

Entwicklung eines magnetisch geführten, planaren Direktantriebs

M. Katzschmann, D. Karolewski, C. Schäffel

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH

Ehrenbergstraße 27

98693 Ilmenau

Tel.: +49 3677 69-5500, Fax: +49 3677 69-5515

Email: michael.katzschmann@imms.de, dominik.karolewski@imms.de,
christoph.schaeffel@imms.de

Kurzfassung

Der Beitrag stellt ein magnetisches 6D-Positioniersystem vor, welches auf einem an der IMMS GmbH entwickelten, planaren 3D-Direktantriebssystem aufbaut. Die bisher eingesetzten Luftführungselemente werden im 6D-System durch eine geregelte, aktive magnetische Führung ersetzt. Dies erfordert zusätzliche Sensorik zum Erfassen der vertikalen Lage. Zusätzliche Aktoren (Spulen) sind jedoch nicht nötig, da mit den bereits vorhandenen 6 Spulen alle Freiheitsgrade im gesamten Fahrbereich kontrolliert werden können. Um den Prozess der Auslegung einzelner Komponenten und der mechanischen Konstruktion optimal zu gestalten, sind umfangreiche Simulationen notwendig. Auf Basis der Simulationsergebnisse entsteht ein System, das die Vorteile des ursprünglichen, direktangetriebenen, planaren Positioniersystems mit denen eines magnetisch geführten Systems vereint.

1 Einleitung

Der Einsatz von Positionierern für Scan- oder Inspektionssysteme erfordert neben einer präzisen, dynamischen Positionierung von Objekten in der Ebene zunehmend die Fähigkeit, Objekte auch in der Höhe auszurichten oder ihre Verkipfung einzustellen. Die dafür meistens eingesetzte serielle Anordnung von Antriebsachsen kann jedoch die Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Dynamik häufig nicht erfüllen. Neben Spiel und Elastizitäten in den Koppellementen stören Reibeffekte in den mechanischen Führungen, Störkräfte durch Schleppketten und ähnliche Einflüsse. Weitere Nachteile der seriellen Anordnung sind z.B. die sehr aufwendigen Messsysteme oder Verschleiß und Abrieb an den mechanischen Führungen.

Mit dem an der IMMS GmbH entwickelten elektrodynamischen Direktantriebssystem

werden alle benötigten Freiheitsgrade durch einen Läufer realisiert. Dieses Prinzip vermeidet alle mechanischen Führungen und Koppellemente. Die Integration von Messsystem und Aktorik in diesen Läufer erzeugt eine extrem steife mechanische Struktur, die die angestrebte hohe Dynamik und Präzision des Systems im Submikrometerbereich ermöglicht.

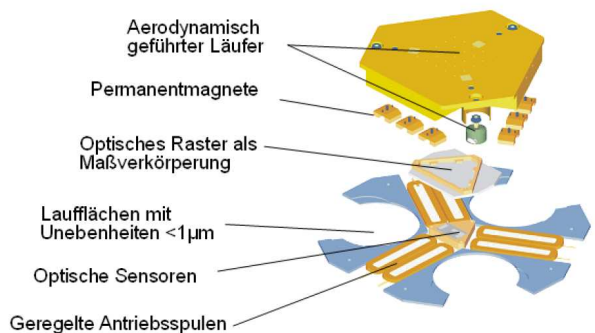


Abbildung 1: Explosionsansicht des elektrodynamischen 3D-Direktantriebssystems

Die Abbildung 1 zeigt den Aufbau des planaren 3D-Direktantriebssystems, wie es bereits 2003 an der IMMS GmbH entwickelt wurde und in [1] und [4] beschrieben ist.

Der durch Luftlager in der Ebene geführte Läufer trägt drei Reihen von symmetrisch angeordneten Magnetkreisen. Jeder Magnetkreis besteht aus zwei Magneten und einem Eisenrückschluss. Durch Wechselwirkung mit den statorfesten Spulenpaaren entstehen horizontale Kräfte jeweils in Richtung der zugeordneten Magnetreihe. Die ebenfalls erzeugten vertikalen Kräfte werden durch die vakuumvorgepannten und damit sehr steifen Luftlager aufgenommen. Durch geeignete Kombination der drei horizontalen Kräfte lassen sich die drei planaren Freiheitsgrade x , y , r_z des Läufers im gesamten Fahrbereich kontrollieren.

