

**51. IWK**  
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium  
International Scientific Colloquium



**PROCEEDINGS**

**11-15 September 2006**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND  
ELECTRICAL ENGINEERING -  
DEVICES AND SYSTEMS,  
MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

## Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische  
Angelegenheiten  
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Susanne Jakob  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):  
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):  
Universitätsbibliothek Ilmenau  
[ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

T. Heidrich, A. Möckel

# **Analyse und Simulation des Motorstromes von Kommutatormotoren mit Permanentmagneterregung**

## **1. Einleitung**

Permanentmagneterregte Kommutatormotoren kleiner Leistung sind in vielen Anwendungen, wie zum Beispiel in Kraftfahrzeughilfsantrieben oder in akkubetriebenen Handwerkzeugen zu finden. Sie werden zur Zeit vorwiegend bei netzunabhängigen Antrieben im Niedervoltbereich eingesetzt. Aufgrund der Dauermagneterregung sind im Vergleich zur Erregung mit Feldspulen günstigere Wirkungsgrade erreichbar. Die hoch automatisierte Fertigung des Motors mit mechanischer Stromkommutierung führt zu einem Kostenvorteil gegenüber anderen Ausführungsarten mit zusätzlicher Kommutierungselektronik.

Bedingt durch die Konstruktion und Arbeitsweise des Motortyps fließt beim Betrieb an einer Gleichspannungsquelle ein Gleichstrom, der von einem Wechselanteil überlagert wird. Für das Betriebsverhalten ist meist eine Betrachtung des Gleichanteils ausreichend. Der Wechselanteil kann bei der Untersuchung von Drehmomentschwankungen, EMV-Problemen und Motorgeräuschen nicht mehr vernachlässigt werden. Eine Analyse dieses Anteils ist auch zur Beurteilung des Kontaktverhaltens zwischen Bürste und Kommutator sinnvoll. Im Folgenden wird der gemessene Verlauf des Motorstromes an einem Beispiel näher untersucht. Die wesentlichen Ursachen für die Entstehung von Schwingungen im Motorstrom werden zur Entwicklung eines geeigneten Motormodells herausgestellt. Mit dem vorgestellten Modell ist eine Optimierung der Motorkonstruktion in Bezug auf den Stromverlauf möglich.

## **2. Analyse des Motorstromes an einem Beispiel**

Der Stromverlauf und das Antriebsmoment eines KFZ-Sitzverstellmotors wurden in verschiedenen Arbeitspunkten gemessen. Es handelt sich um einen 2 poligen Motor mit

8 Nuten. Bei dem vorliegenden Beispiel stimmen die Lamellenzahl und die Anzahl der Nuten überein. Die Klemmenspannung beträgt 12 V und ist eingepreßt. Die Abbildung 1 stellt die gemessenen Größen dar. Es zeigt sich eine ausgeprägte Stromwelligkeit und die damit zusammenhängende Drehmomentschwankung. Dieser erkennbare Zusammenhang entsteht, wenn keine Nutschrägung vorliegt. Die Frequenz der dominierenden Stromschwungung errechnet sich nach Gleichung (1) aus dem Produkt von Kommutatorlamellenzahl  $k$  und Motordrehzahl  $n$

