

Auslegung und Konstruktion eines permanent-magnetischen Umlaufgetriebes

Richard Götz^{*)}; Norbert Babel

Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut, Fakultät Maschinenbau,
Am Lurzenhof 1, 84036 Landshut

^{*)} Corresponding author: E-mail: s-rgoet1@haw-landshut.de

Schlüsselwörter:

Magnetische Planetengetriebe, Halbach-Array, Magnetischer Fluss, elektromagnetische Simulation

Zusammenfassung:

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der Funktionsweise und Optimierung von magnetischen Umlaufgetrieben. Magnetische Getriebe übertragen Drehmomente kontaktlos, und damit reibungsfrei mittels des magnetischen Flusses in den Luftspalten. Diese Getriebe eignen sich daher sowohl für mikromechanische Systeme [1; 2], als auch für Großgetriebe wie z. B. bei Windkraftanlagen [2], da sie hohe Drehzahlen schwingungsarm übertragen, eine reduzierte, schmierungsfreie Wartung bei großer Zuverlässigkeit aufweisen und bei Überlast durchrutschen können [3]. Um den magnetischen Fluss, das Übersetzungsverhältnis und das übertragbare Drehmoment eines solchen Getriebes zu bestimmen, wurden Simulationsmodelle mit verschiedenen Magnetanordnungen (regelmäßige und Halbach-Array-Ausrichtung) erstellt und mit vergleichbar einfachen Mitteln ein funktionsfähiger Getriebeprototyp konstruiert, gefertigt und gebaut.

Einleitung:

Das erste belegte permanent-magnetische Getriebe geht auf ein Patent aus dem Jahre 1901 zurück, das Charles G. Armstrong für ein elektromagnetisches Getriebe einreichte [4]. Weitere Patente in den Jahren 1941 [5] und 1968 [6] folgten, die jedoch aufgrund der geringen Leistungsdichten und der damals noch vergleichsweise geringen Qualität der verfügbaren Magnete technisch nicht interessant waren. Dies änderte sich 2001, als K. Atallah und D. Howe ein koaxiales Planeten-Magnetgetriebe mit NdFeB-Magneten vorstellten [1; 7; 3].

Die hauptsächlichen Vorteile von magnetischen gegenüber mechanischen Getrieben sind die reibungsfreie, da kontaktlose Drehmomentübertragung, ein niedriges Losbrechmoment, es ist keine Schmierung erforderlich und dadurch auch keine Dichtungsprobleme, Schwingungsarmut und dadurch geräuscharm auch bei hohen Drehzahlen, eine reduzierte Wartung und hohe Zuverlässigkeit, Überlastschutz durch kontaktloses Durchrutschen, bzw. Schlupf und die Möglichkeit einer hermetischen Isolation zwischen Eingangs- und Ausgangswelle. Die Nachteile hingegen sind vorwiegend elektromagnetischer Natur, wie hohe Eisenverluste mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit, wodurch bei geringen Drehmomenten und hohen Drehzahlen der Wirkungsgrad sinkt und aufgrund der „Schlupfneigung“ eine winkeltreue Übersetzung nicht mehr möglich ist [2; 3].

Material und Methoden

1. Schematische Funktionsweise von magnetischen Umlaufgetrieben

Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines magnetischen Umlaufgetriebes. Dieses besteht im Wesentlichen aus drei Hauptbestandteilen: Dem Innenring (Permanentmagnete, radial orientiert), dem Außenring (Permanentmagnete, radial orientiert) und dem Modulator (Weicheisen- teile). In dem später behandelten Getrieben wird der Modulator fixiert, wodurch sich der Innen- und Außenring in einem vorgegebenen Übersetzungsverhältnis bewegen können. Damit das Getriebe funktionsfähig ist, muss die Anzahl der Magnetpolpaare auf dem Innen- und Außenring addiert die Anzahl der Weicheisenkerne ergeben (vgl. Gl. 1). Ein Magnetpolpaar besteht jeweils aus zwei nebeneinanderliegenden, radial orientierten Magneten. Die abwechselnd blaue und rote Farbe signalisiert, dass Pole der Magneten entgegengesetzt orientiert sind. Da der Außenring zwölf und der Innenring sechs Polpaare besitzt, muss der Modulator aus 18 Weicheisenkernen bestehen, damit die Gleichung (1) erfüllt ist.

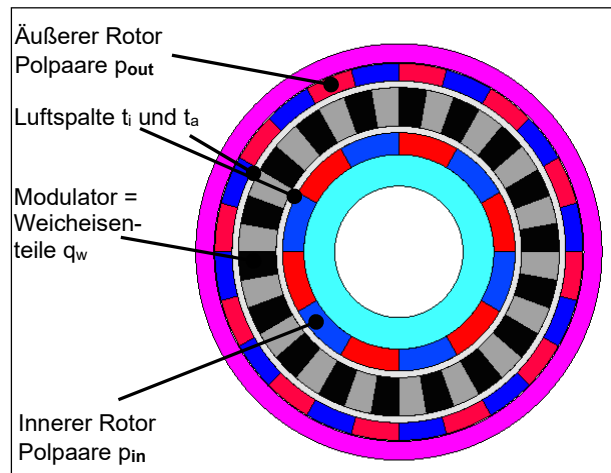


Abbildung 1: Grundbestandteile eines magnetischen Umlaufgetriebes [3]

Ein Magnetpolpaar besteht jeweils aus zwei nebeneinanderliegenden, radial orientierten Magneten. Die abwechselnd blaue und rote Farbe signalisiert, dass Pole der Magneten entgegengesetzt orientiert sind. Da der Außenring zwölf und der Innenring sechs Polpaare besitzt, muss der Modulator aus 18 Weicheisenkernen bestehen, damit die Gleichung (1) erfüllt ist.

$$\begin{aligned}
 q_w &= p_{out} + p_{in} && \text{Gl. (1) [2]} \\
 18 &= 12 + 6 \\
 q_w &= \text{Anzahl der Weicheisenteile} \\
 p_{out} &= \text{Anzahl der Polpaare des Außenrings} \\
 p_{in} &= \text{Anzahl der Polpaare des Innenrings}
 \end{aligned}$$

Als erstes wird der Einfluss der äußeren Magnete auf die Weicheisenkerne betrachtet. Wird der Außenring um 15° verdreht, so invertiert sich die Magnetisierung der Eisenkerne (vgl. Abb. 2).

