

# Asymmetrische Polanordnung als fertigungsoptimierte Methode der Nutrastmomentreduzierung am Beispiel eines permanentmagnetisch erregten Synchrongenerators für Kleinwindenergieanlagen

Dipl.-Ing. (FH) Philipp Harnisch, Dipl.-Ing. (FH) Martin Eckart,  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Schuhmann  
Fakultät Elektrotechnik, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine fertigungsoptimierte Methode der Nutrastmomentreduzierung durch Magnetverschiebung am Beispiel eines Synchrongenerators für Kleinwindenergieanlagen mit in die Läuferoberfläche eingelassenen Permanentmagneten vorgestellt. Auf Grundlage der Drehfeldtheorie wird ein analytisches Berechnungsmodell unter Einbezug der Magnetverschiebung zur Bestimmung des Nutrastmoments entwickelt und mit FEM-Simulationen verifiziert. Durch experimentelle Untersuchung eines gefertigten Prototyps wird der optimierende Effekt der Magnetverschiebung nachgewiesen und mit einem Referenzläufer mit ungeschrägt, symmetrisch verteilten Polen verglichen. Abschließend werden mögliche Ursachen für die verbleibenden Abweichungen identifiziert und Ansätze für die weiteren Betrachtungen abgeleitet.

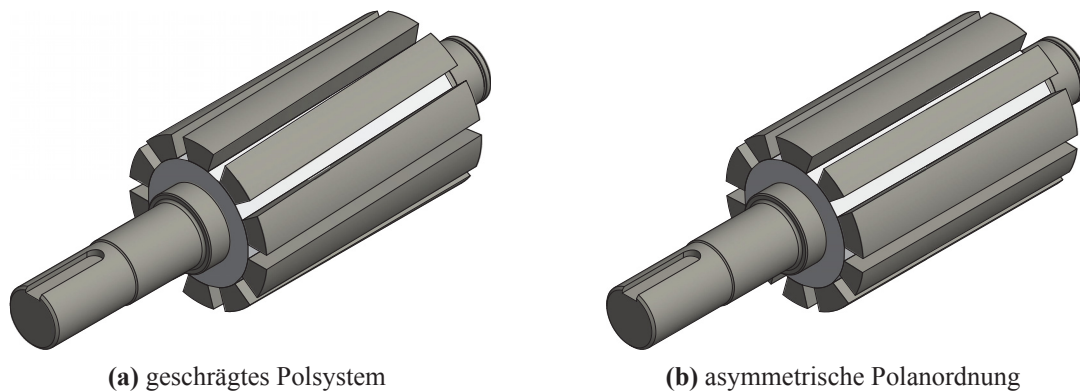
## Abstract

A production-optimized method of reducing cogging torque by magnet shifting using the example of a synchronous generator for small wind turbines with a rotor with inset surface magnets is proposed in this paper. On the basis of rotating field theory an analytical calculation model is developed taking into account the magnet shifting for determination of cogging torque. The analytical results are verified with FEM simulations. By experimental investigation of a manufactured prototype, the optimizing effect of magnet shifting is verified and compared to a rotor with symmetrically distributed poles. Finally, possible reasons for remaining discrepancies are identified and approaches for further considerations are presented.

## 1 Einführung

Im Rahmen der Untersuchungen zu technischen Lösungen zur Senkung der Energiegestehungskosten von Kleinwindenergieanlagen (KWEA) wurden deren einzelnen Komponenten analysiert, wobei die Fertigung des Generatorpolsystems ein großes Einsparpotential aufzeigte. Für die Generatoren haben sich Läufer mit eingelassenen Permanentmagneten in Flusskonzentrationsanordnungen bewährt. Der vergleichsweise einfache Aufbau ist mechanisch robust und reduziert die Entmagnetisierungsgefahr bei elektromagnetischer Bremsung bzw. Kurzschluss. Jedoch führen die ausgeprägten Pole zu unerwünschten prägnanten Nutrastmomenten, die bisher durch Läufer-schrägung kompensiert wurden. Die Herstellung dieses geschrägten Polsystems (s. Abb. 1a) ist allerdings kostenintensiv, allein die Polfertigung beansprucht ca. ein Viertel der Gesamtgeneratorkosten. Zur Senkung dieser Kosten soll als fertigungsoptimierte Methode

der Nutrastmomentreduzierung ein Läufer mit asymmetrisch verteilten Polen variabler Breite (s Abb. 1b) zum Einsatz kommen.



