

Nutrastmomente in elektrischen Maschinen: Neue Betrachtungsweise und Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung

Dr.-Ing. Frank Jurisch, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, DM-PM 4

Cogging in electrical machines: A new overview and measures to influence the cogging torque

The cogging originates in the interaction of the magnet edges with the slot between the teeth. The running force is repeated periodically with each slot pitch. The characteristic cogging arises from the superposition of all running forces. The relationship between the cogging torque and the manufacturing tolerances can simply be formulised by considering symmetrical and unsymmetrical placements of the magnets.

electrical machines; cogging torque; placement & tolerances of permanent magnets,

1. Vorbemerkung

In elektrischen Maschinen für rotierende, lineare oder Schwenkbewegungen treten aus verschiedenen Gründen verursacht Oberwellen auf, die zu Drehmomentwelligkeit führen. Man unterscheidet nach elektrisch und nach magnetisch erregten Oberschwingungen.

Elektrisch erregte Oberschwingungen basieren auf Feld- und Durchflutungswellen gleicher Ordnungszahl. Die Durchflutungsoberwellen werden durch die Wicklungsauslegung und die Art der Stromspeisung hervorgerufen und beeinflusst. Die Feldoberwellen ergeben sich aus der Gestaltung des Magnetkreises und dessen stromabhängiger Sättigung.

Die magnetischen Oberschwingungen resultieren aus Schwankungen des magnetischen Leitwertes im Magnetkreis. Diese Reluktanzkräfte sind auf konstruktive Inhomogenität (Nutung und Verengungen im Rückenbereich) zurückzuführen.

Des weiteren treten noch mechanisch verursachte Schwankungen der Reibung in Lagern und Führungen auf, die den vorgenannten Kräften überlagert sind. Verspannte Lager und Wellenverbindungen führen bei rotierenden Maschinen zu periodischen Schwankungen, die der Läuferumdrehfrequenz entsprechen. Wälzlagerschäden bilden sich entsprechend des Abrollbildes der Wälzkörper ab.

Die nach außen wirkende Kraft ergibt sich aus der Überlagerung der oben beschriebenen Kräfte. Dies führt zu mehr oder weniger großen Störungen des Bewegungsablaufes und beeinflusst die Regelgenauigkeit und Dynamik der elektrischen Maschine.

Im folgenden werden nur die magnetisch verursachten Reluktanzkräfte am Beispiel der rotierenden elektrischen Maschine betrachtet. Für Linearantriebe gelten die Aussagen und Erkenntnisse gleichermaßen. Wegen der unterschiedlichen Längen von Feld- und Ankerteil bei Linearantrieben führen die stochastisch verteilten diesen geometrische und magnetische Toleranzen der Laufbahn zu nicht periodischen Kraftverläufen.

2. Reluktanzkräfte auf Grund magnetischer Unsymmetrien

Die nachfolgenden Betrachtungen werden für rotierende elektrische Maschinen mit permanenterregtem Feld im Läufer und feststehender Ankerwicklungen im Stator durchgeführt, wie es dem grundsätzlichen Aufbau der bürstenlosen Gleichstrommaschinen (ec-Motoren) oder der permanenterregten Synchronmaschinen entspricht. Die Erkenntnisse sind auf Kommutatormaschinen und elektrisch erregte Synchronmaschinen direkt anwendbar und auch auf Asynchronmaschinen übertragbar.

2.1 Wicklungscharakterisierung

Bei elektronisch kommutierten oder aus einem m-phasigen Netz gespeisten Ankerwicklungen sind diese Strangwicklungen entweder ineinander verschachtelt (verteilte Wicklung) oder nacheinander angeordnet. Letztere werden als Einzelzahnwicklung oder auch konzentrierte Wicklung mit kreuzungsfreien Wickelköpfen bezeichnet. Ein charakteristisches Maß für den Wicklungsaufbau ist die Lochzahl q , welche angibt wie viele Nuten q pro Strang m und Pol (durch Polzahl $2p$ gegeben) zur Verfügung stehen.

$$q = \frac{N}{2p * m} \quad (1)$$

Bei verteilten Wicklungen ist $q \geq 1$ und wenn q ganzzahlig ist handelt es sich um eine Ganzlochwicklung. Von Bruchlochwicklung spricht man, wenn $q = z_q/n_q$ eine gebrochene rationale Zahl ist. Bei Einzelzahnwicklungen ist $q < 1$ und somit stets gebrochen.

