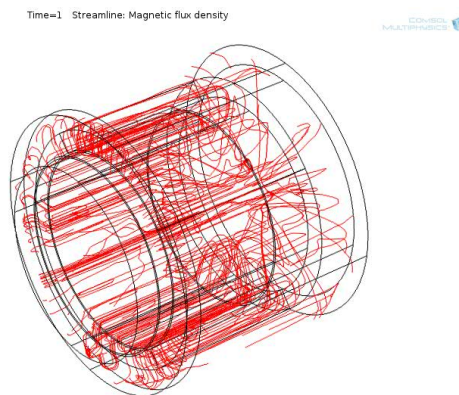


SIMULATIONSANALYSE DER ELEKTROMAGNETISCHEN EIGENSCHAFTEN VON AKTUATOREN

Christoph Blaufuß, Roland Tiedemann, Jan Truglitschka, Fachhochschule Lübeck, 23562 Lübeck, Deutschland

Zusammenfassung

Elektromagnetische Aktuatoren gewinnen immer mehr an Bedeutung und haben sich in den Bereichen, in denen zuverlässiges und dynamisches Verhalten gefragt ist, schon gänzlich durchgesetzt. Besonders in der Luft- und Raumfahrttechnik übernehmen sie wichtige Aufgaben, wie Kraftstoffreglung und -dosierung oder Primär- und Sekundärflugsteuerreglung. Ihre Vorteile gegenüber konventionellen pneumatischen und hydraulischen Systemen liegen auf der Hand. Elektrische Aktuatoren sind wartungsärmer und schließen Leckagen der Zuleitungen aus. Auch Bauraum und Gewicht sind im Leistungsvergleich kleiner. Dies verringert auch den CO₂-Ausstoß. Der ausschlaggebende Punkt für den Einsatz elektromagnetischer Aktuatoren ist aber die enorm hohe Dynamik und die genaue Steuerbarkeit. Diese Dynamik erreicht man durch die Bestromung des Aktuators mit einem hochfrequenten Rechteckpuls muster. Durch frequente Bestromung können die elektromagnetischen Eigenschaften nicht mehr als konstant angenommen werden. Die Eigenschaft des ferromagnetischen Kerns, magnetische Energie zu speichern, verändert sich. Die Änderungen haben direkte Auswirkungen auf die Kraft, die auf den Anker wirkt und somit auch auf die Schaltgeschwindigkeit. Diese wissenschaftliche Arbeit wurde durch eine technische Einordnung und Zusammenarbeit mit Herrn Jan Truglitschka Dipl.-Ing.(FH) vom Unternehmen Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG ermöglicht. Das Ziel ist die Simulation eines elektromagnetischen Aktuators mittels FEM-Simulationstool von Comsol Multiphysics. Die Darstellung 1.1 zeigt ein erstes Bild des Modells und den Verlauf der magnetischen Feldlinien.



magnetischer Fluss im Aktuator

Mit Hilfe dieses Modells soll untersucht werden, welche Auswirkungen eine Bestromung mit unterschiedlichen Frequenzen auf die Induktivität, die magnetische Flussdichte und die Kraftwirkung hat. Dabei ist es interessant zu sehen, bei welcher Grenzfrequenz eine Änderung der drei Größen eintritt und welche Auswirkungen diese auf den Aktuator haben.

1 EINLEITUNG

In Form der Zusammenarbeit der Fachhochschule Lübeck und der Firma Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, vertreten durch Herrn Jan Truglitschka, wurde ein elektromagnetischer Aktuator zum Entlüften von Verdichterstufen näher untersucht. Das Entlüften von Verdichtern ist eine grundlegende Methode zur Stabilisierung von Luftfahrttriebwerken. Es erfolgt über Ventile, die über die elektrischen Aktuatoren gesteuert werden. Dabei stellt man drei Grundanforderungen an einen Aktuator und das von ihm gesteuerte System:

1. eine zeitlich exakte Auslösung der Entlüftung
2. eine schnelle Ausführung der Entlüftung
3. eine sichere Durchführung der Entlüftung

1. Eine zu frühe Auslösung der Ventile würde dazu führen, dass der Verdichter unnötig hochenergetische Luft verliert und damit seinen Wirkungsgrad senkt. Eine zu späte Auslösung wiederum treibt den Verdichter in einen instabilen Bereich, welches den Ausfall der gesamten Turbine zur Folge haben kann.

2. Verbunden mit Punkt 1 ist auch die schnelle Ausführung der Entlüftung, da eine Turbine und damit auch der Verdichter ständigen Lastwechseln ausgesetzt sind und die Ablastventile darauf reagieren müssen.

