

Technische Information

Kohlebürsten und Mathematik

Kohlebürsten bzw. ihre Eigenschaften im wahrsten Sinne des Wortes sind unberechenbar. Kalkulierbar sind aber einige Parameter, die mit dem Bürstenlaufverhalten in engem Zusammenhang stehen.

Unter der etwas provokativen Überschrift "Kohlebürsten und Mathematik" sollen in dieser technischen Information einige wichtige, berechenbare Faktoren im Zusammenhang mit dem Kohlebürstenlauf erläutern.

Im Anhang haben wir die wichtigsten Formeln mit erklärenden Beispielen zusammengefasst.

1. Spezifische Stromdichte

Der zu übertragende Strom bzw. die spezifischen Stromdichte ist einer der maßgebenden Parameter beim Laufverhalten von Kohlebürsten. Für jede Werkstoffklasse gelten optimale Lastbereiche in denen die jeweiligen Kohlebürstenwerkstoffe ihr bestes Laufverhalten zeigen. Unter- bzw. Überlast haben meist negative Auswirkungen auf Verschleiß, Filmbildung, Kollektorzustand etc.

Daher ist es wichtig, die Stromdichte anhand der Belastungsdaten ermitteln zu können.

Im Rahmen dieser Information sollen nicht die physikalischen Zusammenhänge der Gleichstrommaschinen bzw. der Asynchron- oder Synchron-Schleifringläufer aufgerollt werden.

Daher zur Berechnung der Stromdichte nur die folgende generelle Anmerkung:

Da der Strom einmal in den Kommutator hinein, zum anderen aus ihm wieder herausfließt, kann in der Formel für die spezifische Stromdichte auf einer Gleichstrommaschine nur die halbe Bürstenzahl eingesetzt werden. Entsprechend werden bei DC- belasteten Schleifringen nur die Bürsten einer Polarität oder bei AC-belasteten Schleifringen nur die Bürsten einer Phase berücksichtigt.

Technische Information

Beispiele:

Kommutatormaschine:

- 4 polig à 2 Bürsten, d.h. 2 x 2 Bürsten mit (+) Polarität und 2 x 2 Bürsten mit (-) Polarität. Zur Berechnung der Stromdichte werden nur 4 Bürsten herangezogen.
- 6 polig à 5 Kohlebürsten, d.h. 3 x 5 Bürsten mit (+) Polarität, und 3 x 5 Bürsten mit (-) Polarität. Gerechnet wird mit 15 Kohlebürsten.

Schleifring-Läufer:

- 3 Phasen, pro Phase ein Schleifring à 5 Kohlebürsten. Die Berechnung der Stromdichte wird für 5 Kohlebürsten durchgeführt.

Die Stromdichte wird ausgedrückt als "Strom pro Bürstenfläche", d.h. A pro cm² (A/cm²). Sie läßt sich dann mit den anliegend erläuterten Formeln errechnen.

Für die einzelnen Werkstoffklassen gelten folgende Richtwerte. Details können auch dem Schunk - Katalog 10.21 entnommen werden.

Werkstoffklasse	min. Dauerstromdichte A/cm ²	opt. Dauerstromdichte A/cm ²	max. Dauerstromdichte A/cm ²	kurzzeitige Überlast A/cm ²
metallhaltig (30 – 75%)	12	15 – 20	25	50
metallhaltig (über 75%)	15	25 – 30	35	50
Elektrographit	4	10 – 12	16	30
harzgebundene Graphite	1	6 – 8	10	14
pechgebundene Graphite	3	6 – 8	10	12

Technische Information

Die Anzahl der Kohlebürsten sollte, wenn möglich, so angepasst werden, dass die Stromdichten im Bereich der oben genannten optimalen Werte liegen. Dann liegen aufgrund der elektrischen Verluste, Reibwerte und Kollektortemperatur positive Rahmenbedingungen für das Kohlebürstenlaufverhalten vor.

2. Umfangsgeschwindigkeit

Die Umfangsgeschwindigkeit auf Gleichstrommaschinen liegt zumeist in einem Bereich, der für die gängigen Kohlebürstenwerkstoffe unkritisch ist. Nur auf sogenannten Schnellläufern, wie sie z. B. auf Prüfständen in der Automobilindustrie eingesetzt werden und auf denen Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 60m/s vorliegen, sind von der Werkstoff- und Ausführungsseite Anpassungsmaßnahmen notwendig.