**Abb. 1:** Übergang von geschrägter Läuferinheit zur asymmetrischen Polanordnung

## 2 Ursachen der Rastmomententstehung

Unter dem Nutrastmoment versteht man die unerwünschten tangentialen Kraftwirkungen, die durch Wechselwirkungen zwischen Oberwellen des permanentmagnetisch aufgebauten Luftspaltfeldes und der magnetischen Leitwertschwankung aufgrund der Statornutung entstehen. Das gesamte nach außen hin wirksame Nutrastmoment einer permanentmagnetisch erregten Maschine ist somit ein drehwinkelabhängiges Drehmoment und ergibt sich aus den Überlagerungen der jeweiligen Nutrastmomentanteile. Diese unabhängig von der Bestromung auftretende Drehmomentwelligkeit oder Nutrastmomentschwankung resultiert aus der Änderung des magnetischen Leitwerts zwischen dem Erregerpol und dem genuteten Stator [4]. Die Läuferpole sind immer bestrebt, eine Position mit minimaler Reluktanz einzunehmen [1]. Wird der Läufer in Bewegung versetzt, ändert sich der magnetische Leitwert aus Sicht des Läufers aufgrund der mit dem Umfang variierenden radialen Luftspaltweite und schwankt zwischen zwei Maximalwerten [4]. Dabei ergibt sich die Form des gesamten Nutrastmoments aus der konstruktiven und geometrischen Beschaffenheit von Stator und Läufer. Außerdem beeinflusst die Sättigung die Ausprägung des drehzahlunabhängigen Nutrastmoments. Die Anzahl der Nutrastmomentperioden je Läuferumdrehung, gemeinhin auch als „Rastmomentfrequenz“  $f_{\text{cog}}$  bezeichnet und durch die Ordnungszahl  $\nu$  charakterisiert, ist durch

$$f_{\text{cog}} = \text{kgV}\{N_s, 2p\} \cdot \frac{f_s}{p} = \text{kgV}\{N_s, 2p\} \cdot n = \nu \cdot n \quad (1)$$

definiert mit der Nutzahl des Stators  $N_s$ , der elektrischen Statorfrequenz  $f_s$  und der Polpaarzahl  $p$  bzw. der mechanischen Drehzahl  $n$ . Im konkreten Fall beträgt die dominierende Rastmomentordnung  $\nu = 180$  und bedeutet 180 Rastmomentperioden pro mechanischer Umdrehung.

## 3 Wirtschaftliche Notwendigkeit und Maßnahmen der Rastmomentreduzierung

Bei KWEA führt das Nutrastmoment zu akustischen Anregungen, insbesondere im Mast und erschweren den Anlauf des Repellers. KWEA bis in den einstelligen kW-Bereich nutzen mehrheitlich Repeller mit festem Blatteinstellwinkel. Im Anlauf, also bei niedriger Schnelllaufzahl,

ist der strömungsmechanische Drehmomentbeiwert gering und das resultierende niedrige Drehmoment muss zum Anlauf zuerst das Nutrastmoment überwinden. Eine wirksame Kompensation von Nutrastmomenten wird durch den Einsatz von geschrägten Läufern erreicht. Der komplexere Fertigungsprozess erhöht jedoch die Fertigungskosten. Ohne Läufersträgung kann die Läuferfertigung schneller und auf einfacheren dreiachsigen Fertigungsautomaten erfolgen, womit die Herstellungskosten sinken. Darüber hinaus müssen die axial tordierten Nutgassen bei der Fertigung geschrägter Polsysteme im Hinblick auf die Bestückung mit quaderförmigen Magneten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund fallen die Nutgassen im Vergleich zu einer ungeschrägten Variante breiter aus. Hieraus resultiert ein 0,1 mm größerer magnetischer Luftspalt.

Die in der Fachliteratur beschriebenen Maßnahmen der Rastmomentreduzierung zielen zumeist darauf ab, die dominanten Einflussgrößen zur Bildung von Nutrastmomenten in ihrer Wirkung zu neutralisieren bzw. reduzieren. Ziel der Optimierung ist ein Zustand, in dem die Feldkonfiguration über beiden Kanten des Läuferpols möglichst identisch ist. Nach [5] können die rastmomentreduzierenden Maßnahmen, je nachdem auf welchen Parameter sie Einfluss nehmen, in zwei Gruppen (s. Tab. 1) eingeteilt werden.

Grundlage für die zweidimensionale elektromagnetische Feldberechnung und das analytische Berechnungsmodell ist die Methodik der Magnetverschiebung mit resultierender Variation der Polbogenlängen innerhalb festgelegter Polgruppen. Ziel der Magnetverschiebung ist es, die Magnete längs des Läuferumfangs so geeignet zu positionieren, um die Überlagerungswirkung der anteilig wirkenden Nutrastmomente zu minimieren. Bei dem untersuchten Synchrongenerator mit  $N_s = 36$  und  $p = 5$  stehen jedem Läuferpol 3,6 Statornuten gegenüber und die angeregten Nutrastmomente sind nicht mehr phasengleich. Nach [1] wird durch den Gruppenfaktor

$$k_{gr} = \frac{\nu}{N_s} \quad (2)$$

die Anzahl von Polgruppen bestimmt, die phasenverschoben sind. Im vorliegenden Fall ergeben sich fünf phasenverschobene Gruppen mit je zwei Polen.

