

Memory Motoren mit eingespritzten kunststoffgebundenen Permanentmagneten

M.Sc. Vladimir Semin, Hochschule Heilbronn, TU Bergakademie Freiberg

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm, Hochschule Heilbronn

Dipl.-Ing. Jan Wiedemann, Wirthwein AG

1. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird der Einfluss der Formfreiheit von gespritzten kunststoffgebundenen Permanentmagneten (PM) auf die Parameter eines Memory Motors, einer neuartigen Motortopologie, die es ermöglicht den PM-Fluss mit kurzen Stromimpulsen zu regeln. Mithilfe numerischer FEM-Simulationen einer in der Literatur vorgeschlagenen Memory Motor Topologie wurde demonstriert, dass der Einsatz der Magnete mit komplexer Form eine Verringerung der Drehmomentwelligkeit ermöglicht.

2. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurden elektrische Maschinen mit Permanentmagneten immer häufiger eingesetzt. Permanenterregte Synchronmaschinen verfügen über eine Reihe wesentlicher Vorteile, wie ihre hohe Leistungs- und Drehmomentdichte oder eine längere Lebensdauer durch den Wegfall der Schleifringe.

Der Fluss der Permanentmagnete in einer solchen Maschine kann aber nicht direkt geregelt werden, was den Betrieb im Feldschwächungsbereich verkompliziert. Eine mögliche Lösung ist dem PM-Fluss mit negativem d-Achse Strom in der Statorwicklung entgegenzuwirken. Ein Nachteil davon ist die Erhöhung der Kupferverluste im Feldschwächungsbereich (höhere Drehzahlen). Dieses Problem kann durch die Verwendung eines als Memory Motor bekannten Motortyps gelöst werden.

Memory Motoren

Als Memory Motor (Speichermotor) wird in der Literatur eine Motortopologie bezeichnet, die in der Lage ist, den Magnetisierungsgrad der Dauermagnete während des Motorbetriebs dauernd zu ändern. Es wird durch Einsatz von Permanentmagneten mit niedriger Koerzitivfeldstärke, wie AlNiCo Legierungen, möglich (s. Abb.1).

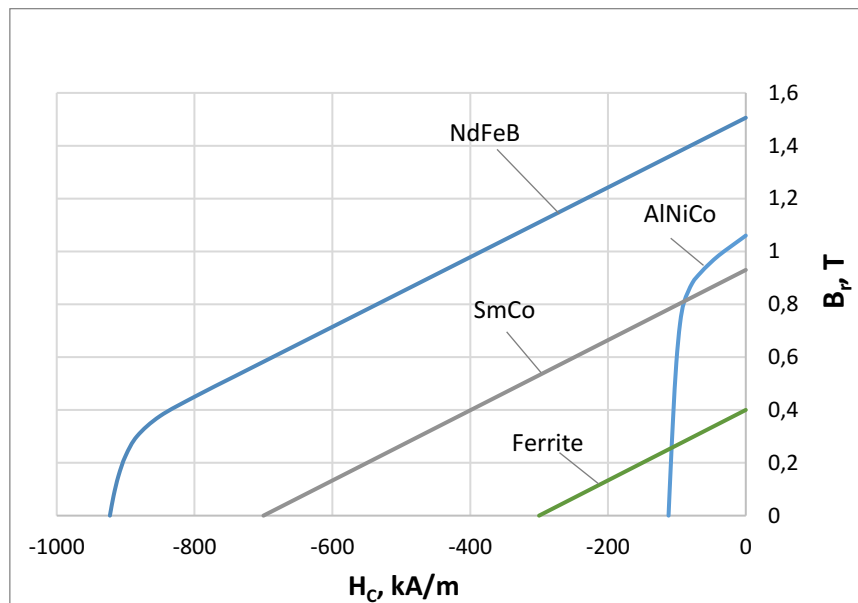


Abbildung 1: Typische Entmagnetisierungskennlinien von verschiedenen hartmagnetischen Werkstoffen. Quelle: J-MAG Materials Library

Diese Magnete können dank ihrer niedrigeren Koerzitivfeldstärke mit einem kurzen Stromimpuls während des Motorbetriebs auf- und entmagnetisiert werden. Nach dem Aufheben des Stroms speichert der Magnet dauernd sein Magnetisierungsgrad (daher der Begriff „Memory“). Somit kann der Motor im Feldschwächungsbereich betrieben werden. Der Magnetesierungsstrom kann entweder durch die Ankerwicklung oder durch eine separate Magnetesierungswicklung erzeugt werden, je nach Motorkonstruktion.

Bei gleichzeitiger Verwendung von Magneten mit niedriger und hoher Koerzitivfeldstärke werden die AlNiCo-Magnete verwendet, um den variablen Teil des Flusses zu erzeugen, der dem Fluss von Magneten mit hoher Koerzitivkraft hinzugefügt oder davon abgezogen wird, indem man die Magnetisierungsrichtung der AlNiCo-Magnete ändert.

