

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 64 (1973)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Die Stabilität des Laufverhaltens von Kohlebürsten unter dem Einfluss aerodynamischer Vorgänge  
**Autor:** Volkmann, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915554>

### **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:** 25.02.2026

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

# Die Stabilität des Laufverhaltens von Kohlebürsten unter dem Einfluss aerodynamischer Vorgänge

Von W. Volkmann

621.3.047.43 : 533.69.048.1

Aus der Praxis ist bekannt, dass der Kohlebürstenlauf auf sehr schnellaufenden Ringen mit Schwierigkeiten verknüpft sein kann, die durch die sog. Luftpolsterbildung zwischen Bürste und Ring entstehen. Man konnte nachweisen, dass dieser Effekt besonders dann begünstigt wird, wenn Bürsten im Einsatz sind, bei denen die Rauheit der Gleitfläche sehr klein ist. Bei Kommutatoren hat man derartige Schwierigkeiten, hervorgerufen durch diesen Effekt, seither nicht vermutet. Man kann vielmehr heute noch oft die Meinung antreffen, dass Schmiegeln, Abschleifen und Überdrehen zur Behebung von Kontaktschwierigkeiten aerodynamischer Art nutzlos sind, und dass eine spiegelglatte Kommutatoroberfläche mit möglichst geringer Rauhtiefe Voraussetzung für einen guten Bürstenlauf sei. Die Untersuchungen, über die im folgenden berichtet wird, ergaben jedoch, dass auch bei schnellaufenden Kommutatoren Schwierigkeiten durch aerodynamische Effekte entstehen können, obwohl die Kommutatoren genutet sind und die Bürsten in tangentialer Richtung nur verhältnismässig kleine Abmessungen aufweisen.

Der aerodynamische Effekt äussert sich durch ungleichmässige Stromaufnahme und ungleichmässigen Verschleiss der parallelgeschalteten Bürsten. Es kann auch vorkommen, dass einzelne Bürsten überhaupt keinen Strom führen. Wenn alle parallel geschalteten Bürsten durch die Luftpolsterbildung von dem Kommutator getrennt werden, so tritt Feuern der Bürsten ein. Die Folgen sind: ungleichmässiger und hoher Verschleiss, Fleckenbildung auf dem Kommutator und weiterhin das Entstehen von Kommutatorunrundheiten.

Die Luftpolsterbildung ist von der Rauheit der Bürstengleitflächen und von der Rauheit der Kommutatoroberfläche abhängig. Je glatter die Laufflächen sind, um so leichter treten die oben angeführten Schwierigkeiten auf. Ausser der Rauhtiefe ist auch die Breite der Vertiefungen, Riefen und Rillen in den Gleitoberflächen von grosser Bedeutung. Spiralisch verlaufende Nuten in der Kommutatoroberfläche mit einem Querschnitt von einigen mm<sup>2</sup> verschieben die Grenze der zulässigen Drehzahl weit nach oben. In noch stärkerem Masse wirkt in derselben Richtung das Kordeln und Rändeln der Rotoroberfläche. Die Rauheit der Bürstengleitfläche hängt von der Kohlestruktur und den Eigenschaften des verarbeiteten Graphits ab, die Rauheit des Kommutators von der Vorbehandlung vor dem Aufsetzen der Bürsten und den jeweils herrschenden Laufbedingungen.

## 1. Einleitung

Bei schnellaufenden Ringen kann der Kohlebürstenlauf starken Störungen unterworfen sein, die durch ungleichmässige Stromverteilung auf die einzelnen Bürsten bzw. durch Feuern sehr ernste Schäden wie z. B. Durchbrennen der Bürstenlitze, Anflecken der Ringe, hohen bzw. ungleichmässigen Verschleiss der Bürsten verursachen können. Schwab [1]<sup>1)</sup> hat nachgewiesen, dass die Störungen durch einen Überdruck in dem Raum zwischen Bürste und Ring verursacht werden, wobei der Druck ähnlich wie bei einem Gleitlager mit Flüssigkeitsschmierung durch die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen dem ruhenden und bewegten Teil entsteht. Das unterschiedliche Verhalten verschiedener Bürstensorten wird mit der Annahme erklärt, dass die Rauheit der Bürstenlaufflächen entscheidend für die Entstehung und Grösse des Überdrucks zwischen Bürste und Ring ist.

Weitere Angaben und Messergebnisse über den Druck zwischen Bürste und Ring werden von Stanley [2] gemacht.

Bemerkenswert ist, dass in den meisten Fällen sowohl bei Schwab als auch bei Stanley und bei eigenen Messungen der gemessene Druck nicht ausreicht, um die Bürsten gegen die Anpresskraft der Feder von dem Ring abzuheben. Dies hat

En pratique, le glissement de balais en charbon sur des bagues qui tournent très rapidement peut donner lieu à des difficultés dues à la formation d'un coussin d'air entre balais et bagues. On a pu prouver que cet effet est surtout favorisé quand il s'agit de balais dont la rugosité de la surface de frottement est très faible. Avec des collecteurs, on n'avait pas supposé jusqu'ici que cet effet provoque ce genre de difficultés. Aujourd'hui encore, on admet souvent que le passage à l'émeri ou le tournage sont inutiles pour supprimer les difficultés de contact de nature aérodynamique et que ce qui importe c'est une surface parfaitement polie du collecteur, avec une profondeur de rugosité aussi faible que possible. Les recherches, dont il est question dans ce qui suit, ont toutefois montré que des difficultés dues à des effets aérodynamiques peuvent également se présenter dans le cas de collecteurs tournant rapidement, même si ceux-ci sont rainurés et si les balais n'ont que des dimensions relativement faibles dans le sens tangentiel.