3. Der wichtigste Aspekt bei einem Luftfahrttriebwerk ist aber die sichere Durchführung der Entlüftung. Sollte die Entlüftung nicht durchgeführt werden, kann, wie schon unter Punkt 1 erwähnt, das Triebwerk ausfallen. Für die Detektion der Entlüftung wird die Aktuatorstromstärke heran gezogen. Beim Erreichen einer gewissen Stromschwelle ist das Auslösen des Aktuators sicher. Sollte der Aktuator nicht die Stromschwelle erreichen, so wird das Ventil durch eine Feder, in einem für den Verdichter unkritischen aber verlustbehafteten Bereich, gehalten. Das heißt, nicht dedektierte Schaltvorgänge verschlechtern den Wirkungsgrad des Verdichters. Um diese Verluste klein zu halten, ist es notwendig, sich näher mit dem Entlüftungsvorgang zu beschäftigen [2].

Die Arbeit befasst sich ausschließlich mit dem elektromagnetischen Aktuator der Verdichterentlüftung. Dabei soll insbesondere auf die elektromagnetischen Eigenschaften und deren Abhängigkeit eingegangen werden. Weitere Untersuchungen verknüpfen die Elektrodynamik mit der Mechanik, und zwar im Speziellen mit der Kraft, mit dem der Zylinder des Aktuators aus seinem Ruhezustand beschleunigt wird. Dabei wird nur der mechanisch stationäre Zustand

betrachtet, also genau der Punkt, an dem der Zylinder genügend Kraft erfährt, um beschleunigt zu werden. Der Zeitpunkt, an dem der Zylinder in Bewegung versetzt wird, und die Gegebenheiten unter denen dieses erfolgt, spielen dabei eine wichtige Rolle, um eine korrekte Aussage über den Schaltvorgang zu erlangen.

2 AUFBAU

In diesem Kapitel sollen die Lage und der Aufbau des Aktuators in dem Verdichter gezeigt werden. Dies soll nicht nur dem besseren Verständnis dienen, sondern auch den magnetischen Kreis darstellen, der von der Erregerspule erzeugt wird. Die Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Aktuators und dessen Anbindung an das Entlüftungssystem.

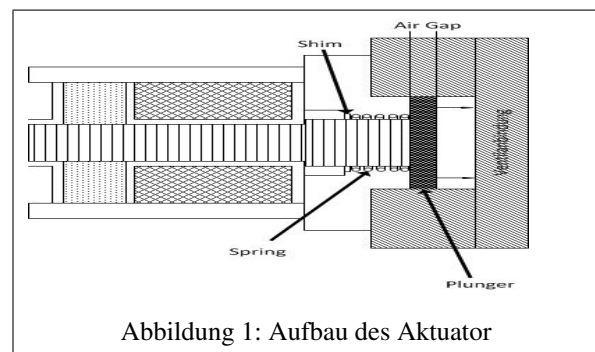
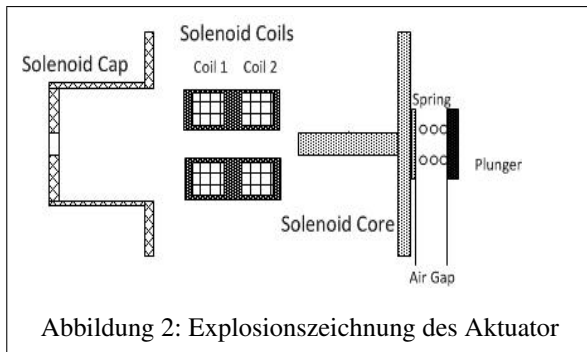


Abbildung 1: Aufbau des Aktuators

In der Luft- und Raumfahrttechnik wird meist durchgängig in der englischen Sprache kommuniziert. Aus diesem Grund sind die in dieser Arbeit verwendeten Abbildungen fast ausschließlich in Englisch beschriftet. Beim Betrachten der Abbildung 1 widmen wir uns erst einmal den beweglichen Teilen des Aktuators. Der Plunger, auch „Pennywasher“ genannt, ist der bewegliche Kolben, der von der elektromagnetischen Kraft axial nach links gezogen wird. Durch die Stellung des Plungers wird das Verhalten des Verdichters gesteuert. Die Spring drückt den Plunger in eine definierte Position und sorgt dafür, dass auch im Falle eines Totalausfalls des Aktuators der Verdichter in einem unkritischen Arbeitspunkt betrieben wird. Der Air Gap ist der Weg, den der Plunger bei einem Schaltvorgang zurücklegen muss und ist für die Schaltgeschwindigkeit des Aktuators von entscheidender Bedeutung. Auf diesen Punkt wird in den nächsten Abschnitten noch weiter eingegangen [2].

