

Ahotondji Tomi Hermann Houenouvo

## Analyse und Diagnose von Mikro- bürstenfeuern bei der Stromübertragung in doppelt gespeisenden Drehstrom- Asynchrongeneratoren



Technische Universität Dresden

**Analyse und Diagnose von Mikrobürstenfeuern bei  
der Stromübertragung in doppelt gespeisenden  
Drehstrom- Asynchrongeneratoren**

**Ahotondji Tomi Hermann Houenouvo**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität  
Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieur**

(Dr.-Ing)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Marschner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hofmann

Prof. Dr.-Ing. Berger

Tag der Einreichung: 21.11.2016

Tag der Verteidigung: 23.06.2017



Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und  
Antrieben

Band 13

**Ahotondji Tomi Hermann Houenouvo**

**Analyse und Diagnose von Mikrobürstenfeuern bei  
der Stromübertragung in doppelt gespeisenden Dreh-  
strom-Asynchrongeneratoren**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5655-6

ISSN 1869-8190

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter angefertigt wurde. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die folgenden Veröffentlichungen [72–75] sind im Rahmen meiner Arbeit entstanden, in welche auch Aufzüge aus dieser Arbeit eingeflossen sind. Für die Veröffentlichung [74] wurde der *“Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award”* verliehen.

Bei der Korrektur des Manuskriptes erhalte ich die Unterstützung von Herrn Prof. Dr. Wilfried Hofmann, Prof. Dr.-Ing. Frank Berger und meinem Kollegen Jörg Schützhold. Die Vorarbeit zur Hardware- und Softwareentwicklung wurden von Herrn Dipl.-Ing Robert Jensch und Dipl.-Ing Xianda Wang unter meiner Betreuung angefertigt. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung dieser Arbeit nicht beteiligt.

Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Dokortitels führen kann.

Dresden, den 21. November 2016

A. T. Hermann Houenouvo

---

## Danksagung

Diese vorliegende Dissertation entstand nach vielen Jahren intensiver Arbeit während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Elektrische Maschinen und Antriebe an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden in den Jahren 2010 bis 2014.

Sehr herzlich möchte ich mich bedanken bei meinem ersten Gutachter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, für die Möglichkeit der Anfertigung und die Betreuung meiner Doktorarbeit, die Förderung meiner wissenschaftlichen Entwicklung und die menschliche Unterstützung während meiner Tätigkeit an seinem Lehrstuhl sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Ebenso bedanke ich mich bei meinem zweiten Gutachter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Berger, Leiter des Fachgebiets Elektrische Geräte und Anlagen am Institut für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik an der Universität Ilmenau für die Übernahme sowie die schnelle und wohlwollende Anfertigung des Koreferats und seine wertvollen Anregungen und Hinweise zu dieser Arbeit.

Großer Dank gilt auch allen gegenwärtigen und ehemaligen Kollegen an der Professur Elektrische Maschinen und Antriebe, die durch ihre fachlichen Diskussionen und wertvollen Ratschläge, aber insbesondere auch durch ihre stete Hilfsbereitschaft und freundschaftliche Zusammenarbeit und Unterstützung ein äußerst angenehmes Arbeitsklima geschaffen und damit zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben. Außerdem möchte ich mich bei meinen Studenten bedanken, die einen Beitrag zur Anfertigung dieser Arbeit geleistet haben.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich insbesondere meiner Frau Scolastica Wangari Houenouvo, meinen beiden Töchtern Adenola Pendo und Maleah Mahoussi sowie meiner ganzen Familie sowohl in Deutschland als auch in Benin sagen, die für mich nicht nur während der Promotion großer Rückhalt und wichtige Unterstützung waren.