Der große Drehzahlbereich des Memory Motors macht ihn perfekt für den Einsatz als Antriebsmotor in einem Elektroauto.

Andere in der Literatur verwendete Bezeichnungen für diesen Maschinentyp sind *Flux-mnemonic Maschine* und *Variable-Flux Permanent Magnet Machine*.

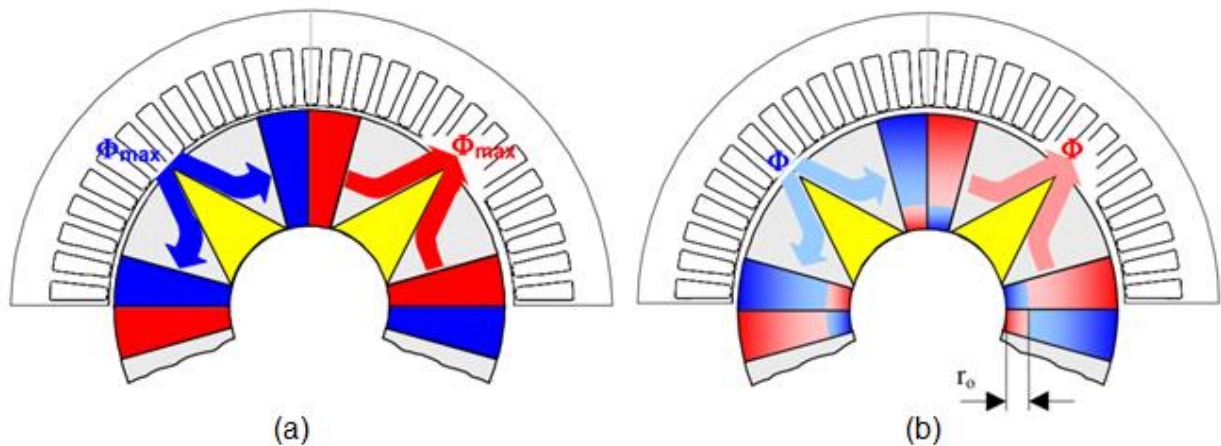


Abbildung 2: Rotor bei vollständig (a) und teilweise (b) magnetisiertem Zustand [1].

Das Konzept wurde 2001 von Prof. V. Ostovic (Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes) vorgeschlagen [1].

In der Veröffentlichung handelt es sich um eine Maschine mit schwach koerzitiven Permanentmagneten im Rotor. Durch negative Stromimpulse in der d-Achse können die Permanentmagnete ihren Magnetisierungszustand ändern, was es ermöglicht, den Rotorfluss zu variieren (Abb. 2).

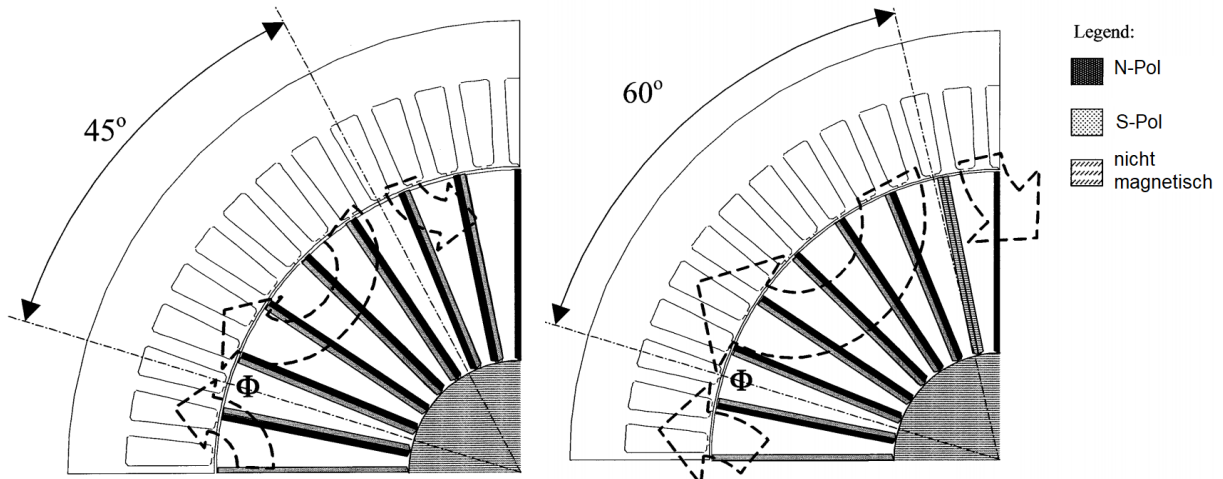


Abbildung 3: Motor mit regulierbarer Polzahl [2]

In einer weiteren Veröffentlichung von Prof. Ostovic wird eine Methodik zur Polzahländerung eines PM-Rotors vorgeschlagen, indem man die tangential magnetisierten speichelförmige Dauermagnete im Rotor mit einem Statorstromimpuls ummagnetisiert (Abb.3).