L'effet aérodynamique se remarque à une captation irrégulière du courant et à une usure également irrégulière des balais couplés en parallèle. Il peut même arriver que certains balais ne conduisent pas de courant. Lorsque tous les balais en parallèle sont séparés du collecteur par des coussins d'air, il se produit des crachements. Les conséquences sont: forte et irrégulière usure, formation de taches sur le collecteur et ovalisation de celui-ci.

La formation d'un coussin d'air dépend de la rugosité de la surface de glissement du balai et de celle de la surface du collecteur. Plus les surfaces de glissement sont lisses, plus les difficultés en question ont tendance à se présenter. Outre la profondeur de rugosité, la largeur des creux et rayures dans les surfaces de glissement a une grande importance. Des rainures en spirale d'une section de quelques mm<sup>2</sup> décalent grandement vers le haut la limite de la vitesse de rotation admissible. Cela est encore plus net par le moletage de la surface du rotor. La rugosité de la surface des balais dépend de la structure du charbon et des propriétés du graphite élaboré, tandis que la rugosité du collecteur dépend du traitement avant la mise en place des balais, ainsi que des conditions de marche.

Schwab zur Annahme veranlasst, dass ausser Luft ein Medium mit grösserer dynamischer Zähigkeit, nämlich Wasser in Form der Rohmannhaut, wirksam ist.

Ähnliche Störungen wie bei Ringen kommen auch bei schnellaufenden Kommutatoren vor. Man hat jedoch bisher die bei Versuchen auf Ringen gewonnenen Erkenntnisse nicht auf die Kommutatoren übertragen, weil man annahm, dass die Nutzung zwischen den einzelnen Lamellen und ausserdem die relativ kurzen Bürstenabmessungen in tangentialer Richtung die Ausbildung eines ausreichend starken Luftpolsters unmöglich machen. Die folgenden Ausführungen sollen nun zeigen, dass auch beim Kohlebürstenlauf auf Kommutatoren die Luftpolsterbildung bei mechanisch einwandfreiem Zustand des Rotors und bei tragbaren Kommutierungsbedingungen eine der wichtigsten Störungsursachen ist.

Um in makroskopischer Sicht den Auftrieb erklären zu können, muss man annehmen, dass die Bürstenlauffläche relativ zu der Rotoroberfläche gekippt ist, so dass ein keilförmiger Spalt entsteht (Fig. 1).

Für die Auftriebskraft zwischen Bürste und Rotor kann man vorgreifend auf den theoretischen Teil dieser Arbeit folgende Gleichung ansetzen:

$$P = \eta U_{rv} f(h_0, h_b, t)$$

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



Dabei bedeuten:

- $P$  Abhebekraft
- $\eta$  dynamischer Zähigkeitskoeffizient
- $U_{rv}$  Rotorumfangsgeschwindigkeit
- $h_0$  Abstand zwischen Rotor und Bürsten bei der anlaufenden Bürstenkante
- $h_b$  Abstand zwischen Rotor und Bürsten bei der ablaufenden Bürstenkante
- $b$  tangentielle Abmessung der Bürste

Bei  $h_0$  und  $h_b$  handelt es sich um fiktive Werte, die bei vollkommen glatten Laufflächen dieselben aerodynamischen Wirkungen hervorrufen, wie die tatsächlich vorhandenen Spalte und Durchlässe bei praktisch vorkommenden rauen Kontaktflächen.

## 2. Reibungshypothese

Grundsätzlich setzt sich die Reibungsenergie beim Kohlebürstengleitkontakt aus zwei Hauptanteilen zusammen, nämlich:

### 2.1 Verhakungsreibung

Vorstehende Spitzen greifen ineinander und werden durch den Gleitvorgang zu Schwingungen angeregt. Dieser Vorgang ist mit Energieverbrauch verbunden. Vereinzelt kann auch ein Ablösen von Verschleisssteilchen erfolgen.

### 2.2 Adhäsionsreibung

Die Energieübertragung erfolgt durch Adhäsionskräfte. Diese sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung der aufeinander gleitenden Flächen und von den meist vorhandenen Fremdschichten und Gashäuten. Im allgemeinen hat der Reibwert bei festen Körpern mit wachsender Relativgeschwindigkeit fallende Tendenz. Beim Gleiten von Graphit auf Metall konnte dieser Zusammenhang noch nicht geklärt werden. Bei kleinen Relativgeschwindigkeiten ist diese Abhängigkeit, wie aus entsprechenden Versuchen hervorgeht, sicher sehr gering. Bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten ist dies jedoch nicht der Fall. Man darf deshalb vermuten, dass die starke Beeinflussung des Reibwertes durch die Drehzahl auf aerodynamische Effekte zurückzuführen ist, wobei Unterdruck (Sog) unter der Bürste den Reibwert erhöht und Überdruck diesen bis auf verschwindend kleine Werte verringern kann, da die Reibungskraft von der wahren gesamten Kontaktfläche und somit von der effektiven Anpresskraft abhängt.