Die Wicklungen werden zur Verminderung des magnetischen Luftspaltes und somit des Durchflutungsbedarfs in Nuten gelegt. Die Zähne und Zahnköpfe aus weichmagnetischem Material dienen der Flussleitung. Der Ankerrücken schließt den magnetischen Kreis. Nutschlitz müssen wegen des Einbringens der Wicklung und deren guter Verkettung mit dem Erregerfeld und einer geringe Nut-Streuinduktivität vorhanden sein.

Will man das im nächsten Abschnitt beschriebene Nutrasten vermeiden, muss die Wicklung ohne Zähne (nutenlos) in einem geblechten Rückschlussring angeordnet oder eisenlos als freitragende Wicklung wie bei Glockenläufermotoren oder Linear- und Schwenkantrieben sowie Ringspaltsystemen ausgeführt werden.

2.2 Nutrastmoment

Die Nutung führt zum **Nutrasten**, dem sgn. Cogging. Die Grundwellenfrequenz dieses Rastmomentes – charakterisiert durch die Ordnungszahl v_c – resultiert aus dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Nut- und Polzahl (Grundbaustein des Aufbaus der Maschine).

$$v_c = 2p * m * q * n_q \quad (2)$$

Ein bewährtes Mittel zur Unterdrückung dieses Nutrastmomentes ist die Schrägung des Ankers oder des Polsystems (in diesem Fall des Magneten) um diesen v_c -ten Teil. Durch gezielt eingebrachte Unsymmetrien in der Teilung des Erregerfeldes, einer optimalen Wahl der Magnetbreite, der Pol- und Nutzahl und der Gestaltung der Magnetkante (Verringerung der Luftspaltinduktionsänderung an der Polkante $dB_\delta/d\alpha$ durch Luftspalterweiterung) sowie des Nutschlitzes werden die Amplituden des resultierenden Nutrastmomentes beeinflusst.

In einer hier vorgestellten neuen Betrachtungsweise zum Nutrastmoment wird dessen Verlauf aus dem Zusammenwirken der Polkante mit dem Nutschlitz und der örtlichen Überlagerung aller Polkanten abgeleitet. Dadurch ist es möglich, den Einfluss sowohl der Magnetbreite und der Geometrie von Luftspalt und Nutschlitz als auch von gezielt eingebrachten Asymmetrien (z.B. Pol- oder Nutversatz) und der geometrischen Toleranzen abzuschätzen.

2.3 Polrastmoment

Unsymmetrien im Rückenbereich des Ankers, wie sie durch Befestigungslöcher für Niete, Nuten für Befestigungselemente oder Kabeldurchführungen sowie Abflachungen auf Grund materialsparender Schnittausslegung entstehen, führen an diesen Stellen zu erhöhtem Feldstärkebedarf. Es tritt ein **Polrasten** auf, dessen Amplitude von der Anzahl der gleichzeitig betroffenen Pole und dem Feldstärkemehrbedarf abhängig ist. Die Grundfrequenz ν_p ergibt sich wieder aus dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Polzahl und der Anzahl der (symmetrisch verteilten) Engstellen. Das Polrasten kann nur durch Beseitigung dieser Schwachstellen vermieden oder durch unsymmetrische Verteilung bezüglich der Pole gemindert werden.

2.4 Einfluss von geometrischen und magnetischen Toleranzen

Die Wirkung der geometrischen Toleranzen auf das Rastmoment ist bei symmetrischen Anordnungen der Polteilungsgeometrie grundsätzlich anders als bei gezielt eingebrachter Unsymmetrie (ungleiche Polteilung und $q < 1$). Bei symmetrischen Anordnungen führen Abweichungen in der Polteilung durch Breiten- und Lageabweichungen der Magnete zu Unsymmetrien, die das resultierende Krafffeld verwischen – die Amplituden werden kleiner. Dies betrifft sowohl das Nut- wie auch das Polrasten.

Bei gezielt unsymmetrischen Anordnungen, die ein niedriges Rastmoment durch Überlagerung mit teilweiser Auslöschung der vom Einzelpol verursachten Rastmomente erzielen, führen Teilungsfehler, Breiten- und Dickenabweichungen sowie magnetische Toleranzen in der Remanenzinduktion und im Ausrichtgrad zur Dominanz einzelner und zur ungünstigen Überlagerung der Kraftkomponenten mehrerer Pole. Das Gleiche gilt auch für exzentrischen Rotor- oder Lagersitz sowie für Unsymmetrien in einzelnen Zähnen oder hervorstehende bzw. zurückgesetzte Magnete. Die Grundwelle dieser Störung entspricht dann immer der Nutharmonischen.