Als Messsystem dient ein an der Unterseite des Läufers befestigtes Kreuzraster, das von drei optischen Sensoren im Stator abgetastet wird. Aus den Messwerten lassen sich die x -, y - und r_z -Positionen des Läufers berechnen.

Ziel der Weiterentwicklung des vorhandenen planaren Direktantriebssystems zu einem 6D-Positionierer ist, die vertikalen Freiheitsgrade z , r_x und r_y ebenfalls aktiv zu steuern, ohne die Vorteile des kompakten, integrierten 3D-Systems zu verlieren und ohne wesentliche Änderungen am bekannten Aufbau vorzunehmen:

- Dazu ist keine zusätzliche Aktorik notwendig, da das Gewicht des Läufers durch vertikale Kräfte, welche durch die vorhandenen Antriebsspulen erzeugt werden können, getragen werden soll.
- Um die Lage des Läufers im Raum mit der geforderten Genauigkeit bestimmen zu können, ist die Integration von drei kapazitiven Sensoren in den vorhandenen Messkopf notwendig, die den Abstand zum Kreuzraster messen.

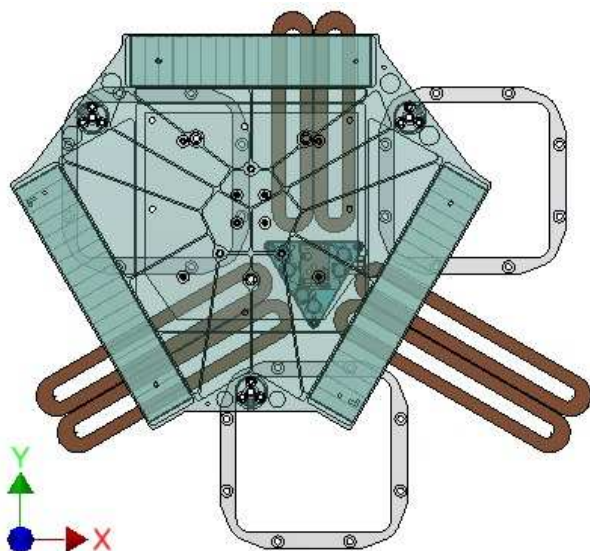


Abbildung 2: 6D-Positionierer mit drei Halbachsensoren

Im Unterschied zu anderen bekannten Lösungen (z.B. [2] und [3]) für vollständig magnetisch geführte 6D-Positioniersysteme werden durch das hier entwickelte System die 6 Freiheitsgrade durch die minimal mögliche Anzahl von Spulen und Sensoren kontrolliert. Da

durch die Spulen keine Reluktanz-, sondern ausschließlich Lorenzkraft erzeugt werden, kann man von einer linearen Abhängigkeit zwischen den Spulenströmen und den wirkenden Kräften ausgehen. Das bedeutet für die Regelung insofern eine Vereinfachung, als dass im Wesentlichen mit der Superposition von Kräften gerechnet werden kann. Von Nachteil für den Regler ist die Anordnung von Sensoren und Spulen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2), da sie aufwendige Transformationen der Sensorwerte auf Achspositionen sowie der Stellgrößen auf die tatsächlichen Spulenströme nötig macht. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Systems besteht in der vollkommenen Passivität des Läufers, wodurch störende Schleppkabel unnötig werden. Ferner wird durch die vollständige Unterbringung von Sensorik und Aktorik unterhalb des Läufers bei dem hier entwickelten System der Bauraum für die Nutzlast auf der Oberseite nicht eingeschränkt.

2 Entwurf des 6D-Positionierers

Im Interesse eines kurzen und zielsicheren Entwicklungsprozesses für den 6D-Positionierer wurde eine fundierte Modellierung und Simulation des statischen und dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems durchgeführt. Dies umfasst unter anderem die Strukturmechanik des Systems, das elektromagnetische Verhalten der Aktoren sowie ihr thermisches Verhalten.