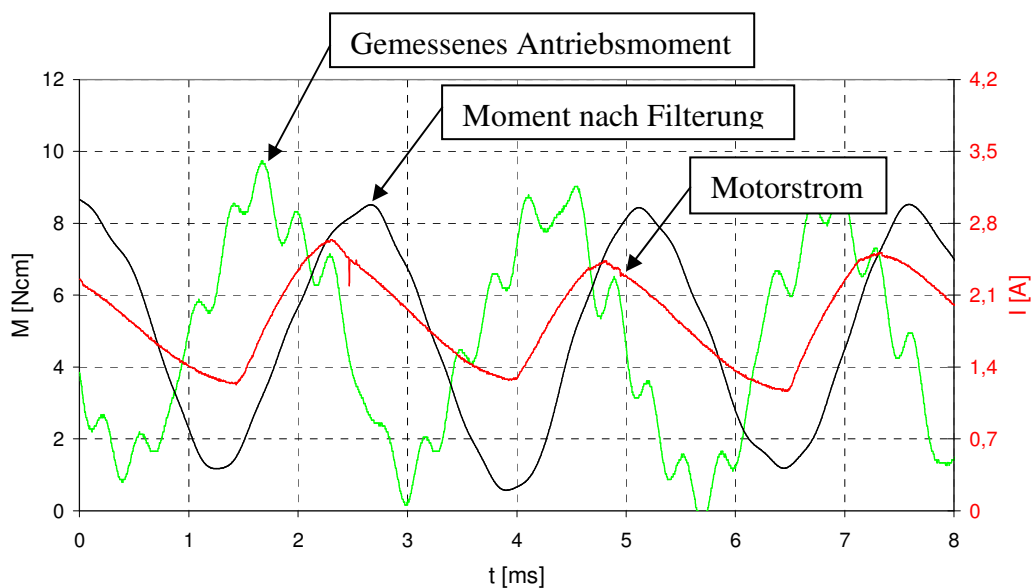


Abbildung 1: Verlauf des Motorstromes und des Drehmomentes ( $n = 2883 \text{ min}^{-1}$ )

$$f_g = n \cdot k \quad k = N = 8 \quad (1)$$

In Abbildung 2 ist der Wechselanteil des Motorstromes bei verschiedenen mechanischen Belastungszuständen dargestellt. Mit zunehmender Erhöhung des Lastmoments steigen die Amplituden der Stromschwüngen in Abbildung 2 an. Es treten starke Einbrüche im Motorstrom auf, wenn die ablaufende Bürstenkante eine Lamelle verlässt. Eine Fourieranalyse des Stromes (Abbildung 3) zeigt die Belastungsabhängigkeit der Amplituden und die enthaltenen Oberschwüngen. Das Verhältnis der Bürstenbreite zur Lamellenbreite spielt für den Stromverlauf eine Rolle und beträgt in diesem Fall 0,92.

