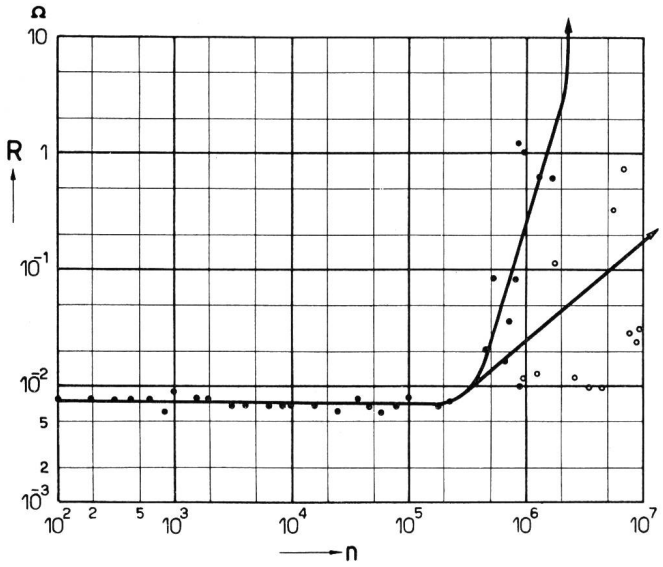
Fig. 9. Kontaktwiderstände von stromlos geschalteten Kontakten