## 3. Versuchsausrüstung

Als Rotor diente jeweils ein elektrisch beheizbarer Ring aus hartgezogenem Elektrolytkupfer, dessen Mantelfläche in axia-

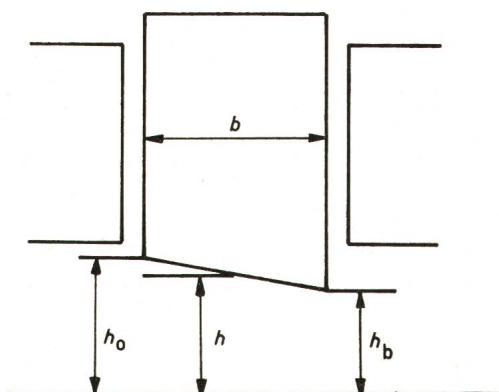


Fig. 1

Luftkeil zwischen Bürste und Rotoroberfläche

- $b$  tangentielle Abmessung der Bürste
- $h$  Abstand zwischen Rotor und Bürste
- $h_b$  Abstand zwischen Rotor und Bürste bei der ablaufenden Rotorkante
- $h_0$  Abstand zwischen Rotor und Bürste bei der anlaufenden Bürstenkante

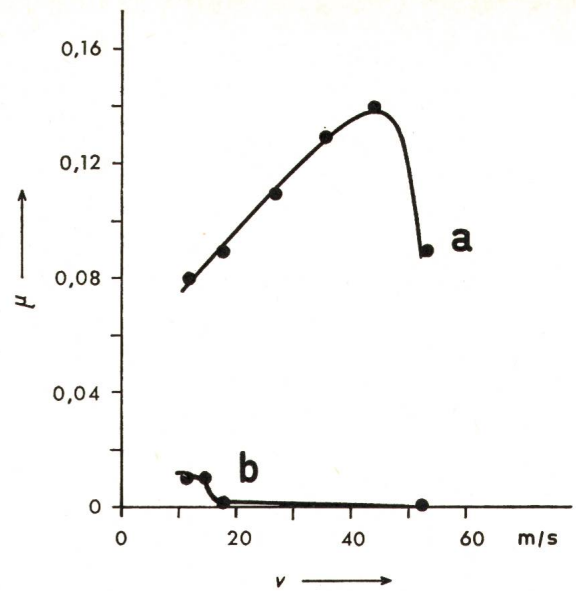


Fig. 2

Reibwert  $\mu$  in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit  $v$

Einfluss der Rotorrauheit

Bürstenqualität B

a Rotoroberfläche rau ( $R_a = 6 \mu\text{m}$ )

b Rotoroberfläche glatt ( $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ )

$R_a$  Mittenrauhwert nach ISO 468

ler Richtung ähnlich wie bei einem Kommutator genutzt war (Scheinkommutator). Die Stegbreite betrug 5 mm und die Nutbreite 0,8 mm. Die Durchmesser der benutzten Ringe waren 330, 340 und 400 mm. Der Ring Nr. 2 war ausser den axial verlaufenden Nuten mit Spiralnuten versehen worden, deren Querschnitt  $2 \times 2$  mm und deren Steigung 6 mm betrug. Der Ring Nr. 3 hatte eine gekordelte Oberfläche mit einer Teilung von 1 mm, bei der die Spitzen der einzelnen pyramidenförmigen Erhebungen mit einem Schleifstein beseitigt worden waren, um unzulässig hohen Bürstenverschleiss zu vermeiden. Die Bürsten (4 pro Ring) hatten die Abmessungen  $10 \times 32 \times 35$  mm und wurden in sog. Kastenhaltern in radialer Richtung mit etwa 0,2 mm Spiel geführt. Der Druck ( $250 \text{ p/cm}^2$ ) wurde dabei von einem federbelasteten Hebel ausgeübt. Die Halter waren an einem Kreuz befestigt, das um die Maschinenachse drehbar war, so dass mit Hilfe einer Federwaage die Reibkraft bestimmt werden konnte. Aus der grossen Zahl der zur Verfügung stehenden Bürstensorten (Qualitäten) wurden zwei elektrographitierte Varianten ausgewählt, die sich in bezug auf Luftpolsterbildung sehr verschieden verhalten. Die Qualität A weist in den meisten Anwendungsfällen gute Stromverteilung auf, hat jedoch bei ungünstigen Bedingungen eine gewisse Neigung zur Ausbildung von hohen Reibwerten und infolgedessen zum Auftreten von Rattererscheinungen. Sie hat eine poröse Struktur, der Ohmsche Widerstand beträgt  $25 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Die Qualität B kann erfahrungsgemäss in der Praxis beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Faktoren bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten ungleichmässige Verschleisswerte aufweisen. Diese Sorte ist verhältnismässig dicht und hat einen Ohmschen Widerstand von etwa  $50 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Für die Vorbehandlung der Rotoroberfläche wurden folgende Mittel benutzt:

1. Kollektorschmirgelstein, handelsüblich, mit der Körnung 220 nach dem US-Standard SPR 118/50. Bei diesem Schmirgelstein weist das verwendete Korn einen Durchmesser von höchstens  $105 \mu\text{m}$  auf.
2. Feines handelsübliches Schmirgelpapier Nr. 600.



Die Rauheit wurde mit einem üblichen Rauhtester gemessen. Die Tastspitze hatte einen für den vorliegenden Zweck leider etwas grossen Radius von 12  $\mu\text{m}$ . Die Grenzwellenlänge betrug 1,5 mm.

#### 4. Versuche und Versuchsergebnisse

Bei der Stromdichte von 12 A/cm<sup>2</sup>, Wechselstrom 50 Hz, und einer Ringtemperatur von 100 °C wurde der Reibwert in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit ermittelt. Die Aufnahmezeit einer Kurve erstreckt sich über etwa 6 h, weil jeweils eine Messung nur nach einstündigem Lauf durchgeführt wurde. Die Ergebnisse sind in Fig. 2 bis 4 dargestellt.