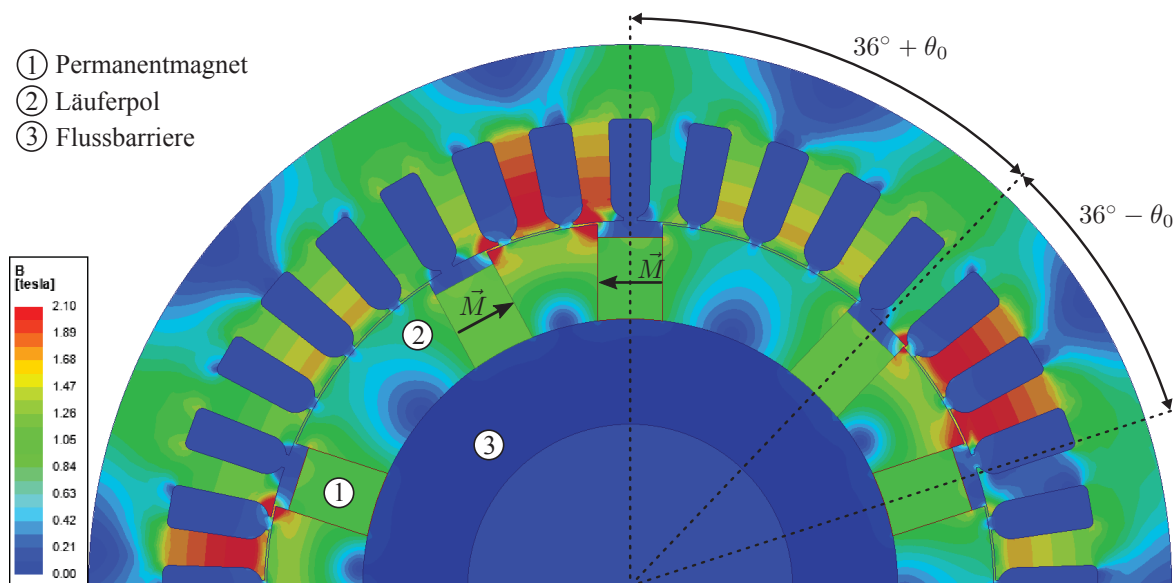
**Tab. 1:** Maßnahmen der Rastmomentreduzierung (rot eingerahmt die gewählte Variante)

<b>Veränderung des Strombelags- / Magnetisierungsspektrums</b>	<b>Beeinflussung des magnetischen Leitwerts</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation der Polbreite</li> <li>• Variation der Polkontur</li> <li>• <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">Variation der Magnetposition</span></li> <li>• Absenkung der Luftspaltinduktion</li> <li>• Steuerung des Arbeitsstromes zur Kompensation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation der Luftspaltkontur</li> <li>• Variation des Verhältnisses von Nutschlitzbreite zu magnetisch wirksamer Luftspaltlänge</li> <li>• Verwendung ungleichmäßiger symmetrischer Statornutung</li> <li>• Größerer Luftspalt</li> </ul>

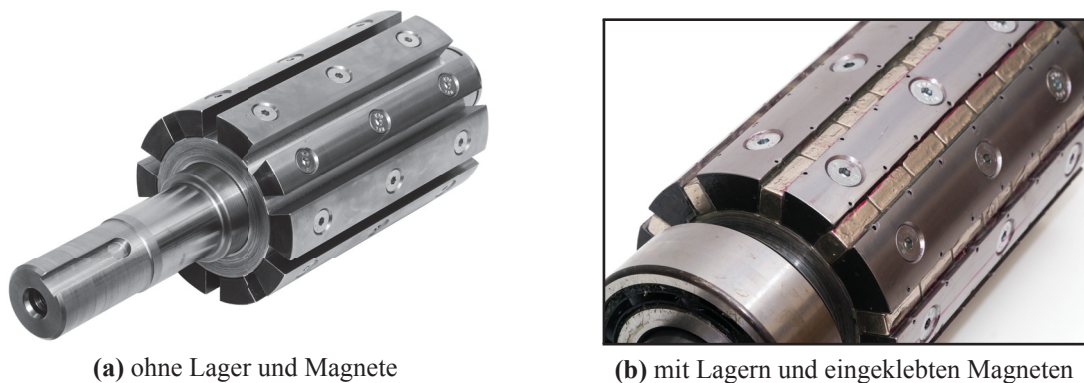
#### 4 Numerische Simulation

Zur prinzipiellen Untersuchung der Wirksamkeit des Verfahrens der Magnetverschiebung wurde die Maschine parameterbasiert in ANSYS Maxwell 2D elektromagnetisch simuliert. Die Parameterstudie des Magnetverschiebungswinkels  $\theta_0$  lieferte mehrere günstige Geometrievarianten, welche hinsichtlich ihres Einflusses auf das elektromagnetische Betriebsverhalten der Maschine bewertet wurden. Die Verteilung der Erregerflussdichte  $B$  zeigt (s. Abb. 2), dass die Magnetverschiebung, zur Minimierung der Sättigungseffekte im Bereich der Polkanten, nur in definierten Grenzen erfolgen sollte.

Im vorliegenden Fall wird bei einem Verschiebungswinkel von  $\theta_0 = 3,6^\circ$  das Nutrastmoment um ca. 95 % reduziert, ohne das Betriebsverhalten signifikant zu verschlechtern (Verringerung der Grundwelle der Flussverkettung im Vergleich zur symmetrischen Ausführung um lediglich ca. 2 % [2]). Zur Validierung der gewählten Variante wurde ein Prototyp gefertigt (s. Abb. 3) und mit einem Referenzläufer mit ungeschrägt, symmetrisch verteilter Polanordnung verglichen.