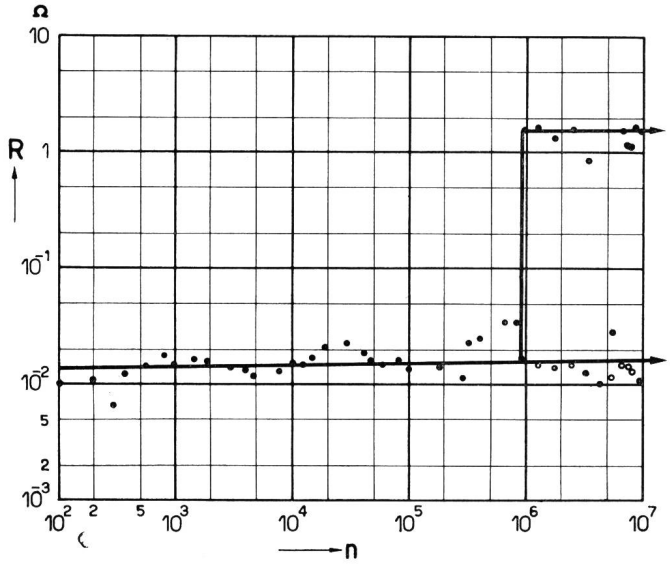

g) Gold-Nickel-Kontakte Nr. 11



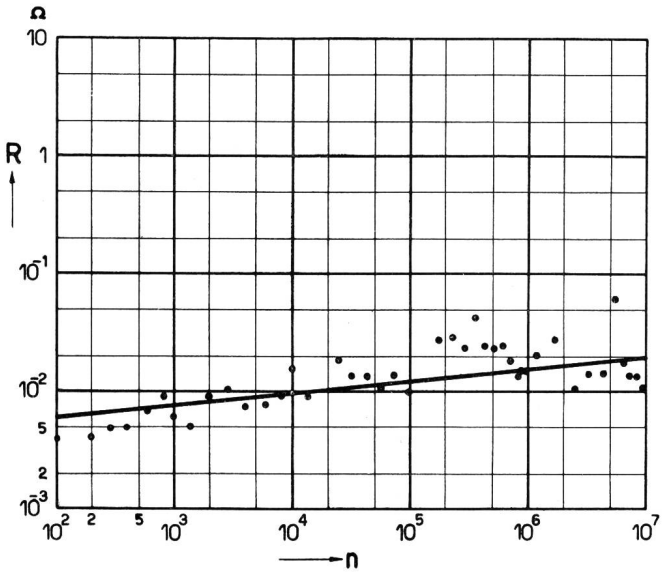

k) Platinkontakte Nr. 14



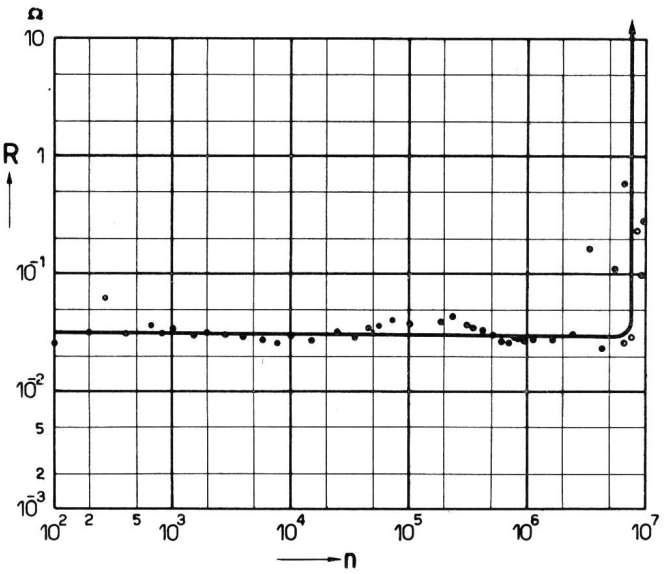

h) Palladiumkontakte Nr. 12



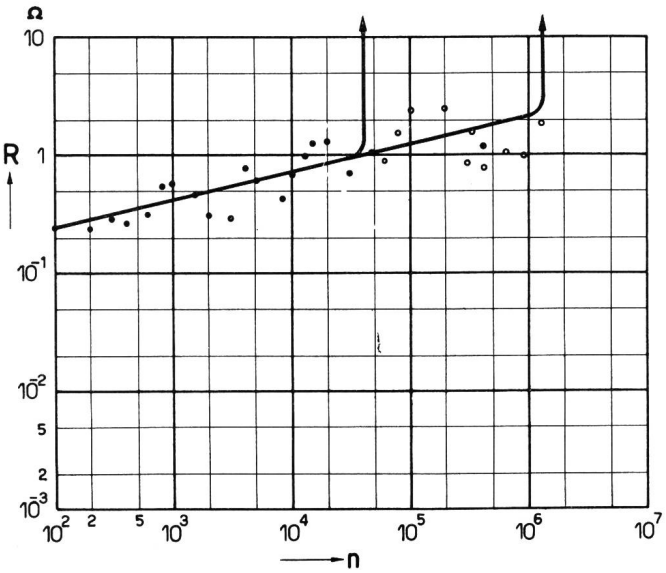

l) Platin-Iridium-Kontakte Nr. 15




i) Platinkontakte Nr. 13




m) Platin-Kupfer- («Cupleg-») Kontakte Nr. 16




n) Wolframkontakte Nr. 18

Oxyde zu denken (bei Platin bildet sich ja kein Oxyd), sondern auch an die Entfernung von Staub. Auf alle Fälle zeigen die Versuche, dass bei den erwähnten Metallen eine Oberflächenerneuerung günstig ist. Unter dieser Erneuerung ist an das Entstehen von immer neuen metallisch blanken Stellen an der Kontaktoberfläche zu denken, wobei diese Stellen vorerst selbstverständlich frei von Staub bleiben. Grundsätzlich ist eine derartig wirksame Oberflächenerneuerung bei stromlos geschalteten Kontakten nicht zu erwarten. Jedoch zeigen die im folgenden Abschnitt 3.3. mitgeteilten Ergebnisse, dass auch hier Oberflächenveränderungen und -erneuerungen eintreten können.

### *3.3. Mikroskopische Untersuchungen an stromlos geschalteten Kontakten*

Die gleichfalls nach $10^7$ Schaltbewegungen durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass im grossen und ganzen die Kontaktoberflächen durch die mechanischen Beanspruchungen nur schwach verändert werden. Immerhin sind bei genauer Betrachtung interessante Erscheinungen und Unterschiede zwischen den verschiedenen Kontakten feststellbar. In der *Tabelle VIII* ist für jeden Kontakt der Befund der mikroskopischen Untersuchung festgehalten. Die Figuren 10a bis 10i zeigen einige charakteristische photographische Aufnahmen von Kontaktoberflächen.

Als bedeutungsvollste Tatsache ist festzustellen, dass auch bei diesen Versuchen Materialverschiebungen und, was besonders interessant ist, Materialwanderungen eingetreten sind. Unter Verschiebung ist sowohl die infolge der Hammerwirkung entstehende Abplattung der ursprünglich konvexen Oberfläche als auch das Wegquetschen von Metall von der Berührungsfläche an den Kontaktrand hinaus zu verstehen (Beispiele für das Wegquetschen: Silberkontakt Nr. 4, Fig. 10a, Platinkontakte Nr. 13 und 14, Fig. 10g). Deutliche, von einem Kontakt zum andern stattfindende Materialwanderung ist besonders bei den zwei Silberkontakten Nr. 3 (s. Fig. 10b) und 6 feststellbar; dabei sei daran erinnert, dass der nickelhaltige Silberkontakt Nr. 6 bereits früher durch seine Sonderstellung aufgefallen ist. Ansätze zur Materialwanderung finden sich auch beim Gold-Nickel-Kontakt Nr. 10 (s. Fig. 10e). Schliesslich sei auf die bei den bereits erwähnten Platinkontakten Nr. 13 und 14 vorhandene Furchenbildung hingewiesen (s. Fig. 10g). Die Richtung der Materialwanderung geht ohne Ausnahme (bei allen sechs Kontakten, die diese Erscheinung aufweisen) vom beweglichen zum festen Kontakt.

