

Zur Charakterisierung galvanischer Schichten

Teil IV: Tribologische Testmethode für Schleifringe

Contribution to the characterisation of galvanic plating

Part IV: A tribological test method for abrasive rings

Dr. sc. nat. Thomas Allmendinger, Glattbrugg/Schweiz, inventor@sunrise.ch

1. Einleitung

Anlass für die vorliegende Untersuchung war der Wunsch nach einer tribologischen Charakterisierungsmethode für galvanisch abgeschiedene Kupfer-Gold-Kadmium-Legierungen (hier Hartgold genannt) gewesen, welche namentlich bei für elektronische Steuerungszwecke eingesetzten Schleifringen appliziert werden und welche dank ihrer vorzüglichen Eigenschaften für viele weitere Anwendungsbereiche nach wie vor erste Wahl sind. Sie zeichnen sich nämlich dadurch aus, dass sie einerseits zähhart – das heißt relativ hart und doch nicht spröde – und andererseits weitgehend korrosionsresistent sind, was einen niedrigen elektrischen Übergangswiderstand sowie eine hohe Langzeitbeständigkeit gewährleistet. Die Schicht war ursprünglich von Werner Flühmann und Mitarbeitern entwickelt worden und wird nun seit längerem bei der Collini AG (Standort Dübendorf/Schweiz) unter dem Namen Galvatronic® produziert.

Bereits anfangs der 1970er Jahre wurde eine Testapparatur zur Überprüfung derartiger Schleifringe beschrieben [1]. Mit jener Apparatur war es möglich gewesen, sowohl den Reibungskoeffizienten als auch den Übergangswiderstand zu messen und außerdem noch den Abrieb zu ermitteln, allerdings nur aufgrund von Gewichtsmessungen. (Definitionen der Begriffe Reibungskoeffizient und Abrieb siehe weiter unten). Die Tests wurden an rotierenden Schleifringen durchgeführt (ϕ 98 mm), und zwar mit wie auch ohne Stromdurchfluss. Anders als bei den heute üblichen Anordnungen, wo meist ein federnder, relativ harter Draht in eine im Schleifring eingelassene Rille gedrückt wird, wurden als Stromabnehmer im Querschnitt rechteckige, relativ weiche Bürsten aus gesintertem Silbergraphit eingesetzt, wobei die Abrasion der Bürsten erheblich größer war als diejenige der Ringe.

Bei der von Flühmann und Mitarbeitern seinerzeit verwendeten Testapparatur handelte es sich um eine Spezialanfertigung, also nicht um ein auf dem

1. Introduction

The present work has been induced by our search of a characterization method for galvanically deposited gold-copper-cadmium alloy layers (here named hardgold layers) being applied at collector rings (also called “abrasive rings”) which are used for regulation functions and which are, due to their excellent properties, still first choice for many application fields. Their emerging property may be characterized on one side as “chewy-hard” – meaning considerably hard and nevertheless not brittle – and, on the other side, as corrosion resistant ensuring a low electrical contact resistance and a long-term consistency. The layer originally has been developed by Werner Flühmann and coworkers, and it is produced long-since by Collini AG (location Dübendorf/Schweiz) under the trade name Galvatronic®.

Already in the early seventies, an apparatus for testing such collector rings has been described [1]. By means of this apparatus, it has been possible measuring the friction coefficient as well as the transition resistance and, moreover, determining gravimetrically the wear. (See below the definitions of the terms “friction coefficient” and “wear”). The experiments were made at rotating collector rings (ϕ 98 mm) with and without current flow. Different from contemporary arrays where a most often resilient and relatively hard wire is pressed into a groove being provided at the collector ring, rectangular and rather smooth “brushes” from sintered silver graphite were used as collectors whereby the abrasion of the brushes was considerably larger than that one of the rings.

The test apparatus used by Flühmann and coworkers had been specially constructed, thus not being a commercially available equipment delivering com-

Fachmarkt erhältliches Gerät, welches vergleichbare Kenndaten liefern könnte. In einer späteren Publikation desselben Ursprungs [2] wurden weitere Ergebnisse publiziert, welche anhand einer heute verbreiteten Kugel-auf-Scheibe-Methode (Ball-on-Disc-Method, abgekürzt BOD) erhoben worden sind, allerdings ohne Angabe der genauen Testbedingungen. Diese Methode dient in erster Linie der Bestimmung des Reibungskoeffizienten, der als das Verhältnis von Reibungskraft und Auflagekraft definiert ist [3]. Darüber hinaus kann über Profilmessungen auch der Verschleiß ermittelt werden. In einem Atemzug mit dem Verschleiß wird meist auch der Verschleißkoeffizient gemäß Achard genannt. Er ist definiert als das Verhältnis von Verschleißvolumen und Auflagekraft mal zurückgelegtem Weg und setzt somit eine entsprechende Relation voraus.

Die BOD-Methode war Gegenstand einer vorgängigen, eigenen Untersuchung gewesen [4], erwies sich aber für Schleifringe als ungeeignet, nicht zuletzt weil ihre Konstruktion nicht der dort oftmals vorliegenden, oben erwähnten Rillenkonstruktion entspricht, aber auch, weil der elektrische Übergangswiderstand nicht gemessen werden kann. Immerhin konnten anhand dieser Methode einige wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, welche sich bis zu einem gewissen Grade auch verallgemeinern lassen. Zunächst zeigte sich, dass der Reibungsverlauf mitunter semi-chaotisch ist und daher keine gut reproduzierbaren Resultate liefert. Dies äußert sich nicht zuletzt in einem oszillierenden Reibungskoeffizienten. Dennoch konnten unter den zahlreichen Versuchen Fälle mit einem ziemlich regelmäßigen Reibungsverlauf gefunden und systematisch untersucht werden – namentlich bei unbeschichtetem Stahl –, welche prinzipielle Aussagen ermöglichten. So ließ sich generell feststellen, dass der Verschleiß mit der Zeit nicht linear wie gemäß der Hypothese von Achard, sondern überproportional zunimmt, und zwar proportional zur Oberfläche der Reibungsrille. Auch stellte sich heraus, dass mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit auch ein höheres Auflagegewicht erforderlich ist, damit der Verlauf regelmäßig wird.

Die letztere Methode kommt somit zum Testen von Schleifringen nicht in Frage. Von Schicht-Anbietern wird häufig der Bosch-Weinmann-Abriebtest angeführt. Hierzu besteht allerdings keine ISO- bzw. ASTM-Norm, auch ist im Fachhandel kein entsprechendes Gerät erhältlich. Dass die meisten Schleifringhersteller eigene, nicht publizierte geschweige

parable characteristics. In a later publication of the same origin [2], further results were published being ascertained by means of the nowadays widely used Ball-on-Disc-method (abbrev. BOD), however without indicating the test conditions. This method is especially suitable for determining the friction coefficient, being defined as the ratio between the friction force and the bearing force [3]. In the same breath, mostly the wear coefficient according to Achard is mentioned. It is defined as the ratio between the wear volume and the bearing force times the travelled path, thus presupposing a corresponding relation.

The BOD-method has been subject of an own previous study [4]. As a result, this method turned out being not suitable for abrasive rings, not least since its construction does not correspond to the above-mentioned construction exhibiting grooves, but also since the transition resistance cannot be measured. At least, by this method some valuable results could be got being generalizable to a certain degree. First of all, the friction course often appeared to be semi-chaotic thus not delivering well reproducible results, that which was not least manifested in an oscillating friction coefficient. Nevertheless, among the numerous trials some examples could be found and systematically investigated – especially on uncoated steel – where the friction course was quite regular allowing some principal statements. Thus it could generally be assessed that the wear does not increase proportionally to the time – according to the hypothesis of Achard – but over-proportionally, namely proportionally to the surface of the friction groove. In addition, it turned out that in the case of an increasing rotation rate, likewise an increasing bearing weight is needed to guarantee a regular course.