Die Abbildung 2 zeigt eine Explosionszeichnung des Aktuators. An dieser Abbildung soll der magnetische Kreis beschrieben werden.



In der Zeichnung ist zu sehen, dass sich zwei Spulen (Coil) in dem Aktuator befinden. Diese bilden zusammen ein redundantes System. Falls eine Spule auf Grund eines Fehlers ausfallen sollte, kann die Funktion mit der Zweiten aufrechterhalten werden. Der Solenoid Cap bildet die Fassung der Solenoid Coils. Das Innere des Solenoid Coils wird durch den Solenoid Core gefüllt. Am rechten Ende des Solenoid Cores befindet sich eine plane Fläche, auf der die Spring sitzt und den Plunger bei ihrer Entspannung auf die Distanz des Air Gaps hält. Der Air Gap ist in der Regel 0,5 mm groß. Im aktiven Zustand, also bei einem Stromfluss in den Spulen, bildet sich ein Magnetfeld nach der „rechten Hand-Regel“ aus. Der magnetische Kreis geht über den Solenoid Core, durchdringt den Air Gap und den Plunger und schließt sich über dem Solenoid Cap, der mit seiner magnetisch leitenden Hülle den Rückleiter bildet. Der Aktuator ist axial rotationssymmetrisch und bildet geometrisch einen Zylinder. Am Verdichter ist der Aktuator durch Bolzen, die durch den Solenoid Cap gehen, befestigt.

3 WIRKUNGSWEISE UND ABHÄNGIGKEITEN

In der Betrachtung der Wirkungsweise des Aktuator kann man dieses Kapitel in drei Unterpunkte aufteilen:

1. die magnetische Kraftwirkung
2. die Eigenschaften des magnetischen Kreises
3. die elektrotechnischen Eigenschaften beim Erregen der Spulen

Alle drei Punkte müssen durchlaufen werden, um eine Wandlung von elektrischer in translatorische Energie zu erzeugen. Das bedeutet, dass jeder Bereich genau untersucht werden muss, um eventuelle Abhängigkeiten herauszufinden, die Auswirkungen auf die Druckkraft des Aktuator haben.

3.1 Die magnetische Kraftwirkung

Ein Aktuator funktioniert prinzipiell wie ein Elektromagnet. Das Magnetfeld versucht den Luftspalt zu verkleinern, damit sich die Feldlinien über einen geringen magnetischen Widerstand schließen können. Für die Herleitung der Kraft auf den Plunger betrachten wir den magnetischen Kreis des Aktuator und dessen Energiebilanz. Im Stillstand des Plungers besitzt der Aktuator eine gewisse Induktivität(L), die sich mit dem in Kapitel 2 beschriebenen magnetischen Weg bestimmen lässt. Bewegt sich der Plunger in die Richtung des Feldes, erhöht sich damit die Induktivität und mit ihr der magnetische Fluss Ψ .

$$(1) \quad d\Psi = i \cdot dL$$

Durch die Flussänderung, die innerhalb einer Zeit Δt passiert, wird eine elektrische Spannung

$$(2) \quad \varphi = -\frac{d\Psi}{dt} = -i \cdot \frac{dL}{dt}$$

induziert. Dies bedeutet, dass die Stromquelle dem Aktuator mehr Energie(W) zur Verfügung stellt.

$$(3) \quad dW = i \cdot u \cdot dt = i^2 dL$$

Die Gleichung der magnetischen Energie wird als bekannt vorausgesetzt und setzt sich wie folgt zusammen:

$$(4) \quad dW_{mag} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot dL$$

Um die Energiebilanz aufrecht zu halten, muss die Differenz der beiden Energien die mechanische Energie sein:

$$(5) \quad dW_{mech} = dW - dW_{mag} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot dL$$

Die Kraft(F) auf den Plunger ergibt sich aus der Energie differenziert nach dem Weg:

$$(6) \quad F = \frac{dW_{mech}}{dx} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{dx}$$

Der Strom (i) in der Erregerspule geht also quadratisch in die Kraft des Aktuator ein. Weiterhin ist sie abhängig von der Änderung der Induktivität, die

aus der Verkleinerung des Luftspaltes resultiert. Um die magnetische Kraft weiter betrachten zu können, müssen wir die Induktivität als Funktion des Luftspaltes darstellen. Die Induktivität einer Ringspule ergibt sich wie folgt:

$$(7) \quad L = \frac{w^2}{R_{Ges}}$$

Wobei w die Windungszahl der Spule und R_{Mag} der magnetische Widerstand des Magnetkreises ist. Die Widerstände des Magnetkreises setzen sich aus dem Widerstand des Luftspaltes und dem des restlichen Weges zusammen.

$$(8) \quad dL = w^2 \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{R_{Mag} + R_L} \right)$$