Fig. 2 zeigt mit zwei Kurven den Einfluss der Rotoroberflächenrauheit bei Benutzung derselben Bürstenqualität (B) auf dem normalen Scheinkommutator. Im ersten Falle (a) war die Kollektoroberfläche mit einem Schmirgelstein, Körnung 220, vorbehandelt worden. Der Reibwert war normal. Die Kurve zeigt, dass der Reibwert mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v$  zunächst ansteigt. Vermutlich nimmt der Druck unter der Bürste infolge geringfügiger Spaltänderungen zunächst ab (siehe Fig. 7). Bisweilen kommt in diesem Geschwindigkeitsbereich auch eine fast horizontal verlaufende bzw. schwach fallende Reibwertkurve vor. Erst bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 45 m/s beginnt die fallende Tendenz der Kurve, die auf die Luftpolsterbildung zwischen Rotor und Bürste zurückzuführen ist. Die Vermutung wird gestützt durch die Tatsache, dass in diesen Fällen ein Überdruck unter der Bürste nachweisbar ist, wenn man ein Manometer an einer radial verlaufenden durchgehenden Bohrung in der Bürste anschliesst.

Bei der Kurve b wurden dieselben Bürsten auf den Ring gesetzt, nachdem dessen Oberfläche mit feinem Schmirgelpapier Nr. 600 geglättet worden war. Durch Luftpolsterbildung liegt schon bei kleiner Umfangsgeschwindigkeit fallende Ten-

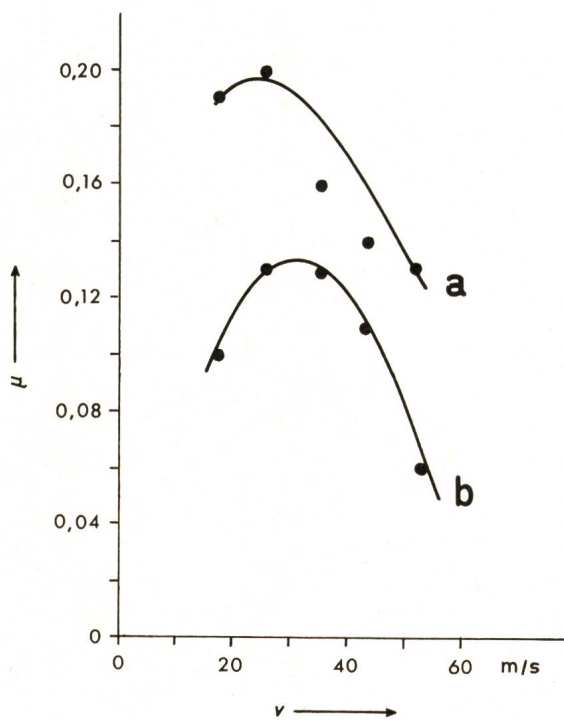


Fig. 3

Reibwert  $\mu$  in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit  $v$   
Einfluss der Bürstenrauheit

- a Bürstenqualität A
- b Bürstenqualität B
- Rotoroberfläche rau ( $R_a \approx 5 \mu\text{m}$ )

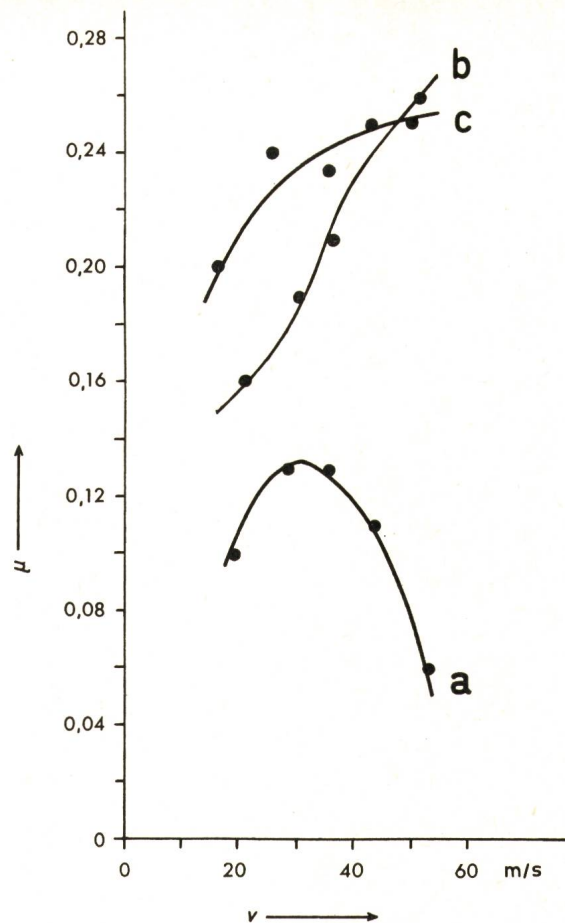


Fig. 4

Reibwert  $\mu$  in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit  $v$   
Einfluss der Rotoroberflächenstruktur  
Bürstenqualität B

- a Ring mit achsial verlaufenden Nuten (Scheinkommutator)
- b Ring mit achsial und spiralig verlaufenden Nuten (Kommutator mit Spiralnuten)
- c Ring mit achsial verlaufenden Nuten und gekordelter Oberfläche (Kommutator mit Kordelung)

denz vor. Feuern trat mit einer Bestückung von 2 Bürsten auf dem Ring schon bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 16 m/s auf. Bei 4 Bürsten lag die Feuergrenze bei etwa 20 m/s.