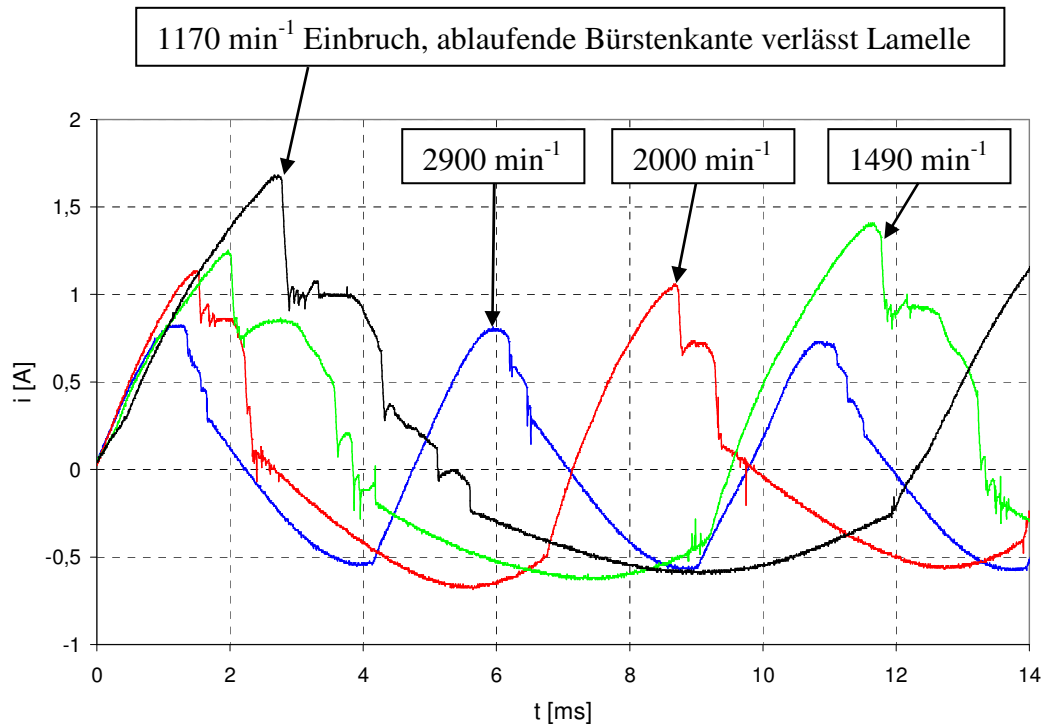


Abbildung 2: Wechselanteil im Motorstrom bei unterschiedlichen Drehzahlen

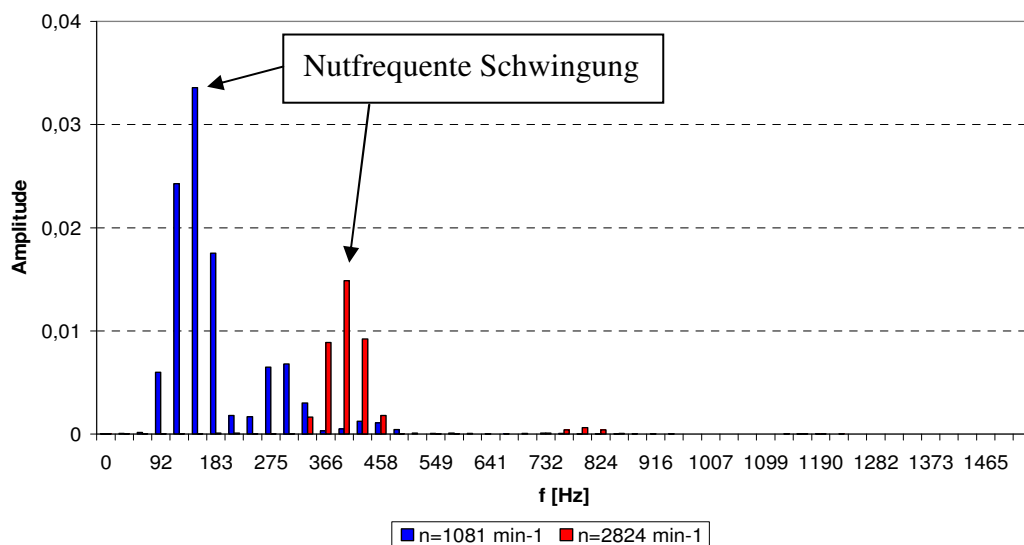


Abbildung 3: FFT Leistungsspektrum des Wechselanteils für zwei Drehzahlen (Hanning -Fenster)

Hauptursache für die Welligkeit des Stromes bei permanentmagneterregten Motoren ist das periodische Zu- und Abschalten von Spulen im Ankerkreis durch den Kommutator. Dadurch schwankt die Anzahl der Spulen, die vom Ankerstrom durchflossen werden, sowie der Ankerwiderstand und die Flussverkettung der gesamten wirksamen

Ankerwicklung. Die Ableitung der Flussverkettung, beziehungsweise die induzierte Spannung, ist abhängig von der Drehzahl und dem Verlauf des Motorstromes (3). Der Kommutierungsvorgang selbst und der auftretende Lichtbogen beim Öffnen des Kommutierungskreises wirken sich ebenfalls auf den Motorstrom aus. Ursache dafür sind Kopplungen über das magnetische Feld zwischen den kommutierenden und den übrigen Ankerspulen. Die Anzahl der kommutierenden Spulen ergibt sich aus dem Überdeckungsverhältnis Bürste-Lamelle. Die Schwankung des magnetischen Leitwertes durch die Nutung spielt kaum eine Rolle, da der wirksame Luftspalt bei permanentmagneterregte Motoren groß ist.

Der Spannungsabfall über den Bürsten und der Übergangswiderstand Bürste -Lamelle zeigen eine Abhängigkeit vom Motorstrom. Durch mechanische Schwingungen im Kontaktsystem, Unwuchten und Fehler (z.B. Lamellenkurzschluss) können zusätzliche Anteile im Strom auftreten.

