

Piezoelektrische Flugzeugbremse

H. Wetzel, R. Li, N. Fröhleke, J. Böcker

Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Universität Paderborn

Warburger Straße 100, 33098 Paderborn

Tel.: 05251-602220, Fax: 05251-603443

wetzel@lea.upb.de

li@lea.upb.de

froehleke@lea.upb.de

boecker@lea.upb.de

Zusammenfassung

Heutige hydraulische Flugzeugbremsen sind sehr zuverlässig, sie haben jedoch auch Nachteile wie hohen Wartungsaufwand, Brandrisiko und Umweltprobleme. Dies führt zur Entwicklung elektromagnetisch angetriebener Bremsen, die aber hinsichtlich Gewicht, Massenträgheit und Spitzenleistung problematisch sind. In dieser Publikation wird eine neuartige piezoelektrische Flugzeugbremse vorgestellt, die im Rahmen eines EU-Projektes entwickelt wird. Zentrale Komponente des neuen Konzepts ist ein Multimassen-Ultraschallmotor (MM-USM) mit seiner elektronischen Stromversorgung und der Regelung.

Schlüsselwörter

Piezoelektrische Antriebe; Ultraschallmotor; Piezoelektrischer Aktor.

1 Einleitung

Die ersten Flugzeuge hatten Anfang des letzten Jahrhunderts einen relativ einfachen Aufbau. Im Flugzeug dominierten als Aktoren für verschiedene Komponenten bis in die vierziger und fünfziger Jahre elektromagnetische Antriebe. Nach und nach wurden diese durch leistungsfähige hydraulische und pneumatische Aktoren verdrängt. Diese historische Entwicklung spiegelt sich in einem modernen Flugzeug in einer Verkoppelung dieser drei Bord-Energieversorgungssysteme (elektrisch-hydraulisch-pneumatisch) und in dem damit verbundenen Aufwand wieder.

1.1 Hydraulische Flugzeugbremse

Das Bremssystem ist ein wichtiges sicherheitsrelevantes System im Flugzeug. Die Flugzeugbremsen sollen während der kurzen Landezeit das schwere Flugzeug von seiner Landegeschwindigkeit bis zum Stillstand abbremsen. Die Bremsen bestehen aus einem Stapel mehrerer feststehender und rotierender Karbon-Bremsscheiben, welche durch Hydraulikzylinder zusammengepresst werden, s. Abbildung 1. 12 hydraulische Zylinder sorgen für eine gleichmäßige Anpressung der rotor- und statorseitigen Karbonscheiben. Die Steuerung der Bremsen beinhaltet standardmäßig auch ein Anti-Blockier-System (ABS), welches bereits 1920 erstmalig für Flugzeuge eingesetzt wurde.

Die Wartung dreier unterschiedlicher Systemarten eines modernen Flugzeugs erfordert jeweils speziell geschulte Fachkräfte, die sich nur um ein Teilsystem kümmern. Das leichtflüssige Öl des Hydrauliksystems muss in regelmäßigen Abständen kontrolliert und nachgefüllt werden. Undichtheiten im Hydrauliksystem führen zu Umweltverschmutzung und lassen sich ganz kaum vermeiden. Außer-

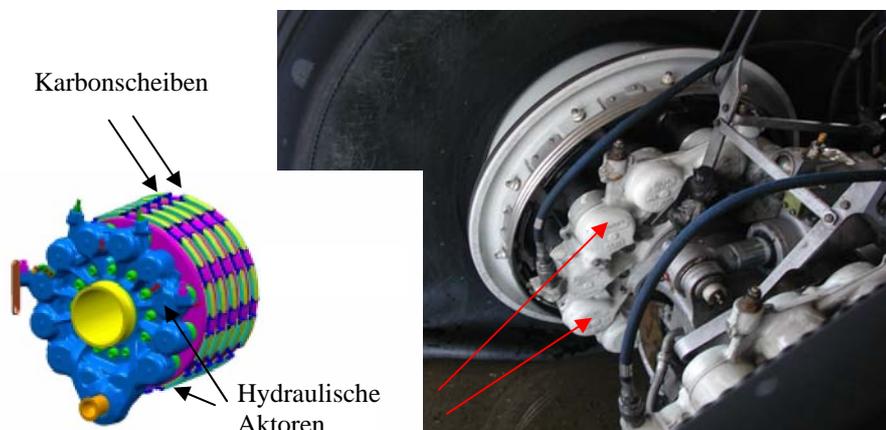


Abbildung 1: *Hydraulische Flugzeugbremse*

dem ist Hydrauliköl brennbar und stellt eine Gefahr im Brandfall dar. Alle diese Nachteile des hydraulischen Bremssystems führten in den letzten Jahren zur Entwicklung elektromechanischer Bremsen.