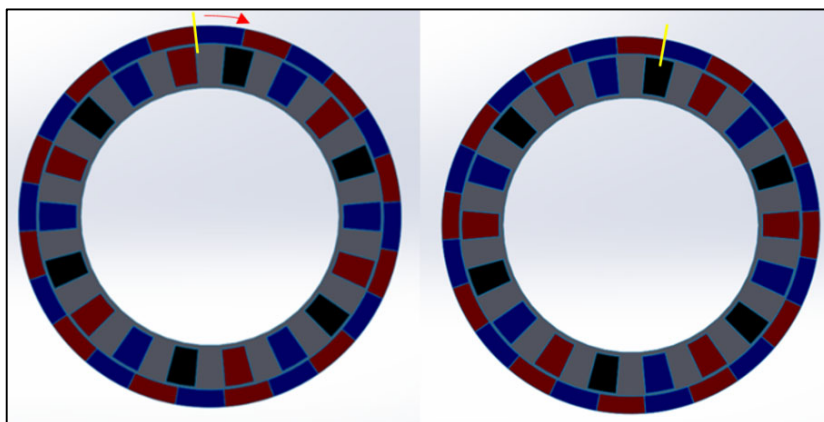


Abbildung 2: Einfluss der äußeren Magnete auf den Modulator [8]

Anschließend wird der Einfluss der inneren Magnete auf den Modulator betrachtet (vgl. Abb. 3). Hier wird eine Verdrehung von 30° benötigt, um die Magnetisierung umzukehren. Wird der Innenring um 15° verdreht, so verdreht sich der Außenring um 30° Grad in entgegengesetzter Richtung. Dies ergibt ein Übersetzungsverhältnis von 1 : 2. Das deckt sich mit der Gleichung 2, welche das Übersetzungsverhältnis in Abhängigkeit der Polpaare auf Außen- und Innenring beschreibt.

$$G_1 = \frac{p_{in}}{p_{out}}$$

Gl. (2) [2]

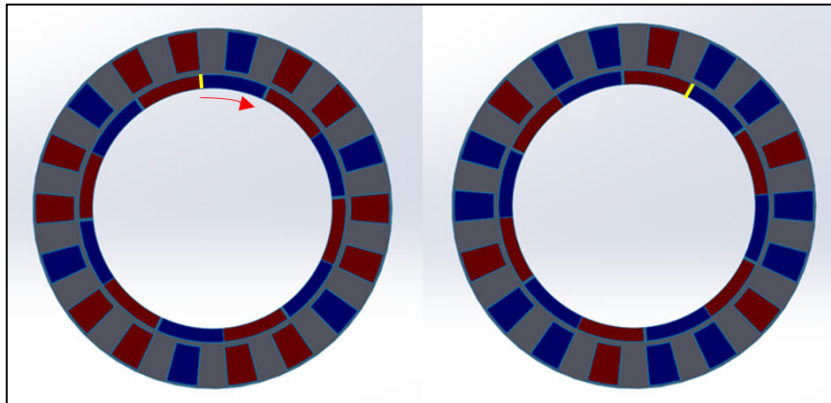


Abbildung 3: Einfluss der inneren Magneten auf den Modulator [8]

2. Magnetische Flussdichte in den Luftspalten

Im Jahr 2001 simulierten K. Atallah und D. Howe [7] den radialen magnetischen Fluss in den Luftspalten eines magnetischen Umlaufgetriebes und legten somit die Berechnungsgrundlagen für diese Getriebe. In der Abbildung 4 wird der *magnetische Fluss im äußeren Luftspalt, welcher allein von den inneren Magneten erzeugt wird*, betrachtet. Die nicht-harmonischen Einzelschwingungen oder Schwebungen sind eine Überlagerung vieler verschiedener harmonischer Schwingungen deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz sind. Mithilfe der Fourier-Transformation können die aperiodischen Schwingungen in ein kontinuierliches Spektrum zerlegt werden woraus der Graph des Frequenzspektrums in Abhängigkeit von der Größe der Amplitudenanteile entsteht (Abb. 5).

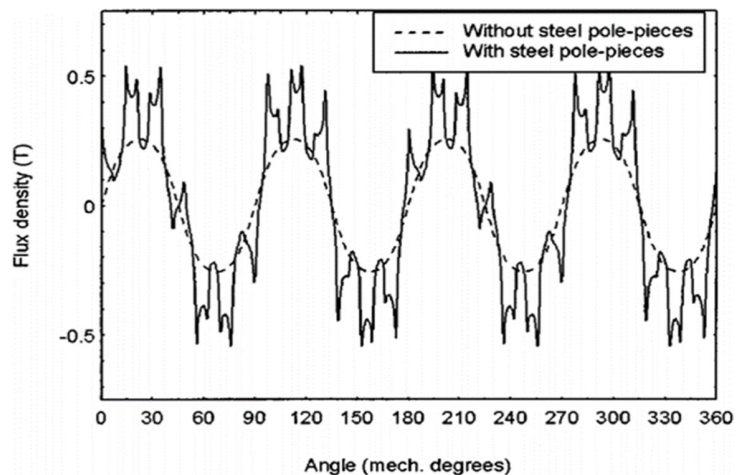


Abbildung 4: Radiale Magnetflussdichte im äußeren Luftspalt [7]

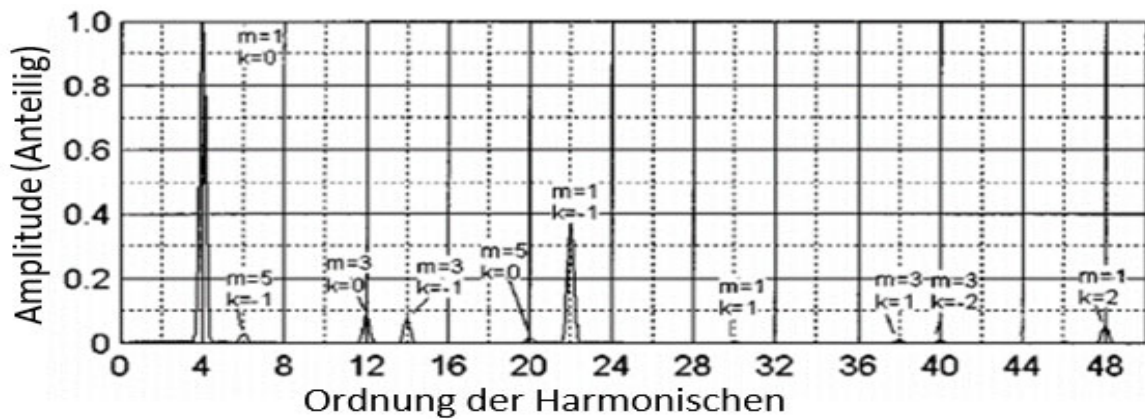


Abbildung 5: Frequenzspektrum der Harmonischen im äußeren Luftspalt [in Anlehnung an 7]