Auf Schleifringen sind hingegen die Geschwindigkeiten ein maßgeblicher Aspekt bei der Auswahl von Werkstoffen und Ausführungen. Generell sollten bei Geschwindigkeiten über 50m/s nur "schwarze" Werkstoffe eingesetzt werden. Die Werkstoffklasse richtet sich nach der vorliegenden elektrischen Auslastung. Laufflächenschlitze zur Vermeidung aerodynamischer Effekte wirken sich positiv aus. Dieses Ausführungsdetail wird in der Regel auch bei metallhaltigen Werkstoffen und Umfangsgeschwindigkeiten ab 25m/s vorgesehen.

3. Elektrische und mechanische Verluste

Die Erwärmung der elektrischen Antriebe wird durch die bereits erwähnten elektrischen Verluste und die mechanischen Verluste bestimmt. Große Bedeutung haben diese Zusammenhänge z. B. bei den Niederspannungsmotoren im Flurförderbereich. Dort kommt es darauf an, die Batteriespannung optimal in Motorleistung umzusetzen und besonders die elektrischen Verluste gering zu halten. Aktuell ist für uns die Berechnung der Verluste bei den Kohle/Kohle-Schleifringeinheiten für Windkraftgeneratoren von Bedeutung.

Die mechanischen Verluste hängen direkt vom Anpressdruck, der Umfangsgeschwindigkeit und dem Reibungskoeffizient ab. D.h. die Änderung eines dieser Faktoren wirkt sich direkt auf die Höhe der Verlust aus. Der Reibungskoeffizient ist selbst abhängig vom Anpress-

Technische Information

druck. Im allgemeinen steigt er mit dem Druck an. Eine Verdopplung des Anpressdruckes hat deshalb eine mehr als zweifache Erhöhung der mechanischen Verlustleistung zur Folge. Bei dem aktuellen Beispiel der Windkraftgeneratoren, bei denen übermäßige Erwärmung große Probleme aufwirft, konnte die Erwärmung z. B. durch Werkstoffe mit niedrigerem Reibungskoeffizient und niedrigerer Übergangsspannung positiv beeinflusst werden.

4. S – Faktor

Der S-Faktor gibt eine Information über die Wärme, die an der Kommutator oder Schleifring-Oberfläche abgestrahlt werden kann. In die Berechnung gehen keine Werte der Kohlebürste ein. Je kleiner der S-Faktor, desto größer die Gefahr der Überhitzung. Der S-Faktor wird gewöhnlich bei der Werkstoffauswahl für DC Motoren nicht berücksichtigt, da dort wichtigere Parameter wie Kommutierungsfähigkeit oder Stromverteilung eine bedeutendere Rolle spielen.

Für verschiedene Motortypen gelten folgende Grenzwerte für den S-Faktor:

Motorart	Belüftet	Geschlossen
<u>DC Motoren</u>		
Große DC Motoren über 250kW	3,5 – 5	5 - 7
Kleine DC Maschinen 1 – 250kW	6 – 10	9 – 12
<u>Schleifringläufer</u>		
Bronze Ringe	0,5 – 2	1 – 3
Stahl Ringe	1 – 3	2 - 4

Die nächste Tabelle enthält Grenzwerte des S-Faktors für einige Werkstoffklassen für Schleifringe.

Motorart	Belüftet	Geschlossen
Elektro-Graohite	>1	>1,2
Metallhaltige Werkstoffe (40-50%)	0,9	1,1
Metallhaltige Werkstoffe (60-70%)	0,5 – 0,8	0,7 - 1
Metallhaltige Werkstoffe (>85%)	0,4	0,6

Technische Information

5. Speziell für Schleifring-Läufer

Eine wesentliche Einflussgröße für Schleifring-Läufer Motoren ist die Wärmeabfuhr der elektrischen und mechanischen Verluste.

Daher müssen zwei weitere Parameter berücksichtigt werden, um eine möglichst präzise Idee darüber zu bekommen, wie bei einer bestimmten Bürstenanordnung die Verluste abgeführt werden können.

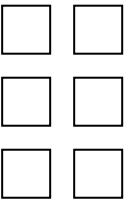

Das Konzept des Überdeckungsverhältnisses ist eine Ergänzung zu dem S-Faktor und beide Faktoren sind untrennbar miteinander verbunden.

Wenn der S-Faktor zu klein, d.h. kleiner als 0,4 ist, braucht man keine weiteren Berechnungen um zu realisieren, dass dann kein Bürstenwerkstoff vernünftig funktioniert. Dann müsste also das Schleifring-Design überdacht werden.

Wenn der S-Faktor innerhalb der angegebenen Grenzwerte liegt, muss dennoch die Anordnung der Bürsten definiert werden, um optimal Patinierung und einwandfreies Kohlebürstenlaufverhalten zu erhalten.

5.1. Tangentiale Überdeckung F_p

Dieser Wert ist das Verhältnis aus Schleifringlänge, die von Kohlebürsten bedeckt ist und Schleifring-Umfang.