1.2 Elektromagnetische Flugzeugbremse

Abbildung 2 zeigt die erste moderne elektromagnetische Bremse, die von der französischen Firma „Messier-Bugatti“ entwickelt wurde und sich zurzeit in der Testphase befindet [MB06]. Als elektrische Motoren höchster Leistungsdichte werden permanentmagneterregte Synchronmotoren (PMSM) eingesetzt. Im Gegensatz zum hydraulischen Zylinder wird die rotatorische Bewegung des Motors erst durch eine Spindel in eine lineare Bewegung umgesetzt. Dabei muss die vergleichsweise hohe Drehzahl des Motors an die langsame Verschiebung der Spindel angepasst werden, wobei dynamische Anforderungen z. B. des Anti-Blockier-Systems zu berücksichtigen sind. Dies wird durch ein rotatorisches Getriebe mit hoher Übersetzung zusammen mit einer Kugelgewindespindel bewerkstelligt.

Die elektromechanische Bremse verspricht deutlich geringere Wartungskosten und eine Reduzierung der Brandgefahr. Da das System nun eine ausschließlich elektrische Steuerung und Aktorik beinhaltet, und nicht wie zuvor ein Mischsystem ist, sollen auch die Entwicklungskosten niedriger ausfallen [MB06]. Aus globaler Sicht planen die Firmen EADS, Airbus und Messier-Bugatti als Zulieferer von Bremssystemen für Airbus und Boeing den Anteil hydraulischer und pneumatischer Systeme im Flugzeug innerhalb der Programme „More Electric Aircraft“ oder dem aktuellsten „All Electric Aircraft“ durch elektrische Systeme deutlich zu reduzieren oder sogar völlig zu ersetzen [JÄN04], [JÄN06], [FAL06].

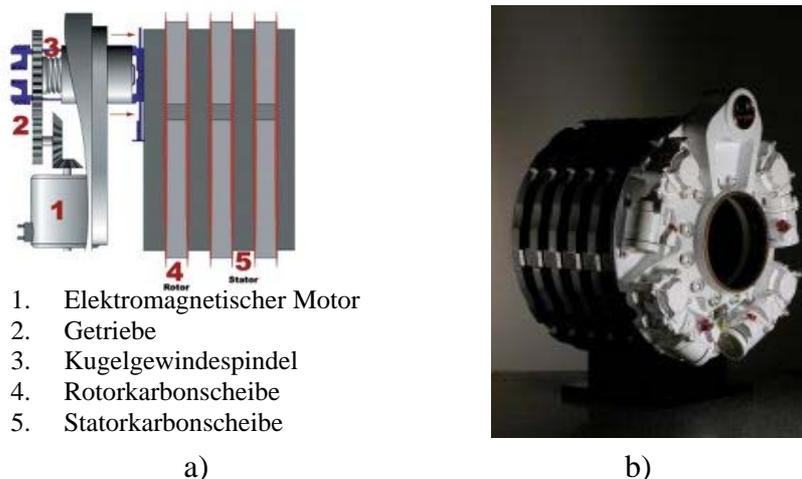


Abbildung 2: Elektromagnetische Flugzeugbremse [MB06]
 a) Schematische Darstellung
 b) Prototyp

Der elektromechanische Antrieb löst zwar einige Nachteile der hydraulischen Bremse, bringt aber eine Reihe neuer Probleme mit sich. Hauptproblem bei der Anwendung eines Elektromotors höchster Leistungsdichte ist die vergleichsweise hohe Drehzahl und das deshalb notwendige Getriebe mit großer Übersetzung. Dies resultiert in einem großen Gesamtgewicht der in Abbildung 2 dargestellten Konstruktion. Bedingt durch hohe Übersetzung und die Eigenmassen der Getrieberäder ergibt sich außerdem eine sehr hohe Trägheit der zu bewegenden Massen. Um diese Trägheit bei der geforderten Dynamik von ca. 10 Hz Grenzfrequenz des Antiblockiersystems (ABS) zu überwinden, muss der Elektromotor ein hohes Drehmoment aufbringen, welches zu hohen Eingangsströmen und Leistungen führt. Der Spitzenleistungsbedarf der elektromechanischen Bremse beim Anlegen der Bremscheiben und während des ABS-Betriebs kann ein Vielfaches der Leistung beim Halten konstanter Bremskraft betragen. Derart starke Leistungsschwankungen sind für das elektrische Bordsystem jedoch höchst unerwünscht und können in einem schwachen Bordnetz auf andere Verbraucher zurückwirken. Moderne elektrische Energiespeicher wie z.B. Superkondensatoren (Supercap, Ultracap) könnten das Problem der Leistungsschwankungen mildern; Untersuchungen dazu sind bis jetzt jedoch nicht bekannt.