Bei der Differenzierung ist darauf zu achten, dass nur R_L von der Luftspalllänge abhängig ist.

$$(9) \quad dL = w^2 \cdot \left(\frac{1}{(R_{Mag} + R_L)^2} \right) \cdot \frac{d}{dx} R_L$$

Der magnetische Widerstand in der Luft setzt sich zusammen aus der durchdrungenen Fläche (A), der Luftspalllänge (x) und der Permeabilität (μ_0).

$$(10) \quad R_L = \frac{x}{A \cdot \mu_0}$$

Mit Gleichung (6) ergibt sich für die Kraft des Aktuator:

$$(11) \quad F = \frac{1}{2} \cdot \frac{i^2 \cdot L_{Anf}^2}{w^2} \cdot \frac{d}{dx} \cdot \frac{x}{A \cdot \mu}$$

Da wir den Aktuator allerdings nur im stationären Anfangszustand betrachten wollen, kann der Ausdruck wie folgt vereinfacht werden:

$$(12) \quad F = \frac{1}{2} \cdot \frac{i^2 \cdot L_{Anf}^2}{w^2} \cdot \frac{1}{A \cdot \mu}$$

Der Spulenstrom und die Anfangsinduktivität (L_{Anf}) gehen quadratisch in die Kraft des Aktuator ein. Auf dieser Grundlage kann nun eine Untersuchung der durchdrungenen magnetischen Fläche und des Einschaltverhaltens des Aktuator vorgenommen werden [3].

3.2 Die Eigenschaften des magnetischen Kreises

Die Bestromung des Aktuator erfolgt über eine pulsweitenmodulierte Rechteckspannung, die mit ihren Ein- und Ausschaltzeiten die Öffnungszeiten des Ventils bestimmt. Dabei werden Schaltfrequenzen von bis zu 2,0 kHz erreicht. Aus der Hochfrequenztechnik ist bekannt, dass sich bei hohen Frequenzen die Induktivität einer Spule verkleinert. Da die Kraft des Aktuator quadratisch von der Induktivität abhängt, muss untersucht werden, welche Auswirkungen dieser Effekt auf den Aktuator hat. In diesem Kapitel soll versucht werden, die unsymmetrische Feldverteilung herzuleiten. Zur Vereinfachung des Problems werden die Einschwingvorgänge des Spulenstroms vernachlässigt und der Strom rechteckförmig angenommen. Der Rechteckstrom wird nach Fourier zerlegt und es wird nur die Grundschwingung betrachtet.

Für eine genauere Betrachtung bilden wir den Querschnitt des Aktuator und reduzieren das Problem durch seine Rotationssymmetrie, auf ein zweidimensionales Problem, siehe Abbildung 3.

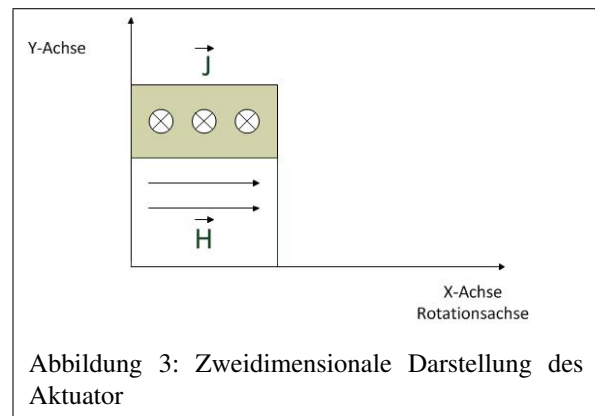


Abbildung 3: Zweidimensionale Darstellung des Aktuator

Wird die Krümmung der Spule vernachlässigt und ein unendlich ausgedehnter Halbraum betrachtet, können die magnetischen Eigenschaften des Kreises sehr gut betrachtet werden. Grundlage sind die Maxwell'schen Gleichungen. Diese können auf Grund des eingeschwungenen Zustandes und der Betrachtung der sinusförmigen Grundschwingung in die komplexe Ebene transformiert werden. Hierbei steht \vec{H} für die magnetische Feldstärke und \vec{E} für die elektrische Feldstärke. Die drei materialabhängigen Konstanten κ , ϵ und μ geben die Leitfähigkeit, die Permittivität und die Permeabilität wieder. ω ist die Kreisfrequenz der Erregung.

$$(13) \quad \text{rot } \vec{H} = (\kappa + j\omega\epsilon) \vec{E}$$

$$(14) \quad \text{rot } \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$

Durch die Überführung in die komplexe Ebene sind die physikalischen Größen nur noch vom Ort und nicht mehr von der Zeit abhängig. Da die elektrische Leitfähigkeit in Leitern, im Falle der Erregerspule das Kupfer, sehr viel größer als die Permittivität ist, kann diese vernachlässigt werden.