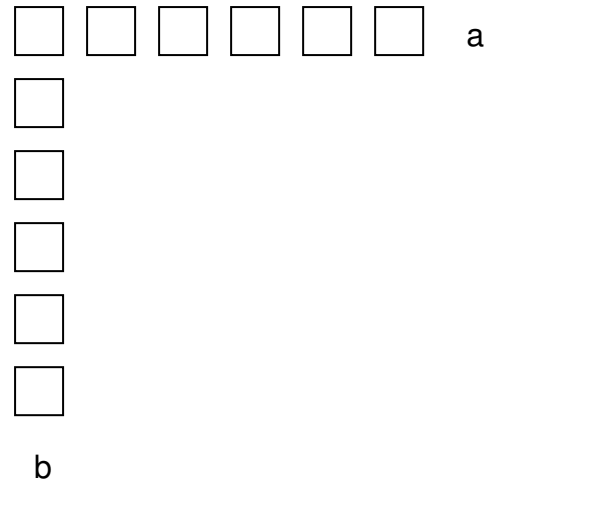
		<p><i>Beispiel: 6 Bürsten / Ring</i> <i>t-Maß = 40mm</i> <i>Durchmesser 300mm</i> Optimal wäre es, die Bürsten in zwei Bahnen anzuordnen. Dann wird der S-Faktor größer (breiterer Schleifring) und die tangentielle Überdeckung wird kleiner</p>
$F_p = \frac{3 * 40}{\pi * 300}$	$F_p = \frac{6 * 40}{\pi * 300}$	

Technische Information

= 12,7%	= 25,7%	
---------	---------	--

5.2 Gesamte Überdeckung F_g

Dieses Verhältnis definiert die von Kohlebürsten bedeckte Fläche des Schleifringes, im Verhältnis zur gesamten Schleifringoberfläche

 <p>a</p> <p>b</p>	<p><i>Beispiel:</i></p> <p>Anzahl der Bürsten $q = 6$ Durchmesser $D: 300\text{mm}$ Breite $W: 100\text{mm}$ t-Maß 40mm a-Maß 20mm</p> $F_g = \frac{6 * 40 * 20}{\pi * 300 * 100} = 4,2\%$
--	---

Erfahrungswerte:

- $F_p < 15\%$ ist optimal
- Bei Werten von F_p zwischen 15% und 20% können erhöhte Oberflächentemperaturen auftreten
- Bei $F_p > 20\%$ sind größere Bürstenprobleme zu erwarten
- Das gleiche gilt für $F_g > 15\%$

Diese Richtwerte sind besonders wichtig für das Design von Maschinen mit Schleifringen. In der Praxis ist eine Änderung später kaum noch möglich.

Technische Information

Formel	Beispiel
<p>Spez. Stromdichte Schleifringe</p> $S = \frac{I}{N \times t \times a}$ <p>A = Stromstärke [A] N = Anzahl Kohlebürsten t = tangenciales Maß [cm] a = axiales Maß [cm]</p>	<p>Turbogenerator 1000A – 2 Ringe a 10 KB's , d.h. Berechnung mit 10 Bürsten – 32 x 32 x 64mm³</p> $\frac{1000A}{10 \times 3.2cm \times 3.2cm} = 9.7A / cm^2$ <p>Asynchron-Schleifringläufer 500A . 3 Ringe a 5 KB's, d.h. Berechnung mit 5 Bürsten – 40 x 20 x 40 mm³</p> $\frac{500A}{5 \times 4cm \times 2cm} = 12.5A / cm^2$
<p>Spez. Stromdichte DC Maschinen</p> $S = \frac{I}{(N / 2) \times t \times a}$ <p>I = Stromstärke [A] N = Anzahl Kohlebürsten (gesamter Motor) t = tangenciales Maß [cm] a = axiales Maß [cm]</p>	<p>1000 A – 6 polig a 5 KB's, d.h. 30 Bürsten, d.h. Berechnung mit 15 Bürsten 20 x 32 x 50 mm³</p> $\frac{1000A}{15 \times 2cm \times 3.2cm} = 10.4A / cm^2$ <p>1000A – 4 polig a 5 Tandembürsten , d.h. 20 Bürsten, Berechnung mit 10 Bürsten 12,5 x 32 x 50mm³ Tandembürsten, d.h. das Gesamt t-Maß ist 25mm</p> $\frac{1000A}{10 \times 2,5cm \times 3,2cm} = 12.5A / cm^2$