1.3 Piezoelektrische Flugzeugbremse

Eine gute Alternative zu elektromagnetischen Antrieben stellen piezoelektrische Ultraschallmotoren dar. Im Unterschied zu Elektromotoren können piezoelektrische Antriebe bei geringen Drehzahlen sehr hohe Drehmomente erzeugen und benötigen daher bei geschickter Auslegung kein Getriebe. Die Masse (ohne Umrichter) und die resultierende Trägheit der piezoelektrischen Antriebe sind im Vergleich zu Elektromotoren geringer. Diese Vorteile machen die piezoelektrischen Antriebe attraktiv für die Flugzeugindustrie [JÄN04]. Als klassische piezoelektrische Antriebslösung kann der Wanderwellenmotor genannt werden [MAA00]. Diese Motoren sind jedoch nur für kleine Leistungen bis ca. 20 Watt verfügbar und haben einen schlechten Wirkungsgrad. Deshalb werden Wanderwellenmotoren nie im Dauerbetrieb eingesetzt.

Im EU-Projekt PAMELA entwickelte die französische Firma SAGEM eine neue Generation piezoelektrischer Aktoren. Ein Multimassen-Ultraschallmotor (MM-USM) sollte für die Landeklappenverstellung ebenso wie für einen Steuerknüppel mit Krafrückkopplung in einem Flugzeug eingesetzt werden. Im Unterschied zum Wanderwellenmotor werden bei dieser Lösung mehrere Schwingmassen auf elliptische Laufbahnen mittels zweier senkrecht zueinander angeordneten Gruppen von Piezoelementen gebracht. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des PAMELA MM-USM. Die aufwendige elektrische Speisung des Hochleistungs-MM-USM erfolgte durch einen LLCC-Resonanzkonverter [SCH01].

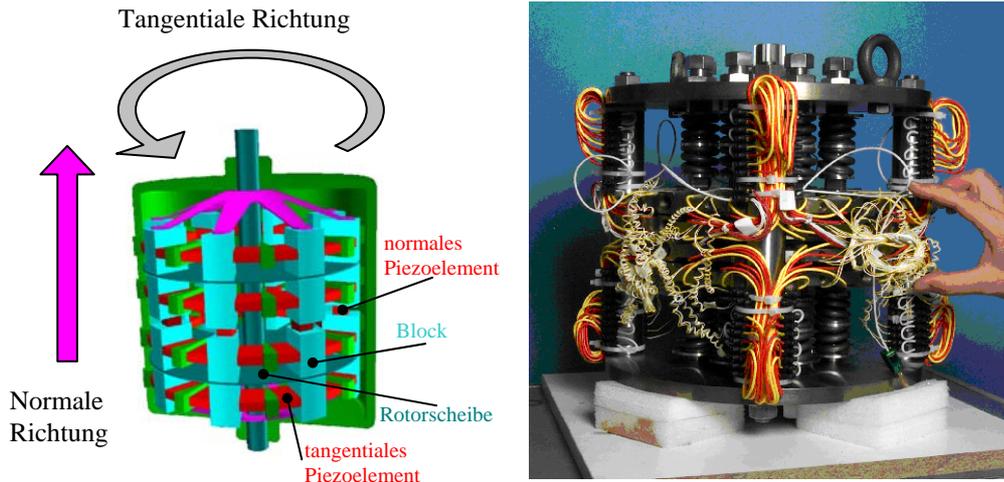


Abbildung 3: PAMELA Multimassen-Ultraschallmotor (MM-USM)

Die Idee des neuen EU-Projekts PIBRAC ist die Entwicklung einer piezoelektrischen Flugzeugbremse, basierend auf einem MM-USM. Die Kugelgewindespindel (vgl. Abbildung 2) kann in diesem Fall direkt vom MM-USM angetrieben werden. Somit entfällt das aufwendige Getriebe und die Trägheit des Aktors ist somit klein.