$$(15) \quad \text{rot } \vec{H} = \kappa\vec{E}$$

$$(16) \quad \text{rot } \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$

Durch Einsetzen der elektrischen Feldstärke aus Gleichung (15) in Gleichung (16) ergibt sich die ortsabhängige Gleichung der magnetischen Feldstärke.

$$(17) \quad \text{rot rot } \vec{H} + j\omega\mu\kappa\vec{H} = 0$$

Der unansehnliche Ausdruck der Doppelrotation verkürzt sich, durch die Nichtexistenz magnetischer Monopole, wie folgt:

$$(18) \quad \Delta\vec{H} + \underline{k}^2\vec{H} = 0$$

Dabei definieren wir k:

$$(19) \quad \underline{k}^2 = -j\omega\mu\kappa$$

Da der zweidimensionale Raum betrachtet wird und nur die Feldausbreitung in der x Achse durch den Spulenkern von Bedeutung ist, kann folgende Aussage getroffen werden:

$$(20) \quad \vec{H} = H_x \cdot \vec{e}_x$$

Die Differenzialgleichung von Gleichung (18) wird mit dem Exponentialansatz gelöst und ergibt:

$$(21) \quad \frac{\partial^2 H_x}{\partial^2} = -\underline{k}^2 H_x$$

$$(22) \quad H_x = H_{x0} \cdot e^{ay}$$

$$(23) \quad \frac{\partial^2 H_x}{\partial^2} = \underline{a}^2 H_{x0} \cdot e^{ay} = -\underline{k}^2 H_{x0} \cdot e^{ay}$$

Daraus folgt:

$$(24) \quad \underline{a}^2 = -\underline{k}^2 = j\omega\mu\kappa$$

$$(25) \quad \underline{a} = \sqrt{j\omega\mu\kappa}$$

$$(26) \quad \sqrt{j\omega\mu\kappa} = +/ - \frac{1+j}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\omega\mu\kappa} = +/ - \frac{1+j}{\delta}$$

$$(27) \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\kappa}} = \sqrt{\frac{1}{f\pi\mu\kappa}}$$

Die komplette Lösung der Differenzialgleichung lautet:

$$(28) \quad H_x = H_{x0} \cdot e^{-\frac{1+j}{\delta} \cdot y}$$

Für das komplexe a ergibt sich nur das negative Ergebnis, da sonst das Feld mit steigender Entfernung von der Quelle immer größer werden würde. Des weiteren fällt auf, dass die Variable δ die Dimension einer Länge besitzt und sozusagen die magnetische Eindringtiefe darstellt. Sie ist neben den Materialkonstanten auch von der Frequenz abhängig. Je höher also die Frequenz ist, desto mehr wird das magnetische Feld nach außen gedrückt und desto geringer wird die Fläche, die vom Feld durchdrungen wird. Die Fläche des durchdrungenen Feldes ist proportional zur Induktivität und nimmt somit mit steigender Frequenz ab. Die Kraft nimmt dabei quadratisch mit der sinkenden Induktivität ab. Die Betrachtungen, die hier getroffen wurden, gelten nicht für den Einschaltzustand. Eine Verschlimmerung dieses Effektes ist dort anzunehmen. Ein weiteres Problem ist eine nicht gleichmäßige Verteilung des magnetischen Feldes und der damit verbundene mögliche Sättigungseffekt des Spulenkerns. Die in diesem Abschnitt gezeigte Lösung der Feldverteilung kann nicht für die Ermittlung der Kraft auf den Plunger verwendet werden. Es soll lediglich der Effekt der Frequenzabhängigkeit von magnetischen Feld und Induktivität aufgezeigt und auf dessen Probleme hingewiesen werden [1] [3] [4].

3.3 Die elektrotechnischen Eigenschaften beim Erregen der Spulen

In Abschnitt 3.1 war zu sehen, dass die Kraft des Aktuator quadratisch mit dem Strom anwächst. Besonders kritisch ist dieses zum Zeitpunkt des Einschaltens des Aktuator. Es wird eine große Kraft benötigt, um den Plunger gegen seine Verharrung und gegen die Federkraft zu beschleunigen. Der dafür benötigte Strom steigt aber auf Grund der Induktivität nur sehr langsam an. Mit hinreichender Genauigkeit kann das elektrische Schaltbild einer Aktuatorerregerspule durch eine Induktivität und einen in Reihe geschalteten ohmschen Widerstand dargestellt werden, siehe Abbildung 4.