Hence the latter method does not come into question for testing abrasive rings. Layer-providers often recommend the abrasive test according to Bosch-Weinmann. However, hereto no ISO- or ASTM-norm exists, and no appropriate apparatus is commercially available, too. The fact that most of the producers of collector rings are using their own test methods being

denn zertifizierte Testmethoden anwenden, macht es noch schwieriger, ein allgemein anerkanntes und zu vergleichbaren Ergebnissen führendes Verfahren zu finden, zumal auch das Material wie auch die Anbringungsweise des Kontaktnehmers (Kollektors, Schleifdrahts) eine wichtige Rolle spielen.

Immerhin gibt es etliche Publikationen vom Schleifdraht-Hersteller Heraeus und namentlich von dessen Mitarbeiter Bernd Gehlert [5, 6], welche interessante Anhaltspunkte liefern. Allerdings wird hier lediglich der Kontaktwiderstand gemessen, während tribologische Größen wie namentlich der Reibungskoeffizient nicht erfassbar sind.

not published and much less certificated does not make it easier to find a generally accepted procedure leading to comparable results, particularly since the material as well as the application mode of the collector wire play an important part.

Anyway, there exist some publications by the manufacturer of collector-wires Heraeus and particularly by its co-worker Bernd Gehlert [5, 6] delivering some interesting clues. However, solely the electrical contact resistance is measured there while tribological qualities such as – especially – the friction coefficient are not detectable.

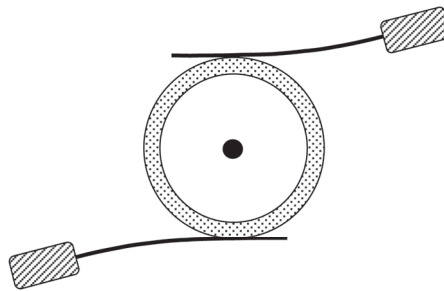


Abb. 1: Testanordnung nach Gehlert

Fig. 1: Testing array according to Gehlert

Wie aus der schematischen Darstellung in *Abbildung 1* ersichtlich ist, wird der zu testende Schleifring von zwei gegenüber liegenden, selbstfedernden Schleifdrähten kontaktiert, wobei der zwecks Belastung angelegte Strom von einem Schleifdraht via rotierenden Schleifring zum andern Schleifdraht fließt. Laut [6] gelten folgende Testbedingungen:

Elektrische Last:	2 A Gleichstrom
Kontaktkraft:	2–3 cN (\approx 2–3 g)
Federlänge:	45 mm
Schleifdraht:	d = 0,5 mm
Schleifringkörper:	d = 60 mm
Drehzahl:	200–300 U/min
Befettung:	keine
Anz. Umdrehungen:	max. 10 Mio.

Als Material für den Schleifdraht wurde einerseits eine AuPdAg-Legierung (Hera277) und andererseits eine AuAgCu-Legierung (Hera238) eingesetzt, wobei mit letzterer eine deutlich geringere Lebensdauer erreicht wurde (5 Mio. anstatt 10 Mio. Umdrehungen). Inwiefern dieser Befund nicht auch mit der

As it is obvious from the scheme (*Fig. 1*), the abrasive ring which has to be tested is contacted by two resilient collector-wires being provided oppositely. For the purpose of electrical strain, a voltage is applied so that a current flows from one collector-wire via the rotating abrasive ring to the other collector-wire. According to [6], the following testing conditions are relevant:

Current strain:	2 A DC
Contact power:	2–3 cN (\approx 2–3 g)
Spring length:	45 mm
Collector-wire:	d = 0.5 mm
Abrasive ring:	d = 60 mm
Speed:	200–300 laps/min
Greasing:	none
Number of laps:	max. 10 million

For the collector-wires, an AuPdAg-alloy (Hera277) and – alternatively – an AuAgCu-alloy (Hera238) were used as materials. When the latter one was employed, the maximum attainable lifetime was considerably shorter (5 million instead of 10 million laps). To what extent this result was also associated

Schleifring-Beschichtung zusammenhing, ist nicht klar, denn im Fokus jener Tests standen die Drähte und nicht die Schichten. Ebenfalls unklar ist, ob die angegebenen Spannungsabfälle von ca. 0,5 V nur auf die Übergangswiderstände oder auf die Gesamtwiderstände zurückzuführen sind.

Demgegenüber wurde eine eigene Test-Vorrichtung konstruiert, welche der speziellen Konstellation von realen Schleifringkontakten entgegenkommt, nebst dem elektrischen Übergangswiderstand jedoch auch die Messung des Reibungskoeffizienten erlaubt. Damit wurden anhand von mit einer ca. 8 µm dicken Gold-Kupfer-Kadmium-Legierung (hier „Hartgold“ genannt) beschichteten Schleifringe grundlegende Untersuchungen durchgeführt, welche Gegenstand des vorliegenden Beitrags sind.

2. Beschreibung der Test-Apparatur

Diese eigene Testapparatur basiert auf der CH-Patent-anmeldung [7] und ist in den *Abbildungen 2, 3 und 4* wiedergegeben. Sie gleicht derjenigen von Heraeus insofern, als zwei Schleifdrähte eingesetzt werden, wobei der Strom vom einen Schleifdraht via Schleifring zum andern Schleifdraht geleitet wird. Doch es bestehen zwei wesentliche Unterschiede: Erstens liegt bei der eigenen Vorrichtung der Schleifdraht konkav auf dem Schleifring respektive seiner Kontakttrille auf und schmiegt sich dadurch an diese an, während er bei der Apparatur von Heraeus konvex aufliegt. Und zweitens lässt sich bei der eigenen Testvorrichtung die Zugkraft über Federwagen verstellen und dadurch optimieren, was bei der Apparatur von Heraeus nicht oder zumindest nicht so einfach möglich ist.

Wie aus *Abbildung 2* ersichtlich, ist beidseitig des Schleifrings 1 je eine Federwaage 2 vorgesehen, welche an der Stelle 3 aufgehängt ist und über eine Umlenkrolle 4 bzw. ein Kabel 5 mit dem Schleifdraht 6 verbunden – vorzugsweise angelötet – ist und einerseits dazu dient, über die Lage des Aufhängepunkts 3 respektive die Länge des Kabels 5 die Spannkraft einzustellen, sowie andererseits durch Ermittlung der Anzeigedifferenz der beiden Federwagen die Reibungskraft bei drehendem Schleifring zu ermitteln. Werden nun zwei derartige Vorrichtungen nebeneinander vorgesehen und sind die entsprechenden beiden Schleifringe miteinander verbunden, so ist es möglich, über die Kabel 7 einen Strom vom einen Kollektor zum andern zu leiten und dabei den Widerstand zu messen. Bringt man auf der andern Seite – also rechts im Bild von *Abbil-*

to the coating of the abrasive ring is not clear since, within that examination, the wires were focussed and not the layers. Furthermore it is uncertain whether the indicated voltage drops of about 0.5 V have solely to be ascribed to the transition resistances or to the overall resistance.

In comparison, an own test-device has been designed resembling the special configuration of real contacts at abrasive rings and permitting the measurement of the friction coefficient as well as of the electrical transition resistance. Therewith, fundamental investigations on the basis of an approx. 8 µm thick gold-copper-cadmium-alloy (here named “hardgold”) have been made, being the subject matter of the present article.