Der neue MM-USM ist eine Weiterentwicklung des Motors aus dem früheren Projekt. Neben einer Skalierung wurde eine Reihe von konstruktiven Verbesserungen durchgeführt.

2 Multimassen-Ultraschallmotor

Der piezoelektrische Multimassen-Ultraschall Motor (MM-USM) besteht aus 32 schwingenden Blöcken, die von zwei Gruppen schwingender Piezoelemente in normaler und tangentialer Richtung (vgl. Abbildung 3) zu elliptischen Bewegungen angeregt werden. Die schwingenden Blöcke sind in 4 Ebenen mit jeweils 8 Blöcken angeordnet. Zwei Rotorscheiben des MM-USM werden jeweils von zwei Ebenen der Blöcke angetrieben. Das Drehmoment wird von beiden Rotorscheiben an die Rotorwelle übertragen.

Abbildung 4 zeigt ein Fragment des modifizierten PIBRAC MM-USM mit zwei schwingenden Blöcken [AUD01]. Eine wesentliche Neuerung des Motors ist die Einführung einer elastischen Schicht zwischen den Blöcken und der Rotorscheibe. Dadurch kann die elliptische Bewegung der Blöcke besser von der kontinuierlichen Bewegung der Rotorscheibe entkop-

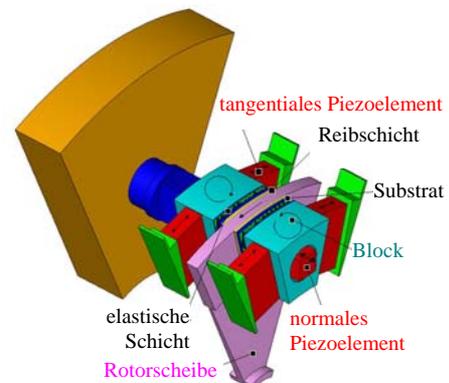


Abbildung 4: Motorfragment des PIBRAC MM-USM [WET06]

pelt werden. Zum Schutz der elastischen Schicht vor der Abnutzung und zur Gewährleistung eines definierten Reibkoeffizienten wird eine dünne Reibschicht auf die elastische Schicht aufgebracht.

Abbildung 5 verdeutlicht das Funktionsprinzip des MM-USM. Damit die Blöcke ihre elliptischen Bewegungen ausführen und auf diese Weise die Rotorscheibe pulsartig weitertreiben, werden tangentiale und normale Piezoelemente mit phasenversetzten Wechsellspannungen angesteuert. Im dargestellten Zustand bewegen sich die linken und die rechten Blockmassen aufeinander zu. Die in Abbildung 5 „äußeren“ tangentialen Piezoelemente werden zu diesem Zeitpunkt mit positiver Spannung angesteuert und dehnen sich. Auf die anderen tangentialen Piezoelemente wird eine negative Spannung geschaltet, so dass sich diese zusammenziehen (innere Elemente in Abbildung 5). Die Piezoelemente der Normalenrichtung werden mit Spannungen versorgt, die in der Phase zu den tangentialen Spannungen um etwa 90° verschoben sind. Je zwei benachbarte normale Piezoelemente müssen dabei mit jeweils umgekehrter Polarität betrieben werden. Im dargestellten Zustand üben die linken Blöcke eine deutlich höhere Anpresskraft auf die Rotorscheibe aus, als die rechten. Der Unterschied in der Anpresskraft wirkt sich in