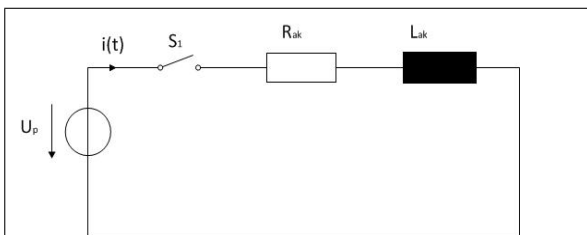


Abbildung 4: Elektrisches Ersatzschaltbild des Aktuator

Der Schalter S_1 stellt die Pulsung der Spannung U_p dar. Auf Streureaktanzen wird verzichtet, da angenommen wird, dass alle Feldlinien sich durch den Spulenkern schließen. Nach Kirchhoff 2 lässt sich die Differenzialgleichung aufstellen.

$$(29) \quad U_p = i(t) \cdot R_{AK} + L \frac{di(t)}{dt}$$

Das Lösen der Differenzialgleichung nach dem zeitvarianten Strom ergibt folgende Aussage:

$$(30) \quad i(t) = \frac{U_p}{R_{ak}} (1 - e^{-t \frac{R_{ak}}{L_{ak}}})$$

Der Widerstand R_{ak} wirkt strombegrenzend und -dämpfend. Der Einschwingvorgang ist mit wachsendem Widerstand früher beendet und der Stromwert ist begrenzt auf den Endzustand $\frac{U_p}{R_{ak}}$. Der Widerstand ist auf Grund seiner Lage im Verdichter hohen Temperaturunterschieden ausgesetzt und muss damit bei der Kraftwirkung berücksichtigt werden. Bei sinkender Induktivität klingt der Schaltvorgang schneller ab und es steht der Endwert des Stromes eher zur Verfügung. An der Amplitude des Stromendwerts nimmt

die Induktivität keinen Einfluss. Für die Kraft bedeutet diese Aussage, dass ein Mittelweg aus schnell ansteigendem Strom und ausreichender Induktivität gefunden werden muss. Eine pauschale Aussage kann hier nicht getroffen werden.

3.4 Zusammenfassung

In den Abschnitten 3.1 bis 3.3 wurde die Wandlung von elektrischer in mechanische Energie aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass ein Kompromiss zwischen schnellem Stromanstieg und hoher Induktivität zu finden ist, um ein Maximum an Auslösegeschwindigkeit zu erzeugen. Bei wachsenden Pulsfrequenzen wird ein Effekt der magnetischen Feldverdrängung erzeugt. Feldüberhöhungen führen auf Grund der unterschiedlichen relativen Permeabilitäten zu einem stark nichtlinearen Verhalten. Diese Nichtlinearitäten sind analytisch nicht oder nur sehr schwer zu erfassen.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, eine weitere Betrachtung des Aktuator mittels eines computergestützten, numerischen Simulationstool durchzuführen. Damit können auch schwierige Sachverhalte durch intelligente Algorithmen gelöst und anschaulich dargestellt werden.

4 NUMMERISCHE SIMULATION DES AKTUATOR

Für die Simulation des Aktuator wird das Simulationstool Multiphysics von der Firma Comsol benutzt. Das Modell wurde mit Daten aus der Praxis angenähert. Allerdings wurde der Luftspalt in das Innere des Aktuator gelegt, da die magnetische Rückführung auch über das Ventil des Verdichters geschieht und dieser auf Grund des hohen Aufwandes bei der Konstruktion nicht mit simuliert werden sollte. Hinsichtlich der Kraftentwicklung hat dieses wohl wenig Einfluss. Die Abbildung 5 stellt die angedeutete Geometrie des Modells dar.

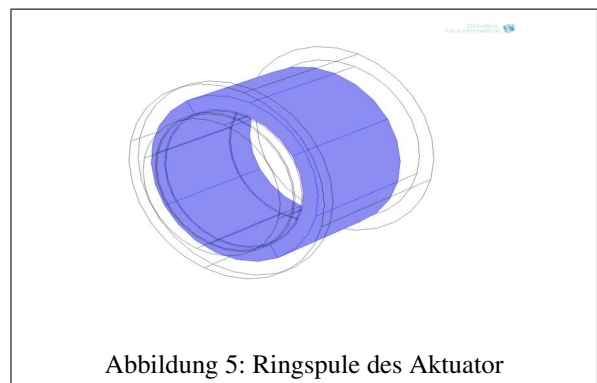


Abbildung 5: Ringspule des Aktuator

Der blau eingefärbte Ring zeigt die Spule des Aktuator. Das Innere des Ringes besteht aus Luftspalt und Spulenkern. Die umschließende Hülle der Spule bildet den magnetischen Rückleiter. Als Spulenmaterial wird Kupfer angenommen. Die magnetischen Rückleiter werden mit Eisen ohne Verluste angenommen, dessen relative Permeabilität 1000 beträgt und konstant ist. Über eine Funktion wird eine Stromdichte in die Spule eingepreßt, die immer senkrecht auf der Fläche steht, siehe Abbildung 6.