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die magnetische Flussdichte im inneren Luftspalt, welche durch die äußeren Magnete erzeugt wird. Ähnlich wie im inneren Luftspalt entstehen hier ebenfalls Harmonische. In ihrer Publikation beschreiben K. Atallah und D. Howe [7] den Zusammenhang zwischen der Ordnung der Harmonischen, die entstehen und der Anzahl der Polpaare und den Weicheisenkernen (vgl. Gl. 3).

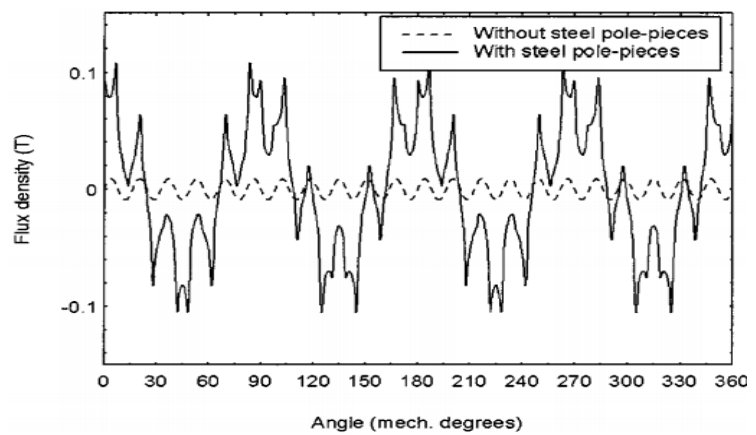


Abbildung 6: Radiale Magnetflussdichte im inneren Luftspalt [7]

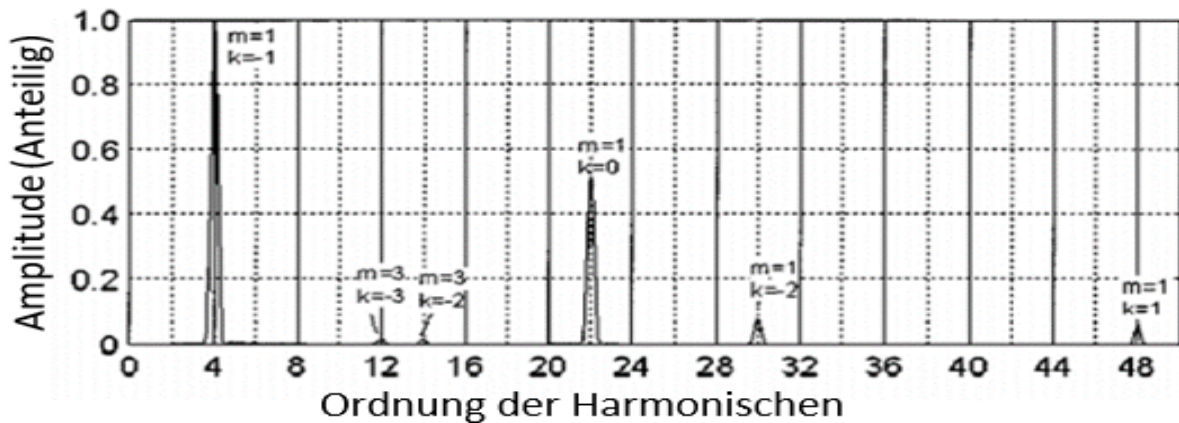


Abbildung 7: Frequenzspektrum der Harmonischen im inneren Luftspalt [in Anlehnung an 7]

$$\rho_{m,k} = |m \cdot p + k \cdot q_w| \quad \text{Gl. (3) [1]}$$

$$m = 1, 3, 5, \dots, \infty$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$$

$$q_w = \text{Anzahl der Weicheisenkerne}$$

$$p = \text{Anzahl der Polpaare auf dem betrachteten Rotor (} p_{in} \text{ oder } p_{out} \text{)}$$

$$\rho_{m,k} = \text{Anzahl der Harmonischen auf der gegenüberliegenden Seite des Modulators}$$

Dabei ist $p_{m,k}$ die Ordnung der harmonischen Schwingung (kurz Harmonische), welche im Luftspalt zwischen den Polpaaren und dem Modulator entsteht und p die Anzahl der Polpaare auf der gegenüberliegenden Seite des Modulators; q_w ist die Anzahl der Eisenkerne, m und k sind Variablen, welche beliebige ganzzahlige Werte annehmen können. Die Formel (Gl. 3) besagt, dass nicht nur Harmonische einer Ordnung entstehen, sondern stets mehrere, wie dies in den Abbildungen 5 und 7 zu sehen ist [7].

Damit eine Relativbewegung zwischen Innen- und Außenring möglich ist, müssen sich die Harmonischen im Luftspalt mit einer anderen Winkelgeschwindigkeit wie die Magnete auf der anderen Seite der Weicheisenkerne, von denen sie erzeugt werden, bewegen. Den Zusammenhang zwischen den Winkelgeschwindigkeiten der Rotoren und den Harmonischen wird in Gleichung 4 beschrieben. Damit ein magnetisches Getriebe ein Drehmoment bei einem Übersetzungsverhältnis von ungleich eins übertragen kann, muss die Ordnung der Harmonischen im Luftspalt gleich der Anzahl der Magnetpolpaare sein und $k \neq 0$.

$$\Omega_{m,k} = \frac{m \cdot p}{m \cdot p + k \cdot q_w} \Omega_r \quad \text{Gl. (4) [1]}$$

$\Omega_{m,k}$ = Winkelgeschwindigkeit der Harmonischen

Ω_r = Winkelgeschwindigkeit des gegenüberliegenden Rotors

Um die Gleichungen 3 und 4 besser zu verstehen, werden diese mittels der Daten, die in der Veröffentlichung [7] verwendet wurden, nachgerechnet. Die Ordnungen der Harmonischen, welche mittels Gleichung 3 berechnet werden.