3. Neue Betrachtungsweise zum Nutrastmoment

Grundansatz der Überlegungen ist, dass das Rastmoment auf Grund des Zusammenspiels der Polkante mit dem Nutschlitz entsteht. Diese periodisch schwankende Kraft ist abhängig von der Luftspaltweite, der Nutschlitzbreite und der Luftspaltinduktion. Aus der Überlagerung dieser Kantenkräfte resultiert dann das Nutrastmoment.

Der stellungsabhängige Kraftverlauf kann nur mit numerischer Feldberechnung hinreichend genau ermittelt werden. Für das Ermitteln des Einflusses geometrischer Toleranzen würde dieses Vorgehen einen enormen Programmier- und Rechenaufwand bedeuten. Man ist gezwungen die gesamte Maschine zu vernetzen, da man sich in diesem Fall nicht auf die Symmetriebedingungen der Urwicklung oder eines Polpaares bzw. der ganzen oder halben Polteilung beschränken kann.

3.1 Vorteil des neuen Ansatzes

Für die Untersuchung der verschiedensten Einflüsse der Pol- und Nutzahlwahl und deren geometrische Toleranzen muss nach oben formuliertem Ansatz nur eine Feldberechnung der Magnetkante mit einem Nutschlitz über den Bereich einer Nutteilung durchgeführt werden. Die verschiedensten Variationen werden dann durch Superposition (z.B. in EXEL) berechnet. Für ähnliche geometrische Verhältnisse der Luftspalt-Nutschlitz-Geometrie sind quantitative Aussagen möglich. Mit der einmal durchgeführten Berechnung können aber auch qualitativ die verschiedensten Fälle abgeschätzt werden.

An einem Beispiel für eine Nutteilung von $\tau_N = 8$ mm, einem Luftspalt von $\delta = 1$ mm, einer Magnetdicke von $h_M = 3$ mm und Nutschlitzbreiten von $b_s = 1,0 ; 1,5 ; 2,0$ mm wird das Vorgehen für permanenterrechte Maschinen mit NdFeB ($B_r = 1,0$ T) demonstriert.

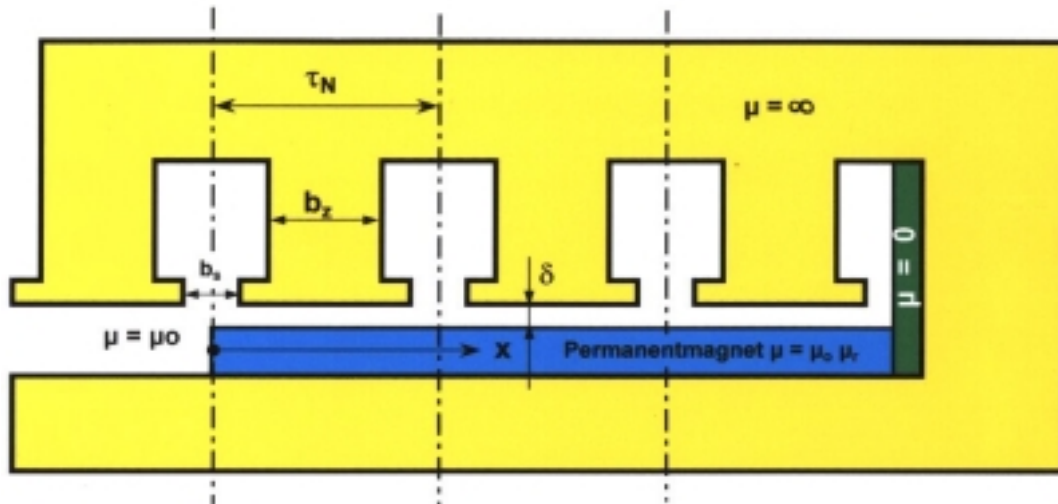


Bild 1: zeigt das Modell für die Ermittlung des Kraftverlaufs einer Magnetkante abhängig von der Stellung zur Nut. Die Verläufe sind ähnlich (Bild 2). Die Rastkraft eines Magneten erhält man durch Subtraktion der gespiegelten und entsprechend der Magnetbreite versetzten zweiten Magnetkante (Bild 3). Für Magnetbreiten von 16 mm ($2 \tau_N$) sowie 20 mm ($2,5 \tau_N$) bei 1,0 mm Nutschlitz wurde eine FEM – Rechnung durchgeführt. Die Übereinstimmung mit dem Ansatz „Kantenmodell“ ist ausgezeichnet (Bild 4).