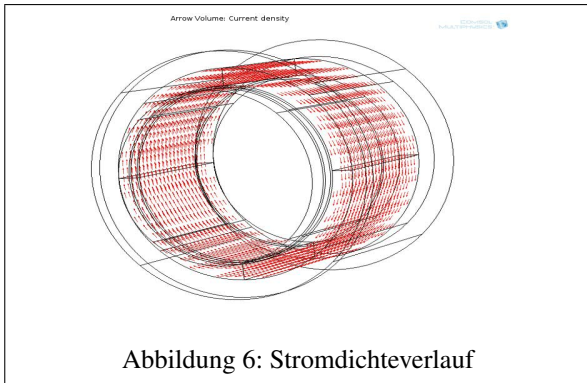


Abbildung 6: Stromdichteverlauf

Die Stromdichte muss einem zeitlichen Verlauf, wie unter Kapitel 3.3 gezeigt, folgen. Das bedeutet, die Stromdichte musste durch eine Funktion der Zeit und des Ortes beschrieben werden. Dies erreicht man durch die zeitliche Diskretisierung. Nach jedem zeitlichen Iterationsschritt wurde jeder Fläche die senkrecht wirkende Stromdichte zugewiesen.

Die Stromdichte erzeugt eine magnetische Feldstärke, die über dem magnetischen Kreis abfällt. Die Abbildung 7 zeigt den zweidimensionalen Schnitt quer durch den Aktuator mit den dazugehörigen Feldstärken.

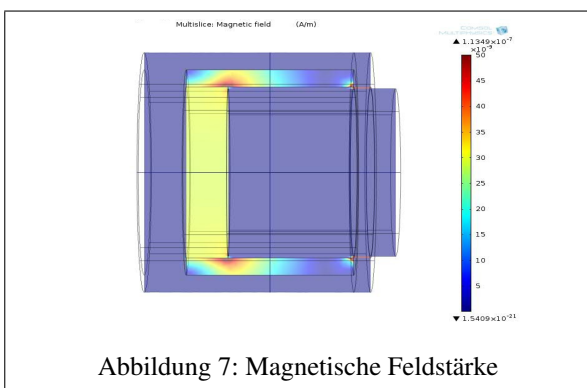


Abbildung 7: Magnetische Feldstärke

Die dunklen Farben repräsentieren eine geringe Feldstärke, die hellen eine hohe. Es ist gut zu sehen, dass die größte magnetische Feldstärke an den Luftstrecken abfällt, sprich über dem Airgap und dem Übergang zwischen Spulenfassung und Kolben.

Auch der Effekt der magnetischen Eindringtiefe kann durch dieses Modell gezeigt werden. Quer zum Luft-

spalt wird eine virtuelle Linie gezogen, die die Parametrierung der Abzisse des Diagrammes bildet. An dieser Linie werden die dazugehörigen Feldstärken aufgetragen. Die Abbildung 8 zeigt diesen Verlauf.

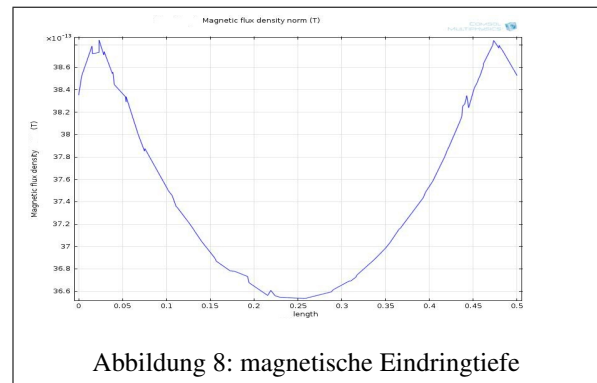


Abbildung 8: magnetische Eindringtiefe

Das Diagramm gibt die magnetische Feldstärke entlang der Linie wieder. Die Linie kann als innerer Durchmesser der Ringspule aufgefasst werden. Am Rand des Kerns ist die maximale Feldstärke zu sehen, die bis zur Kernmitte exponentiell abfällt. Auf Grund der Achsensymmetrie steigt die Feldstärke in der Mitte wieder an und erreicht am Ende wieder ihren Maximalwert. Die exponentielle Abnahme der Feldstärke verhält sich wie in Kapitel 3.2 theoretisch gezeigt und ist ein Indiz für die Richtigkeit der Simulation.