---

## Kurzfassung

Die in der Windbranche dominierenden Asynchron-Schleifringläufermaschinen besitzen Schleifringssysteme, die zur Stromübertragung auf den Rotor verschleißbehaftete Komponenten eingesetzt werden. Die Forderung nach höheren Standzeiten bis zu 5 Jahren wird sich durch die zukünftige offshore Anwendung stellen und könnte sich durch Graphit-Graphit-Gleitkontakte erfüllen lassen. Die Verschleißmechanismen, die durch das komplexe Zusammenwirken von mechanischer und elektrischer Beanspruchung entstehen, werden von sogenannten Mikro- oder Makrobürstenfeuern beeinflusst, die zu einem frühzeitigen Ausfall des Schleifringsystems beitragen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden grundlegende theoretische Erkenntnisse zur Entstehung und Entwicklung von Mikro- zu Makrobürstenfeuern an Schleifringssystemen gewonnen. Aufgrund der komplexen Beanspruchungen in der elektrischen Kontaktmechanik wurden anhand von numerischen Simulationen die Zusammenhänge zwischen den elektrischen, mechanischen, thermischen und magnetischen Größen analysiert. Zur Verifizierung der Feldmodelle wurde ein komplexer Versuchsstand basierend auf online arbeitenden Verhaltensmodellen entwickelt. Dabei wurden die theoretischen Ergebnisse mit den praktischen Messungen verglichen. Die Auswertung der zeitlichen Untersuchungen zeigt, dass sowohl die berechnete Kontaktkraft im Kontaktbereich, die Umfangsgeschwindigkeit des Schleifrings, die im Versuchsraum herrschende Luftfeuchtigkeit als auch die Rundlaufabweichung wichtige Beiträge bei der Entstehung von Mikro- und Makrobürstenfeuern leisten. Es wurde festgestellt, dass die ermittelten Reibungskoeffizienten im Grenzbereich der Mischreibung liegen. Dabei entstehen zusätzliche Reibungskräfte (elasto-hydrodynamische Kräfte), wobei deren Größenordnung nicht bekannt ist. Es wurde festgestellt, dass das Übertragungsverhalten durch steigende Kontakttemperatur aufgrund der Reibung und der Rauheit der Kontaktflächen beeinflusst wird. Mit Hilfe der entwickelten Diagnosesoftware war es möglich, unter Betrachtung von zwei wichtigen Parametern (Kontaktkraft, Umfangsgeschwindigkeit), die Störsignale aus den elektrischen Größen (Bürstenstrom sowie Kontaktspannung) zu extrahieren und zu analysieren. Mikrobürstenfeuer treten bei Kontaktkräften kleiner gleich  $2,5 \text{ N}$  und bei Umfangsgeschwindigkeit  $v$  kleiner gleich  $9 \text{ ms}^{-1}$  auf. Oberhalb dieser Grenze der Umfangsgeschwindigkeit entstehen Makrobürstenfeuer,

---

die hauptsächlich zum elektrischen Verschleiß führt. Der mechanische Verschleiß verstärkt sich, wenn die herrschende Kontaktkraft  $F_K$  größer als 2,5 N und die Umfangsgeschwindigkeit  $v$  größer als  $9 \text{ ms}^{-1}$  sind.

Die erhaltenen Ergebnisse und die entwickelten Diagnosesoftware können genutzt werden, um mögliche Übertragungsstörungen vorherzusagen und an den Anwender zur Verfügung zu stellen. Anhand dieser Erkenntnisse kann eine Anpassung der Druckfingerkräfte vorgenommen werden. Eine Kontrolle der Luftfeuchtigkeit ist notwendig, um ein einwandfreies Übertragungsverhalten bei der Graphit-Graphit-Reibpaarung zu gewährleisten. Die anderen Störungsgrößen wie Salz, Fett in der Luft konnten nicht untersucht werden.

---

## Abstract

The most used asynchronous slip rings rotor machines (double fed induction generators) in the wind industry consist of wear-prone brush slip ring contacts. They are fixed on the rotor and used for the current transfer in the network. The demand of longer service life up to 5 years can be reached through the future offshore application and be met by graphite-graphite sliding contacts. The wear mechanisms are caused by the complex relationship of mechanical and electrical stress and lead to the apparition of micro brush fires. These contribute to initial failures of slip ring systems.