2. Description of the test apparatus

This distinct test apparatus is based on the CH-patent application [7] and illustrated in *Figures 2, 3 and 4*. It resembles that one of Heraeus insofar as two collector-wires are provided whereby the current is conducted from one collector via the abrasive ring to the other one. However, there are two significant differences: Firstly, at the own device the collector-wire lies concavely on the abrasive ring or on its appropriate contact groove, clinging it thereby, whereas at the device of Heraeus it lies convexly on it. And secondly, at that device it is possible measuring and shifting the traction force by means of spring scales and thus optimizing it – that which is not or at least not so easy feasible at the apparatus of Heraeus.

As it is apparent from *Figure 2* showing one unit of such a tribotester, on both sides of the abrasive ring 1 spring scales 2 are provided being suspended at the sites 3 and being connected with the collector-wire 6 via the deflection-rollers 4 and the cables 5 which are preferably soldered on the collector-wire. By shifting the suspension points 3 as well as the longitudes of the cables 5 it is feasible to adjust the tensioning force. Moreover, the friction force is given by the difference of the forces of the two spring scales and may easily be determined by reading off their magnitudes when the abrasive ring is rotating. When two of such units are provided and when the two abrasive rings are connected intimately, it is feasible conducting a current from one collector-wire to the other one via the cables 7 and thereby measuring the electri-

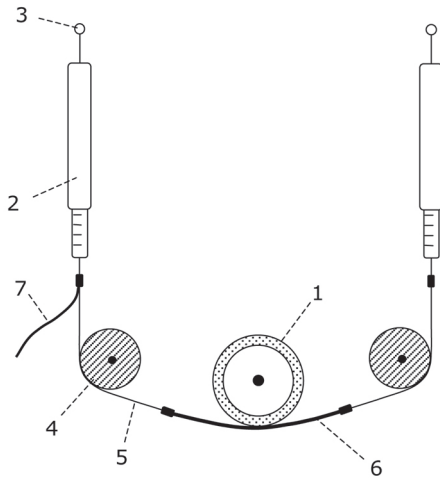


Abb. 2: Schema einer Tribotest-Einheit
Fig. 2: Scheme of one unit of a tribotester

zung 2 – noch ein weiteres Kabel analog zu 7 an, so lässt sich separat auch der Leiterwiderstand messen.

In *Abbildung 3* ist ein Prototyp einer derartigen, an einem Laborgestänge aufgebauten Apparatur abgebildet. Als – selbst federndes – Material für die 11,5 cm langen und ca. 0,4 g schweren Schleifdrähte ($\Phi = 0,5$ mm) diente die bereits erwähnte – laut der Publikation von Gehlert angeblich schlechtere – AuAgCu-Legierung Hera238, welche einen Kern aus CuBe2 enthält. Als Verbindungsschnüre und gleichzeitige Stromleiter wurden (blaue) dünne Kabel verwendet (Außen- $\Phi = 1,2$ mm). Die Kontakte wurden gelötet. Die verwendeten Federwagen wiesen eine maximale Zugkraft von 100 Pond (bzw. Gramm) auf. Die Umlenkrollen (im Bild weiß) waren aus Kunststoff und mit Rillen versehen. Der Durchmesser der Schleifringe wie auch der Umlenkrollen betrug 6 cm. Die genauen Positionen der einzelnen Komponenten sind aus *Abbildung 4* ersichtlich.

Die Normalkraft FN in *Abbildung 4* hängt mit der beidseitig wirkenden Zugkraft FZ zusammen. Infolge der Umlenkung an der Rolle ist sie indes erheblich kleiner, und zwar theoretisch um den

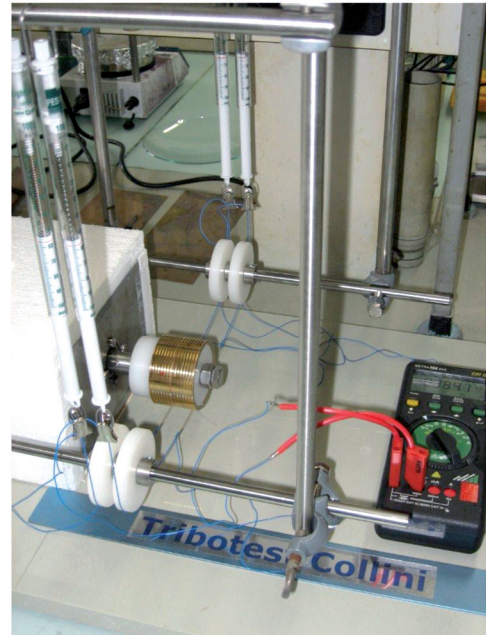


Abb. 3: Abbildung der Testapparatur
Fig. 3: Picture of a test apparatus

cal resistance. Finally, when on the opposing side – namely on the right side of the gadget in *Figure 2* – a further cable is provided (analogous to cable 7), the electrical resistance of the collector-wire may be measured separately.

Figure 3 shows a prototype of such an apparatus being arranged on a lab frame. For the resilient collector-wires, the Hera238-type was chosen consisting of an AuAgCu-alloy with a CuBe2 core (diameter = 0.5 mm, length = 11.5 cm, weight = 0.4 g) even if this material – according to the publication [6] of Gehlert – was reported to be less appropriate. Thin (blue) cables (outer diameter = 1.2 mm) served as connection strings and likewise as current conductors. The contacts were soldered. The maximum range of the applied spring scales was 100 ponds (or grams). The deflection-rollers (in the picture apparently white) were made from a plastic and provided with grooves. The diameters of the abrasive rings were 6 cm. The accurate positions of the several components are evident from *Figure 4*.

The normal force FN in *Figure 4* is related to the traction (attractive force) FZ whereby the attractive forces should be initially equal on both sides. But

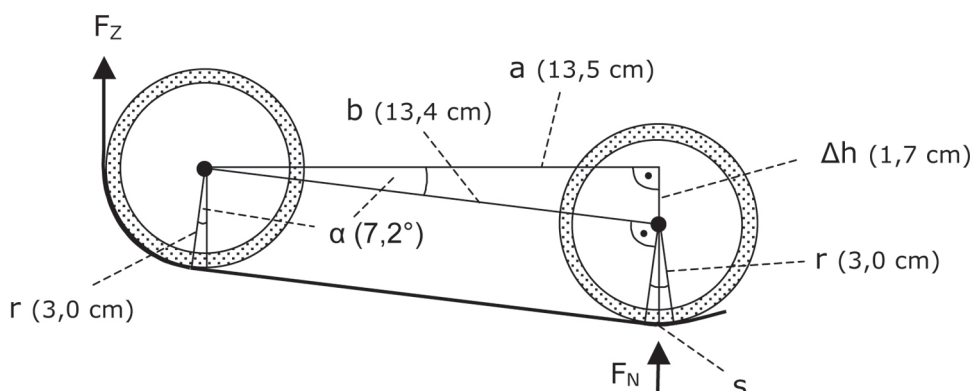


Abb. 4: Position von Umlenkrolle und Schleifring
 Fig. 4: Position of deflection-roller and abrasive ring

Faktor $\Delta h/b = 0,127$. (Bemerkungen zur Gültigkeit dieser Berechnung siehe *Kap. 3.1.*). Allerdings müsste noch das Eigengewicht des Schleifdrahts und der sonstigen daran befestigten Bestandteile abgezogen werden, sie wurden hier aber vernachlässigt. Auch spielt die Elastizität des Schleifdrahts eine Rolle, so dass eine exakte Ermittlung der Normalkraft schwierig wird und auch nicht angestrebt wurde. Die Reibungskraft ergibt sich einfacherweise aus der Differenz der Zugkräfte an den beiden entgegen gesetzt positionierten Rollen. Auch hier ist mit Ungenauigkeiten zu rechnen, und zwar – aus Trägheitsgründen – umso mehr, je geringer die Reibungskraft wird. Die Länge des (gekrümmten) Aufweges $2s$ lässt sich approximativ berechnen. Und zwar berechnet man zunächst den Winkel α aus $\sin \alpha = \Delta h/a$, woraus sich $\alpha = 7,2^\circ$ ergibt. Bei einem Radius von $r = 3$ cm erhält man dann für $2s = 2r\pi \cdot (2\alpha/360^\circ) = 0,75$ cm.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die exakt konzentrische Befestigung der Schleifringe von großer Wichtigkeit ist. Insbesondere darf keiner der Schleifringe „eiern“, d.h. die Schleifringe müssen exakt zentriert sein. So war die Befestigung des in *Abbildung 3* rechts angebrachten Schleifrings anfänglich nicht optimal, was jeweils nach relativ kurzer Zeit zu einem Abrieb in Form eines sich darunter ansammelnden schwarzen Pulvers führte.