Gestartet wurde mit einer Grobdimensionierung von verschiedenen Aufbauvarianten. Auf dieser Basis wurde ein Design ausgewählt, das den Anforderungen an das Endprodukt gut entspricht. Dieses wurde im weiteren Verlauf detailliert untersucht und optimiert.

2.1 Grobdimensionierung und Vergleich von Aufbauvarianten

Da in dem neu zu entwickelnden 6D-Positionierer das Gewicht des Läufers permanent durch die Spulenströme getragen werden muss, ist es entscheidend, dass der Läufer möglichst leicht und das System aus Spulen und Magneten auf maximale Effizienz ausgelegt werden. Für die Magnetenanordnung kommen neben der oben beschriebenen, klassi-

schen Variante, bestehend aus Magnetpaaren und jeweils zugeordnetem Rückschluss, auch Halbacharrays in Frage. Die Magnetanordnung und das dadurch erzeugte Magnetfeld ist in der Abbildung 4 zu sehen. Halbacharrays ermöglichen bei gleicher Spulengeometrie höhere Motorkonstanten, erfordern jedoch mehr Magnetmaterial, wodurch sich das Gewicht erhöht. Darüberhinaus sind Halbacharrays auch technologisch schwerer beherrschbar.

Um einen guten Startpunkt für die detaillierte Simulation und Auslegung des Systems zu erhalten, wurde ein Vergleich von Systemen mit Halbacharrays und solchen mit der klassischen Magnetanordnung durchgeführt. Zielkriterium war die Minimierung der elektrischen Verlustleistung zum Tragen des Gewichts. Ebenfalls berücksichtigt wurden der Bauraum (einschließlich Stator), zu erwartende Kosten und der technologische Aufwand.

Die Abschätzung der erwarteten Gewichte und Baugrößen erfolgte durch Skalieren vorhandener Systeme. Motorkonstanten und Verlustleistungen wurden auf der Basis von FEM-Berechnungen für einige repräsentative Spulen- und Magnetgeometrien abgeschätzt.

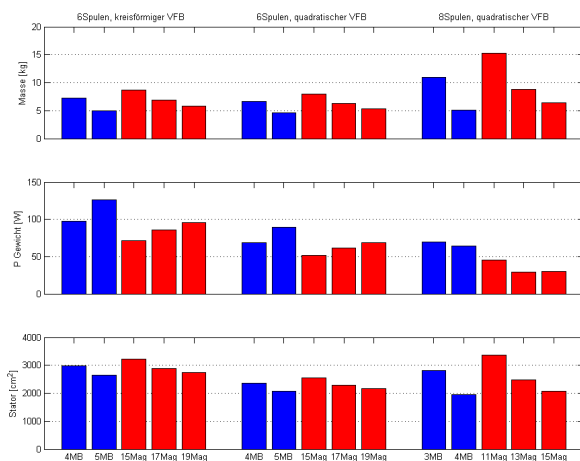


Abbildung 3: Ergebnis des Variantenvergleichs für 40 mm lange Magneten: Der Vergleich umfasst klassische Magnetanordnungen (blau) und Halbacharrays (rot), Varianten mit kreisförmigen Verfahrbereich (VFB) mit 3 Spulenpaaren und quadratische Verfahrbereiche mit 3 oder 4 Spulenpaaren. Die Anzahl der Magnetbrücken (MB) bzw. Magneten wurden jeweils so gewählt, dass geometrisch und energetisch realistische Lösungen entstehen.

Als guter Kompromiss zwischen den zum Teil gegenläufigen Tendenzen (siehe Abbildung 3) und den Anforderungen an das Endprodukt wurde die Variante mit quadratischem Verfahrbereich, 3 Spulenpaaren und Halbacharrays aus 19 Magneten ausgewählt.

Für diese ausgewählte Variante wurden detaillierte Simulationen zur Optimierung des Designs durchgeführt.