In this research work, the basis theoretical knowledge about the apparition and development of micro- and micro-brush fires are won. Due to the complex stresses in the electrical contact mechanics, the relationship between the electrical, mechanical, thermal and magnetic variables are analyzed on the basis of numerical simulations. A complex experimental test bench based on online worked behavior models is developed, to verify the field models. Thus, the theoretical results are compared with the practical measurements. The evaluation of the experimental results shows that the calculated contact force in the contact region, the circumferential speed of the slip ring, the ruling humidity in the experimental room have important contributions in the apparition of micro- and micro-brush fires. It is established that the calculated frictional coefficients are located in the mix friction area. Thus, additional frictional forces (elasto hydrodynamic forces) occur, where their order of magnitude is unknown. It is established that the increasing contact temperature through the frictional effect and the roughness of the contact areas influence the transfer behavior. Due to the develop diagnostic software, it is possible to extract the interference signals from the electrical variables (e.g. contact voltage, amplitude brush current) under consideration of two important parameters (contact force, circumferential speed) and to analyze them. Micro brush fires occur through the combination of contact force under 2,5 N and circumferential speed  $v$  less than  $9 \text{ ms}^{-1}$ . The disturbances in the electrical variables increase as the limit of the circumferential speed is exceeded. In this case, we talk of macro brush fires that lead to increment of electrical wear. In the Szenario that the contact force ist above 2, 5 N and the circumferential speed  $v$  higher than  $9 \text{ ms}^{-1}$ , the mechanical wear increases in favor of the electrical wear. This mechanism leads to increasing of abrasion of the friction partner.

---

The obtained results and the developed diagnostic software can be used to predict possible transmission disturbances of the electrical currents in the double fed induction generators. This information is important to the user. Therefore, an adjustment of the contact pressure forces can be done. Additionally, the control of the humidity is important for the faultless transmission behavior of the graphite-graphite friction partner.

---

# Nomenklatur

## Große Lateinische Formelzeichen

$\vec{B}$	Vektoriell magnetisches Feld der Druckfederkraft	T
$\vec{F}_A$	Vektorielle elektromagnetische Kraft	N
$\vec{F}_B$	Vektorielle Beschleunigungskraft	N
$\vec{F}_D$	Vektorielle Druckfederkraft	N
$\vec{F}_{EHD}$	Vektorielle EHD-Kraft	N
$\vec{F}_{gB}$	Vektorielle Bürstenmassenkraft	N
$\vec{F}_K$	Vektorielle Kontaktkraft	N
$\vec{F}_{RH}$	Vektorielle Reibungskraft in der Bürstenhalterung	N
$A_{Br}$	Eindruckfläche bei Brinell-Härteprüfung	mm <sup>2</sup>
$A_B$	Axiales Bürstenmaß parallel zur Rotorachse DIN IEC 60136-3	m
$A_{g,i}$	Stromamplitude der Grundfrequenz	A
$A_{g,u}$	Spannungsamplitude der Grundfrequenz	V
$A_{ge}$	Gesamte Fläche der Bürstenunterseite	mm <sup>2</sup>
$A_{K,i}$	Mikrokontaktflächen	mm <sup>2</sup>
$A_K$	Kontaktfläche	mm <sup>2</sup>
$A_n$	Nominale Kontaktfläche	mm <sup>2</sup>
$A_{pR}$	Eindruckfläche bei der Rockwell-Härteprüfung	mm <sup>2</sup>
$A_r$	Reale Kontaktfläche	mm <sup>2</sup>