Spannungsgleichung des Motors:

$$U = R_A \cdot i_A + U_B + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2)$$

$U$	Klemmspannung Motor
$U_B$	Spannungsabfall Kontaktsystem Bürste -Lamelle
$i_A$	Ankerstrom
$\Psi$	Flussverkettung der Ankerwicklung mit dem Luftspaltfeld
$R_A$	Ankerwiderstand

Umgestellt nach dem Motorstrom:

$$i_A = \frac{U - U_B(i_A) - \frac{d\Psi(i_A, \varphi)}{dt}}{R_A(\varphi)} \quad (3)$$

$\varphi$	Winkel, Ankerstellung
-----------	-----------------------

### 3. Entwicklung eines Motormodells

Aufgrund des Verhältnisses von Bürstenbreite zur Lamellenbreite kann bei dem zuvor betrachteten Motor zwischen zwei Zuständen der Ankerwicklung unterschieden werden, die in Abbildung 4 skizziert sind. Im ersten Zustand fließt durch alle 8 Ankerspulen ein Ankerzweigstrom. Wenn die Bürsten je zwei Lamellen kontaktieren, findet in je einer Ankerspule die Kommutierung statt. Die Anzahl der vom Ankerzweigstrom  $i_{Az}$

durchflossenen Spulen reduziert sich dementsprechend auf 6. Daraus lässt sich ein elektrisches Ersatzschaltbild ableiten. Steigt das Bürstenüberdeckungsverhältnis über eine Lamellenteilung bilden sich andere Schaltzustände, die ein modifiziertes Modell erfordern.

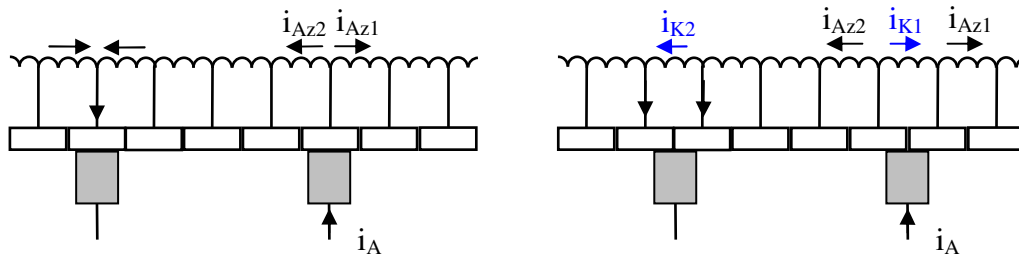


Abbildung 4: Zustände der Ankerwicklung in Abhängigkeit von der Bürstenstellung

$$i_{Az1} = i_{Az2} = \frac{i_A}{2} \quad (4)$$

Problematisch ist die Modellierung des Bürstenübergangs. Die Leitfähigkeit des Bürstenmaterials wird als homogen über das gesamte Volumen betrachtet. Weiterhin findet eine Aufteilung der Bürste in einen Längs- und Queranteil statt (Abbildung 5). Der Längswiderstand ist abhängig vom Bürstenverschleiß. Die überdeckten Lamellenflächen bestimmen die Größe der Querwiderstände und sind damit stellungsabhängig. Den Verlauf der Querwiderstände über einer Lamellenteilung zeigt Abbildung 6. Im Modell wird zunächst davon ausgegangen, dass die gesamte Bürstenauflfläche elektrisch tragfähig ist.