Das von K. Atallah und D. Howe [7] simulierte Getriebe besteht aus:

- $p_{in} = 4$ Magnetpolpaaren auf dem Innenring
- $p_{out} = 22$ Magnetpolpaaren auf dem Außenring
- $q_w = 26$ Eisenkernen im Modulator

Die Harmonischen im *inneren Luftspalt* werden durch die äußeren Polpaare erzeugt, deshalb muss gelten: $p = p_{out} = 22$.

Jetzt können die Werte in Gleichung 3 eingesetzt werden:

$$p_{m,k} = |m \cdot 22 + k \cdot 26|$$

$$m = 1; k = -1: \quad p_{m,k} = |1 \cdot 22 + (-1) \cdot 26| = 4$$

$$m = 3; k = -3: \quad p_{m,k} = |3 \cdot 22 + (-3) \cdot 26| = 12$$

$$m = 3; k = -2: \quad p_{m,k} = |3 \cdot 22 + (-2) \cdot 26| = 14$$

usw.

Vergleicht man die beispielhaft errechneten Werte $p_{m,k}$ entsprechen diese den Werten die auch im Frequenzspektrum der Harmonischen von Abbildung 7 zu finden sind.

3. Erhöhung des übertragbaren Drehmoments durch die Verwendung von Halbach Arrays

Im Gegensatz zu einer konventionellen Polpaar-Anordnung besteht ein Halbach Array aus vier oder mehreren Magneten. Ein Halbach Array bündelt den magnetischen Fluss auf einer Seite (Abb. 8). Der radial orientierte Anteil der Magnetflussdichte auf der gebündelten Seite ähnelt dabei stark einer Sinusschwingung. Da eine reine Harmonische eine Sinusschwingung ist, sollten die Harmonischen, welche von den Weicheisenkernen moduliert werden, optimal mit den Halbach Arrays interagieren.

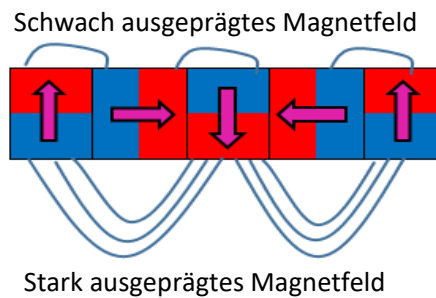


Abbildung: 8 Anordnung der Polpaare in Form von Halbach-Arrays

Damit die Polpaare in Halbach-Anordnung mit einer konventionellen Anordnung verglichen werden kann, werden jeweils 2D-Getriebemodelle konstruiert und der magnetische Fluss mittels FEM simuliert. Die rosafarbenen Pfeile in Abbildung 9 und 10 zeigen die Hauptrichtung des Magnetflusses und Abmessungen der einzelnen Permanentmagnete.

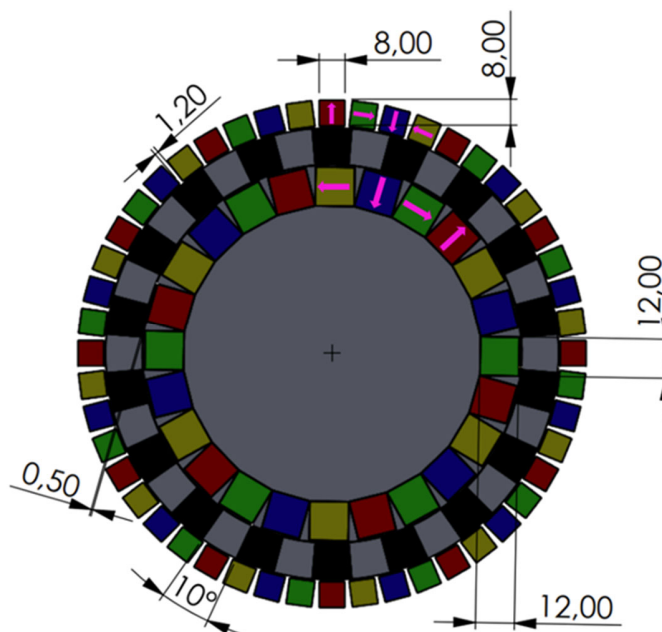


Abbildung 9: Querschnitt von **Version 1** unter Anordnung der Polpaare in Form von Halbach-Arrays [8]

Damit die Modelle vergleichbar sind, wurden die wichtigsten Abmessungen und Eigenschaften, wie der Durchmesser der inneren und äußeren Rotoren, die Größe der Luftspalte, die Güte der Magneten, sowie die Anzahl der Polpaare, identisch gewählt. Die Abbildung 9 zeigt die Abmessungen der **Version 1 unter Anordnung der Polpaare in Form von Halbach-Arrays** und Abbildung 10 mit **Version 2 in konventioneller**, das heißt mit regelmäßig abwechselnder Polpaarerausrichtung. Für die CAD-Konstruktion wurde das Programm SolidWorks, Version 2020, der Fa. Dassault Systèmes [9] verwendet und für die elektromagnetischen Simulationen EMWorks2D, Version 2021, der Fa. Electromagneticworks Inc [10]. Die Simulationen wurden aufgrund des geringeren Rechenaufwandes nur 2-dimensional durchgeführt.