Die Tests wurden mit einer Umdrehungszahl von 200 U/min durchgeführt, zuerst ohne Strom und später bei einer Stromstärke von 1 A (also mit halb so viel wie bei den Tests von Gehlert/Heraeus [5, 6]). Die Bedingungen waren also diesbezüglich denen von Gehlert/Heraeus vergleichbar. Der gemess-

due to the redirecting at the roller, it is considerably smaller, to wit by the theoretic factor $\Delta h/b = 0.127$. (Remarks to the validity of this calculation are made in *chapter 3.1.*). Indeed, the own weight of the collector-wire as well as the other components being attached there should be subtracted; however, they were neglected here. Furthermore, the own resilience of the collector-wire acts a part so that the accurate determination of the normal force gets difficult, but such an optimum accuracy was not aspired. The friction force arises from the difference of the attractive force at the opposite rollers. Here some imprecisions must be envisaged, too, all the more – from inertia reasons – the friction force decreases. The length of the (curved) covered path $2s$ may be calculated approximately. For that, initially the angle α is computed by the relation $\sin \alpha = \Delta h/a$ yielding $\alpha = 7.2^\circ$. Assuming a radius of $r = 3$ cm, one gets the result $2s = 2r\pi \cdot (2\alpha/360^\circ) = 0.75$ cm.

The experience has revealed that an exact concentric mounting of the connector rings is of great importance. In particular, both rings must not “wobble”, i.e. the rings must be precisely centred. So, since initially the mounting of the right connector ring in *figure 3* was not optimum, after comparatively short time wear in the form of a visible black powder was accumulated on the bottom below the right connector ring.

The tests were carried out at a revolution number of 200 laps/min, initially without current, and later with a current strength of 1 A (i.e. with half as much as reported for the tests of Gehlert/Heraeus [5, 6]). Hence, regarding this the conditions were comparable with those of Gehlert/Heraeus. The measured

sene Spannungsabfall (in mV) entsprach somit dem Widerstand in $m\Omega$, wobei stets geringfügige Oszillationen auftraten. Der Ohm'sche Widerstand des Schleifdrahts (Kollektordrahts, eigtl. von zwei halben Drähten) betrug $16m\Omega$. Nachdem sich die anfänglich angewandte Zugkraft von 80 Pond (bzw. Gramm) als zu rigoros erwiesen hatte, wurde bei den späteren, hier aufgeführten Versuchen mit Zugkräften von 60 Pond und weniger gefahren, allerdings nicht weniger als mit 10 Pond, was einer theoretischen Normalkraft von $10 \times 0,127 \text{ Pond} = 1,3 \text{ Pond}$ und somit der Hälfte des bei Gehlert/Heraeus angegebenen Werts von 2–3 Pond entspricht.

3. Resultate und Auswertungen

Das Ziel der hier beschriebenen Versuche war es einerseits, den zeitlichen Verlauf des Reibungskoeffizienten – auch in Abhängigkeit von der Zugkraft – zu studieren. Andererseits ging es aber auch darum, eine praktisch brauchbare Testmethode für galvanische Schichten auf Schleifringen zu finden, welche nicht allzu viel Zeit beansprucht und daher unter strengeren Bedingungen ablaufen sollte, als sie im realen Anwendungsfalle vorliegen. Zu bedenken ist dabei, dass es bei der hier vorgesehenen Rotations-Geschwindigkeit von 200 U/min rund sieben Tage dauert, bis zwei Millionen Umdrehungen erfolgt sind. Ferner galt es, die Schwankungsbreite des Übergangswiderstandes zu berücksichtigen, wobei nicht der Übergangswiderstand allein, sondern der – auch den Eigenwiderstand des Kollektordrahtes mit einschließende – Gesamtwiderstand gemessen wurde. Die ursprüngliche Absicht, die Veränderung des Rillenprofils online zu erfassen, konnte hingegen nicht verwirklicht werden, da keine hinreichend einfache, zerstörungsfreie Messmethode zur Verfügung stand. Auch allfällige Veränderungen am Kollektordraht konnten nicht quantifiziert werden, so dass letztlich ein Ja/Nein-Entscheid herangezogen wurde, welcher sich auf das Auftreten von schwarzem abgeriebenem Pulver bezieht.

Anschließend wird zuerst auf die Veränderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der mittleren Zugstärke (= Zugkraft) eingegangen. Daraufhin wird der Einfluss der mittleren Zugstärke auf die Zugdifferenz betrachtet. Ferner wird der Verlauf des Reibungskoeffizienten bei niedriger mittlerer Zugstärke über einen längeren Zeitraum untersucht, und schliesslich geht es um den zeitlichen Verlauf des Reibungskoeffizienten bei Anwendung der relativ hohen mittleren Zugstärke von 60 Pond.

voltage-slope (in mV) corresponded to the resistance in $m\Omega$, whereby always minor oscillations occurred. Ohm's resistance of a collector-wire (rather of two half wires) came to $16m\Omega$. After the initially applied attractive force of 80 ponds (or grams) had turned out to be too rigorous, for the subsequent experiments being referred here attractive forces of 60 ponds and less have been applied, however not less than 10 ponds – that which corresponds to a theoretical normal force of $10 \times 0.127 \text{ ponds} = 1.3 \text{ ponds}$ and thus to half as much as the 2–3 ponds indicated by Gehlert/Heraeus.

3. Results and interpretation

The target of the here described experiments was, on one side, studying the temporal course of the friction coefficient, also as a function of the traction. On the other side, a practicable test method for galvanic layers on abrasive rings should be found which does not afford too much time and which should thus occur at more rigorous conditions as they exist in reality. Thereby, it is taken into consideration that the here provided revolution number of 200 laps/min entails a duration of about seven days till two million laps are accomplished. In addition, the spread of the transition resistance had to be regarded whereby not the sole transition resistance but the overall resistance including the own resistance of the collector-wire was measured. However, the primal intention recording the groove profile online could not be realized since no sufficiently easy, non-destructive method was available. Possible alterations at the collector-wire could not be quantified, too, so that finally a yes/no-decision was taken relying on the emerging of a black abraded powder.

Subsequently, first the shifting of the electrical resistance as a function of the traction (attractive force) is elaborated. Then, the influence of the middle traction on the difference of the two attractive forces is studied. Further, the course of the friction coefficient at a low middle traction is considered over a longer period, and finally the temporal course of the friction coefficient is regarded when the relatively high middle traction of 60 ponds is inserted.

3.1. Elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Zugstärke

Wie aus dem bei einem neu beschichteten Schleifring erhobenen *Diagramm 1* hervorgeht, bleibt der elektrische Widerstand bei Variation der Zugstärke praktisch konstant (nämlich ca. 50 mΩ). Erst von einem bestimmten Moment an – und zwar unterhalb von ca. 20 Pond – nimmt der Widerstand signifikant zu, was leicht damit erklärbar ist, dass dann der Kontakt ungenügend wird. Nicht eingezeichnet im Diagramm sind die geringfügigen Schwankungen des Widerstands, welche unvermeidbar, aber relativ gering sind (max. 2 mΩ innerhalb einer Minute). Aufgezeichnet ist der totale Widerstand, der sich zusammensetzt aus dem Ohm'schen Widerstand des Schleifdrahts (wie gesagt 16 mΩ, eig. zwei halbe Drähte) und den beiden Übergangswiderständen.