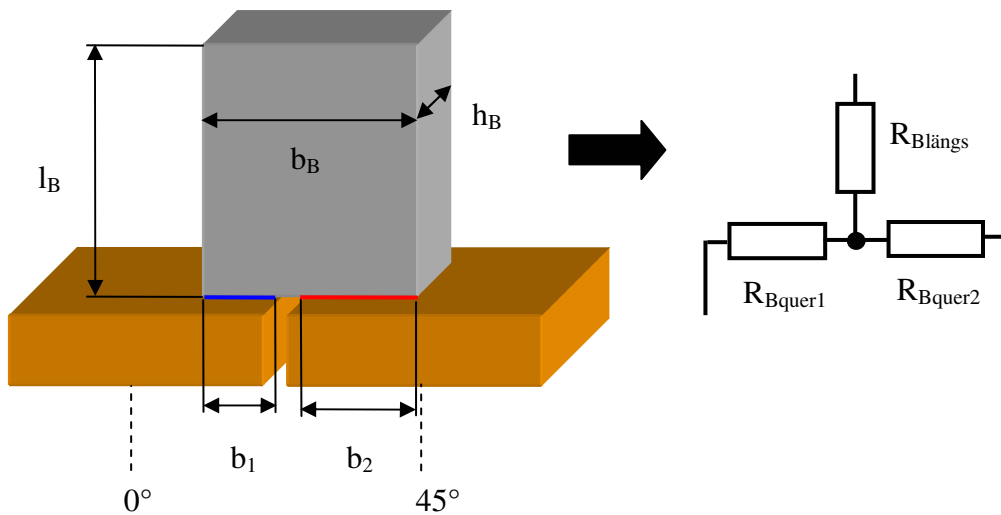


Abbildung 5: Modell des Bürstenübergangs

$$R_{Blängs} = f(l_B) \quad (5)$$

$$R_{Bquer1}(\varphi) = f(b_1) \quad (6)$$

$$R_{Bquer2}(\varphi) = f(b_2)$$

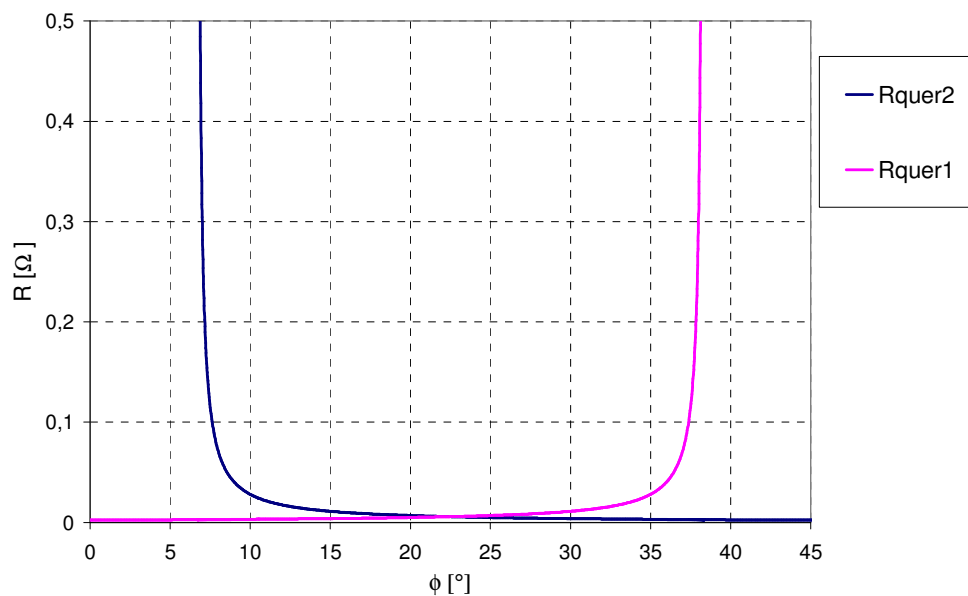


Abbildung 6: Querwiderstände über eine Lamellenteilung bei homogener Leitfähigkeit des Bürstenmaterials und vollständiger elektrischer Tragfähigkeit der Lauffläche

Das Ersatzschaltbild des Motors ist in Abbildung 7 dargestellt. Mithilfe der Schalter wird zwischen den beiden Zuständen des Ankerkreises gewechselt. Die Schaltzeitpunkte ergeben sich aus den geometrischen Abmessungen von Bürste, Kommutator und



Lamellenschlitz. Aus einer Reihenschaltung von ohmschen Widerstand, Eigeninduktivität und einer Spannungsquelle werden die einzelnen Spulengruppen nachgebildet. Die Spannungsquelle umfasst die rotatorisch induzierte Spannung und die durch Gegeninduktivitäten hervorgerufenen Spannungen.