Wichtig ist nun, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Verlauf des Kontaktwiderstandes und der infolge der Materialwanderung bewirkten Oberflächenerneuerung besteht. So zeigen Kontakte mit eingetretener Materialwanderung (Nr. 3, 6, 10) oder mit metallisch blanken Berührungsstellen (Nr. 11) mit zunehmender Schaltzahl keine Zunahme des Kontaktwiderstandes. Bei den Gold-Nickel-Kontakten (Nr. 10 und 11) sinkt sogar der anfängliche, etwa 5 m$\Omega$ betragende Widerstandswert auf den Wert von 1...2 m$\Omega$; es ist dies der konstante Wert, den die Kontakte bei elektrischer Belastung während mehr als $10^7$ Schaltungen annahmen.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen sind wahrscheinlich die schon erwähnten, von *Bowden* [39] gefundenen Ergebnisse über die Reibung von festen Körpern am geeignetsten. Wenn auch die in den «Temperaturblitzen» auftretenden Temperaturen die Schmelzpunkte der Kontaktmetalle nicht erreichen, so liegen sie doch über den Entfestigungstemperaturen, womit die Möglichkeit zur Materialwanderung gegeben ist. Dasselbe gilt natürlich auch für die Materialverschiebung. Gerade bei Platin, dessen Entfestigungstemperatur $t_e$ ziemlich tief ist (s. *Tabelle I*), wird somit verständlich, dass Material von der Kontaktmitte aus gegen den Rand gequetscht wird (Fig. 10g) und dass sogar, ähnlich wie bei den elektrisch belasteten Wolframkontakten, Furchen entstehen.

Als Möglichkeit für eine andere Erklärung ist nicht von der Hand zu weisen, dass interne, zwischen den geschlossenen Kontakten fliessende Thermoströme eine gewisse Rolle spielen. Es ist ja anzunehmen, dass beim Zusammenprallen der Kontakte nicht sämtliche Berührungsstellen die gleiche Temperatur annehmen. Auch scheinen unedle Legierungszusätze (Gold-Nickel-Kontakte Nr. 10 und 11) und spurenhafte Verunreinigungen (nickelhaltiger Silberkontakt Nr. 6) diese Effekte zu unterstützen.

Im Abschnitt 3.2. ist festgestellt worden, dass die geprüften Kontakte der Platingruppe sich ohne Strombelastung eigentlich erstaunlich ungünstig verhalten und im allgemeinen schon nach $10^6$ Schaltbewegungen ausfallen. Dieser Befund wird durch die rein mikroskopische Untersuchung der Kontaktoberflächen gestützt. Es ist nämlich auffällig, dass bei

**Tabelle VIII. Zustand der stromlos geschalteten Kontakte nach $10^7$ Schaltbewegungen**

| Kontakt-metall | Nr. | Material-wanderung | Beweglicher (oberer) Kontakt | Fester (unterer) Kontakt |
|---|---|---|---|---|
| Ag | 1 | nein | schwache Abplattung von ca. 0,1 mm Durchmesser; bräunliche Flecken auf der Kontaktoberfläche | bräunliche Flecken auf der Kontaktoberfläche |
| | 2 | nein | schwache Abplattung | Kontaktoberfläche etwas rauh |
| | 3 | ja | schwache Abplattung und kleine, deutlich sichtbare Vertiefung als Folge von Materialabtransport | etwas blankes Metall aufgeschweisst |
| | 4 | nein | schwache Abplattung; das weggequetschte Metall ist rund um die abgeplattete Stelle in Form eines kleinen Grates angehäuft | zum Teil viele dunkle Flecken |
| | 6 | ja | kleine blanke Vertiefung als Folge von Materialabtransport | kleine kreisförmige Fläche, in deren Mitte ein wenig blankes Metall aufgeschweisst ist |
| Ag/Au (90/10) | 7 | nein | unverändert | unverändert |
| | 8 | nein | unverändert | an der Berührungsstelle der Kontakte schwacher dunkler Fleck |
| Ag/W (70/30) | 9 | nein | Kontaktoberfläche zum Teil schwach dunkel verfärbt | unverändert |
| Au/Ni (95/5) | 10 | ja | kleine runde Vertiefung mit mehreren blanken Stellen | etwas gelbliches Metall aufgetragen |
| | 11 | nein | schwache Abplattung von gelblichem Aussehen | schwache Abplattung von gelblichem Aussehen |
| Pd | 12 | nein | schwache Abplattung, dunkel verfärbt | schwache Abplattung, dunkel verfärbt |
| Pt | 13 | Oberfläche verändert | entweder ist der bewegliche oder der feste Kontakt deutlich abgeplattet und das weggequetschte Metall an den Rand der Abplattung gedrückt. Die dadurch entstandene muldenförmige Vertiefung ist von mehreren unter sich parallelen Furchen durchzogen | |
| | 14 | Oberfläche verändert | deutliche Abplattung, beginnende Furchenbildung, Kontakt dunkel verfärbt | schwache Abplattung, dunkel verfärbt |
| Pt/Ir (90/10) | 15 | nein | schwache Abplattung, dunkel verfärbt | schwache Abplattung, dunkel verfärbt |
| Pt/Cu (95/5) | 16 | nein | schwache Abplattung, dunkel verfärbt | schwache Abplattung, dunkel verfärbt |
| W | 18 | nein | unverändert | unverändert |