Nach der für diese Vorversuche benötigten Zeit von knapp zwei Stunden wurde an denselben Schleifringen bzw. Rillen ein Langzeittest durchgeführt, und zwar bei einer mittleren Zugstärke von 20 Pond und bei einer Umgebungstemperatur von 20–25 °C (Temperaturschwankung u. a. infolge Tag-/Nacht-Wechsels). Nach 11 Millionen Umdrehungen war noch kein Abrieb sichtbar, wonach das Experiment abgebrochen wurde. Zu diesem Zeitpunkt belief sich der totale Widerstand auf ca. 40 mΩ, was einem Kontaktwiderstand von 12 mΩ pro Kontakt entspricht. Die mittlere Zugdifferenz betrug zu diesem Zeitpunkt lediglich 1,5 Pond, was einem Reibungskoeffizienten von $1.5 : 20 : 0,127 = 0,59$ entspricht.

3.1. Electrical resistance as a function of the traction

As follows from *Diagram 1* concerning a freshly coated abrasive ring, the electrical resistance remains almost constant (namely approx. 50 mΩ) when the traction is varied. However, from a certain moment on – namely below approx. 20 ponds –, the resistance increases significantly. This may easily be explained so that then the contact gets insufficient. The values in the diagram represent the total resistance consisting of the Ohm resistance of the collector-wire (as already mentioned being 16 mΩ, actually two half wires) and the two transition resistors. The inevitable but small oscillations of the resistance (max. 2 mΩ within a minute) are not mapped in the diagram.

After about two hours being necessary for these preliminary trials, subsequently a long-time test was made with the same abrasive rings and within the same grooves applying a middle traction of 20 ponds at an ambient temperature of 20–25 °C (the fluctuation of the temperature was mainly due to the day-/night-changes). After 11 million laps the test has been stopped although still no wear was apparent. At that time, the total resistance had come to approx. 40 mΩ, that which corresponds to a contact resistance of 12 mΩ per contact. The mean traction difference was merely 1.5 ponds corresponding to a friction coefficient of $1.5 : 20 : 0.127 = 0.59$.

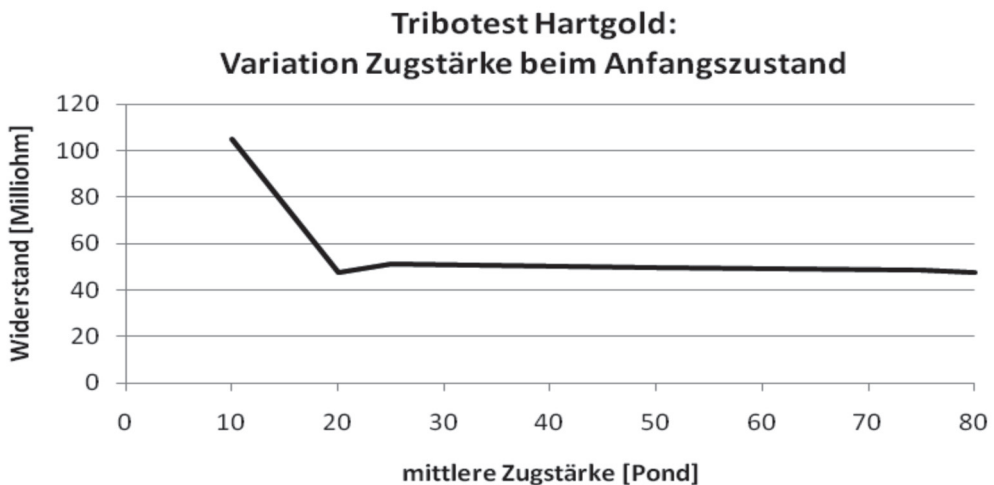


Diagramm 1

Dieser Wert – und noch vielmehr die folgenden Werte – scheint jedoch unrealistisch hoch, ergeben sich doch teilweise Werte über 1, was prinzipiell unmöglich ist. Das bedeutet, dass die für die Berechnung der Normalkraft angenommene Formel nicht zulässig ist. Daher soll im Folgenden lediglich ein Relativwert für den Reibungskoeffizienten angegeben werden, der sich aus dem Quotient von Zugkraft und Zugkraftdifferenz ergibt und den in *Kap. 2* aufgeführten Umrechnungsfaktor weglässt. Der relative Reibungskoeffizient beträgt im vorliegenden Falle somit $1,5 : 20 = 0,075$.

3.2. Einfluss der Zugstärke auf die Zugdifferenz

In *Diagramm 2* sind die als Folge verschiedener mittlerer Zugstärken auftretenden Zugdifferenzen aufgezeichnet. Diese Messungen wurden ebenfalls an einem praktisch frischen Schleifring gemacht, beginnend beim größten Wert (beidseitig 60p). Der Messwert wurde in den ersten beiden Fällen (60p bzw. 40p) nach ca. anderthalb Stunden erhoben. Im letzten Fall – also bei 20p – veränderte sich der Wert mit der Zeit (worauf im nächsten Kapitel noch näher eingegangen wird). Dividiert man die Zugdifferenz durch die Zugstärke, so erhält man den Reibungskoeffizienten, allerdings mit Vorbehalt der oben

However, this value – and still more the following ones – seems to be unrealistically high particularly since sometimes values larger than 1 arise, that which principally is impossible. This means that the supposed calculation of the normal force probably is not permissible. As a consequence, subsequently we shall solely use a relative value for the friction coefficient, given by the quotient of traction and traction difference, and omitting the factor 0.127 given in *chapter 2*. Thus in this case, the relative friction coefficient would be $1.5 : 20 = 0.075$.

3.2. Influence of the traction on the difference of the attractive forces

In *Diagram 2*, the difference of the attractive forces (traction difference) is plotted versus the middle attractive force (traction) as a variable. The measures were made on a nearly fresh abrasive ring, too, starting at the maximum value (60p on both sides). In the second two cases (60p and 40p), the readings were made after ca. one and a half hour. In the last case – namely at 20p –, the value changed with time (that which will be discussed more thoroughly in the next chapter). The division of the difference of the attractive forces through the middle attractive force

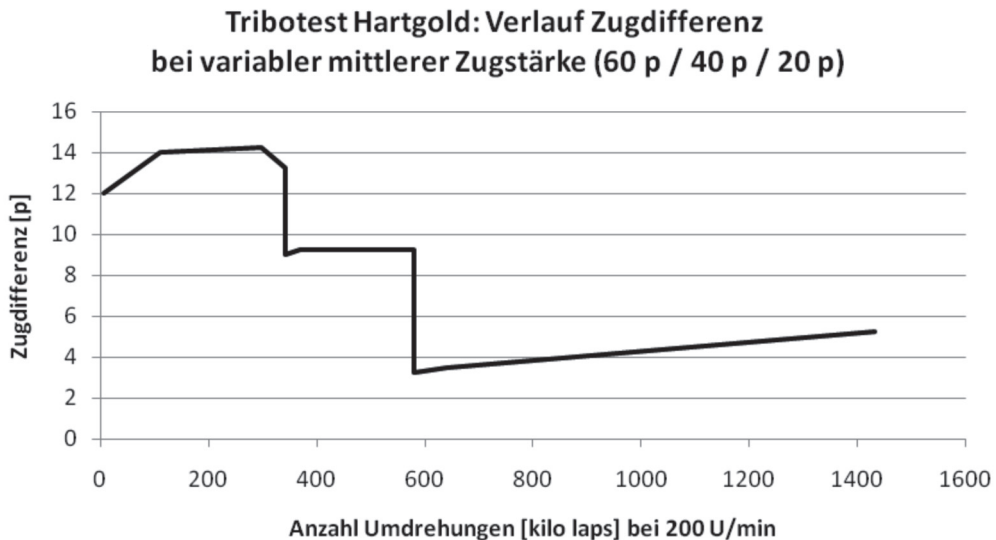


Diagramm 2

erwähnten Ungenauigkeiten. Dies ergibt in den drei Fällen

$$14/60 = 0,25 \quad 9,25/40 = 0,25 \quad 4/20 = 0,2$$

(ansteigend)

also fast dasselbe Ergebnis. Dieses Ergebnis entspricht jedoch überhaupt nicht dem im vorangegangenen Versuch (*Kap. 3.1.*) erhaltenen Wert von 0,075, was offenkundig macht, dass es sich beim Reibungskoeffizienten nicht um eine stoffspezifische Größe handelt, sondern um eine vom Werdegang und den Umständen abhängige (siehe hierzu auch 4).