Aussagen über die magnetische Kraft des Aktuator kann über eine gesonderte Funktion getroffen werden. Die Funktion berechnet die Kraft aus der Stromstärke und den magnetischen Eigenschaften. Stromanstieg sowie ungleichmäßige Feldverteilung werden dabei gleichermaßen berücksichtigt. Die Abbildung 9 zeigt einen möglichen Kraftverlauf des Aktuator.

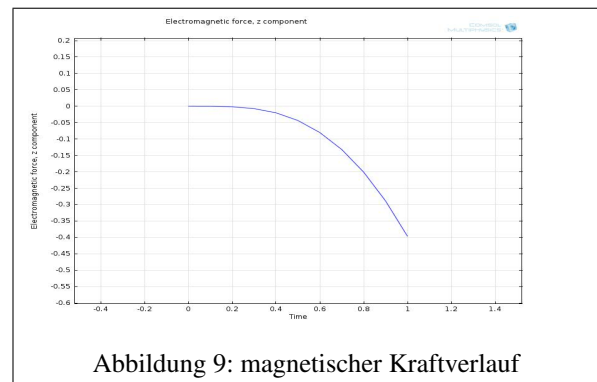


Abbildung 9: magnetischer Kraftverlauf

Gut zu sehen ist der langsame Kraftanstieg in der Anfangszeit. Dieser langsame Anstieg ist der Grund für die Totzeit des Aktuator. Am Anfang wird eine größere Kraft benötigt, um den Kolben aus seiner Verharrung zu beschleunigen. Nicht auf dem Diagramm

zu sehen ist, dass die magnetische Kraft am Ende des Einschaltvorganges gegen einen konstanten Wert strebt.

Durch das Tool und das Modell können wir den kompletten Aktuator simulieren und Aussagen über die einzelnen physikalischen Eigenschaften treffen. Auf die Nennung von konkreten Parametern wurde bei dieser Arbeit bewusst verzichtet, da die Richtigkeit und hinreichende Genauigkeit erst überprüft werden müssen.

5 RESÜMEE

Der elektromagnetische Aktuator benötigt, trotz seines scheinbar trivial wirkenden Aufbaus, ein hohes Maß an physikalischem Verständnis. In ihm spiegeln sich viele interessante Effekte wieder, die positive sowie negative Auswirkungen auf das Betriebsverhalten haben. Um Optimierungen hinsichtlich Verbrauch und CO₂-Ausstoß bei Triebwerken zu erreichen, müssen diese Effekte verstanden und genauer untersucht werden, um weiteres Potential heraus zu holen. So kann zum Beispiel bei einer geschickten Auslegung des Aktuators die Totzeit verringert oder sogar eliminiert werden, um den Verdichter in dem optimalen Arbeitspunkt zu halten. Auch die Aussage bei welchen Parametern ein sicheres Auslösen des Schaltvorganges erfolgt, sorgt für einen sicheren und optimierten Betrieb.

Diese Arbeit zeigt die Probleme und Eigenschaften eines elektromagnetischen Aktuators. Sie dient als Grundlage für das Verständnis und der weiteren Optimierung. Außerdem wird ein Lösungsansatz mittels FEM-Simulation gezeigt. Mit einem in der

FEM-Simulation benutzten Modell lassen sich Veränderungen in der Geometrie, Erregung und anderen Parametern schnell untersuchen und damit Aussagen über die Wirkung treffen. Weiterhin können auch Aussagen über Verlustleistung im Eisen, lokale Feldüberhöhungen, Temperaturobreitung und -überhöhungen getroffen werden.

Bei der Fortsetzung dieser Arbeit wird das Modell für die Simulation weiter verbessert, um den Spalt zwischen Theorie und Praxis zu verringern. Dazu zählt zum Beispiel die relative Permeabilität nicht mehr als konstant anzusehen, sondern diese als Funktion der Feldstärke darzustellen. Der wichtigste Teil der Fortsetzung wird allerdings die praktische Vermessung eines Aktuators am Prüfstand sein, um die theoretisch gewonnenen Daten abzugleichen. Durch diesen Abgleich kann überprüft werden, ob das Modell mit hinreichender Genauigkeit die Realität widerspiegelt.

Literaturverzeichnis

- [1] Karl Knüpfmüller. *Theoretische Elektrotechnik: Eine Einführung*. Springer-Lehrbuch.
- [2] Michael Egbers. *Simulation des reaktionsverhaltens der aktuatoren von verdichterabblaseventilen im pneumatischen systemmehrwelliger luftfahrttriebwerke*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2008.
- [3] Eugen Philippow. *Grundlagen der Elektrotechnik*. Dr. Alfred Huethig Verlag, Heidelberg, 8. edition, 1988.
- [4] Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake. *Skript Magnetofluid-dynamik*. Institut fuer Elektroprozessstechnik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.