---

$A_{S,i}$	Strommittelwert der Seitenbandamplituden .....	A
$A_{S,u}$	Spannungsmittelwert der Seitenbandamplituden .....	V
$D_{bR}$	Durchmesser des gehärteten Stahls bei der Rockwell-Härteprüfung .....	mm
$D_{k,B}$	Durchmesser der Hartmetallkugel bei der Brinell-Härteprüfung .....	mm
$D_S$	Durchmesser des Schleifrings .....	mm
$D$	Dämpfung des Spannungsfehlers am Eingang des Spannungswandlers AMC1200 ...	%
$E_{S,B}$	Elastizitätsmodule der Kontaktpartner (Bürste/Schleifring) .....	N/mm <sup>2</sup>
$F_0$	Prüfvorlast bei Rockwell-Härtemessung .....	N
$F_A$	Elektrodynamische Kraft .....	N
$F_B$	Beschleunigungskraft .....	N
$F_D$	Druckfederkraft .....	N
$F_{EHD}$	Elastohydrodynamische Kraft .....	N
$F_{gB}$	Bürstenmassekraft .....	N
$F_H$	Hauptlast bei Rockwell-Härtemessung .....	N
$F_{KF}$	Anteil der Festkörperreibungskraft .....	N
$F_{Kh}$	Anteil der Fluidreibungskraft .....	N
$F_K$	Kontaktkraft .....	N
$F_N$	Normalkraft .....	N
$F_{pB}$	Prüfkraft bei Brinell-Härtemessung .....	N
$F_{pR}$	Eindruckkraft bei der Rockwell-Härteprüfung .....	N
$F_{RH}$	Reibungskraft in der Bürstenhalterung durch Dreheinfluss .....	N

---

$F_R$	Reibungskraft im Kontaktbereich .....	N
$G_f$	Symmetrischer Fehler bei Verstärkung des Spannungswandlers AMC1200 .....	%
$H_{k,R}$	Kontakthärte nach Rockwell .....	N/mm <sup>2</sup>
$H_K$	Gerundete Kontakthärte nach Rockwell .....	N/mm <sup>2</sup>
$H_m$	Magnetische Feldstärke .....	A/m
$H$	Härte des Materials .....	N/mm <sup>2</sup>
$HBW$	Brinellhärte .....	N/mm <sup>2</sup>
$HR$	Rockwell-Härtezahl .....	[-]
$Hum_a$	Absolute Luftfeuchtigkeit .....	g/m <sup>3</sup>
$Hum_r$	Relative Luftfeuchtigkeit .....	%
$Hum$	Luftfeuchtigkeit .....	%
$HV$	Vickershärte .....	N/mm <sup>2</sup>
$I_B$	Bürstenstrom .....	A
$N_{Ab}$	Diskretes Abtastintervall .....	[-]
$N_f$	Diskrete Frequenzen .....	Hz
$N$	Skalenendwert .....	[-]
$R_B$	Radiales Bürstenmaß (Höhe) DIN IEC 60136-3 .....	m
$R_{E,n}$	Engwiderstände der einzelnen Punktkontakte .....	$\Omega$
$R_E$	Engwiderstand .....	$\Omega$
$R_F$	Fremdschichtwiderstand .....	$\Omega$
$R_K$	Gesamter Kontaktwiderstand .....	$\Omega$

---

---

$R$	Gesamter Kontaktwiderstand .....	$\Omega$
$RMS_i^*$	Konditionierter gleitender Strommittelwert .....	A
$RMS_u^*$	Konditionierter gleitender Spannungsmittelwert .....	V
$S_{iB}$	Prozentualer Anteil der Lichtbogenintensität bei Nutzung vom Bürstenstrom .....	%
$S_M$	Prozentualer Anteil der Lichtbogenintensität .....	%
$S_{uB,o}$	Oberer prozentualer Anteil der Lichtbogenintensität bei Kontaktspannung .....	%
$S_{uB,u}$	Unterer prozentualer Anteil der Lichtbogenintensität bei Kontaktspannung .....	%
$S$	Skalenteilung .....	$\mu m$
$T_{Bü}$	Bürstentemperatur .....	$^{\circ}C$
$T_B$	Tangentiales Bürstenmaß in Umfangsrichtung DIN IEC 60136-3 .....	m
$T_K$	Kontakttemperatur .....	$^{\circ}C$
$T_S$	Oberflächentemperatur des Schleifrings .....	$^{\circ}C$
$TU$	Umgebungstemperatur im Schleifringraum .....	$^{\circ}C$
$U_B$	Bürstenspannung .....	V
$U_e$	analoge Ausgangsspannung des Sensors .....	V
$U_K$	Kontaktspannung zwischen dem Kontaktpaar .....	V
$U_{LL}$	Leiter-Leiter-Spannung .....	V
$U$	Geschwindigkeit in x- Richtung .....	m/s
$V_{aus}$	Ausgangsspannung nach dem Spannungswandler AMC1200 .....	V
$V_{ein}$	Eingangsspannung vor dem Spannungswandler AMC1200 .....	V
$V_S$	Feste Verstärkung des Spannungswandlers AMC1200 .....	[-]