In der Arbeit von Sakai et al. [3] wurde erst vorgeschlagen, Seltenerd-magnete mit hoher Koerzitivfeldstärke zusammen mit niedrig koerzitiven AlNiCos zu verwenden. Die AlNiCos sorgen für den variablen Anteil des Flusses und die Seltenerd-magnete für den konstanten.

In der Veröffentlichung von Yu et al. [4] wurde 2009 ein doppelt genuteter PM-Motor (*engl. doubly salient PM motor*) mit Flussregelungsfähigkeit untersucht (Abb. 4a). In dieser Maschine wurden AlNiCo PMs im Inneren des Stators installiert und mithilfe einer Magnetisierungswicklung auf- und entmagnetisiert, um den Luftspaltfluss regeln zu können. Während die Magnete vollständig entmagnetisiert waren, arbeitet der Motor, wie ein geschalteter Reluktanzmotor (*engl. switched reluctance motor*).

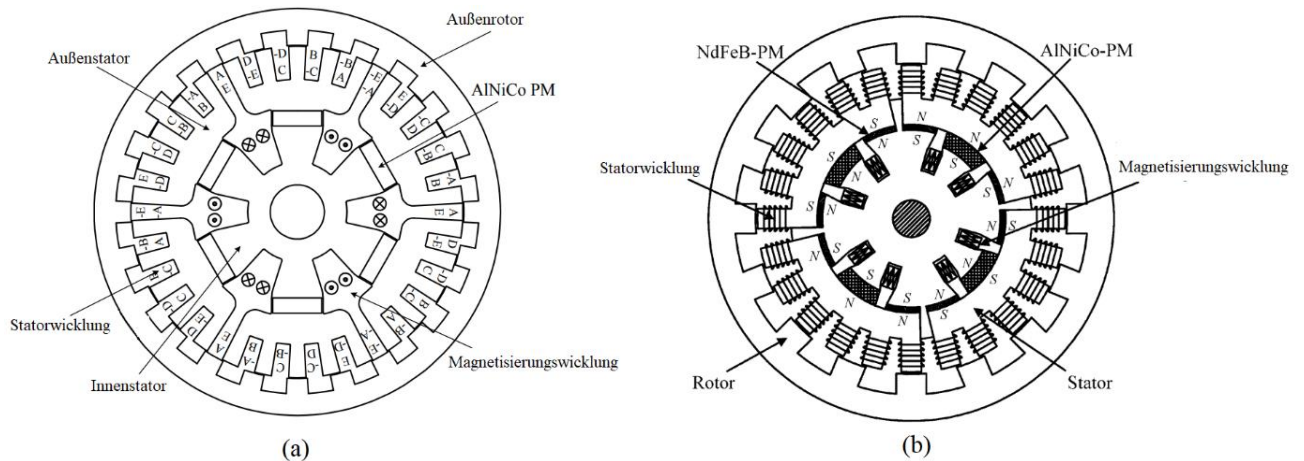


Abbildung 4: Vorgeschlagene Motorkonstruktionen a) mit AlNiCo-PM [4] b) mit AlNiCo und NdFeB-PMs [5]

Dieser Motoraufbau wurde in weiteren Veröffentlichungen ausgearbeitet [6] [7]. 2011 wurden bei dieser Topologie zusätzlich zu den AlNiCo-Magneten, noch NdFeB-Magnete eingesetzt, was die energetischen Parameter der Maschine verbessern konnte (Abb. 4b) [5]. Als eine mögliche Anwendung wurde Antrieb der E-Fahrzeuge vorgeschlagen.