**Abb. 2:** Verteilung der Amplitude des  $B$ -Feldes im Leerlauf bei Magnetverschiebungswinkel  $\theta_0 = 7,6^\circ$

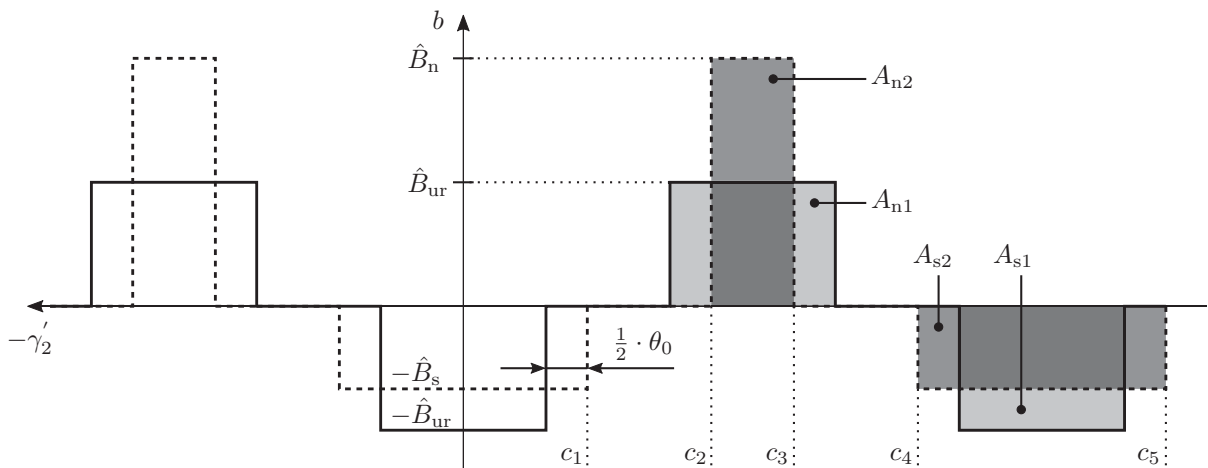


**Abb. 3:** Gefertigter Läufer mit asymmetrischer Polanordnung bei Magnetverschiebungswinkel  $\theta_0 = 3,6^\circ$

## 5 Analytisches Berechnungsmodell

Das hier vorgestellte mathematische Berechnungsmodell zur analytischen Beschreibung des wirkenden Nutrastrmoments unter Einfluss einer asymmetrischen Polanordnung baut auf den Arbeiten von [3] auf. Da die in [3] angestellten Überlegungen jedoch einen permanentmagnet-erregten AC-Servomotor mit gestaffelten Oberflächenmagneten und einer symmetrischer Polanordnung betreffen, wurde die Analytik auf die konkrete Problemstellung adaptiert. Außerdem wird eine näherungsweise radiale Orientierung des Luftspaltfeldes angenommen, da die Polteilung  $\tau_p$  deutlich größer als die Luftspaltweite  $\delta$  ist.

Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen ist die mit einsetzender Magnetverschiebung sich ändernde räumliche Verteilung der Luftspaltinduktion längs des Läufer- bzw. Statorumfangs. Deren Radialkomponente wird vereinfacht durch eine Rechteckfunktion angenähert (s. Abb. 4). Die sich ändernden Amplituden der Luftspaltinduktion für die Nord- und Südpole sind durch den Umstand der „Flusskonstanz“ (Sättigungseffekte werden vernachlässigt) begründet, da die Magnete einen gleichbleibenden magnetischen Fluss antreiben, der bei variablem  $\theta_0$  durch unterschiedlich große Polflächen fließt. Deswegen gilt der Zusammenhang  $A_{n2} \stackrel{!}{=} A_{s2} \stackrel{!}{=} A$ .



**Abb. 4:** Verlauf der Radialkomponente der Luftspaltinduktion (durchgezogen symmetrisch, gestrichelt Magnetverschiebung) nach [2]

Mit den Amplituden des Luftspaltfeldspektrums bei konstantem Luftspaltleitwert nach [2]

$$\hat{B}_\mu = \frac{1}{\mu\pi} \cdot \left( \hat{B}_n \cdot [\sin(\mu p c_3) - \sin(\mu p c_2)] - \hat{B}_s \cdot [\sin(\mu p c_5) - \sin(\mu p c_4)] \right) \quad (3)$$

lässt sich das permanentmagnetisch erregte Luftspaltfeld für eine Polanordnung mit Magnetverschiebung als Fourierreihe der Form

$$b(\gamma'_2) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{B}_\mu \cdot \cos \left[ \mu p \cdot \left( \gamma'_2 + \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \quad (4)$$

beschreiben.  $\gamma'_2$  ist die Bezugsordinate des Läuferumfangswinkels in mechanischen Grad im Läuferkoordinatensystem.