---

$V$	Geschwindigkeit in y- Richtung .....	m/s
$W$	Geschwindigkeit in z- Richtung .....	m/s
$X_i(n)$	Komplexes Spektrum des Stromsignals .....	A
$X_u(n)$	Komplexes Spektrum des Spannungssignals .....	V
$Y_i(f)$	Faltung des ungestörten Stromsignals .....	A
$Y_u(f)$	Faltung des ungestörten Spannungssignals .....	V

**Abkürzungen**

$ALU$	.....	Arithmetisch-Logische Einheit
$AMD$	.....	Amplitudendemodulation- Verfahren (Hüllkurvenanalyse)
$APDL$	.....	Ansys Parametric Design Language
$API$	.....	Application Programming Interface
$BF$	.....	Bürstenfeuer
$BGN$	.....	Beginn der Abtastung
$DDR - SRAM$	.....	Double Data Rate Synchronous Dynamic Radom Access Memory
$DFT$	.....	Diskrete Fourier Transformation
$DIS$	.....	Unterbrechung der Verbindung
$DSAG$	.....	Doppeltgespeiste Drehstrom-Asynchrongeneratoren
$DSP$	.....	Digital Signal Processor
$EDV$	.....	Elektronische Datenverarbeitung
$EEPROM$	.....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
$FFT$	.....	Fast Fourier Transformation

---

<i>FPGA</i>	.....	Field Programmable Gate Array
<i>FWU</i>	.....	Firmware-Upgrade-Datenformat
<i>GET</i>	.....	Datenabfrage
<i>HD</i>	.....	Hydrodynamik
<i>HLD</i>	.....	Halten der kontinuierlichen Verbindung
<i>HRB</i>	.....	Rockwell-Härte nach dem ROCKWELL-B-Verahren
<i>JTAG</i>	.....	Joint Test Action Group
<i>LIST</i>	.....	Liste der gespeicherten Dateien
<i>MBF</i>	.....	Mikrobürstenfeuer
<i>MFC</i>	.....	Microsoft Foundation Classes
<i>NEW</i>	.....	Erstellen einer neuen Messung mit dem Server
<i>OPN</i>	.....	Aufnahme der Messdaten
<i>REF</i>	.....	Rechteck- Fensterfunktion
<i>SAV</i>	.....	Speicherung der Messdaten
<i>SBA</i>	.....	Seitenbandanalyse
<i>SET</i>	.....	Senden der Einstellung für die Messung
<i>SPI</i>	.....	Service Provider Interface
<i>STA</i>	.....	Abfrage des Status von FPGA
<i>STP</i>	.....	Manuelles Anhalten des Abtastvorgangs
<i>VDI</i>	.....	Verein Deutscher Ingenieure

**Griechische Formelzeichen**

---

$\alpha_a$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	1/K
$\alpha_f$	Öffnungswinkel bei Vickers-Härteprüfung .....	°
$\alpha, \beta$	Halbachsen der Kontaktellipse .....	m
$\delta$	Parameter für die Äquipotentialflächen .....	m <sup>2</sup>
$\Delta q$	Intervallbreite der Eingangsspannung .....	V
$\varepsilon$	Exzentrizität .....	m
$\eta$	Dynamische Viskosität .....	Pa s
$\lambda_B$	Thermische Leitfähigkeit der Bürste .....	W/(m·K)
$\lambda_S$	Thermische Leitfähigkeit des Schleifrings .....	W/(m·K)
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante .....	N/A <sup>2</sup>
$\mu_h$	Anteil der Fluidreibungszahl .....	[-]
$\mu_{m,i}$	gleitender Strommittelwert .....	A
$\mu_{m,u}$	gleitender Spannungsmittelwert .....	V
$\mu$	Reibungszahl .....	[-]
$\nu_B$	Transversale Konzentrationszahl der Bürste .....	[-]
$\nu_{S,B}$	Poissonzahl der Kontaktpartner (Bürste/Schleifring) .....	[-]
$\nu_S$	Transversale Konzentrationszahl des Schleifrings .....	[-]
$\rho_C$	Spezifischer elektrischer Widerstand von Kohle .....	$\Omega\text{m}$
$\rho_F$	Dichte des Fluides .....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand .....	$\Omega\text{m}$
$\sigma_B$	Dichte der Bürste .....	kg/m <sup>3</sup>