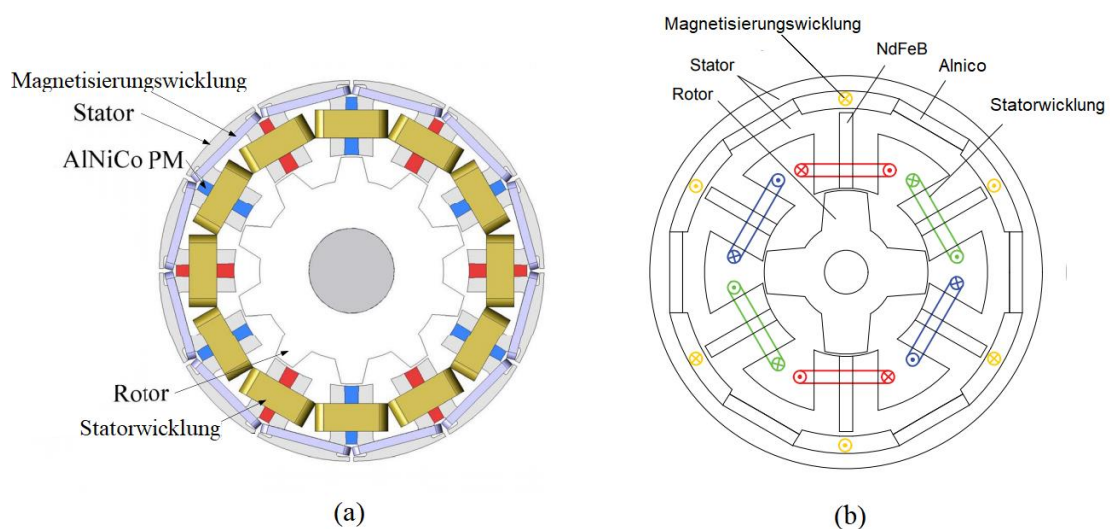


Abbildung 5: Flux Switching Memory Motors: a) mit AlNiCo-Magnete [8]; b) mit AlNiCo- und NdFeB-Magnete [9]

2014 [9] wurde das Memory Motor Konzept auf einen Flussschaltmotor (*engl.* sflux switching motor) angewendet (Abb.5a). Der Motor verfügte über AlNiCo-Magnete im Stator, die in den Statorzahn eingebaut wurden. Um Magnetisierung ändern zu können wurde eine getrennte Magnetisierungswicklung verwendet.

In der Arbeit von Wu et al. [8] wurde eine Erweiterung dieser Topologie vorgeschlagen (Abb. 5b). Die AlNiCo-PMs wurden im Statorzahn durch NdFeB ersetzt und in das Innere des Stators verschoben, wo die Magnetisierungswicklung installiert wurde.

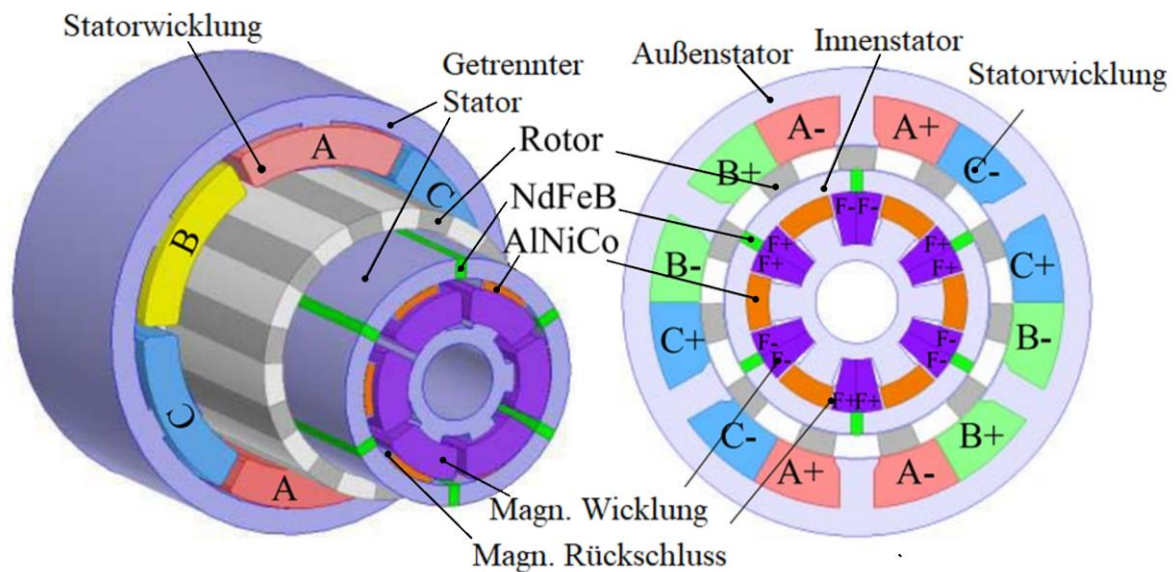


Abbildung 6: Maschine mit in 2 Teile geteiltem Stator [10]

2016 wurde eine andere Ausführung des Flussschaltmotors mit PM-Flussregelung vorgeschlagen [10]. Der Stator der Maschine (Abb. 6) hatte einen äußeren Teil mit der drehmomenterzeugenden Wicklung und einen inneren Teil, in dem die Permanentmagnete und Magnetisierungsspulen gebracht wurden. Der in der Mitte zwischen den beiden Statorteilen platzierte Rotor bestand aus abwechselnden magnetischen und nichtmagnetischen Polen.

Kunststoffgebundene Permanentmagnete

Kunststoffgebundene oder polymergebundene Permanentmagnete (*engl.* *Plastic/polymer bonded permanent magnets*) sind Verbundwerkstoffe, bei denen Permanentmagnetpulver in Kunststoff eingebettet ist. Ein solcher Werkstoff macht es möglich hartmagnetische Bauteile einzuspritzen. Ein Vorteil davon ist die Formfreiheit der Magnete und ihre niedrige Leitfähigkeit.

Die magnetischen Eigenschaften eines solchen Werkstoffes hängen vom verwendeten Magnetpulver und dem Füllgrad ab. Die Remanenz ist dem Füllgrad pro Volumen proportional [11].