Aus Fig. 3 geht der Einfluss der Bürstenrauheit hervor. Beide Bürstensorten waren zunächst auf dem Ring eingelaufen, der normal mit Schmirgelstein Nr. 220 bei einer Stromdichte von 12 A/cm<sup>2</sup> und einer Ringtemperatur von 100 °C 7 Tage lang eingelaufen war. Kurve a gilt für die Qualität A und Kurve b für die Qualität B. In keinem Fall trat Feuern ein. Der Kurvenverlauf lässt jedoch den Schluss zu, dass bei einer Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit Qualität B früher zum Feuern kommen wird. Mit blossen Auge sind, abgesehen von dem Glanz, bei den beiden Bürstenaufläufen keine Differenzen festzustellen, die das unterschiedliche Reibungsverhalten klären könnten. Bei der Ermittlung der Rauheit ergaben sich jedoch Unterschiede, auf die später noch eingegangen wird.

Fig. 4 zeigt den Einfluss der Rotoroberflächenstruktur. Die Kurve a gilt für den normalen Scheinkommutator, Kurve b für den Scheinkommutator mit spiralig verlaufenden Nuten, und Kurve c für den Scheinkommutator mit gekordelter Oberfläche. In allen drei Fällen lief die Bürstenqualität B. Man erkennt, dass weder bei der Spiralnuten noch bei der Kordelung eine Reibwertverminderung durch Luftpolsterbildung eintrat.



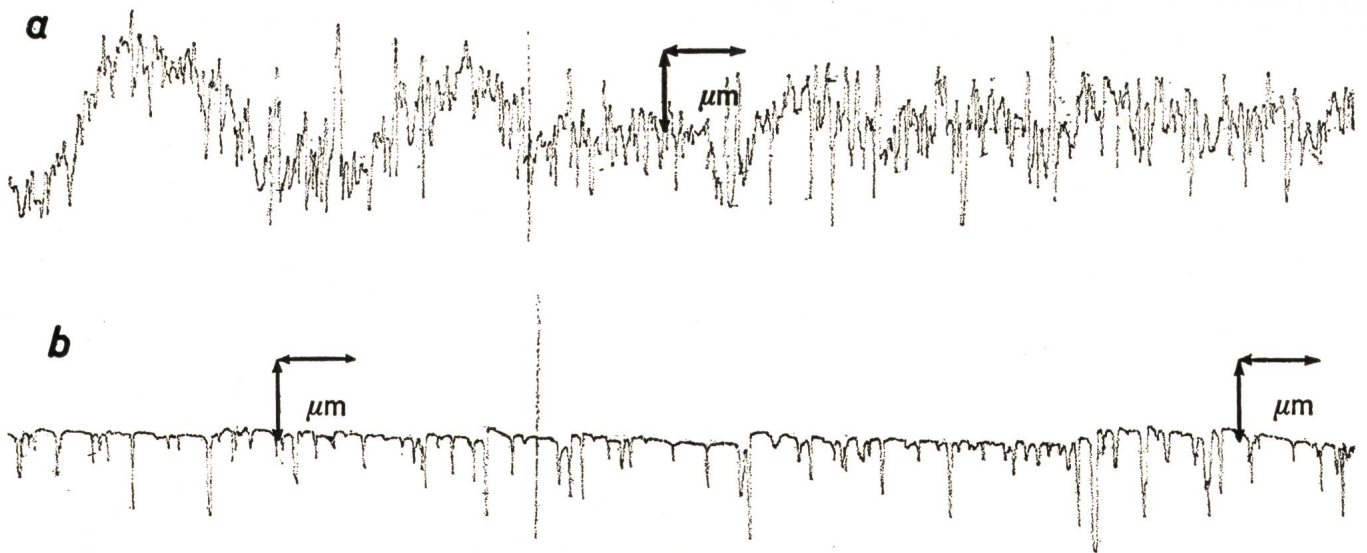


Fig. 5  
Rauheit der Oberfläche einer Kupferscheibe

*a* mit Schmirgelstein Körnung 220 vorbehandelt

*b* mit Schmirgelpapier Nr. 600 geglättet

10 mm  $\triangleq$  3  $\mu$ m, 10 mm  $\triangleq$  330  $\mu$ m

Die Verhältnisse bei *b* und *c* sind offenbar stabiler. Bei Bürsten, die von Haus aus einen hohen Reibwert aufweisen, kann jedoch die Gefahr des Ratterns durch das Anbringen von Nuten oder durch die Spiralnuten vergrößert werden. Erfahrungsgemäss muss man mit dem Eintreten von Rattern rechnen, wenn der Reibwert etwa den Wert von 0,5 überschreitet. Durch die Verhinderung der Luftpolsterbildung wird die wahre kontaktierende Gesamtfläche vergrößert. Dies wird weiterhin durch die Tatsache erhärtet, dass die Übergangsspannung immer den entgegengesetzten Verlauf hat. Bei wachsendem Reibwert sank der Kontaktwiderstand in allen Fällen.

##### 5. Versuche mit einer geklebten Zweischichtbürste

Wenn die schwach gekippte Bürste durch einen Luftkeil von dem Rotor abgehoben wird, so müsste das Kippen bei einer isoliert geklebten Zweischichtbürste nachweisbar sein. Bei Übergang von einwandfreier Kontaktierung zu Luftpolster-

bildung müsste der Strom in der anlaufenden Schicht früher abnehmen und zu 0 werden als in der ablaufenden Bürstenhälfte. In einigen Fällen konnte dies durch Versuche bestätigt werden. Bisweilen nahmen jedoch beide Teilströme durch Luftpolsterbildung gleichmässig ab. Daraus kann man entnehmen, dass sich nicht nur makroskopisch unter der Bürste als ganzem ein Luftkeil ausbildet, sondern dass sich die Gesamtwirkung aus einer Vielzahl von Einzeleffekten zusammensetzt, bei der jeweils nur sehr kleine Bezirke der Lauffläche wirksam werden.