all diesen Kontakten stark dunkle, fleckenhafte Verfärbungen an den Berührungsstellen vorhanden sind.

Bei den Palladiumkontakten fällt, da dieses Metall schon bei 350° C oxydiert, die Entstehung von Oxyd in Betracht; für Platinkontakte fehlt eine entsprechende Erklärung.

An Silberkontakten konnten keine derartigen Verfärbungen von Bedeutung gefunden werden.

## 4. Untersuchungen an Kontakten, die dem Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden

### *4.1. Problemstellung und Versuchsbedingungen*

Die hier durchgeführten Versuche stellen in gewissem Sinne das Gegenstück zu den im Teil 3 beschriebenen dar. Während dort die Kontakte, wenigstens äusserlich, nur einer mechanischen Beanspruchung unterworfen wurden, werden sie hier rein elektrisch beansprucht.

Bereits in einem früheren Bericht der Forschungs- und Versuchsanstalt [43] wurde darauf hingewiesen, dass sich Silber-Palladium-Kontakte, je nach dem Palladiumgehalt, verschieden verhalten, wenn sie hochfrequenten Hochspannungsfunken ausgesetzt werden. Die Oberfläche von Kontakten der Zusammensetzung Ag/Pd 90/10 werden vom Funken flusslaufartig aufgerissen, während solche der Zusammensetzung Ag/Pd 80/20 eine gleichmässige narbige Oberfläche erhalten, die aus zusammenhängenden «Zellen»