Ziel der Arbeit

Es muss untersucht werden, ob der Einsatz der formfreien plastikgebundenen Magnete Drehmomentwelligkeit eines Memory-Motors reduzieren kann.

Unter der Drehmomentwelligkeit versteht man Schwankungen im Drehmomentverlauf. Solche Schwankungen sind in besonders in Maschinen mit Permanentmagneten präsent. Der Grund dafür ist die Anziehungskraft zwischen Permanentmagneten und Eisen in der Maschine.

Die hohe Drehmomentwelligkeit verursacht Vibrationen und Geräusche, welche das Anwendungsbereich der Maschine schränken.

3. Numerische Optimierung eines Memory Motors mit eingespritzten kunststoffgebundenen Permanentmagneten

Für die Untersuchung wurde der in [6] vorgeschlagene Motor genommen. Nach dem Funktionsprinzip gehört der Motor zu doppelt genuteten PM-Motoren (*engl.* doubly salient PM motor). Der Motor hat AlNiCo-Magnete im Stator und einen passiven genuteten Eisenrotor. Die in der Veröffentlichung angegebenen Motorparameter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Motorparameter aus [6]

Speisespannung	220 V
Drehzahlbereich	0-3000 rpm
Leistung	1,5 kW
Außerdurchmesser des Rotors	280 mm
Außerdurchmesser des Stators	211 mm
Eisenlänge	80 mm
PM-Material	AlNiCo-PM, $B_R=1,3$ T; $H_C=56$ kA/m

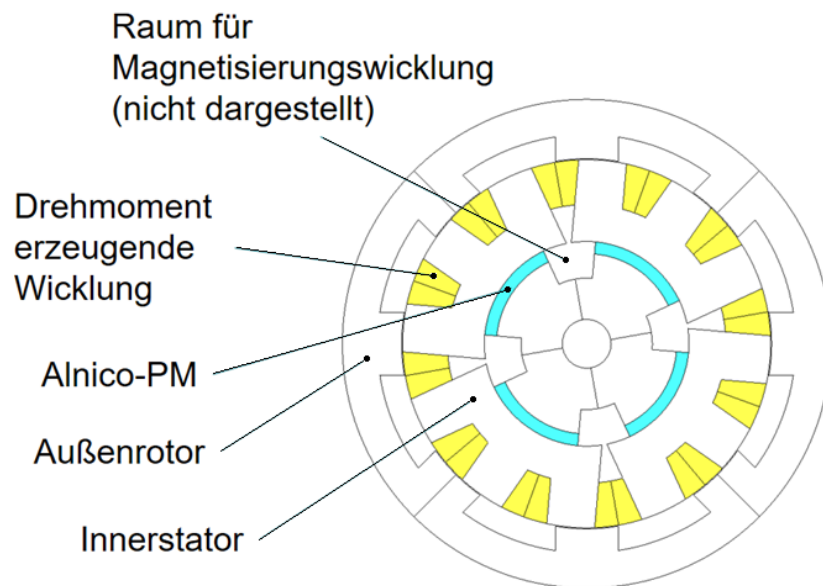


Abbildung 7: FEM-Modell des Motors

Der Motor besteht aus einem Innenstator und einem Außenläufer. Der Stator hat Permanentmagnete aus AlNiCo, die im inneren Teil des Stators eingebracht sind. Um die Magnete ist eine Magnetisierungswicklung gewickelt. Eine Zahnspulenwicklung, die das Drehmoment generiert, ist im äußeren Teil Stators platziert (Abb. 7).

Die Wicklung hat 3 Stränge und wird mit rechteckigen bipolaren Blockstrom gespeist.

Um den Einfluss der Formfreiheit der AlNiCo-Magnete auf die Drehmomentwelligkeit zu bestimmen, wurde in der FEM-Software JMAG ein Modell der Maschine erstellt.

Zuerst wurden der normale Motorbetrieb bei einer Drehzahl von 350 rpm simuliert. Danach wurden Einschalt- und Ausschaltzeiten bei der Phasenkommutierung angepasst, um den maximalen Drehmomentwert zu erreichen (Abb. 8a).

Um das Drehmoment zu erzeugen wird die Spule mit einem positiven Stromimpuls bestromt, wenn die gesamte Phasenflussverkettung steigt, und mit einem negativen, wenn die Flussverkettung fällt (Abb. 8b). Das unterscheidet den doppelt genutzten Motor von einem geschalteten Reluktanzmotor, bei dem der Strom unipolar ist und nur während des Anstiegs der Flussverkettung wirkt.