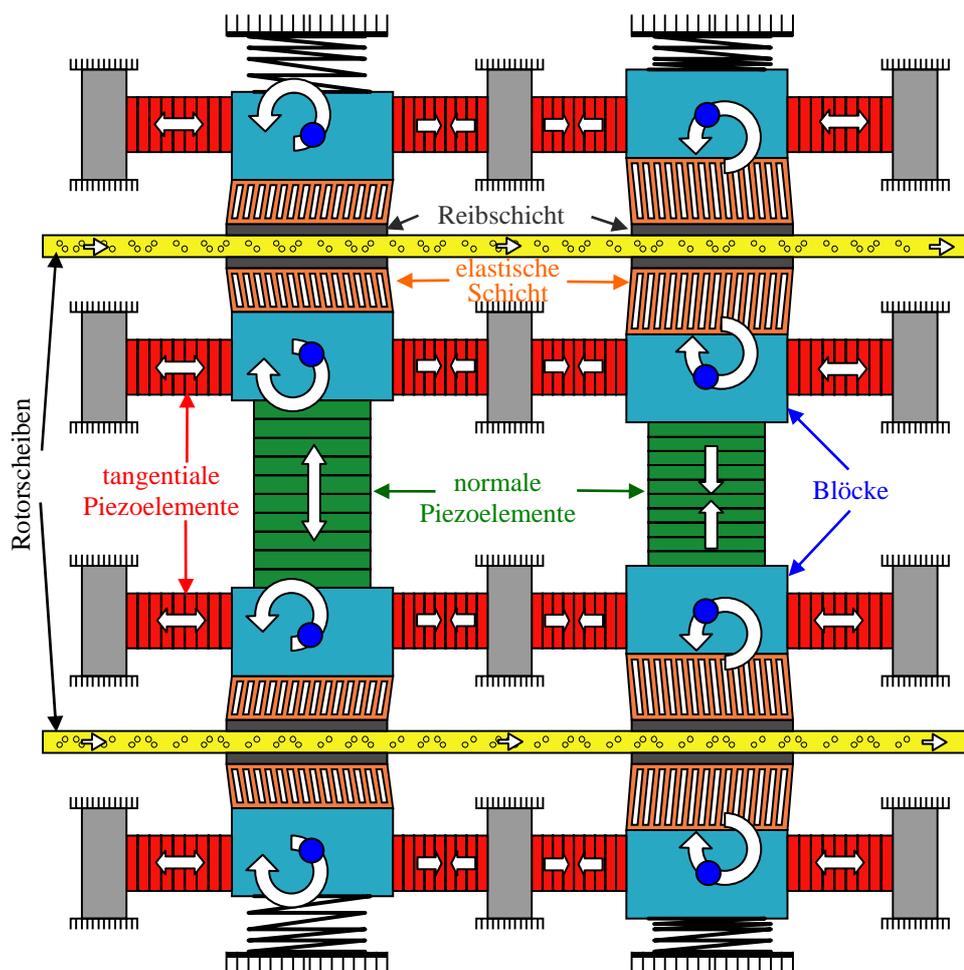


Abbildung 5: Funktionsprinzip des MM-USM

den unterschiedlichen Reibkräften aus. Dadurch wird die Rotorscheibe zum dargestellten Zeitpunkt von den linken Blöcken durch deren höhere Reibkraft angetrieben. Die rechten Blöcke laufen zu diesem Zeitpunkt zurück und bremsen zwar die Rotorscheibe, aber mit einer schwächeren Reibkraft. Der dargestellte Vorgang wiederholt sich zyklisch, wobei die Piezoelemente möglichst nah ihrer Resonanzfrequenz mit sinusförmigen Spannungen angesteuert werden.

Der Reibschluss zwischen den Blockmassen und der Rotorscheibe ist für die Funktion des MM-USM von größter Bedeutung. Die Reibkraft wirkt einerseits nutzbringend während der Vorwärtsbewegung, andererseits verschlechtert die Reibkraft während des Rücklaufs aber die mittlere Kraftausbeute und den Wirkungsgrad. Durch die Einbringung der elastischen Schicht kann das Verhältnis zwischen der antreibenden und bremsenden Wirkung der Reibkraft gegenüber dem klassischen Wanderwellenmotor von weniger als 20% [SCH04] auf 40% Wirkungsgrad verbessert werden. Die Entwickler des MM-USM erarbeiten momentan Lösungen zur Minimierung der Bremswirkung während des Rücklaufs der Blockmassen. Dies sollte zur weiteren Wirkungsgradsteigerung des MM-USM führen.

3 Modellierung des MM-USM

Zur Modellierung des MM-USM wurde in MATLAB/SIMULINK ein vereinfachtes Modell erstellt [WET06]. Dieses Modell erlaubt die Motormodellierung auf Systemebene, die zur Verständnis der Reibvorgänge, zur Untersuchung des Drehzahl-Drehmoment-Verhaltens und zur Reglerauslegung benutzt wird. Abbildung 6 zeigt die Struktur des SIMULINK-Modells. Eine detaillierte Simulation des Motorverhaltens und Verifikation der mechanischen Motorauslegung erfolgt mittels Finite Element Methode (FEM). Das FEM-Modell ist detaillierter als das SIMULINK-Modell und

berücksichtigt eine Reihe konstruktiver Besonderheiten und parasitärer Effekte. Für eine Modellierung auf Systemebene ist das FEM-Modell jedoch zu kompliziert und weniger geeignet. In [WET06] wird das FEM-Modell als Verifikation für das