---

---

$\sigma_F$	Squeeze-Zahl .....	[-]
$\sigma_i$	Varianz aus dem Frequenzspektrum des Stroms .....	A
$\sigma_S$	Dichte des Schleifrings .....	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_u$	Varianz aus dem Frequenzspektrum der Spannung .....	V
$\xi_v$	Dynamische Viskosität .....	Pa s
$\xi$	Elastizitätsfaktor .....	[-]
$f$	Lastvektor einer äußeren Kraft .....	N

### Indizes

$A$	.....	Elektrodynamische Abhebung
$B$	.....	Beschleunigung
$D$	.....	Druck
$dyn$	.....	dynamisch
$E$	.....	Elastizität
$eff$	.....	Effektivwert
$el$	.....	elastisch
$elk$	.....	elektrisch
$F$	.....	Luft
$gB$	.....	Bürstenmasse
$H$	.....	Hauptlast
$Kf$	.....	Festkörperreibung
$Kh$	.....	Fluidreibung

---

<i>max</i>	.....	maximal
<i>mech</i>	.....	mechanisch
<i>min</i>	.....	minimal
<i>pF</i>	.....	Luftdruck
<i>pl</i>	.....	plastisch
<i>stat</i>	.....	statisch

**Kleine Lateinische Formelzeichen**

$l_0$	Anfangslänge	.....	mm
$\Delta \dot{h}_E$	Beschleunigung der Rundlaufabweichung	.....	m/s <sup>2</sup>
$\Delta h_E$	Exzentrizität des Schleifrings	.....	mm
$\delta l$	Längenänderung	.....	mm
$\delta T$	Temperaturänderung	.....	K
$\delta h_F$	Kleine Luftspalthöhenänderung	.....	µm
$\delta p_F$	Kleine Luftdruckänderung	.....	Pa
$a_{g,i}(t)$	Ungestörtes Stromsignal	.....	A
$a_{g,u}(t)$	Ungestörtes Spannungssignal	.....	V
$a$	Punktradius	.....	mm
$b_S$	Breite des Schleifrings	.....	mm
$br$	Radius unter Stromeinwirkung	.....	mm
$c_B$	Spezifische Wärmekapazität der Bürste	.....	J/(kg·K)
$c_S$	Spezifische Wärmekapazität des Schleifrings	.....	J/(kg·K)

---

$c_s$	Staubkonzentration .....	%
$d_{1,2}$	Diagonallängen nach Eindrücken bei der Vickers-Härteprüfung .....	mm
$d_{bR}$	Bleibender Durchmesser nach Eindrücken bei der Rockwell-Härteprüfung .....	mm
$d_{bV}$	Bleibender Durchmesser nach Eindrücken bei der Vickers-Härteprüfung .....	mm
$d_b$	Bleibender Durchmesser nach Eindrücken bei der Brinell-Härteprüfung .....	mm
$d_{sens}$	Abstand des Triangulationssensors von der Schleifringoberfläche .....	mm
$f_a$	Abtastfrequenz .....	Hz
$f_D$	Drehfrequenz des mechanischen Signals .....	Hz
$f_{EHD}$	Normierter elastohydrodynamischer Reibkraftanteil .....	[-]
$f_g$	Grundschwingungsfrequenz des elektrischen Signals .....	Hz
$f_{max}$	Maximale Grenzfrequenz im Signal .....	Hz
$f_{NF}$	Nyquist-Frequenz .....	Hz
$f_N$	Nennfrequenz .....	Hz
$f_s$	Frequenzen der Seitenbänder .....	Hz
$f_{tol}$	Frequenzabweichung des westeuropäischen Verbundnetzes .....	Hz
$f$	Resonanzfrequenz .....	Hz
$f_R$	Normierter Anteil der Festkörperreibung .....	[-]
$g$	Erdbeschleunigung .....	N/Kg
$h_0$	Luftspalte unter Einfluss des Umgebungsluftdrucks .....	$\mu\text{m}$
$h_B$	Eindrucktiefe bei der Brinell-Härteprüfung .....	mm
$h_E$	Maximale Eindrucktiefe bei der SHORE-Härteprüfung .....	mm