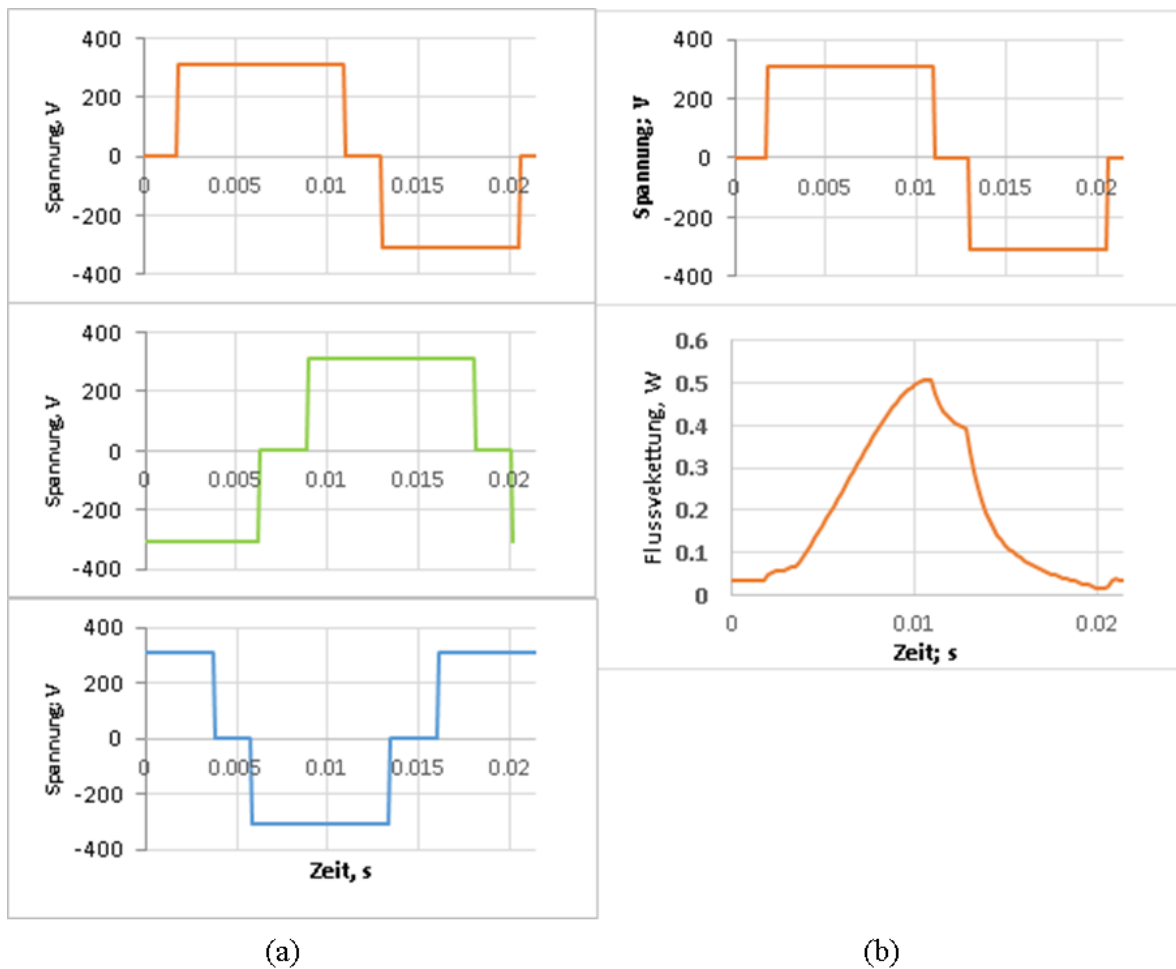


Abbildung 8: a) Strangspannungen für 3 Phasen bei 350 rpm; b) U-Strangspannung (oben) und entsprechende Flussverkettung (unten)