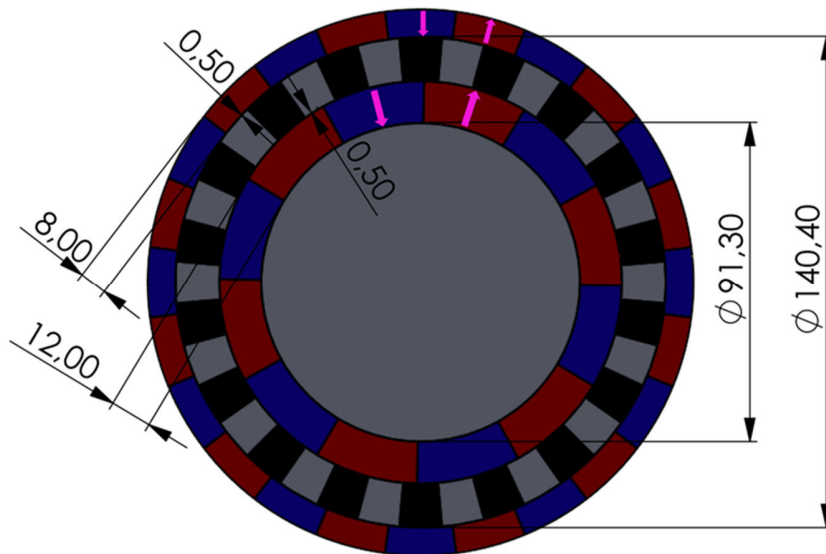


Abbildung 10: Querschnitt von **Version 2** mit konventioneller Polpaaranordnung [8]

Als erstes werden die Magnetfelder, welche allein von den Rotoren erzeugt werden, untersucht. Dazu werden vier Simulationsmodelle benötigt. Diese enthalten jeweils nur einen Rotor, wobei die restlichen Bauteile in der Simulation durch Luft ersetzt wurden. In den Simulationen wird der radial orientierte Anteil des magnetischen Fluss 0,25 mm entfernt von den Magneten gemessen. Dies entspricht der Mitte des Luftspalts, der 0,5 mm beträgt (Abb. 11).

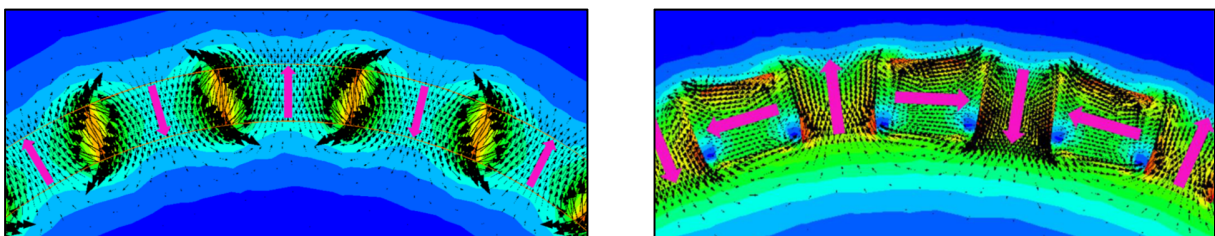


Abbildung 11: Simulierter magnetischer Fluss im Außenring mit konventionellen Magnetanordnung links, und in Halbach Array-Anordnung rechts [8]

In Abbildung 12 ist die radiale Magnetflussdichte, erzeugt durch die Polpaare des **äußeren** Rotors der beiden Varianten, und in Abbildung 13 die radiale Magnetflussdichte, erzeugt durch die Polpaare des **inneren** Rotors, dargestellt. Zu Vergleichszwecken wurde in beide Abbildungen zusätzlich eine Sinusschwingung, bei Abbildung 12 mit einer Periodendauer von 30° und einer Amplitude von 0,7 Tesla (grau) eingetragen und bei Abbildung 13 mit einer Periodendauer von 60° und Amplitude von 0,65 Tesla (grau) abgebildet.

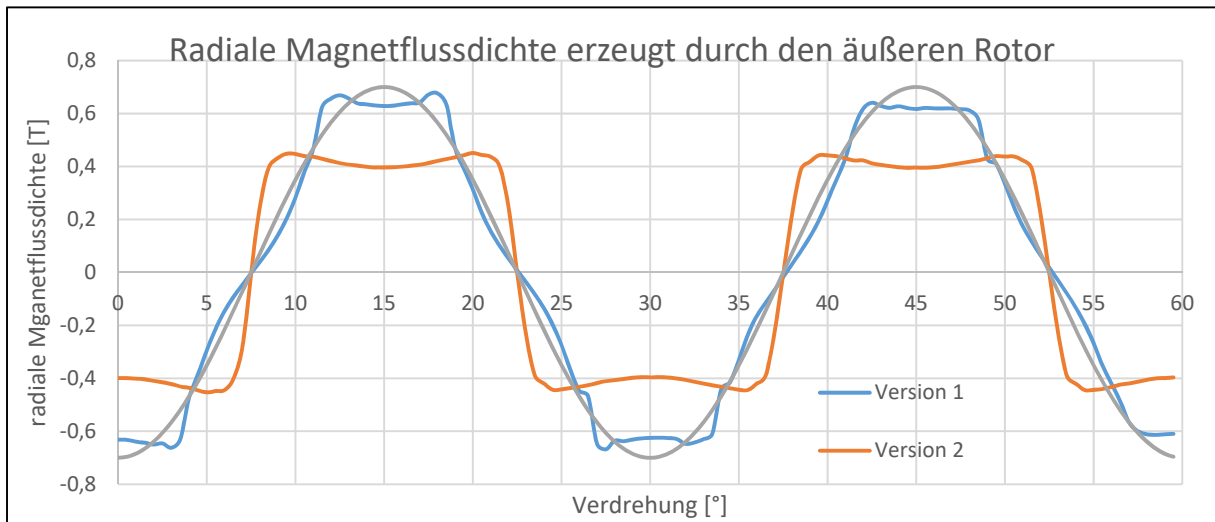


Abbildung 12: Radiale Magnetflussdichte von Version 1 (mit Halbach-Arrays) und 2 (konventionell) erzeugt durch die Polpaare des äußeren Rotors [8]