Aus diesem Grunde reichen die makroskopisch gemessenen Werte für den Überdruck nicht aus, um die Bürste abzuheben. Bei den durchgeführten Versuchen wurde sogar einige Male Sog bei feuernder, nicht ratternder Bürste festgestellt. Allerdings konnte man in diesen Fällen bemerken, dass die Bürste durch Kippen zwei Laufflächen gebildet hatte. Die theoretisch abgeleiteten Gesetzmässigkeiten gelten natürlich auch für Verengungen im Bereich, der im allgemeinen durch die Rautiefe erfasst wird.

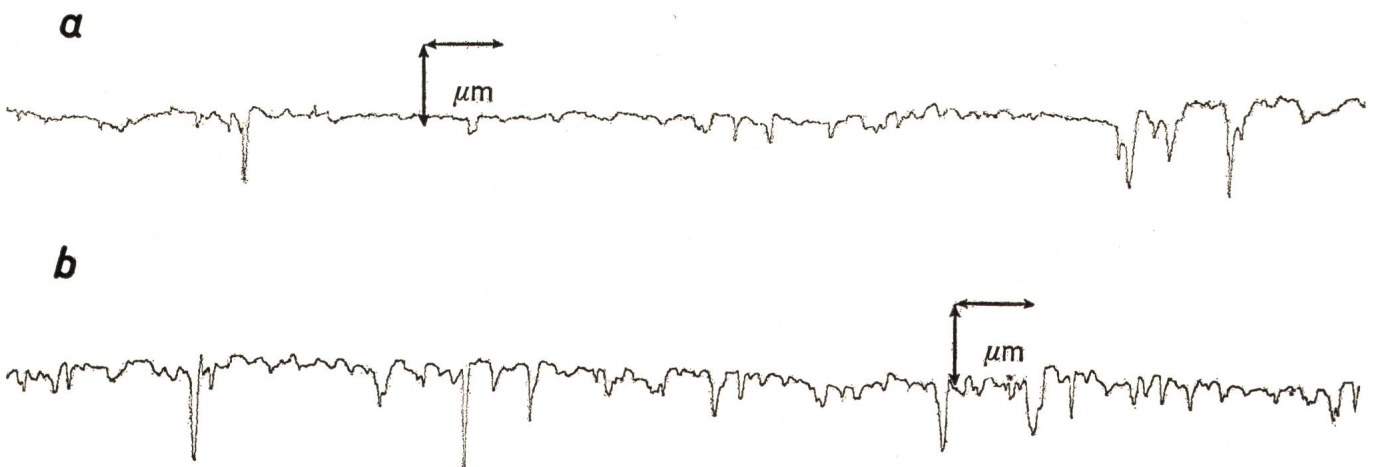


Fig. 6

Rauheit der Bürstenflächen bei Lauf auf derselben Patina

*a* Bürstenqualität B, niedriger Reibwert

*b* Bürstenqualität A, hoher Reibwert

## 6. Rauheit der Rotor- und Bürstengleitfläche

Fig. 5 zeigt die Rauheit einer hartgeschmiedeten Elektrolytkupferscheibe nach Behandlung mit dem Schmirgelstein, Körnung 220 (Kurve *a*) und nach Glättung mit Schmirgelpapier Nr. 600 (Kurve *b*). Bei der Aufnahme der Diagramme wurde der Taststift des Rauhtesters senkrecht zur tangentialen Bürstenrichtung bewegt.

Aus diesen und anderen hier nicht dargestellten Diagrammen kann man schliessen, dass eine Rauhtiefe des Rotors von 3...6 µm und einer Rillenbreite von etwa 50 µm und mehr notwendig sind, um einwandfreien Bürstenlauf auch bei empfindlichen Bürstenqualitäten zu gewährleisten.

Fig. 6 stellt die Rauheit von Bürstenaufläufen dar, und zwar Kurve *a* für die Bürstenqualität B und Kurve *b* für die Bürstenqualität A. Bei Lauf auf derselben Patina wies Qualität A ein einwandfreies Laufverhalten auf, während die früher eingelaufene Qualität B nach Auswechseln mit Qualität A stark feuerte und eine mit der Umfangsgeschwindigkeit stark fallende Reibungscharakteristik zeigte. Die Reibungskurve der Qualität A verlief in diesem Falle schwach steigend. Um guten Kohlebürstenlauf auch auf relativ glatten Rotoroberflächen zu erzielen, muss also die Rauhtiefe der Bürstengleitfläche mindestens etwa 3 µm und die Riefen und Rillenbreite etwa 50 µm und mehr betragen.

Der Ring war vor dem Versuch mit Schmirgelstein Nr. 220 behandelt worden, und anschliessend war eine Patina bei der Stromdichte von 12 A/cm<sup>2</sup> und der Ringtemperatur von 100 °C in zweistündigem Lauf gebildet worden. Der arithmetische Mittelwert der Rauhtiefe betrug also einige µm.