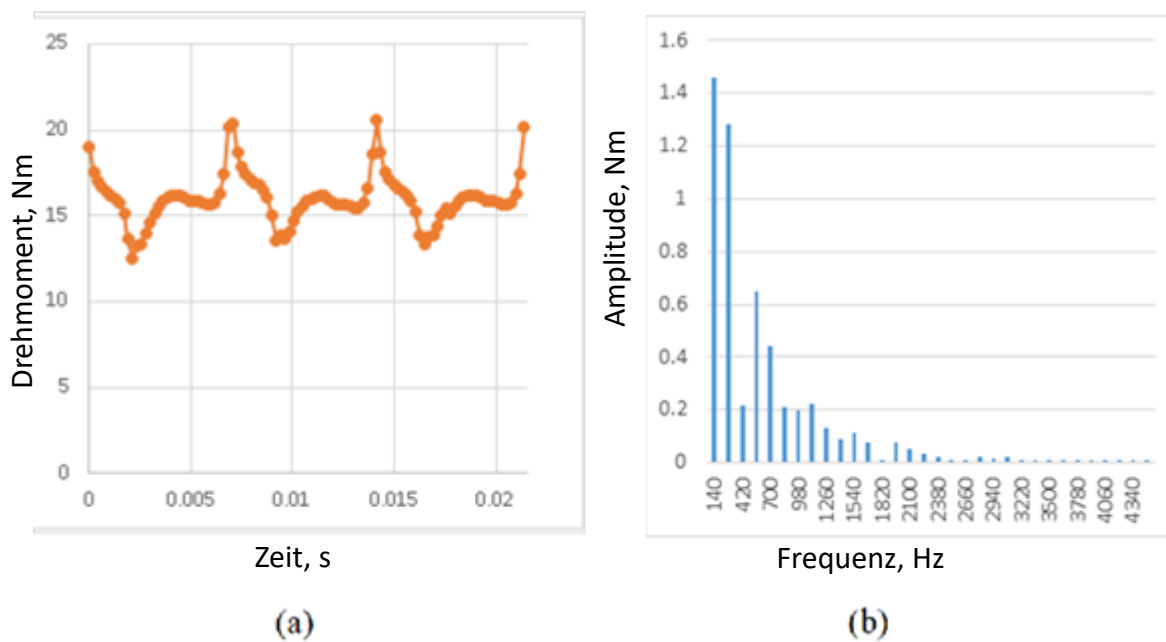


Abbildung 9: a) Drehmomentverlauf vor der Optimierung bei 350 rpm; b) Ergebnis einer FFT-Analyse der Kennlinie

Aus dem bei einer Drehzahl von 350 rpm simulierten Drehmomentverlauf (Abb. 8a) kann man sehen, dass der Drehmomentwert grosse Schwankungen aufweist. Um die Drehmomentwelligkeit zu bewerten, wurde eine FFT-Analyse durchgeführt. Als numerischer Ausdruck der Welligkeit kann Verhältnis des quadratischen Mittelwerts aller variablen Glieder der Fourier-Reihe zu dem Gleichanteil:

$$n_W = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^n A_{RMS,n}^2}}{A_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

A_0 – Gleichanteil;

$A_{RMS,n}$ – RMS-Wert n-tes Gliedes der Fourier Reihe.

Aus der Gleichung (1) ergibt sich ein Wert von 14,2%.

Anschließend wurde eine Studie zur Optimierung der Magnetform durchgeführt. Als Optimierungskriterium wurde die Drehmomentwelligkeit festgelegt. Zur Magnetform wurde der PM-Werkstoff durch ein polymergebundenes PM-Pulver ersetzt. Der Füllgrad pro Volumen wurde als 65% angenommen, was eine resultierende Remanenz von ca. 850 mT ergibt.

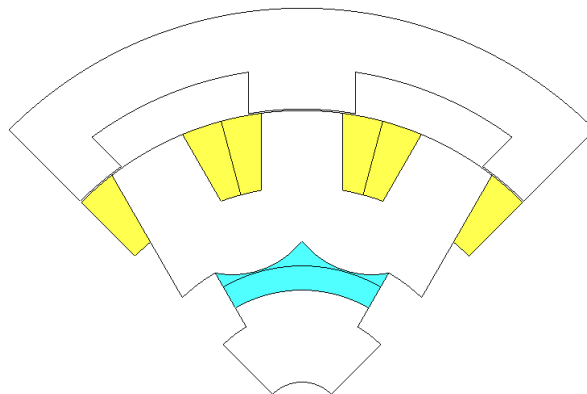


Abbildung 10: Die optimierte Magnetform

Nach dem Ausprobieren vieler möglicher Magnetformen wurde eine optimale Form gefunden, bei der die Drehmomentwelligkeit minimal war (Abb. 10). In Abb. 10 kann man die Optimierte Drehmomentkennlinie (blau) im Vergleich zu der ursprünglichen Kennlinie (orange) sehen,