3.3. Zeitlicher Verlauf des Reibungskoeffizienten bei niedriger Zugstärke

In *Diagramm 3* ist der weitere Verlauf des gemäß *Diagramm 2* begonnenen Experiments wiedergegeben, wobei in der Folge noch niedrigere Zugstärken – bis hinab zu (einseitig) 10 p – angewandt wurden. Der Prozess erfolgte in diesem Falle bei 22 bis 30 °C und wurde hin und wieder unterbrochen, was zu Sprüngen bei der Zugdifferenz führte. Dabei erniedrigte sich die Zugdifferenz nach der Pause jeweils, wie wenn sich die Schicht erholt hätte. Überhaupt ist zu berücksichtigen, dass derart kleine Zugdifferenzen, wie sie hier auftraten, sehr schwer zu messen sind, d. h. dass die Messungenauigkeit relativ groß ist.

Dennoch lassen sich die zwei Aussagen machen, dass einerseits bei konstanter mittlerer Zugstärke die

yealds the relative friction coefficient with the already mentioned reserves. So the three relevant values are

$$14/60 = 0.25 \quad 9.25/40 = 0.25 \quad 4/20 = 0.2$$

(increasing)

therefore almost the same results. But this result does not match at all the value of 0.075 which has been obtained with the previous trial (cf. *chapter 3.1.*) making evident that the (relative) friction coefficient is not a material specific quantity but a quantity which depends on the history and on the circumstances (see hereto also [4]).

3.3. Temporal course of the friction coefficient at low traction

In *Diagram 3*, the further course of the experiment, started according to *diagram 2*, is shown whereby in succession still lower tractions – until 10 p – were applied. In this case, the process occurred at temperatures between 22 and 30 °C, and it was interrupted from time to time leading to leaps of the traction difference. Thereby, the traction difference always diminished after the break, in such a way as it were as if it were been recovered. Anyway, it is to be regarded that such small traction differences as they occurred here are quite difficult to measure, i. e. the measuring-inaccuracy is comparatively large.

Nevertheless, the following two statements may be made: firstly, that the traction difference and thus

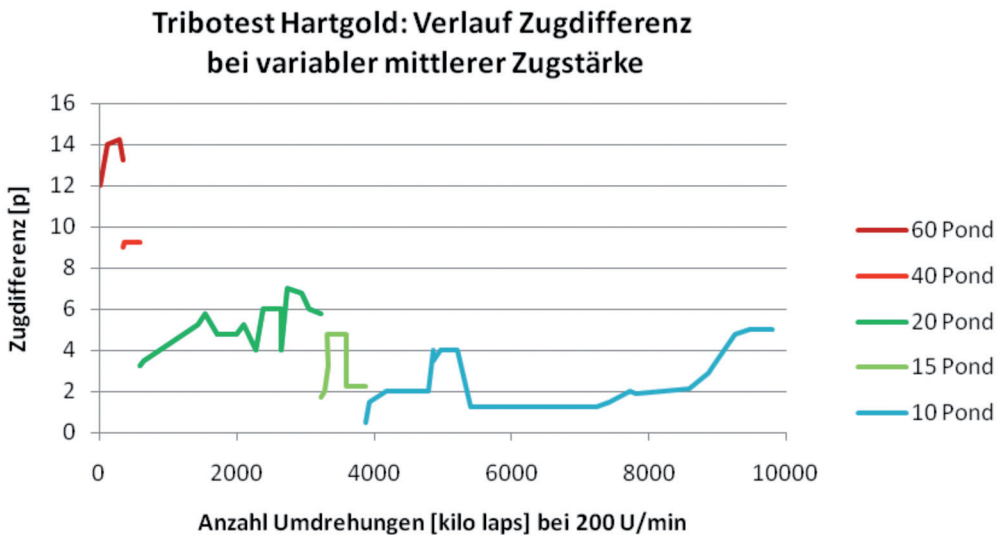


Diagramm 3

Zugdifferenz und damit der Reibungskoeffizient mit der Zeit zwar zunimmt, und dass andererseits am Ende bei noch geringerer Zugstärke gefahren werden kann (nämlich bei bloß 10 p), als es anfänglich möglich war (vgl. *Diagramm 1*), ohne dass der elektrische Widerstand signifikant zunimmt. (Die Widerstandswerte sind hier nicht angegeben, lagen jedoch zwischen 40 und 60 mΩ). Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass sich die Schleifringrille mit der Zeit etwas verändert, spricht sich dem Schleifdraht angleicht. Jedenfalls konnten auch bei diesem Testlauf 10 Millionen Umdrehungen gefahren werden, ohne dass ein pulverförmiger Abrieb entstand. Der Wert des relativen Reibungskoeffizienten belief sich am Ende auf ca. 0,5, war also gut doppelt so groß wie am Anfang.

3.4. Zeitlicher Verlauf des Reibungskoeffizienten bei einer Zugstärke von 60 p

Um über einen Stresstest zu verfügen, der in relativ kurzer Zeit durchführbar ist, wurde bei einem weiteren Versuch mit den gleichen Schleifringen, aber in anderen Rillen und bei einer Zugstärke von 60 Pond gefahren, wobei auch hier von Zeit zu Zeit Unterbrechungen erfolgten. Anders als beim Versuch gemäß *Diagramm 2* dauerte es hier länger, bis eine konstante Zugdifferenz erreicht war. Das hier erhaltene *Diagramm 4* ähnelt übrigens stark den Tribogrammen, wie sie bei Anwendung der Ball-on-Disc-Methode

the friction coefficient increase gradually when the middle traction is kept constant; and secondly, that it is feasible finally applying a lower traction (namely solely 10 p) as it is feasible initially (cf. *diagram 1*) without hazarding the disadvantage of a significant increase of the electrical resistance. (The resistance values are not indicated here, but they amounted between 40 and 60 mΩ). This could be ascribed to the fact that the slide groove is gradually deforming thus adapting to the collector-wire. Anyhow, even after a test course of 10 million laps no powdery wear emerged. The final value of the relative friction coefficient was 0.5 thus twice as much as the initial value.