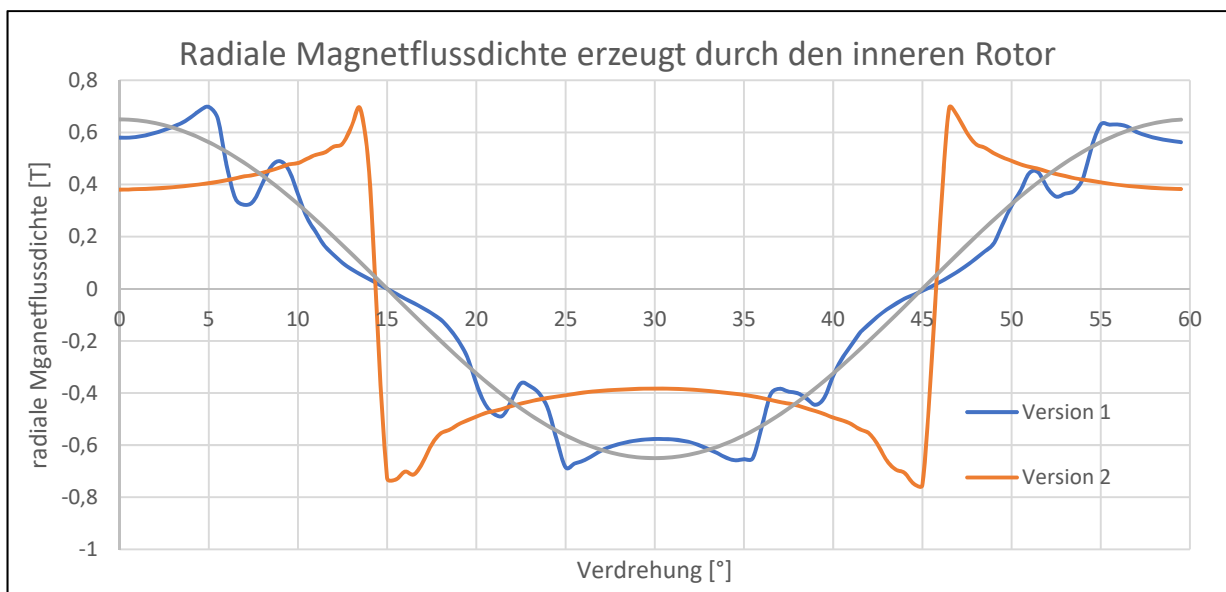


Abbildung 13: Radiale Magnetflussdichte von Version 1 und 2 erzeugt durch die Polpaare des inneren Rotors [8]

Der Einsatz von Halbach Arrays (Version 1) zeigt, dass mit dieser Anordnung eine höhere Magnetflussdichte erzielt und dadurch auch ein höheres Drehmoment erzeugt wird (vgl. Abb. 14). Zudem ähnelt der Verlauf der Magnetflussdichte von Version 1 stärker einer Sinusfunktion, während bei Version 2, mit regulärer Anordnung, ein eher rechteckiger Verlauf zu beobachten ist.

Dies bedeutet, dass Version 2 deutlich mehr ungewünschte Harmonische höherer Ordnungen erzeugt, wie Abbildung 14 bestätigt. Da jede Harmonische mit einem anderen Übersetzungsverhältnis mittels des Modulators zum gegenüberliegenden Rotor transportiert wird, erzeugen diese Störungen im gegenüberliegenden Magnetfeld.

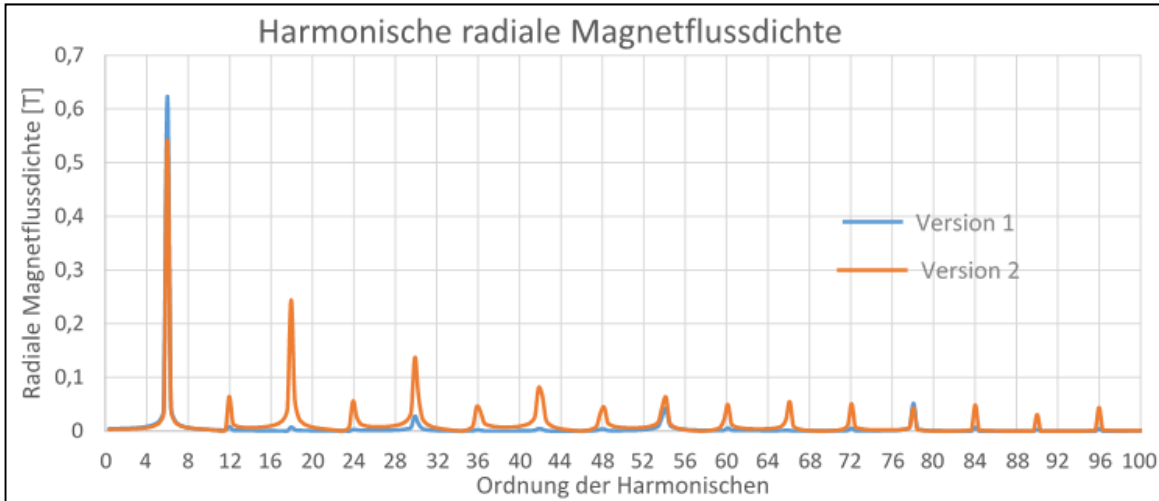


Abbildung 14: Amplitudenspektrum der radialen Magnetflussdichte erzeugt durch die inneren Polpaare [8]

Diese sind wahrscheinlich auch für die in Abbildung 15 zu erkennenden unregelmäßigeren Drehmomentverläufe bei Version 2 verantwortlich.