## 7. Theoretische Grundlagen

Bei der theoretischen Behandlung des Problems kann man von Gleichungen ausgehen, die für die Berechnung von Gleitlagern erarbeitet wurden [3; 4; 5; 6]. Bei ausreichend hoher Geschwindigkeit bildet sich ein Schmierkeil aus, bei dem der Druck von der *x*-Koordinate abhängt. An der anlaufenden Kante ist der Überdruck  $p = 0$  und erreicht zwischen Mitte des Körpers und ablaufender Kante ein Maximum. Vereinfachend wird angenommen, dass sich ein flacher Körper mit der Geschwindigkeit  $v$  relativ zu der darüberstehenden Bürste bewegt. Bürstenaufläuf- und Rotoroberfläche verlaufen nicht parallel. Dies kommt in der Praxis vor, weil der Bürstenradius meist grösser als der Rotorradius ist, oder weil die Bürste geringfügig gekippt ist. Unterhalb der Bürste bildet sich dann eine Strömung und ein Überdruck aus, der die Bürste vom Rotor abzuheben sucht. Nimmt man ausserdem an, dass die Strömung laminar ist, dass weiterhin der Überdruck  $p$  des strömenden Mediums nur von  $x$  und nicht auch noch von den Koordinaten  $y$  und  $z$  abhängt, und werden die Massenkraft des flüssigen bzw. gasförmigen Mediums vernachlässigt, so kann man für das Druckgefälle schreiben:

$$\frac{dp}{dx} = 6 \eta v \frac{h - h_b}{h^3} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- $p$  der statische Überdruck
- $\eta$  dynamische Zähigkeit
- $v$  Umfangsgeschwindigkeit des Rotors

Für  $h$  kann man schreiben:

$$h = h_b + \gamma (b - x) \quad (2)$$

wobei  $\gamma = \frac{h_0 - h_b}{b}$  ist.

Nimmt man an, dass bei der anlaufenden Bürstenkante  $p = 0$  und bei der ablaufenden Kante  $\frac{dp}{dx} = 0$  ist, so lautet der Ausdruck für den maximalen Druck:

$$p_m = 6 \eta v \frac{1}{2 \gamma h_b} - \frac{2 (h_b + \gamma b) - h_b}{2 \gamma (h_b + \gamma b)^2} = 6 \eta v \bar{p} \quad (3)$$

Berechnet man weiterhin  $p$  als Funktion von  $x$ , so erkennt man, dass der mittlere Druck schätzungsweise etwa halb so gross ist wie der Maximaldruck. Wertet man Gl. (3) aus, so ergeben sich für den reduzierten Überdruck  $\bar{p}$  die Kurven der Fig. 7.

Man erkennt, dass bei ideal glatten Flächen und sehr kleiner Spaltweite der Druck beliebig gross werden kann. Setzt man, um ein überschlägliches Ergebnis zu erhalten, für die Zähigkeit der Luft den Wert  $\eta = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ p} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$  (gültig für 100 °C) ein, so erhält man für  $p = 6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}$  und bei einer Umfangs-

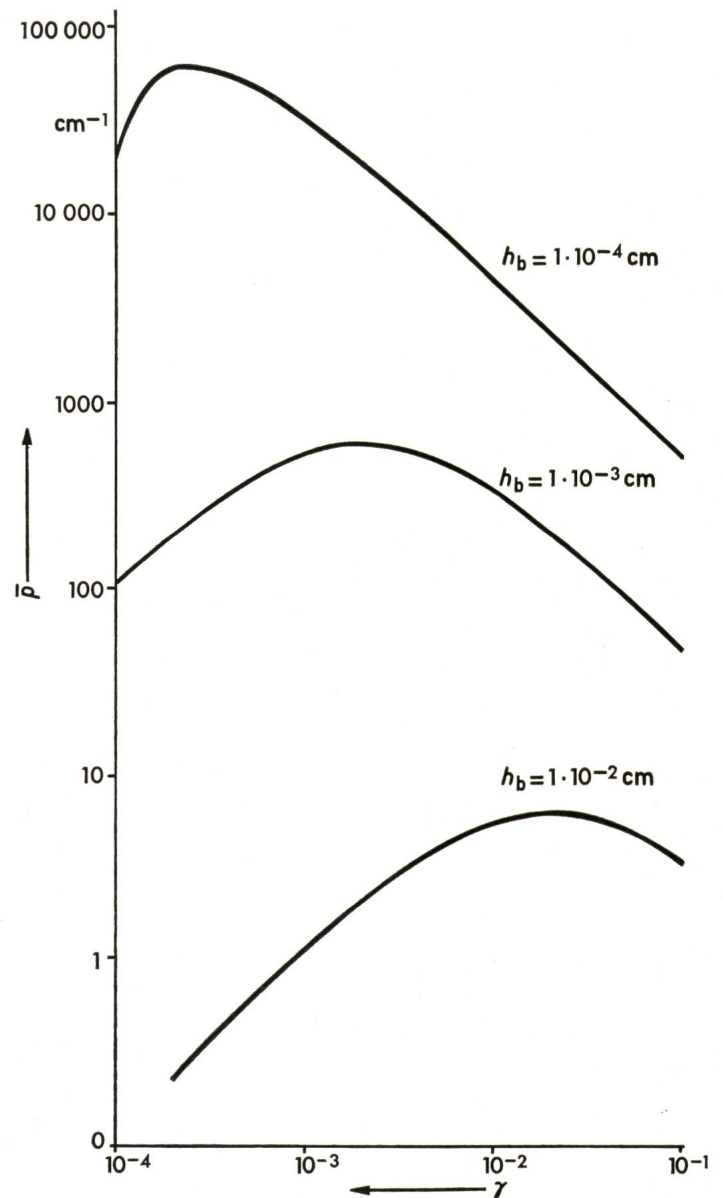


Fig. 7  
Reduzierter Überdruck  $\bar{p}$  unter der Bürste in Abhängigkeit des Keilwinkels  $\gamma$



geschwindigkeit von  $v = 40 \text{ m/s}$  den Überdruck  $p_{\max} = 3,17 \cdot 10^4 \text{ p/cm}^2$ . Die oben durchgeführte Berechnungsweise ist natürlich auch für mikroskopisch kleine Flächenbereiche gültig.