3.4. Temporal course of the friction coefficient at a traction of 60 p

For getting a stress test being available within comparatively short time, an additional trial has been made with the same abrasive rings but in other grooves and with a traction of 60 p. There occurred some interceptions from time to time, too. Different from the trial according to *diagram 2*, here it lasted longer till a constant traction difference was reached. By the way, the here obtained *diagram 4* was very similar to the tribograms which have been obtained using the ball-on-disc-method (cf. tribogram 6 in [4]). After three million laps the trial was stopped since at the right abrasive ring a powdery wear had been emerged. The relative friction coefficient was just before the

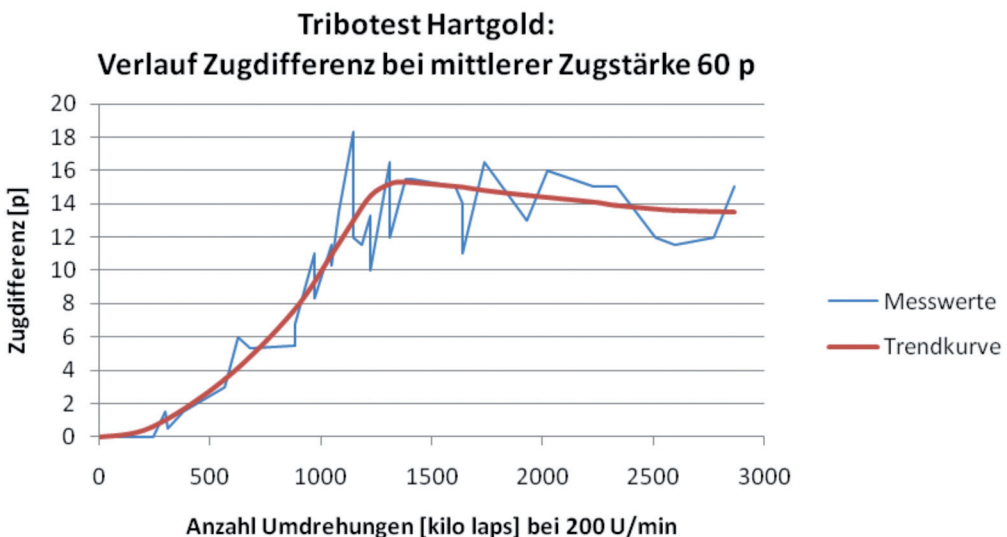


Diagramm 4

aufreten (vgl. Tribogramm 6 in [4]). Nach ca. drei Millionen Umdrehungen wurde dieses Experiment abgebrochen, da beim rechten Schleifring ein pulverförmiger Abrieb entstanden war. Der relative Reibungskoeffizient betrug kurz vor Ende ca. 0,25 und der elektrische Gesamtwiderstand ca. $37\text{ m}\Omega$. Anzufügen ist, dass in einem solchen Falle – also bei Erreichen eines Durchbruchs – meist nicht nur die Schicht, sondern auch der Schleifdraht havariert ist, dass aber der elektrische Widerstand nur relativ schwach ansteigt, jedoch stark schwankt (in diesem Falle zwischen 59 und $69\text{ m}\Omega$).

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Gegenstand des vorliegenden Berichts sind tribologische Untersuchungen mittels einer eigens entwickelten Apparatur zum Testen von galvanisch abgetriebenen Hartgold-Überzügen (Gold-Kupfer-Kadmium-Legierung) an mit Rillen versehenen Schleifringen, in welche je ein selbst federnder Schleifdraht (Kollektor) eingelassen wird. Im Unterschied zu herkömmlichen Vorrichtungen ist im vorliegenden Falle der Schleifdraht jedoch nicht konvex, sondern konkav angeordnet, d. h. er schmiegt sich an die Oberfläche des Schleifrings an. Dadurch wird die Kontaktlänge bzw. -fläche vergrößert und infolge dessen der Auflagedruck verringert. Außerdem ist es möglich, über beidseitig angebrachte Federwagen die Zugstärke zu verändern sowie die Zugdifferenz zu messen und so den (relativen) Reibungskoeffizienten zu ermitteln.

Bei den hier beschriebenen Versuchen ging es einerseits darum, den zeitlichen Verlauf des Reibungskoeffizienten – auch in Abhängigkeit von der Zugkraft – zu studieren. Andererseits sollte eine praktisch brauchbare Testmethode für galvanische Schichten auf Schleifringen gefunden werden. Dabei wurden Vergleiche angestellt mit einer Methode von Gehlert/Heraeus, welche allerdings lediglich die Messung des elektrischen Spannungsabfalls erlaubt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse dürften sich nicht zuletzt auch Anhaltspunkte finden lassen, welche für die Konstruktion von realen Kollektorsystemen von Bedeutung sind.

Zunächst ergab sich, dass der elektrische Widerstand bei Variation der Zugstärke – abgesehen von einer minimalen Oszillation von ca. $2\text{ m}\Omega$ innert einer Minute – praktisch konstant blieb. Erst von einem bestimmten Moment an – und zwar unterhalb von ca. 20 Pond – nahm er signifikant zu, was leicht damit erklärbar ist, dass dann der Kontakt ungenügend wird. Dieser totale Widerstand setzt sich zusam-

end ca. $0,25$, and the electrical total resistance was ca. $37\text{ m}\Omega$. It has to be mentioned that in such a case – when a breakthrough has been reached – most often not only the layer has sustained damage but also the collector-wire, whereas the electrical resistance increases solely slightly but fluctuates considerably (in this case between 59 and $69\text{ m}\Omega$).

4. Summary and conclusions

The present work concerns tribological investigations by means of a specially developed apparatus for testing galvanically deposited hardgold-layers (from a gold-copper-cadmium alloy) on abrasive rings being provided with grooves in which resilient collector-wires are inserted. In contrast to convenient devices, here the resilient-wires are arranged not convexly but concavely, so they cling the surface of the abrasive ring. Thereby the contact-length or -area is enlarged while the bearing pressure is diminished. In addition, it is feasible with the aid of spring scales being provided on both sides to shift the traction force and to appreciate the (relative) friction coefficient by measuring the difference of the attractive forces.

The target of the here described experiments was, on one side, studying the temporal course of the friction coefficient, also as a function of the traction. On the other side, a practicable test method for galvanic layers on abrasive rings should be found. Thereby, a comparison with the method of Gehlert/Heraeus has been drawn, that which solely enables the measuring of the electrical voltage drop. Due to the attained knowledge, not least some clues could be found being possibly favourable for the construction of real collector systems.

First of all, the electrical resistance turned out remaining almost constant – aside from a minimum oscillation of ca. $2\text{ m}\Omega$ – when the traction is varied. However, from a certain moment on – namely below approx. 20 ponds –, the resistance increased significantly. This may easily be explained so that then the contact got insufficient. The total resistance is composed of the Ohm resistance of the collector-wire (ca. $16\text{ m}\Omega$) and the transition resistance of the two collector contacts yielding a single contact of $12\text{ m}\Omega$ when the total resistance is $40\text{ m}\Omega$. This value

men aus dem Ohm'schen Widerstand des Kollektor-drahts (ca. 16 mΩ) und den Übergangswiderständen der beiden involvierten Kollektorkontakte, was bei einem Gesamtwiderstand von 40 mΩ einem Kontakt-widerstand von 12 mΩ entspricht. Er war nur etwa ein Fünftel so groß wie der bei Gehlert angegebene, was auf die erheblich größeren Kontaktbereiche der hier vorgeschlagenen Anordnung zurückzuführen sein dürfte. Anschließend wurde noch ein Langzeit-Test bei 20 Pond durchgeführt, bei welchem auch nach 11 Millionen Umdrehungen noch kein sichtbarer Abrieb vorlag.