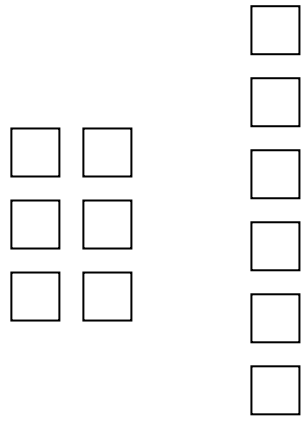
Technische Information

Formel	Beispiel
Umfangsgeschwindigkeit	
$v = \frac{\pi \times d}{1000} \times \frac{n}{60}$ <p>d = Durchmesser [mm] n = Drehzahl [U/min] π = Kreiszahl = 3,14</p>	<p>350mm Durchmesser – 1500 Umdrehungen/min</p> $\frac{3.14 \times 350mm}{1000} \times \frac{1500 \text{ min}^{-1}}{60} = 27.5m / sec$
Mechanische Verluste	
$V_m = \frac{\mu \times N \times t \times a \times p}{10000} \times v$ <p>μ = Reibungskoeffizient N = Anzahl der Bürsten (gesamter Motor) t = tangentiales Maß [mm] a = axiales Maß [mm] p = spezifischer Druck [cN/cm²] v = Umfangsgeschwindigkeit [m/sec]</p>	<p>E101 . Reibungskoeffizient 0,11 – 4 polig a 3 KB's 16 x 25 x 50mm³ - 180cN/cm² - 350mm Durchmesser - 1500 Upm</p> $\frac{0,11 \times 12 \times 16mm \times 25mm \times 180cN / cm^2}{100000}$ $\times 27,5m / s = 26 \frac{Nm}{s} = 260W$
Elektrische Verluste DC Maschine	
$V_e = 2 \times I \times U_{\bar{u}}$ <p>I = Stromstärke [A] U_{\bar{u}} = Übergangsspannung pro Bürste [V]</p>	<p>Strom 230A - E101 Übergangsspannung pro Bürste 1.25V</p> $V_e = 2 \times 230A \times 1.25V = 535W$

Technische Information

Elektrische Verluste Schleifringläufer	
$V_e = I \times U_{\bar{u}}$	Strom 230A A12S – Übergangsspannung pro Bürste 0,6V $V_e = 230 \text{ A} \times 0,6 \text{ V} = 138 \text{ W}$
Gesamte Verluste	
$V_t = V_m + V_e$	Obige Beispiele für DC Maschinen $V_t = 261 \text{ W} + 535 \text{ W} \approx 800 \text{ W}$
Bürstendruck	
$p = \frac{P}{t \times a}$ <p>P = gemessener Druck [cN] t = tangenciales Bürstenmaß cm a = axiales Bürstenmaß [cm] a = axiales Maß [cm] p = spezifischer Bürstendruck in cN/cm²</p>	<p>Gemessener Druck 2,5N Bürstenabmessungen 20 x 32 x 50mm³</p> $p = \frac{2500}{2,0 \times 3,2} \text{ cN/cm}^2$ <p>= 390 cN/cm²</p>
S-Faktor	
$S = \frac{\pi * D * W}{I}$ <p>D = Schleifring -/Kommutatordurchmesser [cm] W = Breite des Ringes [cm] I = Stromstärke pro Schleifring [A]</p>	<p>Durchmesser: 150mm Breite: 50mm Strom: 1000A</p> $S = \frac{3,14 * 15 * 5}{1000}$ <p>= $\frac{235,5}{1000} = 0,23$</p>

Technische Information

Tangentiale Überdeckung F_p	
$F_p = \frac{c * t}{\pi * D}$ <p> C = Anzahl der Bürsten hintereinander entlang des Umfanges t = tangentiales Bürstenmaß D = Durchmesser </p>	 <p style="margin-top: 10px;"> $C = 3$ $c = 6$ </p> <p style="margin-top: 10px;"> Durchmesser : 300mm t-Maß 40mm </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> $F_p = \frac{3 * 40}{\pi * 300}$ $= 12,7\%$ </div> <div style="text-align: center;"> $F_p = \frac{6 * 40}{\pi * 300}$ $= 25,7\%$ </div> </div>

Technische Information

Gesamte Überdeckung Fg	
$F_g = \frac{q * t * a}{\pi * D * W}$ <p>q = Anzahl der Bürsten t,a = Bürstenabmessungen D = Schleifringdurchmesse W = Schleifringbreite</p>	<div style="text-align: right;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> a </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <input type="checkbox"/> </div> <p style="text-align: center;">b</p> <p>Anzahl der Bürsten q = 6 Durchmesser D: 300mm Breite W: 100mm t-Maß 40mm a-Maß 20mm</p> <p>a) $F_g = \frac{6 * 40 * 20}{\pi * 300 * 100} = 5,1\%$</p> <p style="margin-left: 40px;">Fp = 4,2%</p> <p>b) Fg = 5,1 %</p> <p style="margin-left: 40px;">Fp = 25,5%</p>