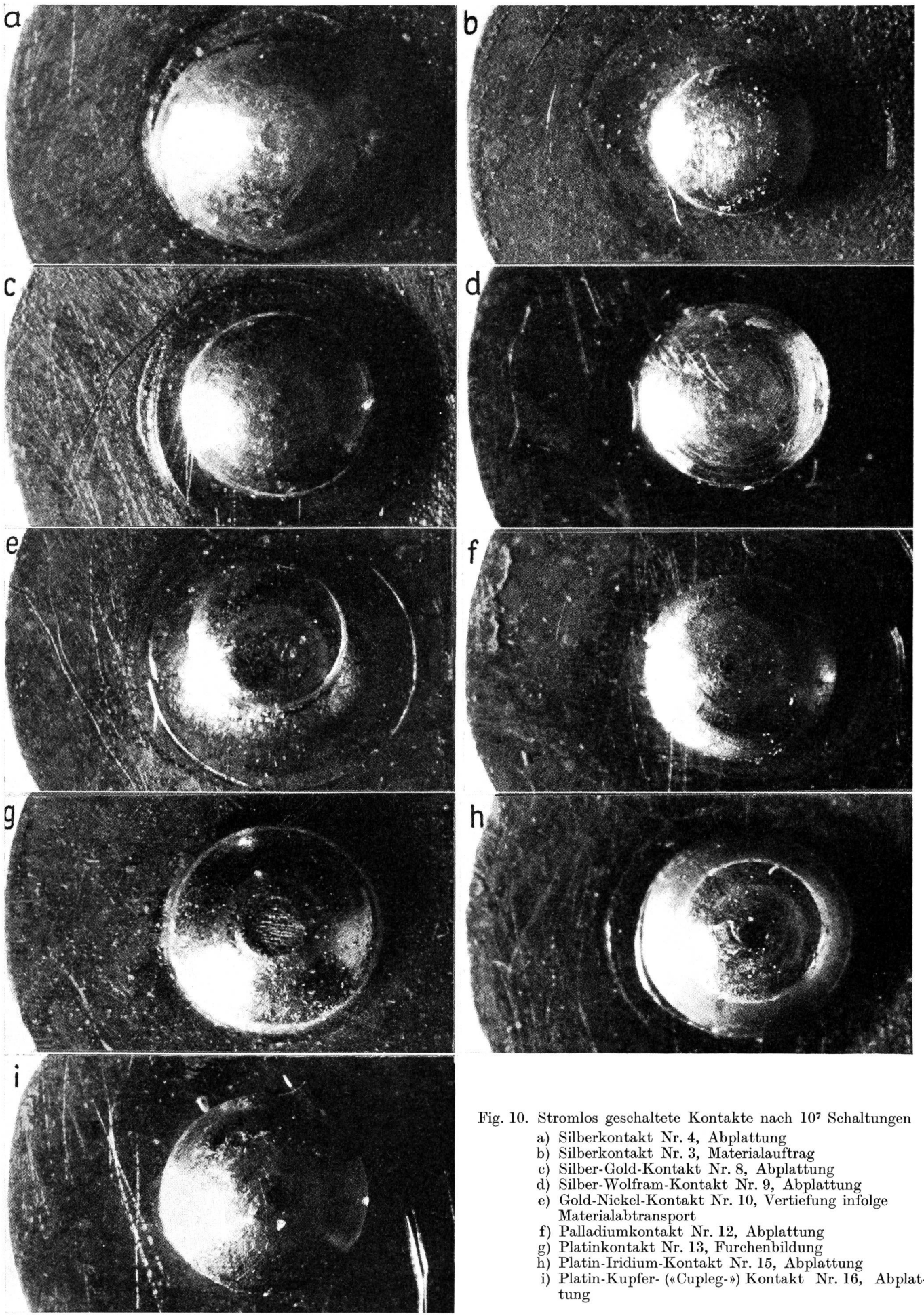



Fig. 10. Stromlos geschaltete Kontakte nach $10^7$ Schaltungen

a) Silberkontakt Nr. 4, Abplattung
b) Silberkontakt Nr. 3, Materialauftrag
c) Silber-Gold-Kontakt Nr. 8, Abplattung
d) Silber-Wolfram-Kontakt Nr. 9, Abplattung
e) Gold-Nickel-Kontakt Nr. 10, Vertiefung infolge Materialabtransport
f) Palladiumkontakt Nr. 12, Abplattung
g) Platinkontakt Nr. 13, Furchenbildung
h) Platin-Iridium-Kontakt Nr. 15, Abplattung
i) Platin-Kupfer- («Cupleg-») Kontakt Nr. 16, Abplattung

Fig. 11. Oberflächenstrukturen (schematisch) von Silber-Palladium-Kontakten, die dem Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden
a) Ag/Pd 90/10
b) Ag/Pd 80/20

besteht (Fig. 11; vgl. auch Fig. 12f und 12g). Die «Flusslaufform» ist aber nur die Vorstufe der «Zellenform»; nach genügend langem Abfunken erhalten alle diese Silber-Palladium-Kontakte eine gleichmässig narbige Oberfläche.

Es liegt nun nahe, aus den Veränderungen der Kontaktoberfläche Rückschlüsse auf das Verhalten der Kontakte im praktischen Betrieb zu ziehen. Werden sie vom Hochspannungsfunken wenig angegriffen, so wird auch ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber Abbrand und Oxydation gross sein. *Keil* und *Meyer*