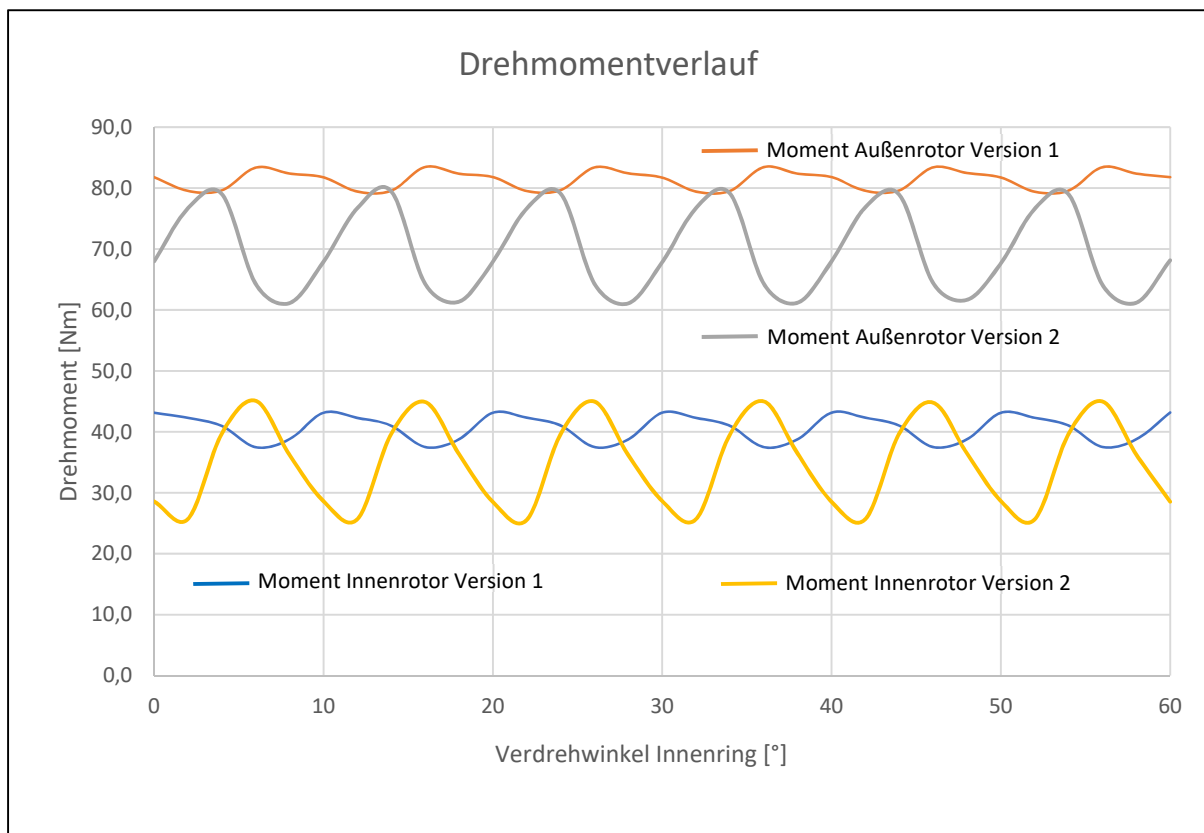


Abbildung 15: Drehmomentvergleich zwischen Version 1 mit Halbach Arrays und Version 2 konventionelle Anordnung [8]

4. Konstruktion und Fertigung eines Prototyps

Um die Simulationen zu verifizieren wird ein Prototyp konstruiert, dessen Bauteile größtenteils mittels 3D-Druck aus Kunststoff hergestellt wurden. Da sich die Verwendung von Halbach Arrays in der Simulation als effektiver erwies, wurde das Getriebe mit dieser Magnetpolanordnung konstruiert und handelsübliche Neodym Magnete eingesetzt. Die Durchmesser der Rotoren bleiben dabei gegenüber dem Simulationsmodell unverändert.

Da die Beschaffung und Bearbeitung von Baustahl (S235, Werkstoff-Nr. 1.0038) deutlich einfacher ist, wie das von Weicheisen (siehe DIN 41301: Elektrobleche; Magnetische Werkstoffe für Übertrager) werden die Kerne aus S235 gefertigt. Obwohl die relative Permeabilität von S235 geringer ist (ca. um den Faktor 3) sank das Drehmoment von ursprünglich 79,34 Nm nur auf 79,28Nm. Um den magnetischen Fluss so wenig wie möglich zu stören, wurden alle nicht 3D-gedruckten Bauteile aus nicht magnetischem austenitischem Stahl oder Aluminium konventionell hergestellt. Die einzigen magnetischen Bauteile blieben die vier Kugellager, da hier kein entsprechender Ersatz gefunden werden konnte.

Das fertig konstruierte CAD-Modell des Getriebes ist in Abbildung 16 im Schnitt dargestellt. Um eine sichere Verklebung der Magneten und Stahlkerne zu gewährleisten, werden alle Klebeflächen aufgeraut, mit Aceton gereinigt und anschließend mit Zweikomponentenkleber verklebt. Für die Montage des Getriebes wurden entsprechende Montagehilfen (vgl. Abb. 17 und 19) entwickelt und gefertigt, da die magnetischen Kräfte der Polpaare dies erfordern.

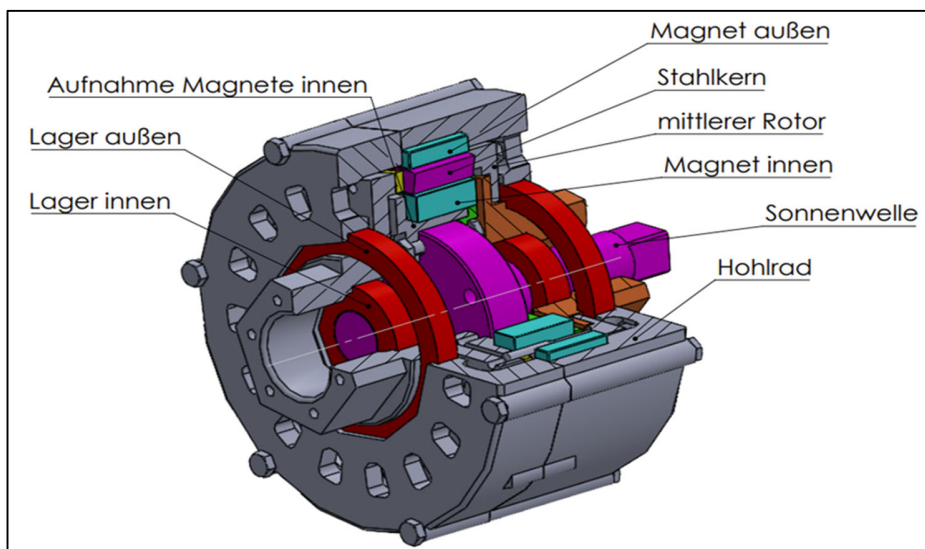


Abbildung 16: CAD-Modell des konstruierten Getriebes im Schnitt [8]

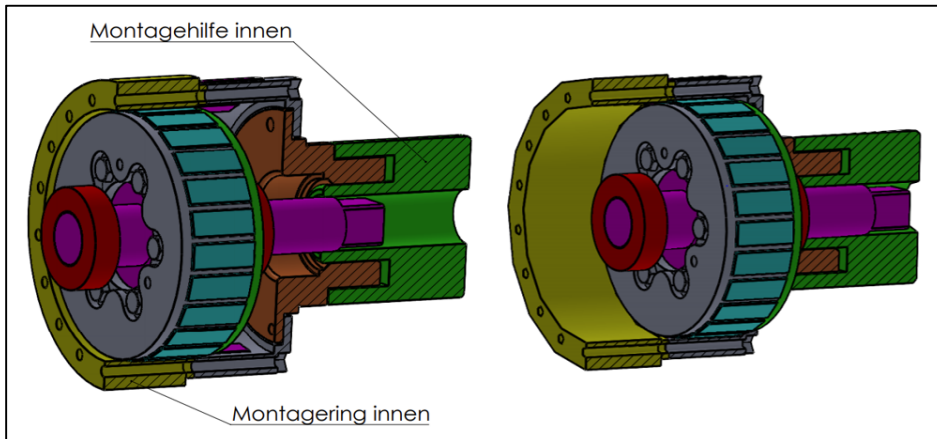


Abbildung 17 Schnittansicht CAD-Modell mit Montagevorrichtungen des Modulators [8]

Abbildung 18 zeigt den montierten Modulator mit Innenring und Abbildung 19 das CAD-Modell, sowie den gefertigten Außenring mit Montagevorrichtung, Abbildung 20 das gefertigte und komplett montierte Getriebe.