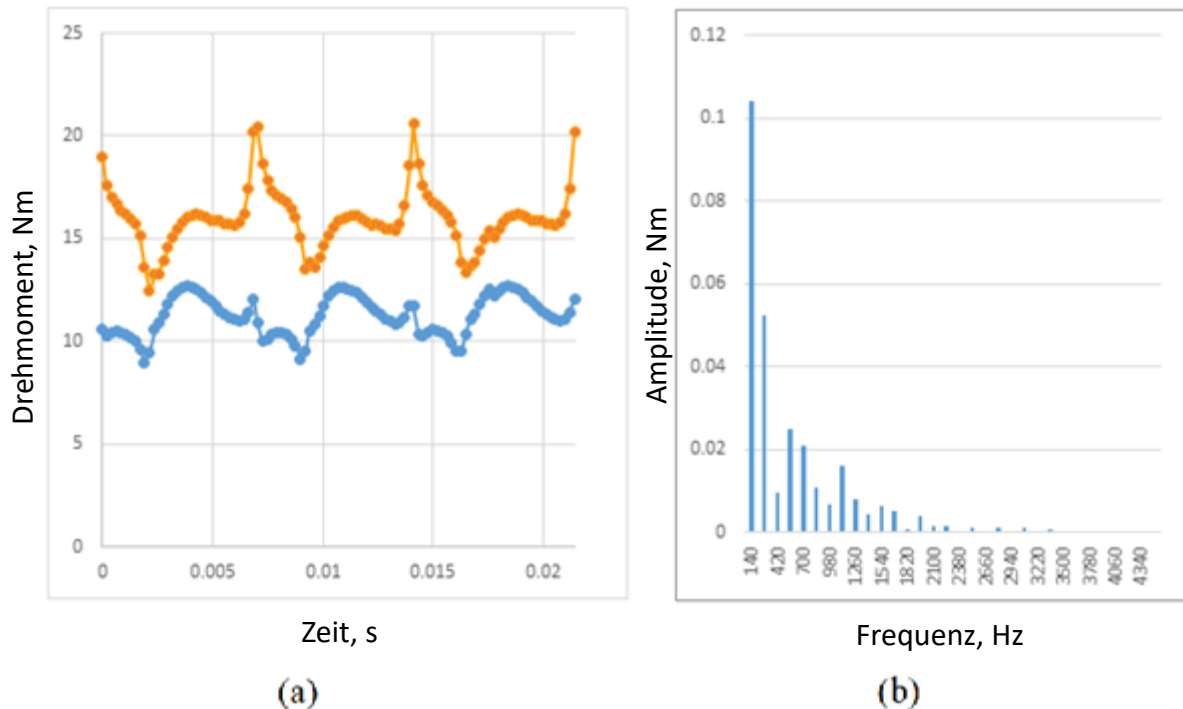


Abbildung 11: a) Drehmomentverlauf vor (orange, oben) und nach (blau, unten) der Optimierung; b) Ergebnis einer FFT-Analyse nach der Optimierung

Der n_w -Wert nach Gl. (1) nach der Formoptimierung lag bei 11,7% im Vergleich zu 14,2% vor der Optimierung. Durch die Formänderung konnte eine Verringerung der Drehmomentüberschwingungen erreicht werden. Der Mittelwert des Drehmoments wurde aber durch das Verwenden des PM-Stoffs mit niedriger Remanenz um 28% verringert.

4. Fazit

Memory Motor ist eine relativ neue Motortopologie, die eine direkte Steuerung des PM-Flusses durch Ummagnetisierung der AlNiCo PMs ermöglicht. Mit einer numerischen Simulation und multiparametrischen Optimierung der Magnetgeometrie wurde nachgewiesen, dass der Einsatz von formfreien eingespritzten Magneten bei diesem Motortyp die Drehmomentwelligkeit reduzieren kann.

Weitere Arbeit: die genaue Methodik zum Bestimmen der optimalen Magnetform muss noch entwickelt werden.

Literatur

- [1] „V. Ostovic, "Memory motors-a new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation," Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 2001, pp. 2577-2584 vol.4, doi: 10.“.
- [2] „V. Ostovic, "Pole-changing permanent-magnet machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6, pp. 1493-1499, Nov.-Dec. 2002, doi: 10.1109/TIA.2002.805568.“.
- [3] „K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi and K. Yasui, "Principle of the variable-magnetic-force memory motor," 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382812.“.
- [4] „C. Yu and Y. Gong, "Performance analysis of new fault-tolerant flux-mnemonic doubly-salient permanent-magnet motor drive," 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2009, pp. 500-505, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385707.“.
- [5] „X. Zhu, L. Quan, D. Chen, M. Cheng, W. Hua and X. Sun, "Electromagnetic Performance Analysis of a New Stator-Permanent-Magnet Doubly Salient Flux Memory Motor Using a Piecewise-Linear Hysteresis Model," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 5, p“.
- [6] „X. Zhu, L. Quan, D. Chen, M. Cheng, Z. Wang and W. Li, "Design and Analysis of a New Flux Memory Doubly Salient Motor Capable of Online Flux Control," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 3220-3223, Oct. 2011, doi: 10.1109/TMAG.2011.215“.
- [7] „H. Liu, L. Quan, X. Zhu, D. Chen and B. Zhang, "Dual-mode operations of new stator-permanent-magnet double salient flux memory motor drive," 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073963.“.
- [8] „D. Wu, X. Liu, Z. Q. Zhu, A. Pride, R. Deodhar and T. Sasaki, "Novel switched flux hybrid magnet memory motor," 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0318.“.
- [9] „H. Yang, H. Lin, J. Dong, J. Yan, Y. Huang and S. Fang, "Analysis of a Novel Switched-Flux Memory Motor Employing a Time-Divisional Magnetization Strategy," in IEEE

Transactions on Magnetism, vol. 50, no. 2, pp. 849-852, Feb. 2014, Art no. 7021004, doi: 10.1109/TMAG.2013.2278888.

- [10] „X. Zhu, Y. Chen, Z. Xiang, L. Yang and L. Xu, "Electromagnetic Performance Analysis of a New Stator-Partitioned Flux Memory Machine Capable of Online Flux Control," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016, Art no. 8203704, doi: 10.1109/TMAG.2016.2614444.
- [11] „Magnequench," [Online]. Available: <https://mqitechnology.com/products/bonded-neo-powder/>.