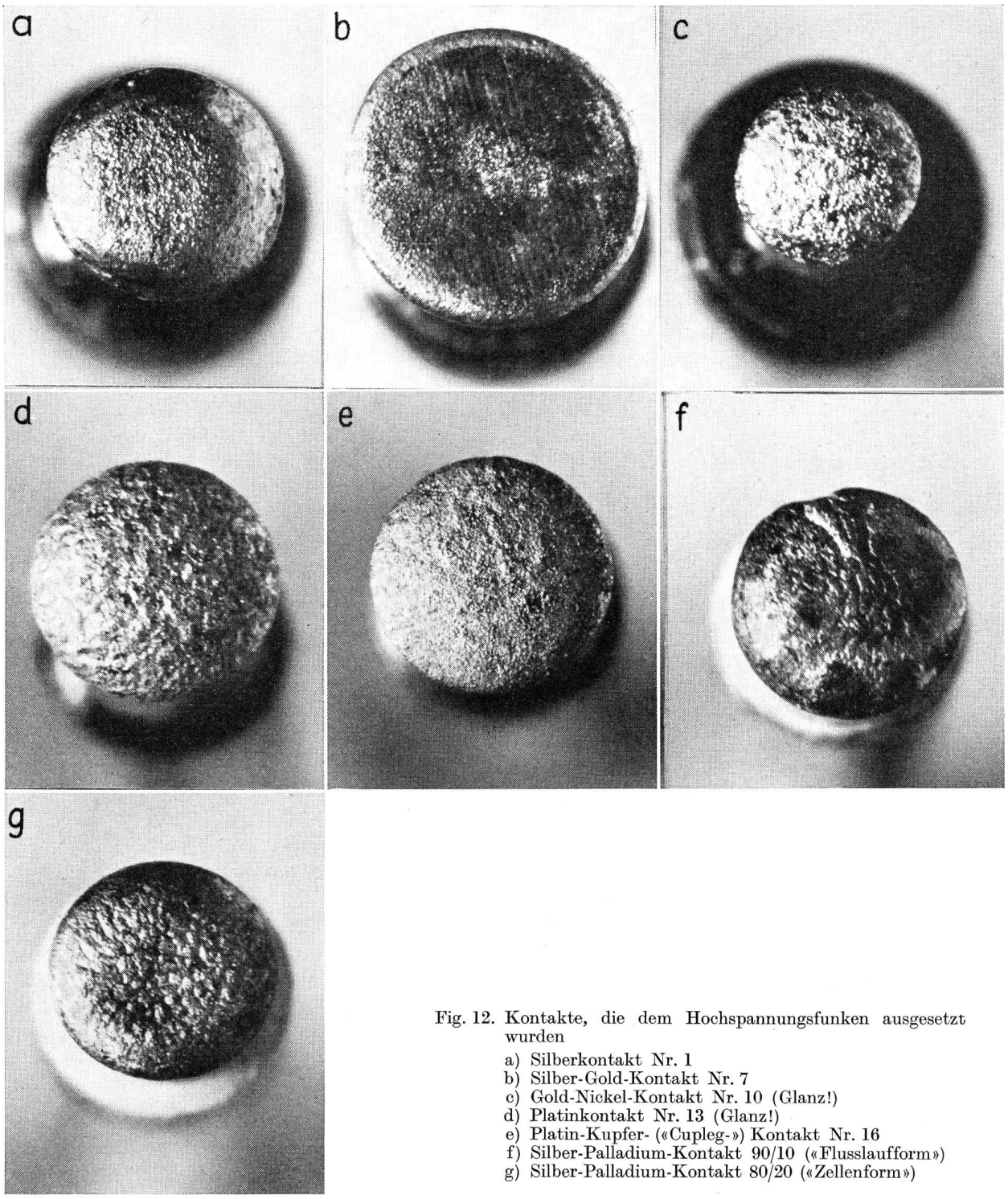



Fig. 12. Kontakte, die dem Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden
a) Silberkontakt Nr. 1
b) Silber-Gold-Kontakt Nr. 7
c) Gold-Nickel-Kontakt Nr. 10 (Glanz!)
d) Platinkontakt Nr. 13 (Glanz!)
e) Platin-Kupfer- («Cupleg-») Kontakt Nr. 16
f) Silber-Palladium-Kontakt 90/10 («Flusslaufform»)
g) Silber-Palladium-Kontakt 80/20 («Zellenform»)

[44] haben ebenfalls diesbezügliche Beobachtungen angestellt und dabei gefunden, dass damit die Neigung zum Entstehen von Oxydationsflüssen und -schichten geprüft werden kann. So entstehen bei gewissen Sintermetallen durch schlecht benetzende Oxydschmelzen tropfenförmige Zusammenballungen von Oxydationsprodukten, was auf ungünstiges Verhalten der Kontakte hinweist. Diese Oxydtropfen sind von ähnlicher Art, wie sie auf Kontakten, die in Betrieb gestanden haben, auftreten.

Es war deshalb gegeben, im Zusammenhang mit den durchgeführten spektrographischen Untersuchungen auch das Verhalten der Kontakte unter dem Einfluss des Hochspannungsfunkens zu beobachten. Für diese Untersuchungen wurde der sogenannte *Feussner*sche Funkenerzeuger verwendet. Die vorgenommenen Einstellungen waren:

| | |
|---|---|
| Primärspannung | 165 V |
| Primärstrom | 0,8 A |
| Sekundärspannung | ≈ 12 kV |
| Parallelkapazität | 5000 pF |
| Selbstinduktion | ≈ 0 $\mu$H |
| Elektroden | je 2 gleiche Relaiskontakte |
| Elektrodenabstand | 2,5 mm |
| Dauer der Funkeneinwirkung | 3 Minuten |

### *4.2. Mikroskopische Untersuchungen an abgefunkten Kontakten*

In der *Tabelle IX* sind die Zustände der Kontaktoberflächen, die dem Hochspannungsfunken ausgesetzt wurden, beschrieben. Die Figuren 12a bis 12g zeigen einige charakteristische Photographien dieser Oberflächen.