Im Weiteren wird die Magnetisierung der Magnete als ein in sich geschlossener Kreisstrom

begriffen. Dadurch lässt sich analog wie bei elektrisch erregten Synchronmaschinen diesem Kreisstrom ein „äquivalenter“ Strombelag zuordnen, der anschließend das gleiche magnetische Luftspaltfeld erregt [5]. Durch die Beziehung

$$b(\gamma'_2) \stackrel{!}{=} \Lambda_0 r \int a(\gamma'_2) d\gamma'_2 \quad (5)$$

bestimmt sich nach Umformung der „äquivalente“ Strombelag zu

$$a(\gamma'_2) = \sum_{\mu=1}^{\infty} -\hat{A}_{\mu} \cdot \sin \left[ \mu p \cdot \left( \gamma'_2 + \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \quad (6)$$

mit

$$\hat{A}_{\mu} = \frac{\mu p \hat{B}_{\mu}}{\Lambda_0 r}. \quad (7)$$

Mit der Koordinatentransformation  $\gamma'_1 = \gamma'_2 + \omega t$  folgt für den „äquivalenten“ Strombelag für den stationären Betrieb im Ständerkoordinatensystem

$$a(\gamma'_1) = \sum_{\mu=1}^{\infty} -\hat{A}_{\mu} \cdot \sin \left[ \mu p \cdot \left( \gamma'_1 - \omega t + \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right]. \quad (8)$$

Die analytische Beschreibung des Luftspaltleitwertes erfolgt ausgehend eines Näherungsansatzes nach [3]. Im Zahnkopfbereich wird ein konstanter, zur Nutschlitzmitte hin abnehmender Luftspaltleitwert angenommen. Der resultierende Luftspaltleitwert wird anschließend als Fourierreihe

$$\Lambda(\gamma'_1) = \Lambda_0 + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \hat{\Lambda}_{\lambda} \cdot \cos(\lambda N_s \gamma'_1) \quad (9)$$

beschrieben.

Durch Anwendung des Durchflutungsgesetzes wird dann aus dem ermittelten „äquivalenten“ Strombelag und dem die Ständernutung berücksichtigenden Luftspaltleitwert das resultierende Luftspaltfeld mit

$$b(\gamma'_1) = \Lambda(\gamma'_1) \int r \cdot a(\gamma'_1) d\gamma'_1 \quad (10)$$

bestimmt.

Nach Einsetzen der Gleichungen (7), (8) und (9) in Gleichung (10) folgt nach einigen Umformungen für das Luftspaltfeld

$$\begin{aligned} b(\gamma'_1) = & \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{B}_{\mu} \cdot \cos \left[ \mu p \cdot \left( \gamma'_1 - \omega t + \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \\ & + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{\hat{B}_{\mu} \hat{\Lambda}_{\lambda}}{2\Lambda_0} \cdot \left\{ \cos \left[ \gamma'_1 \cdot (\mu p - \lambda N_s) - \mu p \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \right. \\ & \left. + \cos \left[ \gamma'_1 \cdot (\mu p + \lambda N_s) - \mu p \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Nach [3] beschreibt dabei der erste Summand in Gleichung (11) das bei konstantem Luftspalt-

leitwert permanentmagnetisch erregte Luftspaltfeld des Läufers und der zweite die Einflüsse der sogenannten Nutungsfelder.

Über die tangential gerichtet wirkende Zugspannungsverteilung

$$\sigma_t(\gamma'_1) = a(\gamma'_1) \cdot b(\gamma'_1) \quad (12)$$

berechnet sich das Luftspaltdrehmoment mit den Gleichungen (8) und (11) zu

$$m = r^2 l \int_0^{2\pi} a(\gamma'_1) \cdot b(\gamma'_1) d\gamma'_1 \quad (13)$$

und liefert nach einigen Umformungen den Ausdruck

$$\begin{aligned} m = & - \sum_{\tilde{\mu}=1}^{\infty} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} r^2 l \hat{A}_{\tilde{\mu}} \frac{\hat{B}_{\mu} \hat{A}_{\lambda}}{4\Lambda_0} \\ & \cdot \left\{ \int_0^{2\pi} \sin \left[ (\tilde{\mu}p - \{\mu p - \lambda N_s\}) \cdot \gamma'_1 - (\tilde{\mu}p - \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] d\gamma'_1 \right. \\ & + \int_0^{2\pi} \sin \left[ (\tilde{\mu}p + \{\mu p - \lambda N_s\}) \cdot \gamma'_1 - (\tilde{\mu}p + \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] d\gamma'_1 \quad (14) \\ & + \int_0^{2\pi} \sin \left[ (\tilde{\mu}p - \{\mu p + \lambda N_s\}) \cdot \gamma'_1 - (\tilde{\mu}p - \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] d\gamma'_1 \\ & \left. + \int_0^{2\pi} \sin \left[ (\tilde{\mu}p + \{\mu p + \lambda N_s\}) \cdot \gamma'_1 - (\tilde{\mu}p + \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] d\gamma'_1 \right\}. \end{aligned}$$

Gleichung (14) zeigt, dass nur ein Drehmoment gebildet werden kann, wenn für die Polpaarzahlkombinationen von Strombelag und Nutungsfeld die Bedingung

$$\tilde{\mu}p \binom{+}{-} (\mu p \pm \lambda N_s) \stackrel{!}{=} 0 \quad (15)$$

erfüllt wird. Denn ausschließlich in diesem Fall führen die Integrationen der periodischen Funktionen über den Umfangswinkel  $2\pi$  auf einen von Null verschiedenen Wert. Allerdings wird der Ausdruck  $\tilde{\mu}p + (\mu p + \lambda N_s) \stackrel{!}{=} 0$  nie erfüllt und folglich liefert der letzte Integralterm in Gleichung (14) immer Null.