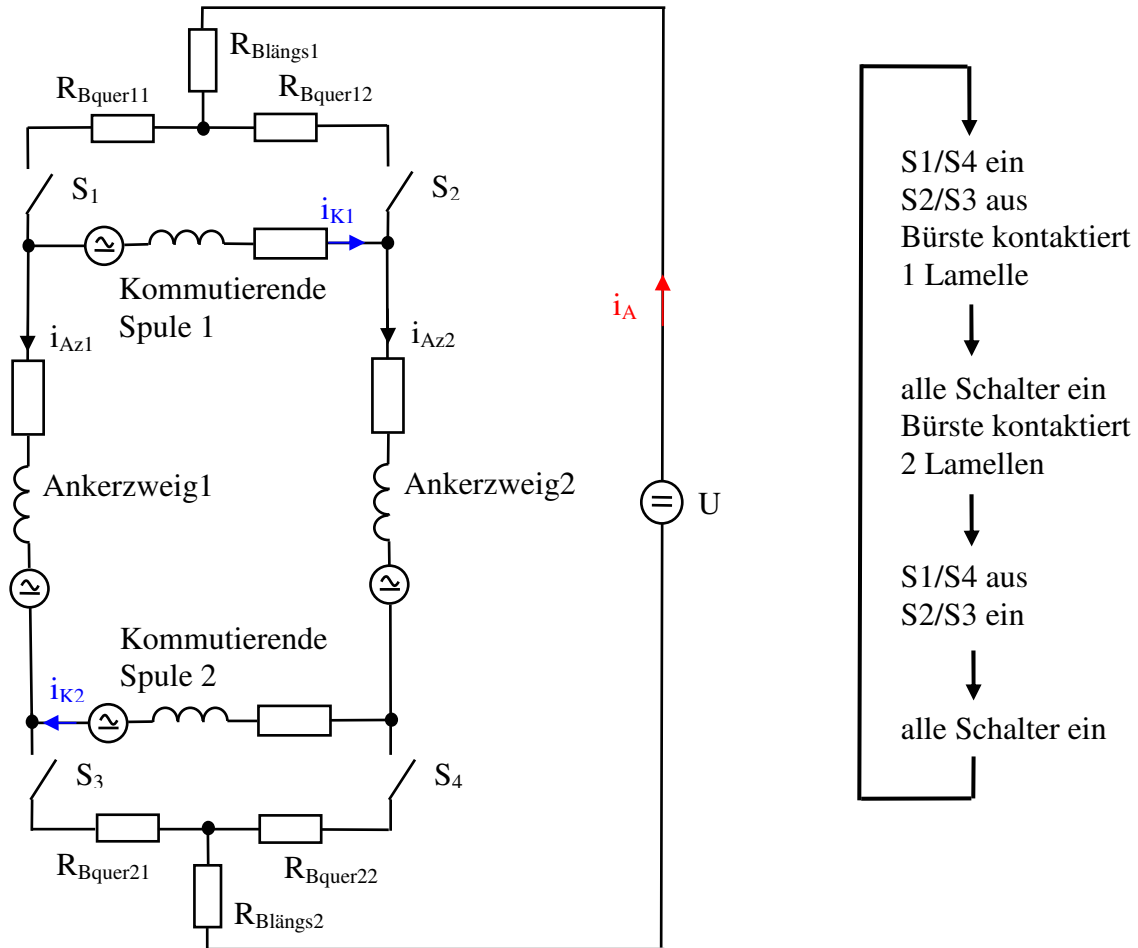


Abbildung 7: Abgeleitetes Ersatzschaltbild des Motors

Zur Simulation des Motorstromes ist ein aus dem Ersatzschaltbild resultierendes Gleichungssystem zu lösen. Dafür bieten sich Programme wie zum Beispiel Matlab oder Mathematica an. Eine Umsetzung mit diskreten Elementen in PSpice oder Simulink ist ebenfalls möglich. Die für das Modell erforderlichen Induktivitäten und Flussverkettungen sind analytisch nur schwierig treffend zu berechnen. Deshalb werden sie durch eine Feldrechnung mit einem FEM Programm ermittelt. Sie sind als Funktion des Motorstromes und des Winkels über eine Lamellenteilung zu bestimmen. Es ergeben sich Kennlinienfelder über eine Lamellenteilung bei verschiedenen Motorströmen. Ein Simulationsergebnis ist in Abbildung 8 abgebildet.

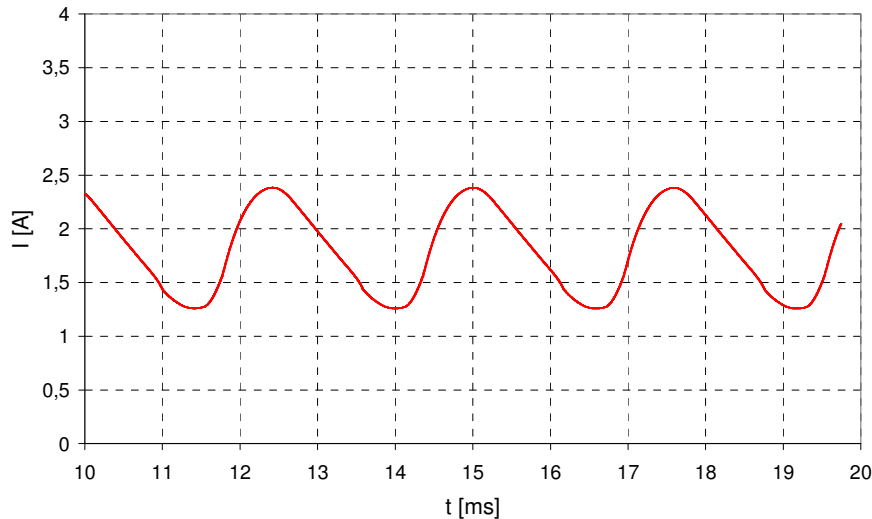


Abbildung 8: Motorstrom aus Simulation ( $n = 2900 \text{ min}^{-1}$ )

#### 4. Zusammenfassung

Der Motorstrom von permanentmagneterregten Kommutatormotoren zeigt eine meist unerwünschte Welligkeit. Die Art der Ausprägung ist abhängig von der Spannungsquelle, der Motorkonstruktion und insbesondere vom Kontaktsystem Bürste-Kommutator. Um