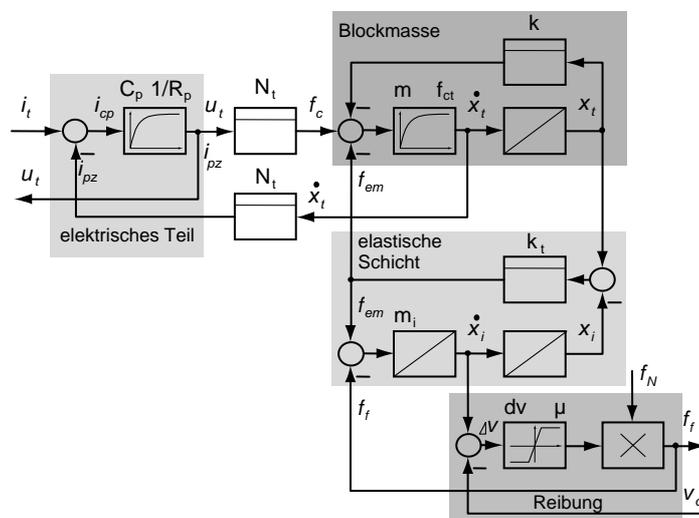


Abbildung 6: Verallgemeinertes Modell des MM-USM

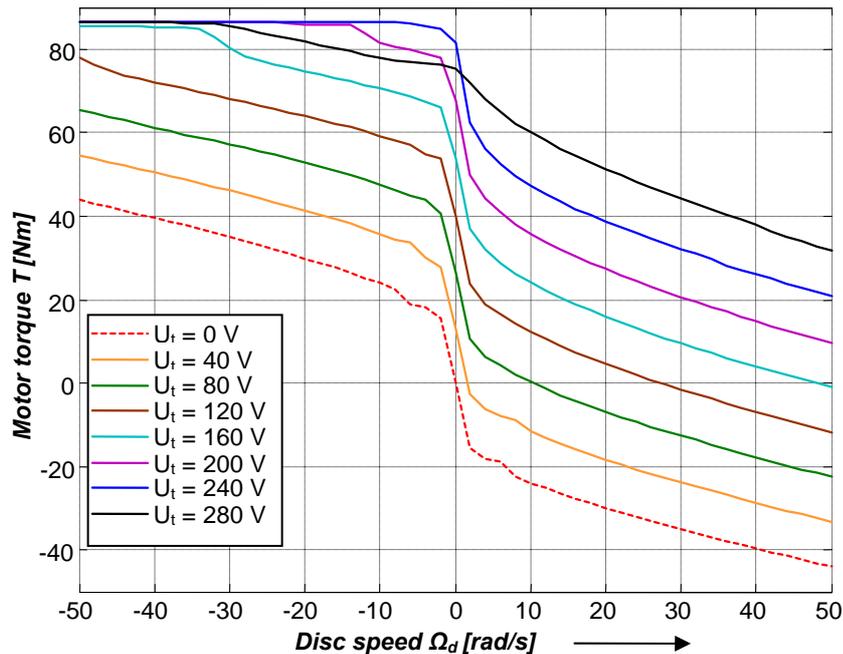


Abbildung 7: Drehzahl-Drehmoment-Kurven des MM-USM
(erzeugt mit MATLAB / SIMULINK)

SIMULINK-Modell verwendet. Die Übereinstimmungen und Unterschiede werden diskutiert.

Abbildung 7 zeigt die Drehzahl-Drehmoment-Kurven des MM-USM, die mit dem SIMULINK-Modell bestimmt wurden. Für den Motorbetrieb ist das Verhalten im ersten Quadranten relevant. Der Motor weist wie auch der Wanderwellenmotor [SCH01] hohe Haltedrehmomente auf. Das Lastverhalten des MM-USM bei höheren Drehzahlen (über 10 rad/s) kann gut durch Geraden approximiert werden. Bei kleineren Drehzahlen ist dagegen ein nichtlineares Verhalten zu erkennen, so dass die Verwendung adaptiver Regelkonzepte erforderlich ist.

4 Antriebsregelungsstruktur für den MM-USM

Abbildung 8 zeigt die Regelungsstruktur des MM-USM. Die kaskadierte Regelung mit unterlagerten Drehzahl- und Drehmomentregelung steuert die Spannungsamplitude der tangentialen Piezoelemente. Die Sollwerte für diese Regelung werden vom übergeordneten Fahrprofilmodul generiert. Dieses Modul übernimmt gleichzeitig die Koordinierung der einzelnen untergeordneten Regelungen und die Generierung der Parameter für den Arbeitspunkt. Die Positions- und die Geschwindigkeitsregelung können durch gezielte Vorgabe der Sollwerte für bestimmte Bremsphasen fahrprofilabhängig deaktiviert werden. Während die Bremse „angefahren“ wird, benötigt man die beiden Regelungen. Beim eigentlichen Bremsvorgang genügt die Drehmoment- bzw. Anpresskraftregelung. Bedingt durch das stark nichtlineare Motorverhalten ist eine arbeitspunktabhängige Adaption der Regelparameter und ggf. der Reglerstruktur notwendig.