Die verbleibenden drei Bedingungen werden genau dann erfüllt, wenn für die Polpaarzahlen der Luftspaltleitwertschwankung

$$\lambda = \frac{2p}{\text{ggT}\{2p, N_s\}} \cdot g \quad \text{mit} \quad g = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

gilt.

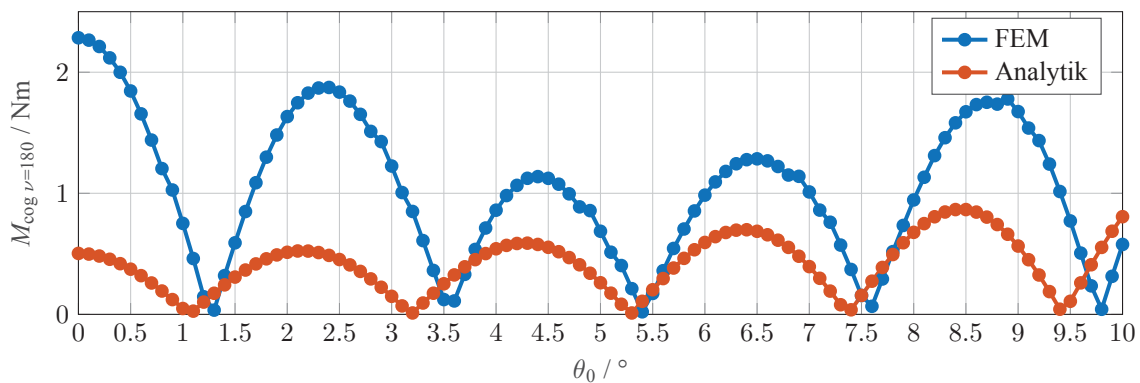
Nach weiteren Umformungen folgt für das Nutrastmoment des Läufers unter Berücksichtigung

des Einflusses der Magnetverschiebung durch  $\theta_0$  innerhalb festgelegter Polgruppen schließlich

$$m_{\text{cog}} = \sum_{\tilde{\mu}=1}^{\infty} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} r^2 l \hat{A}_{\tilde{\mu}} \frac{\hat{B}_{\mu} \hat{A}_{\lambda} \pi}{2 \Lambda_0} \cdot \left\{ 2 \cdot \sin \left[ (\tilde{\mu} p - \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] + \sin \left[ (\tilde{\mu} p + \mu p) \cdot \left( \omega t - \theta_0 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

und kann als Summe von Pendelmomenten begriffen werden.

In Abb. 5 sind die durch FEM und analytisches Berechnungsmodell ermittelten Amplitudenverläufe des Nutrastmoments der Ordnung  $\nu = 180$  in Abhängigkeit vom Magnetverschiebungswinkel  $\theta_0$  gegenübergestellt. Es existieren verschiedene Minima hinsichtlich des Nutrastmoments. Die Analytik bildet prinzipiell den „richtigen“ Verlauf ab, aber mit zu niedrigen Amplituden. Zum einen berücksichtigt das Berechnungsmodell lediglich die Radialkomponente des Luftspaltfeldes, obwohl die Tangentialkomponente ebenso zur Nutrastmomentwirkung beiträgt. Zum anderen erfasst es nicht die mit Magnetversatz einsetzenden Sättigungseffekte in den Polkanten und Zahnköpfen (s. Abb. 2), was Grund für die Verschiebung der Minima ist.



**Abb. 5:** Vergleich der Amplituden des Nutrastmoments in Abhängigkeit vom Magnetverschiebungswinkel für  $\nu = 180$  [2]

## 6 Experimentelle Untersuchung

Für die messtechnische Verifikation kam der Versuchsaufbau nach Abb. 6 zum Einsatz. Die Messstrecke setzt sich aus einem DC-Getriebemotor mit  $\ddot{u} = 714$  als motorischer Antrieb, drehsteifen Kupplungen, einer Drehmomentmesswelle mit Nenndrehmoment  $M_N = 5 \text{ Nm}$  sowie einer Vorrichtung für das Einbringen eines Offsets im Drehmomentverlauf zusammen. Über die modularen Gegengewichte ist es möglich, das System in Drehrichtung „vorzuspannen“ um ein Drehmoment mit konstantem Vorzeichen während der Messaufzeichnung zu gewährleisten.

Dadurch ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Nutrastmomentmessung. Zum einen ist eine rotatorische Messung möglich, bei der der Prüfling durch den DC-Getriebemotor angetrieben wird. In diesem Fall verfälschen jedoch unerwünschte Drehzahlschwankungen die Messergebnisse. Eine bessere Variante zur lageäquidistanten Abtastung des Drehmoments ist eine stationäre Messung, bei der die Läuferposition des Prüflings über ein Handrad vor der Getriebestufe eingestellt wird.