2.2 Simulation der Magnetkreise

Da die verwendeten Halbacharrays keine Eisenrückschlüsse benutzen und auch die Spulengehäuse eisenfrei konstruiert sind, kann man davon ausgehen, dass keine Sättigungs- und Hystereseeffekte auftreten. Das heißt, die durch die Spulen erzeugten Lorentzkräfte hängen linear von den Strömen ab und es kann von Superposition für die Wirkung der 6 Spulenströme ausgegangen werden. Auch kann die Gegeninduktion der bewegten Magneten in die Spulen vernachlässigt werden, da die Maximalgeschwindigkeit bei der gegebenen magnetischen Periode zu Frequenzen unterhalb von 2.5 Hz führt. Diese Frequenzen erzeugen nur geringe, langsam variierende Störspannungen, die durch einen Stromregler leicht kompensiert werden können.

Da Superposition angenommen werden darf, genügt es für die Effizienzoptimierung, die Wirkung einer Spule auf ein Halbacharray zu untersuchen. Der Magnetquerschnitt ist durch die Geometrie des Systems festgelegt, die Optimierung beschränkt sich deshalb auf den Spulenquerschnitt. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Verlustleistung bei vorgegebener Horizontal- und Vertikalkraft. Da die Optimierung für Horizontal- und Vertikalkräfte zum gleichen Ergebnis führt, muss hier kein Kompromiss eingegangen werden.

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die mittels FEM berechnete magnetische Flussdichte und den Feldlinienverlauf an einem Halbacharray.

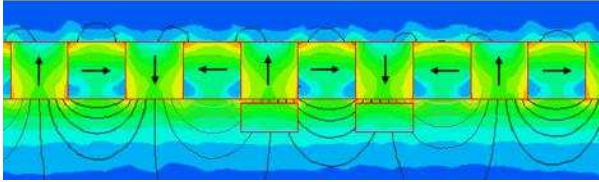


Abbildung 4: Feldverlauf an einem Halbacharray, Quelle: [1]

In Abhängigkeit von der Spulenposition erhält man die in der folgenden Abbildung 5 gezeigten Kräfte und Momente an einem Halbacharray für die optimierte Spulengeometrie.

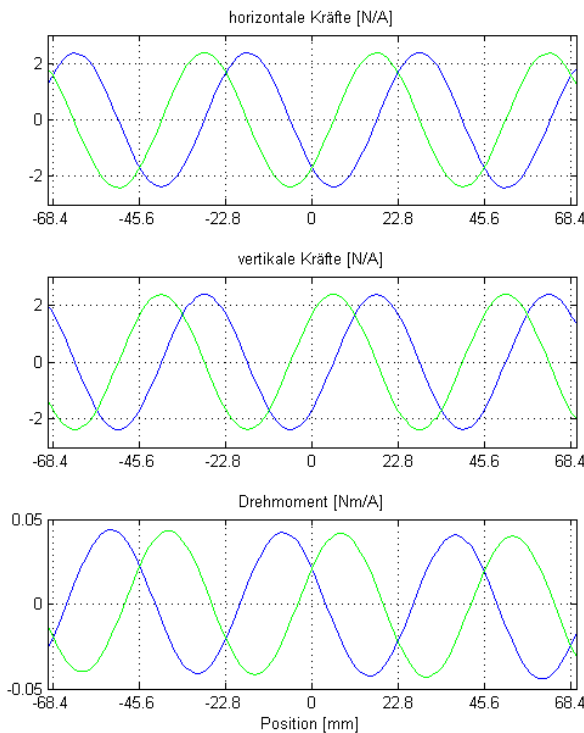


Abbildung 5: Kräfte und Momente an einem Halbacharray, verursacht durch die linke (blaue Kurven) und die rechte (grüne Kurven) Spule

Die Kräfte und Momente sind dabei in einem spulenfesten Koordinatensystem gegeben. Diese kann man in ein läuferfestes kartesisches Koordinatensystem umrechnen. Dadurch erhält man den positionsabhängigen Zusammenhang $K(x,y)$ zwischen den 6 Spulenströmen i_1, \dots, i_6 und den Kräften F_x, F_y, F_z sowie den Momenten M_x, M_y, M_z .