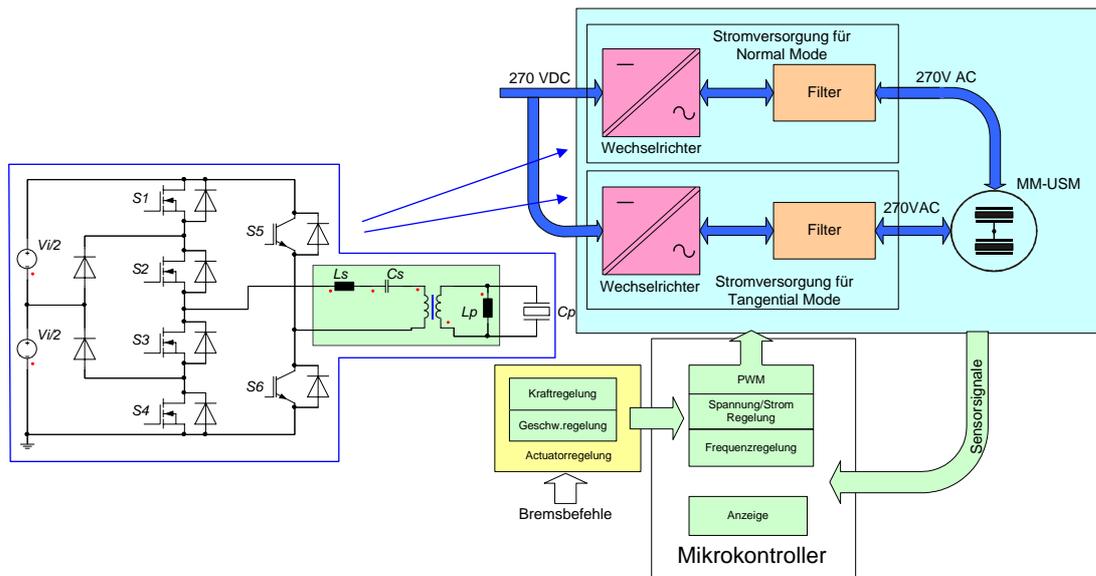


Abbildung 9: Struktur der Stromversorgung

lasswiderstände und günstiges Schaltverhalten aufweisen. Außerdem ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade für die Minimierung der durch die Pulsweitenmodulation bedingten Oberschwingungen.

Die Spannungs- und Stromregelung sowie die Erzeugung der optimierten pulsweiten-modulierten Muster erfolgt in einem FPGA-basierten Mikrokontroller.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der dargestellte Multimassen-Ultraschallmotors (MM-USM) stellt ein völlig neuartiges Aktorprinzip dar, welches elektromagnetischen Aktoren hinsichtlich Trägheit und Spitzenleistung überlegen ist und Vorteile für den Einsatz in einer Flugzeugbremse verspricht. Die Modellbildung dieses Motors, welche Grundlage für Systemuntersuchungen und den Regelungsentwurf ist, wurde vorgestellt. Die elektronische Stromversorgung, die über eine Verstellung von Spannungsamplitude, Phase und Frequenz eine Regelung von Drehmoment und Drehzahl ermöglicht, wurde kurz skizziert. Prototypen von Motor und geregelter Stromversorgung sind momentan im Aufbau und werden 2007 in Betrieb genommen und optimiert.

Danksagung

Die Autoren dieser Publikation bedanken sich bei der EU für die großzügige finanzielle Unterstützung des Projekts PIBRAC, Projektnummer: AST4-CT-2005-516111 und bei den Projektpartnern für die Zusammenarbeit.