Die Durchsicht der vielgestaltigen, sich sowohl in der Struktur als auch in den Farben unterscheidenden Kontaktoberflächen ergibt gewisse Zusammenhänge mit dem Verhalten der elektrisch belasteten Kontakte. Vergleicht man etwa die in der *Tabelle IV* vorgenommene Einteilung mit den Angaben der *Tabelle IX*, so findet man folgende Übereinstimmungen:

Die sich bezüglich des Kontaktwiderstandes ausserordentlich gut verhaltenden Gold-Nickel-Kontakte (Nr. 10 und 11) sind mit einem gleichmässigen, zu-

**Tabelle IX. Zustand der dem Hochspannungsfunken ausgesetzten Kontakte**

| Kontaktmetall | Nr. | Zustand der Kontaktoberfläche |
|---|---|---|
| Ag | 1 | gleichmässig narbige Oberfläche, aus einzelnen Schmelzstellen bestehend, blau und gelb verfärbt; keine blanken Stellen |
| | 2 | unregelmässige, grobporige, narbige Oberfläche, starke blaue und gelbe Verfärbungen; keine blanken Stellen |
| | 3 | feine narbige Oberfläche, blau und gelb verfärbt; keine blanken Stellen |
| | 4 | gleichmässig narbige Oberfläche, blau und gelb verfärbt; keine blanken Stellen |
| | 6 | gleichmässig narbige Oberfläche, blau und gelb verfärbt; keine blanken Stellen |
| Ag/Au (90/10) | 7 | Oberfläche feinporig, aus vielen zufällig verteilten, farbig glänzenden Bezirken zusammengesetzt; Farben: hellgelb, goldgelb, hellblau, dunkelblau, violett |
| | 8 | 2 Zonen: kreisförmiger innerer Teil (ca. ½ Kontaktdurchmesser) narbig und buntfarbig wie bei Kontakt Nr. 7; umgebender ringförmiger Teil aus blankem, glattem, metallisch glänzendem Metall bestehend |
| Ag/W (70/30) | 9 | ziemlich rauhe, narbige Oberfläche, höchste Stelle metallglänzend, übriger Teil buntfarbig: gelb, rot, braun, blau |
| Au/Ni (95/5) | 10, 11 | rauhe Oberfläche, aus zusammenhängendem, mattsilberigem Metallüberzug bestehend; keine Anlauffarben und Oxydationsprodukte |
| Pd | 12 | feine, nur ganz schwach rauhe Oberfläche, aus mattsilberigem Metall bestehend; keine Anlauffarben und Oxydationsprodukte |
| Pt | 13, 14 | rauhe Oberfläche, aus mattsilberigem Metall bestehend; keine Anlauffarben und Oxydationsprodukte |
| Pt/Ir (90/10) | 15 | wie Platinkontakte Nr. 13 und 14 |
| Pt/Cu (95/5) | 16 | wie Platinkontakte Nr. 13 und 14, aber Oberfläche weniger rauh |
| W | 17, 18 | die Randpartien des (Flach-) Kontaktes sind mattweiss (Oxyd) und sehr feinporig; aus der Abrundung des Kontaktrandes ist ersichtlich, dass Abbrand stattfindet |

sammenhängenden, mattsilbrigen Schmelzfluss überzogen (Figur 12c), ebenso die Kontakte der Platingruppe (Fig. 12d und 12e). Kontakte aus diesen Metallen zeigen offenbar keine Neigung, dicke Oxydationsschichten oder gar Zusammenballungen zu bilden. Es sind dies diejenigen Kontakte, deren Oberfläche nach dem elektrischen Schaltversuch ($10^7$ Schaltungen) zumindest stellenweise noch blank sind (siehe *Tabelle V*).

Im Gegensatz dazu besitzen die Silber- und Silber-Gold-Kontakte, die gemäss *Tabelle IV* als mittelgute Kontakte zu bewerten sind, nach dem Abfunken keine metallisch blanken Stellen mehr; ihre Oberflächen sind im allgemeinen von buntem Aussehen. Bei den Silberkontakten zeigt sich zudem, dass diejenigen mit gleichmässigen, feinporigen Oberflächen (Nr. 1 und 3) im Betrieb kleinere Kontaktwiderstände besitzen als solche mit unregelmässigen, stark narbigen Oberflächen (z. B. Nr. 2).

In diesem Zusammenhang sind übrigens auch die beiden Silber-Gold-Kontakte interessant: Kontakt Nr. 7, der bezüglich des Widerstandsverlaufes der schlechtere ist, besitzt nach dem Abfunken eine bunte Oberfläche ohne metallisch blanke Stellen; dagegen ist beim besseren Kontakt (Nr. 8) ein Ring von blankem, gleichmässig glattem Metall vorhanden. Zwischen diesen beiden Kontakten kann als Unterschied nur eine spurenmässige Verunreinigung durch Fremdmetall vermutet werden.