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = K(x, y) \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die (6x6)-Matrix $K(x,y)$ ist im gesamten Verfahrbereich invertierbar und bildet damit die Grundlage für die Kommutierung der Spulen. Mit Hilfe der inversen Matrix $K(x,y)^{-1}$ lassen sich die im Regler berechneten Stellgrößen in Spulenströme umrechnen.

Diese Beziehung kann zum Beispiel benutzt werden, um ortsabhängig die Ströme zum Tragen des Gewichts zu berechnen und daraus die elektrische Verlustleistung aller 6 Spulen zu bestimmen. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

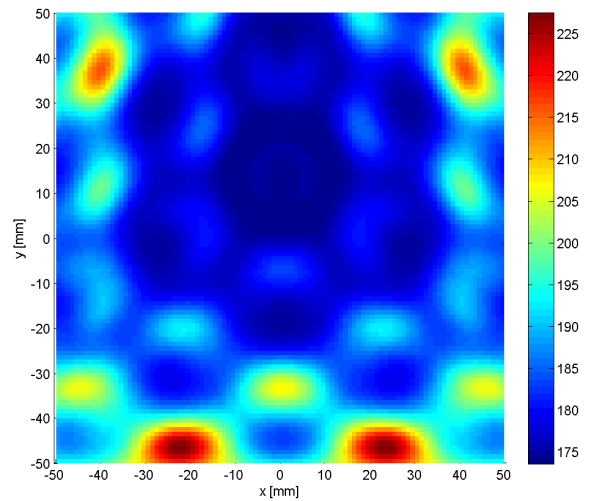


Abbildung 6: Gesamte elektrische Verlustleistung in Watt zum Tragen des Gewichts

2.3 Simulation der Strukturmechanik

Ziel der FEM-Berechnungen der Strukturmechanik ist es, einen möglichst leichten Läufer zu entwerfen, um die thermische Belastung der Spulen gering zu halten und gleichzeitig einen sehr steifen Läufer zu entwerfen, um die Bandbreite eines Positionsreglers nicht durch zu niedrige Strukturresonanzen zu limitieren. Als problematisch erweisen sich hierfür insbesondere die weit außen angeordneten, schweren Halbacharrays.

Verglichen wurde im Rahmen der Optimierung ein aus Aluminium gefräster Läufer mit einer aus Stahlblechen gefertigten Struktur. Optimiert wurden die Anordnung und Dicke der Verrippung sowie die Anbindung der Halbacharrays an die tragende Struktur. Für den Aluminiumläufer wurde zusätzlich die Wirkung einer oberen Abdeckplatte auf die Steifigkeit der Struktur untersucht.

Verglichen mit dem Aluminiumläufer erwiesen sich die Stahlblechstrukturen, gemessen an der ersten Biegefrequenz, als steifer, aber auch als schwerer. Die mit dem Aluminiumläufer erreichten 560 Hz sind aber hinreichend hoch für die angestrebte Reglergüte, weshalb der leichte Aluminiumläufer bevorzugt wurde.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die optimale Ankopplung des Messrasters an den Läufer, um Durchbiegung und Relativbewegungen zwischen Läufer und Raster zu minimieren. Auch hier wurde durch Variation der Ankopplungspunkte sowie der Rasterdicke eine gute Lösung gefunden.

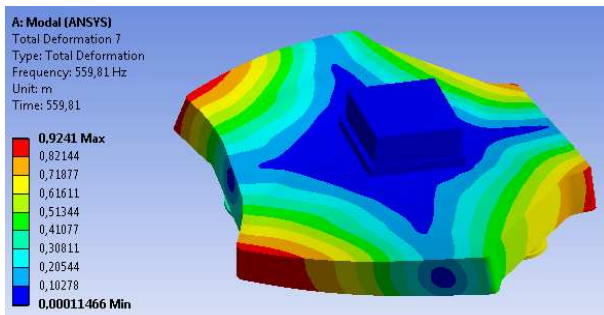


Abbildung 7: Erste Biegeform des Aluminiumläufers mit Nutzlast, ihre Frequenz liegt bei 560 Hz

2.4 Endstufenauslegung

Auf Basis der im Abschnitt 2.2 angegebenen Formel (1) lassen sich in Abhängigkeit vom gewählten Draht die benötigten Ströme und zugehörigen Spannungen für die folgenden drei Lastfälle berechnen:

- horizontale Beschleunigung von 2 m/s^2 ,
- vertikale Beschleunigung von 9.81 m/s^2 ,
- horizontaler Ruck von 1000 m/s^3 .