Bei den vorhergehenden Berechnungen wurde der Einfluss der Kommutatornuten vernachlässigt. Die Nuten wirken vermindernd auf den entstehenden Druck. Wie die Praxis lehrt, kann trotzdem eine mechanische Kontaktlockerung bzw. Trennung eintreten. Dies ist also der Fall, wenn die Rauhtiefe der Laufflächen einen gewissen Grenzwert unterschreitet.

Abgesehen von dieser Keilwirkung kann die Tendenz zum Abheben der Bürste verstärkt werden, wenn diese nur mit sehr wenig Punkten in mechanischem Kontakt mit dem Rotor steht. Die Strommengen werden in diesem Falle durch die elektrische Belastung stark erhitzt. Im Extremfall glühen die Spitzen auf und verursachen das charakteristische Spritzfeuer. Diese Erhitzung hat zur Folge, dass die Luft in der Nähe der Kontakt-

spitzen ebenfalls stark erwärmt wird und so zu einer zusätzlichen Drucksteigerung beiträgt, bei der eine Keilwirkung nicht notwendig ist.

#### Literatur

- [1] *A. Schwab*: Die hydrodynamischen Wirkungen unter den Laufflächen von Kohlebürsten und ihre Bedeutung für den Gleitkontakt. Dissertation der Technischen Hochschule Graz 1957.
- [2] *I. W. Stanley*: Aerodynamische Schichten zwischen Kohlebürsten und Schleifringen. Ingenieur-Digest 2(1963)5, S. 33...39.
- [3] *G. Vogelpohl*: Beiträge zur Kenntnis der Gleitlagerreibung. VDI-Forschungsheft 386, 1937.
- [4] *E. Schmid und R. Weber*: Gleitlager. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1953.
- [5] *R. Holm*: Electric contacts. Theory and application. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1967.
- [6] *H. Sassenfeld und A. Walther*: Gleitlagerberechnungen. VDI-Forschungsheft 441, 1954.

#### Adresse des Autors:

Willy Volkmann, Dipl.-Ing., Schunk & Ebc GmbH., Postfach 308, D-63 Gießen.

## EXACT (International Exchange of Authenticated Electronic Component Performance Test Data)

Sitzung des Council vom 26. bis 28. März 1973 in Stockholm

Der EXACT Council trat in Stockholm vom 26. bis 28. März 1973 zu einer ausserordentlichen Sitzung zusammen, um über die Möglichkeit eines Austausches von Resultaten von Prüfungen elektronischer Bauelemente zwischen der internationalen EXACT-Organisation (International Exchange of Authenticated Electronic Component Performance Test Data) und der amerikanischen GIDEP-Organisation (Government-Industry Data Exchange Program) zu beraten. Die Verhandlungen wurden vom EXACT-Präsidenten, T. Gussing (Schweden), geleitet. Von EXACT war je 1 Delegierter folgender Mitgliedsländer anwesend: Belgien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Israel, Norwegen, Österreich, Schweden, Schweiz, sowie 2 Delegierte von ESRO (European Space Research Organization). Die GIDEP-Delegation stand unter der Leitung von Captain E. Clausner, US Navy, Navy Material Command, Washington D. C.

Im wesentlichen wurden folgende Vereinbarungen getroffen:

a) EXACT stellt GIDEP je einen Satz der monatlich veröffentlichten Prüfberichte zur Verfügung (zurzeit durchschnittlich 40 Prüfberichte pro Monat). GIDEP ist berechtigt, diese Prüfberichte zu kopieren und an seine Mitglieder (ca. 300) zu verteilen. Als Gegenleistung wird GIDEP der EXACT-Organisation monatlich je ca. 200 Prüfberichte aus dem Kreise seiner Mitglieder zustellen, die aber vorderhand auf Berichte mit positiven

Resultaten beschränkt sein werden oder auf solche, für die der Bauelementehersteller die Bewilligung zur Zirkulation innerhalb EXACT erteilt hat.

b) EXACT wird die Titel der von GIDEP erhaltenen Prüfberichte allen seinen Mitgliedern periodisch bekanntgeben, so dass diese je nach ihrem Bedürfnis Kopien derselben gegen Bezahlung beim EXACT-Generalsekretariat bestellen können. Nationale Teilnehmer am EXACT-Programm, die eine automatische Belieferung aller bei EXACT eingetroffenen GIDEP-Berichte wünschen, können dieselben über ihr Nationalzentrum (im Falle der Schweiz beim Technischen Sekretariat des SEV) abonnieren.

c) Die beiden Partner werden laufend ihre Statuten, Ausführungsrichtlinien, Sitzungsberichte usw. gegenseitig austauschen. Jeder Partner erhält überdies das Recht, an die Council-Sitzungen der anderen Organisation eine Delegation zu entsenden.

d) GIDEP wird vor der Aufnahme eines neuen Mitgliedandes in die EXACT-Organisation orientiert und kann dazu auch Stellung nehmen.

e) Die gegenseitige Vereinbarung tritt nach der Ratifizierung des Vertrages durch die Mitglieder der beiden Organisationen in Kraft und kann beidseitig unter Einhaltung einer Frist von 12 Monaten gekündigt werden.

E. Ganz