---

---

$h_F$	Luftspalthöhe .....	$\mu\text{m}$
$h_{pR}$	Eindrucktiefe bei der Rockwell-Härteprüfung .....	mm
$h'_F$	Dimensionslose Luftspalte .....	[-]
$i_B$	Fließender Bürstenstrom zwischen Bürste und Schleifring .....	A
$i_c$	analoger Ausgangsstrom des Sensors .....	V
$i_K$	Kontaktstrom durch die Kontaktstelle .....	A
$i_L$	Leiterstrom .....	A
$i$	Imaginäre Zahl .....	[-]
$j$	Stromdichte .....	$\text{A}/\text{m}^2$
$k$	Diskreter Zeitindex .....	[-]
$l_c$	Charakteristische Länge .....	mm
$l$	Leiterlänge .....	m
$m_B$	Masse der Bürste .....	kg
$m_H$	Index der Harmonischen .....	[-]
$m, k$	Ganzzahlige Zählindizes .....	[-]
$n_{elk}$	Anzahl der Strombrücken .....	[-]
$n_H$	Index der Seitenbänder .....	[-]
$n$	Drehzahl des Schleifrings .....	$\text{min}^{-1}$
$p_0$	Umgebungsluftdruck .....	Pa
$p_F$	Luftdruck .....	Pa
$p_K$	Druck im Kontaktbereich .....	$\text{N}/\text{mm}^2$

---

---

$p$	Flächenpressung	Pa
$p'_F$	Dimensionsloser Druck	[-]
$r_B$	Spezifischer Widerstand der Bürste	$\Omega\text{m}$
$r_K$	Gesamter Kontaktradius	mm
$r_{S,B}$	Radien der Kontaktpartner (Bürste/Schleifring)	mm
$r_S$	Spezifischer Widerstand des Schleifrings	$\Omega\text{m}$
$r$	Abstand zwischen den parallelen Leitern	m
$t_p$	Einwirkungsdauer bei der Brinell-Härteprüfung	s
$t_v$	Zeitverschiebung zwischen Messpunkt der Rundlaufabweichung und Bürstenmitte	s
$t'$	Dimensionslose Zeit	[-]
$v_{\max}$	Maximale Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$v_{\min}$	Minimale Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$v$	Gleitgeschwindigkeit	m/s
$w_H(t)$	Hann- Fensterfunktion im Zeitbereich	[-]
$x_{D,i}(t)$	Gestörtes Stromsignal bei Zustandsverschlechterung	A
$x_{D,u}(t)$	Gestörtes Spannungssignal bei Zustandsverschlechterung	V
$x_i(t)$	Stromsignal im Zeitbereich	A
$x_i(t_n)$	Zeitdiskretes Stromsignal	A
$x_u(t)$	Spannungssignal im Zeitbereich	V
$x_u(t_n)$	Zeitdiskretes Spannungssignal	V
$z_p$	Polpaarzahl der Maschine	[-]