diese Abhängigkeiten genauer zu untersuchen und beschreiben zu können, wurde ein Simulationsmodell für eine spezielle Motorkonstruktion entwickelt. Die Modellparameter basieren dabei sowohl auf analytisch berechneten Werten, wie auf Ergebnissen aus einer Feldrechnung. Für die Anwendung auf andere Konstruktionen ist eine Anpassung des Modells notwendig. Das Modell kann darüberhinaus als Bestandteil für die gekoppelte Simulation von Ansteuerelektronik und Motor dienen, da die verwendeten Motormodelle häufig nur idealisierte Motorströme abbilden.

#### Literaturquellen:

- [1] Hans-Dieter Stöling, Eberhard Kallenbach: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, Hanser-Verlag 2002
- [2] Hans-Dieter Stöling, Achim Beisse: Elektrische Kleinmaschinen, Teubner-Verlag 1987
- [3] A. Möckel: Einflussfaktoren auf die Kommutierung, 14. Kleinmaschinenkolloquium der TU Ilmenau 2006

#### Autorenangaben:

Dipl.- Ing. Tobias Heidrich / Dr.-Ing. A. Möckel  
 Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, PF 10 05 65  
 98694, Ilmenau  
 Tel: +49 3677 69-1541  
 Fax: +49 3677 69-1552  
 E-mail: [tobias.heidrich@tu-ilmenau.de](mailto:tobias.heidrich@tu-ilmenau.de)