Beim nächsten Versuch wurden die Zugdifferenzen ermittelt, welche sich als Folge verschiedener Zug-stärken (einseitig 60 p, 40 p und 20 p) ergaben. Dabei ergab sich, dass das dem relativen Reibungskoeffizienten entsprechende Verhältnis zwischen Zugdif-ferenz und Zugstärke in allen drei Fällen praktisch gleich war, nämlich 0,25. Allerdings begann sich im letzteren Falle – also bei 20 p – schon bald eine lang-same Veränderung abzuzeichnen, der im anschlie-ßenden Langzeitversuch – bei niedriger Zugstärke – weiter nachgegangen wurde. Dabei zeigte sich, dass einerseits bei konstanter Zugstärke die Zugdifferenz und damit der Reibungskoeffizient mit der Zeit zwar zunahm, und dass aber andererseits am Ende bei noch geringerer Zugstärke gefahren werden konnte (nämlich bei bloß 10 p, nach 10 Millionen Umdrehungen), als es anfänglich möglich war (nämlich bei mindes-tens 20 p), ohne dass der elektrische Widerstand signifikant zunahm. Der Grund dafür lag vermutlich bei der allmählichen Veränderung des Rillenprofils aufgrund des Reibungsprozesses. Daher wurden je nachdem unterschiedliche Reibungskoeffizienten erhalten, was einmal mehr zeigte, dass der Reibungs-koeffizient nicht als stoffspezifische Größe angesehen werden darf.

Um die erforderliche Testdauer herabsetzen zu können, wurde schließlich noch ein Stresstest bei 60 p durchgeführt, wobei einige Unterbrechungen erfolgten. Das dabei erhaltene Diagramm ähnelte stark den Tribogrammen, wie sie bei Anwendung der Ball-on-Disc-Methode auftreten. Nach drei Millionen Umdrehungen wurde dieses Experiment abgebrochen, da einseitig ein pulverförmiger Abrieb entstanden war.

Referenzliste

Vorgängige Teile in der Reihe „Zur Charakterisie-rung galvanischer Schichten (Autor: Thomas All-mendinger): [8] [9] [10]

is about a fifth as large as that one quoted by Gehlert – that which could probably be ascribed to the larger contact area at the here proposed arrangement. Subsequently, a long-time-test at 20 ponds was made whereby no visible wear emerged.

Within the next trial, the differences of the attractive forces as a consequence of different tractions (60 p, 40 p and 20 p) have been determined. In all the three cases, the ratios of the two quantities – correspond-ing to the relative friction coefficients – were equal, namely 0.25. However, in the last case – at 20 p – soon a slow shift was outlined that which was con-sidered more detailed in a subsequent long-time-trial at low tractions. Thereby it turned out that – on one hand – the traction difference and thus the friction coefficient increased gradually, but that – on the other hand – it was feasible finally applying a lower traction (namely solely 10 p, after 10 million laps) as it was feasible initially without a significant increase of the electrical resistance. This can probably be ascribed to the fact that the slide groove has been gradually deformed due to the friction process. Therefore, depending on the conditions, different friction coef-ficients were obtained exhibiting once more that the friction coefficient must not be considered as a mater-ial specific quantity.

For finding a method to reduce the test period, finally a stress test at 60 p was carried out whereby some interceptions occurred. The resulting diagram is very similar to the tribograms which are obtained using the ball-on-disc-method. After three million laps the trial was stopped since on one side a powdery wear had been emerged.

Reference list

Antecedent parts in the series “Contributions to the characterisation of galvanic platings” (author: Thomas Allmendinger): [8][9][10]

- [1] W. Flühmann, W. Saxer, F. Aubert, H. E. Hintermann: „Verschleis-suntersuchungen an hochlegierten Goldniederschlägen“, *Galvano-technik* 65 (1974), 8
- [2] W. Saxer: „Elektrolytisch abgeschiedene Überzüge für Gleitkontakte“, *Galvanotechnik* 82 (1991), 10

- [3] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, *ASTM G 99 - 05*
- [4] Th. Allmendinger: „Tribologische Untersuchung zur Ball-on-Disc-Methode am Beispiel Stahl sowie an galvanisch abgeschiedenen Hartgold-Schichten“ (Deutsch/Englisch), zur Publikation angenommen beim *J. Electrochem. Plating Technol.*, Jahrgang 2012
- [5] W.C. Heraeus GmbH (Erfinder: Bernd Gehlert): „Schleifringkörper zur kontinuierlichen Stromübertragung“, *Offenlegungsschrift DE 10 2005 047 799 A1* (Anmeldetag 05.10.2005)
- [6] Bernd Gehlert, W.C. Heraeus GmbH: „Lebensdaueruntersuchungen von Edelmetall- Kontaktwertstoff-Kombinationen“, http://heraeus-electro-technology.com/media/webmedia_local/prospekte/Lebensdaueruntersuchungen_fuer_Schleifringuebertrager.pdf
- [7] Thomas Allmendinger: „Anbringung von Stromabnehmern bei Gleitkontakten“, CH-Patentanmeldung Nr. 01639/10 vom 07.10.2010
- [8] „Einheiten bei der Härtemessung“, *Galvanotechnik 99* (2008), 1878-1883
- [9] „Duktilität und Flexibilität“, *Galvanotechnik 99* (2008), 2143-2148
- [10] „Röntgenbeugung, insbesondere bei Kupfer-Gold-Legierungen“, *Galvanotechnik 101* (2010), 62-73
- [1] W. Flühmann, W. Saxer, F. Aubert, H. E. Hintermann: „Verschleissuntersuchungen an hochlegierten Goldniederschlägen“, *Galvanotechnik 65* (1974), 8
- [2] W. Saxer: „Elektrolytisch abgeschiedene Überzüge für Gleitkontakte“, *Galvanotechnik 82* (1991), 10
- [3] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, *ASTM G 99 - 05*
- [4] Th. Allmendinger: „A Tribological Study on the Ball-on-Disc (BOD) Method, Taking Steel and Galvanic Hard Gold as Examples“, *J. Electrochem. Plating Technology*, February 2013, available from <<http://www.jept.de/?p=318%20title=>>
- [5] W.C. Heraeus GmbH (Erfinder: Bernd Gehlert): „Schleifringkörper zur kontinuierlichen Stromübertragung“, *Offenlegungsschrift DE 10 2005 047 799 A1* (Anmeldetag 05.10.2005)
- [6] Bernd Gehlert, W.C. Heraeus GmbH: „Lebensdaueruntersuchungen von Edelmetall- Kontaktwertstoff-Kombinationen“, http://heraeus-electro-technology.com/media/webmedia_local/prospekte/Lebensdaueruntersuchungen_fuer_Schleifringuebertrager.pdf
- [7] Thomas Allmendinger: „Anbringung von Stromabnehmern bei Gleitkontakten“, CH-Patentanmeldung Nr. 01639/10 vom 07.10.2010
- [8] „Contributions to the characterisation of galvanic platings, Part I: Units of the hardness measurement / Zur Charakterisierung galvanischer Schichten, Teil I: Einheiten bei der Härtemessung“, *Galvanotechnik 99* (2008), 1887-1883
- [9] „Contributions to the characterisation of galvanic platings, Part II: Ductility and Flexibility / Zur Charakterisierung galvanischer Schichten, Teil II: Duktilität und Flexibilität“, *Galvanotechnik 99* (2008), 2143-2148
- [10] „Contributions to the characterisation of galvanic platings, Part III: X-ray diffraction (XRD), particularly at copper-gold-alloys / Zur Charakterisierung galvanischer Schichten, Teil III: Röntgenbeugung, insbesondere bei Kupfer-Gold-Legierungen“, *Galvanotechnik 101* (2010), 62-73

	<p>Polierstahlkugeln, Polierstahlstifte und Polierstahlkörper</p> <p>zum Hochglanzpolieren von Metallwaren sowie Kugeln aus Stahl, Messing, Bronze, Kunststoff für jeden Verwendungszweck.</p> <p>Bitte fordern Sie Preise und kostenlose Muster an.</p>
	<p>walter möller GmbH</p> <p>D-58507 Lüdenscheid · Bahnhofstraße 66 D-58472 Lüdenscheid · Postfach 22 44 Fernruf (023 51) 2 19 61 · Fax (023 51) 3 82 99</p>