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Einführung	1
1.2. Stand der Forschung	2
1.2.1. Einsatz von Schleifringssystemen in doppeltgespeisten Drehstromasynchron- generatoren (DSAG)	2
1.2.2. Problematik	4
1.3. Ziele der Forschungsarbeit	6
<b>2. Grundlagen der physikalischen Kontaktierung im Schleifringssystem</b>	<b>9</b>
2.1. Reibung	11
2.1.1. Reibungsverhalten	12
2.1.2. Reibungsmechanismen	15
2.2. Verschleiß im Tribo-System Bürste/ Schleifring	16
2.2.1. Mechanischer Verschleiß	17
2.2.2. Elektrischer Verschleiß	19
2.3. Beitrag des elasto-hydrodynamischen (EHD) Einflusses	20
2.4. Grundlagen der elektrischen Kontakte	27
2.4.1. Kontaktwiderstand	27
2.4.2. Kontaktfläche der Strombrücke	31
2.4.3. Kräfte im Schleifringssystem	37
2.5. Geschichte und Eigenschaften von Graphit-Graphit-Reibpaarungen	47
<b>3. Mehrdomänen-Simulation des Kontaktproblems im Schleifringssystem</b>	<b>50</b>
3.1. Modellbeschreibung	50
3.2. Multiphysik-Simulation	52
3.3. Simulationsergebnisse	58
3.3.1. Analyse stillstehender Kontaktpaarungen	58
3.3.2. Analyse schleifender Kontaktpaarungen	60

<b>4. Messsystem zur Charakterisierung der Bürstenfeuer</b>	<b>72</b>
4.1. Schleifringversuchsstand . . . . .	72
4.2. Messgrößen zur Charakterisierung der Bürstenfeuer . . . . .	74
4.2.1. Umgebungsmessgrößen . . . . .	74
4.2.2. Erfassung der Kontakt- und Bürstentemperatur . . . . .	75
4.2.3. Kraftmessung . . . . .	75
4.2.4. Drehzahlmessung . . . . .	76
4.2.5. Abstandsmessung . . . . .	76
4.2.6. Elektrische Größen . . . . .	76
4.3. Datenerfassungssystem . . . . .	80
4.3.1. Hardwarebeschreibung . . . . .	81
4.3.2. Softwarebeschreibung . . . . .	85
<b>5. Messergebnisse</b>	<b>92</b>
5.1. Messung im Stillstand . . . . .	93
5.2. Messung beim quasi-stationären Betrieb . . . . .	94
5.3. Messung bei schleifenden Kontaktpaarungen . . . . .	98
<b>6. Signalanalysemethoden zur Zustandsbewertung und Klassifizierung der Bürstenfeuerentstehung</b>	<b>114</b>
6.1. Methodik zur zustandsabhängigen Fehlerfrüherkennung . . . . .	115
6.2. Merkmalsextraktion . . . . .	117
6.2.1. Modellgestütztes Verfahren . . . . .	117
6.2.2. Signalgestütztes Verfahren . . . . .	118
6.3. Merkmalsinterpretation . . . . .	120
6.4. Zusammenfassung und Fazit . . . . .	121
<b>7. Diagnoseansätze zur Bürstenfeuererkennung</b>	<b>123</b>
7.1. Diagnosealgorithmus . . . . .	125
7.2. Datengewinnung . . . . .	128
7.3. Merkmalsextraktion im Frequenzbereich . . . . .	128
7.3.1. Zerlegung der Messdaten und Fensterfunktion . . . . .	129

7.3.2. Fourier-Transformation . . . . .	130
7.3.3. Seitenbandanalyse . . . . .	134
7.3.4. Hüllkurvenanalyse . . . . .	136
7.4. Frequenzbestimmung . . . . .	139
7.5. Auswertung . . . . .	141
7.6. Anwendung der Diagnosestrategie und Zustandsbewertung . . . . .	143
7.6.1. Einfluss der Kontaktkraft bei quasi konstanter Umfangsgeschwindigkeit	144
7.6.2. Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit bei quasi konstanter Druckfingerkraft . . . . .	146
7.6.3. Fazit des Diagnosealgorithmus . . . . .	153
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>154</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>170</b>
A.1. Messgrößen zur Charakterisierung des Verschleiß- und Störverhaltens . . . . .	170
A.2. Messergebnisse . . . . .	172
A.2.1. Quasi stationärer Betrieb . . . . .	172
A.2.2. Dynamischer Betrieb . . . . .	181