Abbildung 18: Montierter Modulator mit Innenring [8]

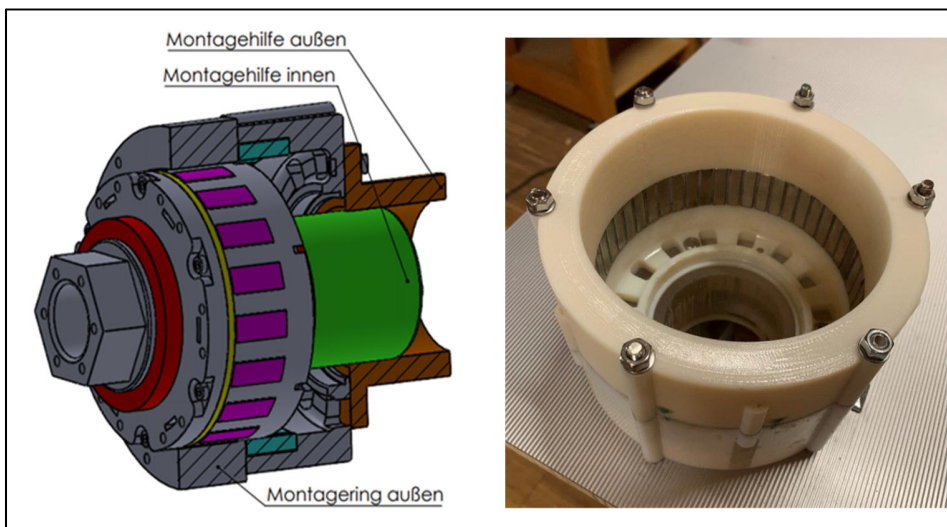


Abbildung 19: Schnittansicht CAD-Modell mit Montagerrichtungen des Außenrings links, und bei der Montage rechts [8]



Abbildung 20: Fertig montiertes Getriebe [8]

5. Messung des Drehmoments und der Übersetzung

Das Getriebe sollte laut Gleichung 2 ein Übersetzungsverhältnis von 1:2 besitzen, da der Außenring zwölf und der Innenring sechs Polpaare besitzt. Dies konnte im Versuch praktisch bestätigt werden. Anschließend wurde das maximal übertragbare Drehmoment am Innenring mittels eines Drehmomentschlüssels gemessen und beträgt 30 Nm. Laut Simulationen sollte das maximale übertragbare Drehmoment des Innenrings 39,64 Nm betragen. Dass das tatsächliche Drehmoment geringer ausfällt, war zu erwarten, da in den 2D-Simulationen der 3-dimensionale magnetischen Flusses, wie er in der Realität vorliegt, nicht erfasst wird. Das übertragbare Drehmoment am Außenring konnte nicht gemessen werden, da hierfür ein Adapter für den Drehmomentschlüssel aus Aluminium hergestellt werden müsste. Laut Simulation ist das Drehmoment, aufgrund des Übersetzungsverhältnisses, am Außenring ungefähr doppelt so groß. Daher kann davon ausgegangen werden, dass am Außenring ein tatsächliches Drehmoment von ca. 60 Nm zu erwarten ist.

6. Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass ein funktionsfähiges, permanentmagnetisches Umlaufgetriebe, mit verhältnismäßig einfachen Mitteln, unter Anwendung des von Atallah und Howe [7] entwickelten Formelapparats, entwickelt und konstruiert werden konnte. Das Ergebnis ist trotz der erwähnten Abweichungen von den Simulationen sehr zufriedenstellend, da die prozentuale Differenz mit den von der NASA entwickelten Getrieben vergleichbar ist [11].

Interessenskonflikte

Es besteht kein Interessenkonflikt aufgrund von Abhängigkeiten oder Unterstützungen durch Firmen oder etwaige Geldgeber.

Literaturverzeichnis

- [1] Filippini, Mattia;
Magnetic gears numerical modelling and optimization;
Dissertation, Universit`a degli Studi di Padova, November 26, 2018
- [2] Ikuta, Koji; Makita, Shunichi; Arimoto, Suguru
Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism;
IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Jan. 1991;
pp. 125–130. doi: 10.1109/MEMSYS.1991.114782.
- [3] Babel, N. und Schwanke, U.: „Umlaufrädergetriebe, Kurzreferenz für Konstrukteure“,
Books on Demand GmbH, Norderstedt 2010. 5. Auflage 2021
- [4] Charles G. Armstrong: Power-transmitting device; US Patent 687,292; Nov. 1901
- [5] Harold T. Faus: Magnet gearing; US Patent 2,243,555; May 1941
- [6] Thomas B. Martin: Magnetic transmission; US Patent 3,378,710; Apr. 1968
- [7] Atallah, K. and Howe, D.
A Novel High-Performance Magnetic Gear
IEEE Transactionson Magnetics 37.4 pp. 2844–2846, 7.2001
- [8] Götz, Richard
Auslegung und Konstruktion eines permanent-magnetischen Umlaufgetriebes
2021, Bachelorarbeit, Hochschule Landshut
- [9] SolidWorks, Version 2020, Fa. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, Waltham,
Massachusetts, USA
- [10] EMWorks2D, Version 2021, Fa. Electromagneticworks Inc., Montreal, Québec, Canada
- [11] Dr. Scheidler, Justin J; Asnani, Vivake M. and Tallerico, Thomas F.
NASA’s Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion
AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium/ Propulsion and Energy Forum
10.2514/6.2018-4988, 9-11.7.2018, Ohio