Schliesslich sind auch zwischen den Silber-Wolfram- und den Wolframkontakten deutliche Unterschiede in der Oberflächenstruktur vorhanden, was sich im unterschiedlichen Verhalten des Kontaktwiderstandes äussert.

Zusammenfassend darf somit festgestellt werden, dass diese wenigen, unter Benützung des Hochspannungsfunkens durchgeführten Versuche ziemlich eindeutige Zusammenhänge zwischen der Oberflächenbeschaffenheit nach dem Abfunken und dem Verlauf des Kontaktwiderstandes bei elektrisch beanspruchten Kontakten aufdeckten. Entscheidend ist dabei, ob wenigstens stellenweise blankes Metall übrigbleibt oder ob die ganze Oberfläche anläuft und sich mit grobnarbigen Oxydationsflüssen bedeckt. Im letzteren Fall ist unter betriebsmässigen Bedingungen mit verhältnismässig raschem Anstieg der Kontaktwiderstände zu rechnen.

**Bibliographie**


[1] *W. Burstyn.* Elektrische Kontakte und Schaltvorgänge. Berlin, 1950.
[2] *R. Holm.* Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin, 1941.
[3] *H. E. Linckh.* ETZ **72** (1951), 79.
[4] *E. M. Wise.* Electrical Contacts. The International Nickel Company, Inc. New York, 1945.
[5] *E. M. Wise,* loc. cit., S. 2.
[6] *R. Palme.* Schweizer Archiv **19** (1953), 177.
[7] *E. M. Wise,* loc. cit.
[8] *J. C. Chaston.* Schweizer Archiv **19** (1953), 44.
[9] *E. M. Wise,* loc. cit., S. 52.
[10] *H. Fischer.* Kontaktwerkstoffe für die Schwachstrom-Technik. Hanau, 1951.
[11] *H. E. Linckh,* loc. cit.
[12] *R. Palme,* loc. cit., S. 179.
[13] *E. M. Wise,* loc. cit., S. 21.
[14] *J. C. Chaston,* loc. cit., S. 46.
[15] *R. Palme,* loc. cit., S. 184.
[16] *E. M. Wise,* loc. cit., S. 89.
[17] *W. Burstyn,* loc. cit., S. 4.
[18] *R. Holm,* loc. cit., S. 310.
[19] *H. Mackh,* Arch. f. techn. Messen, J 04-1 (1949).
[20] *H. Fischer,* loc. cit.
[21] *A. Keil* und *C.-L. Meyer,* ETZ **73** (1952), 31.
[22] *J. C. Chaston,* loc. cit., S. 46.
[23] *R. Holm,* loc. cit., S. 84.
[24] *E. M. Wise,* loc. cit., S. 21.
[25] *R. Holm,* loc. cit., S. 291.
[26] *A. Keil* und *C.-L. Meyer,* loc. cit.
[27] *G. J. Ekkers, A. Farner* und *R. Kläui.* Albiswerk-Berichte **1** (1949), 20.
[28] *I. Dietrich* und *E. Rüchardt.* Z. f. angew. Physik **1** (1948), 1.
[29] *I. Dietrich.* Z. f. angew. Physik **2** (1950), 128.
[30] *I. Dietrich.* Z. f. angew. Physik **1** (1949), 377.
[31] *C. Benedicks.* Ergebn. der exakten Wissenschaften 8 (1929).
[32] *E. Justi* und *H. Schulz.* Abhandlungen der Braunschweig. Wissenschaftl. Gesellschaft **1** (1949), 89.
[33] *H. Gagel* und *H. Dittler.* ETZ **79** (1952), 292.
[34] *J. C. Chaston,* loc. cit., S. 46.
[35] *W. Rump.* Metallforsch. **11** (1947), 138.
[36] *J. Brandmüller* und *H. Heumann.* Z. f. angew. Physik **1** (1948), 139.
[37] *I. Dietrich.* Z. f. angew. Physik **1** (1949), 377.
[38] *K. Brehm.* AEG-Mitteilungen **41** (1951), 302.
[39] *F. P. Bowden.* J. Roy. Soc. NSW **78** (1945), 187.
[40] *P. Dinichert.* Microtecnic (1951), 225.
[41] *R. Holm,* loc. cit., S. 139.
[42] *R. Holm,* loc. cit., S. 142.
[43] *Bericht der Forschungs- und Versuchsanstalt PTT,* Nr. V-11.95 (1950).
[44] *A. Keil* und *C.-L. Meyer,* loc. cit.