Literatur

- [AUD01] Audren, J. T.; Bezanere, D.: „Vibration motors“. United States Patent 6628044, September 2003
- [FAL06] Faleiro, Lester: “Summary of the European Power Optimised Aircraft (POA) Project”. 25th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2006
- [JÄN04] Jänker, P.; Grohmann, B. A.; van den Bossche, D.: “Actuator Technology – Driver of Aerospace System Innovation –“. ACTUATOR-2004, Bremen, Germany, June 2004, pp. 168-176.
- [JÄN06] Jänker, P.; Claeysen, F.: “New Actuators for Aircraft and Space Applications”. ACTUATOR-2006, Bremen, Germany, June 2006, pp. 324-329.
- [LI06-1] Li, R.; Fröhleke, N.; Wetzel, H.; Böcker, J.; Ouchouche, S.; Agostini, E.; Audren, J.-T.: “Power Supply and control scheme for an airborne piezoelectric brake actuator”. ACTUATOR-2006, Bremen, Germany, June 2006, pp. 960-963.
- [LI06-2] Li, R.; Fröhleke, N.; Wetzel, H.; Böcker, J.: “Investigation on Power Supplies for a Piezoelectric Brake Actuator in Aircrafts”. IPEMC-2006, Shanghai, China, August, 2006.
- [MAA00] Maas, J.; Schulte, T.; Fröhleke, N.: “Model-based control for ultrasonic motors”. Mechatronics, Transactions on IEEE/ASME, Volume 5, Issue 2, June 2000, pp. 165-180
- [MB06] Messier-Bugatti: “Electric on track for smooth introduction BRAKE”.
<http://www.messier-bugatti.com>
- [PIB04] <http://www.pibrac.org> Webseite des EU-Projekts PIBRAC
- [SCH99] Schulte, T.; Grotstollen, H.; Schöner, H.-P.; Audren, J.-T.: „Active Control Stick Driven by a Piezo Electric Motor“. Proc. of the 3rd International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems. Patras, Griechenland, 1999.
- [SCH01] Schulte, T.; Fröhleke, N.: „Development of power converter for high power piezoelectric motors“. Aupec 2001.
- [SCH04] Schulte, T.: “Stromrichter und Regelungskonzept für Ultraschall-Wandervellenmotoren”. Dissertation an der Universität Paderborn. Fortschritt Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 363; Paderborn, 2004.
- [WET06] Wetzel, H.; Fröhleke, N.; Böcker, J.; Ouchouche, S.; Bézanère, D.; Cugnon, F.: “Modelling and Control of a Multi-Mass Ultrasonic Motor for Airborne Applications”. IEEE IECON-2006, Paris, France, November 2006.

Lebensläufe der Autoren:

Hermann Wetzel ist seit 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik. Nach dem Studium der Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Tscheljabinsk in Russland arbeitete er von 1995 bis 1996 als Entwicklungsingenieur im Automatisierungszentrum der FESTO KG für die Uralregion. Anschließend studierte er von 1998 bis 2001 Elektrotechnik an der Universität Paderborn. Von 2001 bis 2005 arbeitete er an der Entwicklung von Stromversorgungen hoher Leistungsdichte. Seit 2005 beschäftigt er sich mit der Modellierung und Regelung piezoelektrischer Aktoren.

Rongyuan Li ist seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn. Er empfing den B.S. und M.S. Abschluss von der Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, 1998 und 2001. Seine Forschungsinteressen schließen Digitalsteuerung für Energie- und Elektronikanwendungen, leistungsstarke Konverter und weichschaltende Techniken ein.

Norbert Fröhleke koordiniert seit 1989 am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik die Forschungsaktivitäten im Arbeitsbereich elektronische Stromversorgungen und hält 3 Lehrveranstaltungen. Er erhielt den Titel des Ing. grad. der Elektrotechnik von der Universität Paderborn 1975, des Diplomingenieurs von der Technischen Universität Berlin 1984 und den Dr. Ing. von der Universität Paderborn 1991. Neben den Arbeitsfeldern Steuerung von Werkzeugmaschinen, Elektronikwartung elektrischer Kraftwerke und Ausbildung von Technikern arbeitete er in der Leistungselektronik bei der AEG. Seine Forschungsinteressen beinhalten: Modellierung, Regelung, rechnergestützter Entwurf magnetischer Bauteile und elektronischer Stromversorgungen, Speisung und Regelung piezoelektrischer Antriebe.

Joachim Böcker ist seit 2003 Professor für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn. Er studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte danach am dortigen Institut für Mechanik. Von 1988 bis 2001 arbeitete er im Forschungslabor für Elektrische Antriebstechnik und Leistungselektronik der AEG AG, welches später auf die DaimlerChrysler AG überging, als Leiter der Gruppe Regelungstechnik. Von 2001 bis 2003 führte er ein eigenes Ingenieurbüro.