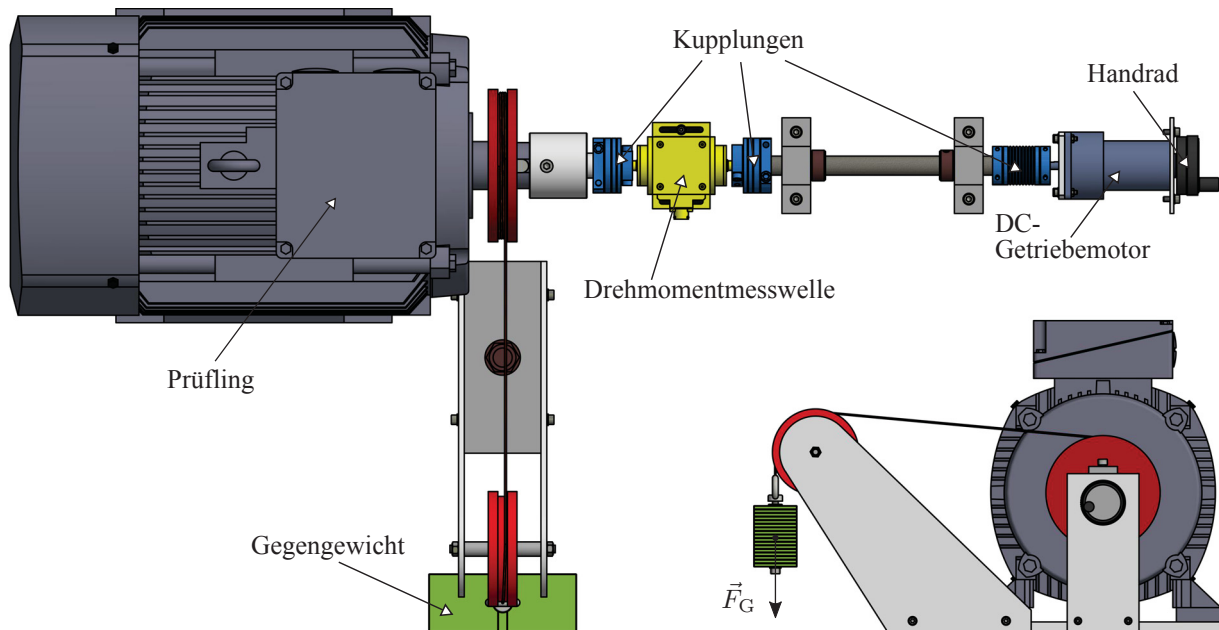


Abb. 6: Versuchsaufbau

Abb. 7 zeigt die mit stationärer Messung aufgenommenen Nutrastmomentverläufe (ohne Gleichanteil) für den gefertigten Prototyp mit asymmetrischer Polanordnung ( $\theta_0 = 3,6^\circ$ ) und den Referenzläufer mit symmetrisch verteilten Polen ( $\theta_0 = 0^\circ$ ). Bei beiden Läufern ist eine ausgeprägte Ordnung  $\nu = 180$  zu erkennen, wobei eine klare Minimierung bei der optimierten Läufervariante zu verzeichnen ist. Zudem ist dem Drehmomentverlauf des vermessenen Protoyps eine Ordnung  $\nu = 36$  unterlagert (wiederkehrendes Muster aller  $10^\circ$ ), was sich auch im Amplitudenspektrum (s. Abb. 8b) widerspiegelt und laut den FEM-Ergebnissen nicht zu erwarten gewesen wäre. Diese unerwünschte Begleiterscheinung ist auf etwaige Fertigungstoleranzen zurückzuführen, die nach [5] einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das tatsächlich wirkende Nutrastmoment haben.