Weiterhin wurde die maximale, in den Spulen induzierte Störspannung durch die über den

Spulen bewegten Magneten bestimmt, da diese durch den Stromregler der Endstufen zu kompensieren sind. Ebenfalls berücksichtigt wurde der durch eine FEM-Berechnung bestimmte Koppelfaktor von 18 Prozent zwischen benachbarten Spulen.

Durch Superposition konnten die Ströme und Spannungen für die Kombination der oben genannten Lastfälle in Abhängigkeit vom Ort berechnet werden. Die folgende Abbildung 8 zeigt die im Verfahrensbereich auftretenden Maximalwerte in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser.

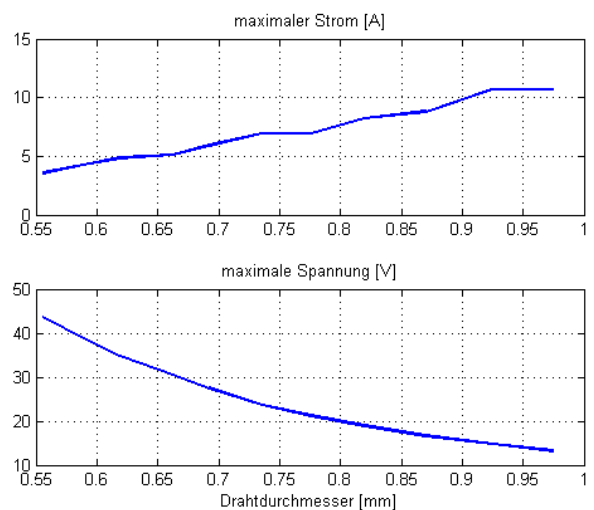


Abbildung 8: Maximale, im Verfahrensbereich auftretende Ströme und Spannungen an einer Spule für die Kombination der drei genannten Lastfälle als Funktion des Drahtdurchmessers

Auf Basis dieses Ergebnisses wurde eine optimale Kombination von Drahtdurchmesser und Endstufenparametern gefunden.

Neben den Maximalwerten konnte durch analoge Berechnung der mittleren Werte die Spannungsversorgung des elektrischen Systems korrekt ausgelegt werden.

2.5 Thermische Simulation

Da das Gewicht des Läufers permanent durch die Antriebsspulen getragen wird, entstehen in den Spulen des Systems erhebliche Verlustleistungen. Abbildung 6 zeigt die Verluste des Gesamtsystems, in der Abbildung 9 sind die Verluste für eine einzelne Spule dargestellt.

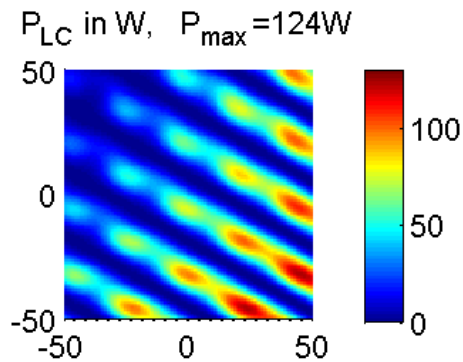


Abbildung 9: Ortsabhängige Verlustleistung in einem Spulenpaar zum Tragen des Gewichts

Die dadurch verursachte Aufheizung der Spulen würde auf Grund der Anordnung von Spulen und Messsystem, wie sie in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen ist, auch unmittelbar zu einer Erwärmung des Messrasters und des Läufers führen. Neben der dadurch hervorgerufenen thermischen Ausdehnung des Rasters kann die Erwärmung des Läufers zusätzlich zu einer Verschiebung der Rasteraufhängung führen, wodurch insbesondere die Ebenheit des Rasters beeinflusst wird. Genauigkeit und Ebenheit des Rasters sind jedoch entscheidend für die Präzision der Positionierung des Läufers weshalb eine ausreichende Kühlung der Spulen notwendig ist. Entscheidend ist dabei die Oberflächentemperatur des Spulengehäuses.

Auf Basis von FEM-Berechnungen wurden verschiedene Kühlkonzepte untersucht und mit Hinblick auf die Oberflächentemperatur optimiert. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Kühlung die Effizienz der Magnetkreise nicht stört und ihre Herstellung technologisch beherrschbar bleibt. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt, dass die Übertemperatur auf der Oberfläche des Spulengehäuses für die optimierte Lösung kleiner als 3 °C ist.



Abbildung 10: Temperaturverteilung auf der Oberseite des Spulengehäuses

Abbildung 11 zeigt die Temperaturverteilung im Querschnitt der optimierten Spulenbau-

gruppe. Man sieht, dass das Kühlkonzept die Spulentemperatur ebenfalls ausreichend begrenzt und die Wärme erfolgreich über die Kühlkanäle abgeführt wird.

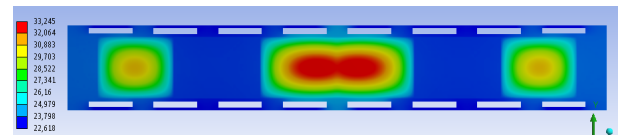


Abbildung 11: Temperaturverteilung im Spulenquerschnitt

3 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde ein magnetisches 6D-Positioniersystem vorgestellt. Die hohe Präzision und Dynamik des Positionierers werden insbesondere

- durch den kompakten, integrierten Aufbau mit einer für die benötigten Freiheitsgrade minimalen Anzahl von Sensoren und Aktoren,
- durch die vollkommene Passivität des Läufers sowie
- durch den Verzicht auf mechanische Führungen und Gelenke

ermöglicht.

Der Abschnitt 2 befasst sich mit dem Entwurfsprozess und der Optimierung des Systems durch Simulation. Dies umfasst unter anderem die Strukturmechanik des Systems, das elektromagnetische Verhalten der Aktoren sowie ihr thermisches Verhalten. Wesentlich für die Funktion des Systems sowie die erreichbaren Parameter sind die zwischen den Teilbereichen auftretenden Wechselwirkungen, die in den Simulationen berücksichtigt wurden.

Mit Hilfe dieses umfangreichen Modellierungs- und Simulationsprozesses ist ein System entstanden, welches den gestellten Anforderungen genügt sowie die Vorteile des ursprünglichen, direktangetriebenen, planaren Positioniersystems mit denen eines magnetisch geführten Systems vereint. Trotz der erweiterten Funktionalität bleibt das mechanische De-

sign gegenüber dem ursprünglichen System weitgehend erhalten. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wird der 6D-Positionierer gemeinsam mit den Projektpartnern aufgebaut und getestet.

Die Arbeiten werden gefördert vom BMWi unter dem Kennzeichen KF2534501BN9 in einem Projekt mit den Partnern Physik Instrumente GmbH & Co. KG (PI), Technische Universität Ilmenau (TUI) FG Mechatronik, und IMMS GmbH.

Literatur

[1] Neumann, H.: Simulation und Steuerung eines magnetisch geführten Direktantriebs, Diplom, Ilmenau 2010

[2] Molenaar, A.: A novel Planar Magnetic Bearing and Motor Configuration applied in a Positioning Stage, Technische Universität Delft, Diss., 2000

[3] Volkert, R.; Büchenschütz, M. : Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche - Magnetische Führungen – SFB 622 – Teilprojekt A5 (2005-2013), Version: 2009; <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/MTRWeb/forschungDetail.asp?s=ger&a=SFB>, Abruf: 19.08.2011

[4] Schäffel, C.: Integrated Planer Precision Drives, 6. Polish-German Mechatronic Workshop, 05.07. – 08.07.2007, Ilmenau