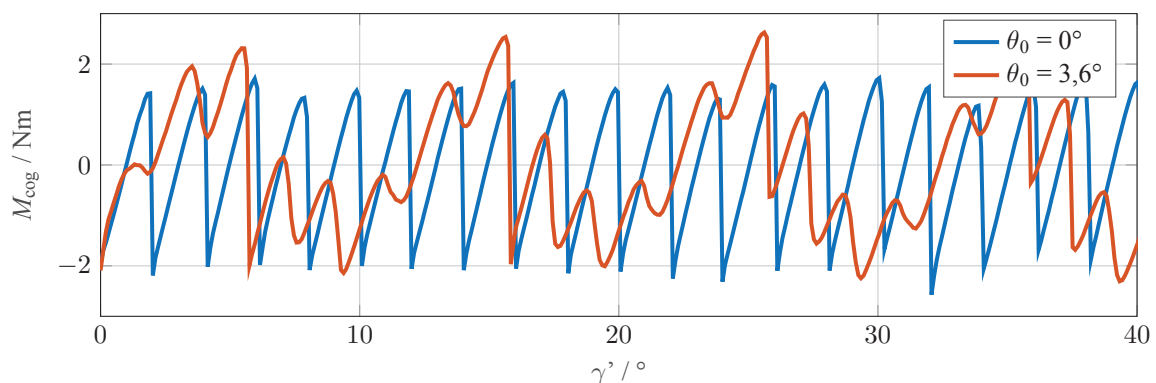
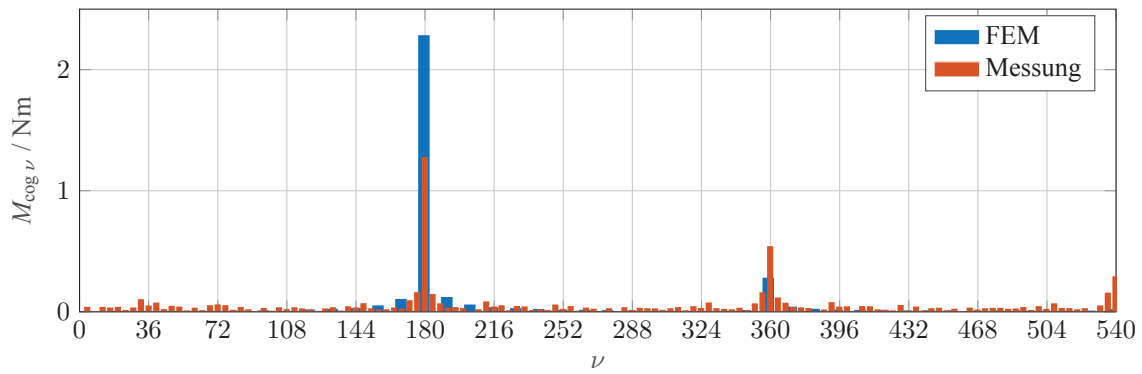
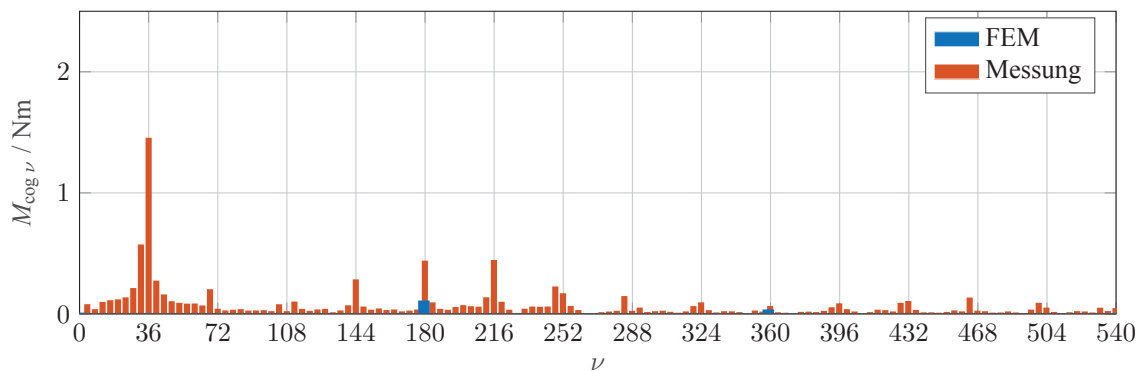


Abb. 7: Stationär gemessener Nutrastmomentverlauf von gefertigtem Prototyp und Läufer mit symmetrisch verteilten Polen



(a) bei Magnetverschiebungswinkel  $\theta_0 = 0^\circ$



(b) bei Magnetverschiebungswinkel  $\theta_0 = 3,6^\circ$

**Abb. 8:** Amplitudenspektrum des stationär gemessenen und numerisch ermittelten Nutrastmoments des gefertigten Prototyps und Läufers mit symmetrisch verteilten Polen

## 7 Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Berichts war eine fertigungsoptimierte Methode der Nutrastmomentenreduzierung durch Magnetverschiebung am Beispiel eines Synchrongenerators für Kleinwindenergieanlagen mit in die Läuferoberfläche eingelassenen Permanentmagneten. Unter Anwendung der Drehfeldtheorie wurde ein analytisches Berechnungsmodell zur Bestimmung des Nutrastmoments im Kontext der Magnetverschiebung vorgestellt und dessen grundlegende Gültigkeit mit FEM-Simulationen verifiziert. Durch praktische Vermessung eines gefertigten Prototyps mit Magnetversatz und einem Referenzläufer mit symmetrisch verteilten Polen konnte die Reduzierung der prägnanten Nutrastmomentordnung  $\nu = 180$  bei der optimierten Läufervariante bestätigt werden. Weiterführend ist die Untersuchung der Ursache für eine unterlagerte Nutrastmomentordnung  $\nu = 36$  in den Messergebnissen vorzunehmen.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden gefördert und mitfinanziert mit Mitteln des sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst (SMWK).



## Literatur

- [1] Dosiek, L.; Pillay, P.: Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines. In IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43; S. 1565-1571.
- [2] Harnisch, P.: Auslegung, Nachrechnung und Prüfung eines rastmomentoptimierten, hochpoligen permanentmagneterregten Synchrongenerators. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2018.
- [3] Huth, G.: Nutrastung von permanenterregten AC-Servomotoren mit gestaffelter Rotoranordnung. In Electrical Engineering, 1995; S. 391-397.
- [4] Marinescu, M.: Einfluss von Polbedeckungswinkel und Luftspaltgestaltung auf die Rastmomente in permanentmagneterregten Motoren. In etzArchiv Bd. 10, 1988; S. 83-88.
- [5] Steinbrink, J.: Kraftwirkungen in permanentmagneterregten Maschinen. Dissertation, Universität Hannover, 2005, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006.