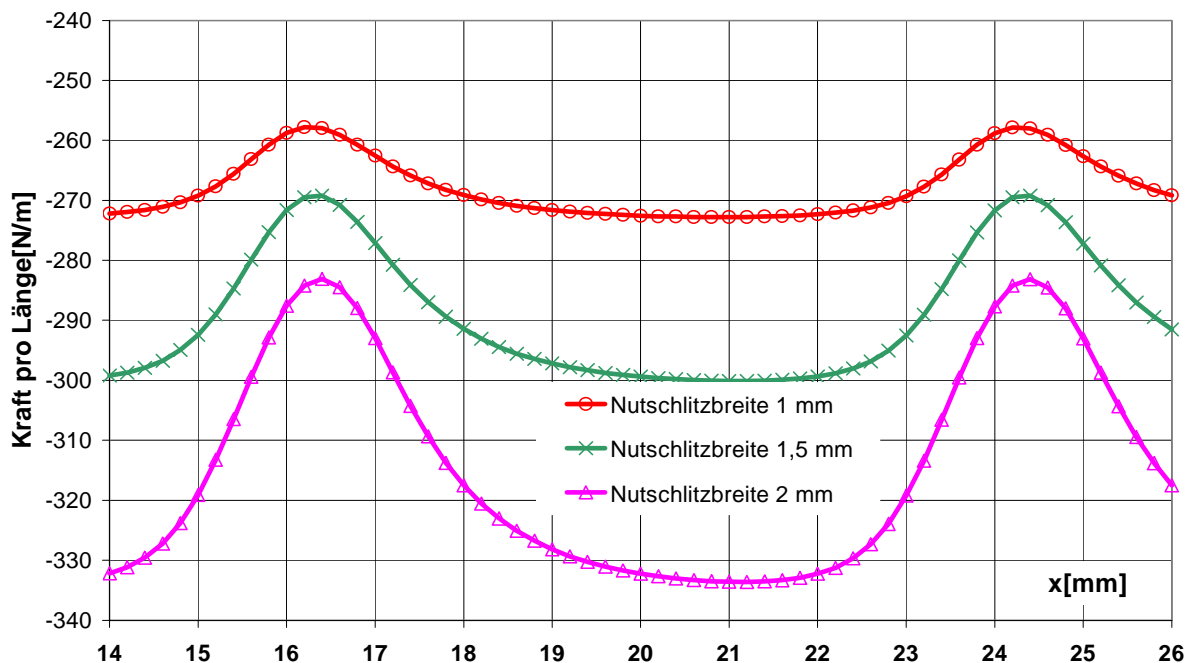


Bild 2: Kraft (x-Komponente) auf linke Magnetkante

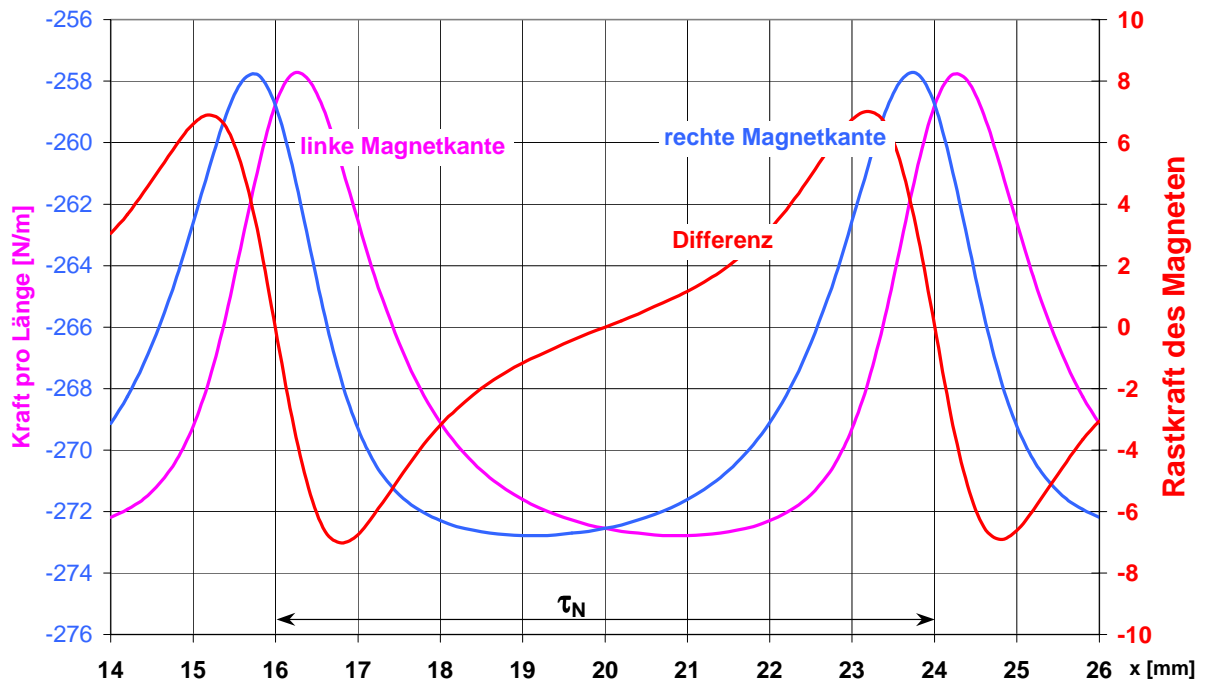


Bild 3: Kraft auf beide Magnetkanten (nach rechts bewegt) $b_M = 2 \cdot \tau_N$

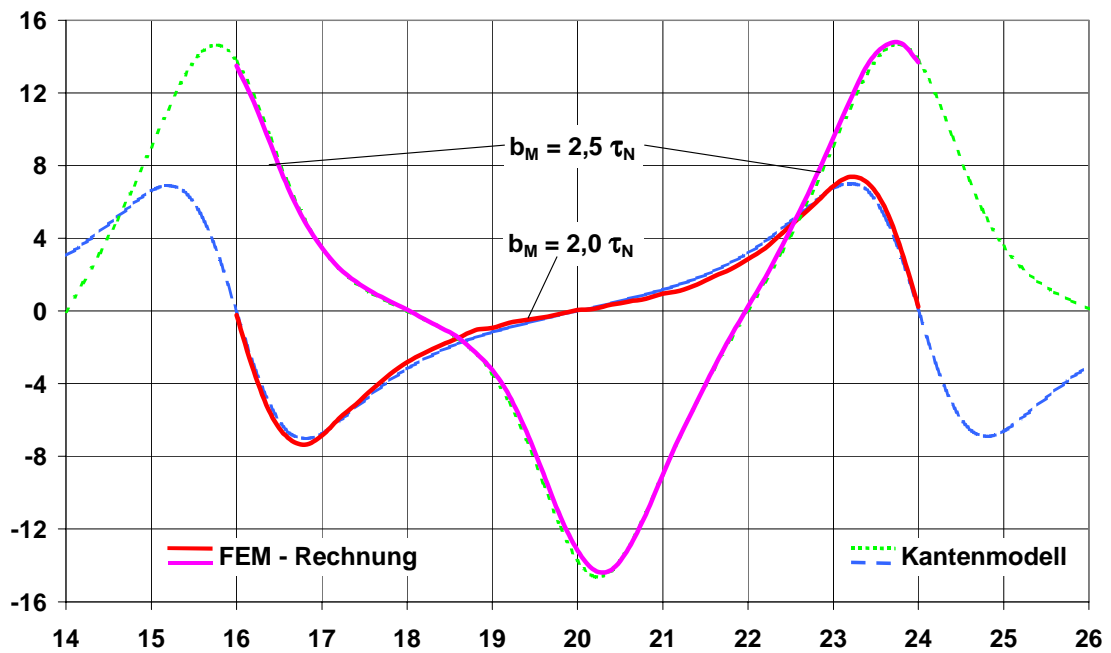


Bild 4: Vergleich der Berechnung nach den zwei Modellen

Durch kontinuierliche Verschiebung einer Magnetkante werden das Nutrastmoment für die entsprechenden Magnetbreiten $b_M = n, x \cdot \tau_N$ ermittelt und Scheitelwerte über dem x-ten Teil einer Nutteilung aufgetragen. Man erkennt, dass – entgegen der in einigen Artikeln der Fachliteratur geäußerten Auffassungen – das Rastmoment eines Magneten nicht bei einem ganzzahligen Vielfachen der Nutteilung am geringsten ist, sondern sich bei einer Magnetbreite, die ca. 10% kleiner ist als die Nutteilung, auf 25% verringert. Im Bereich von 15 bis 65 % der Nutteilung breiterem Magneten hingegen tritt das größte doppelt so hohe Rastmoment auf (Bild 5).

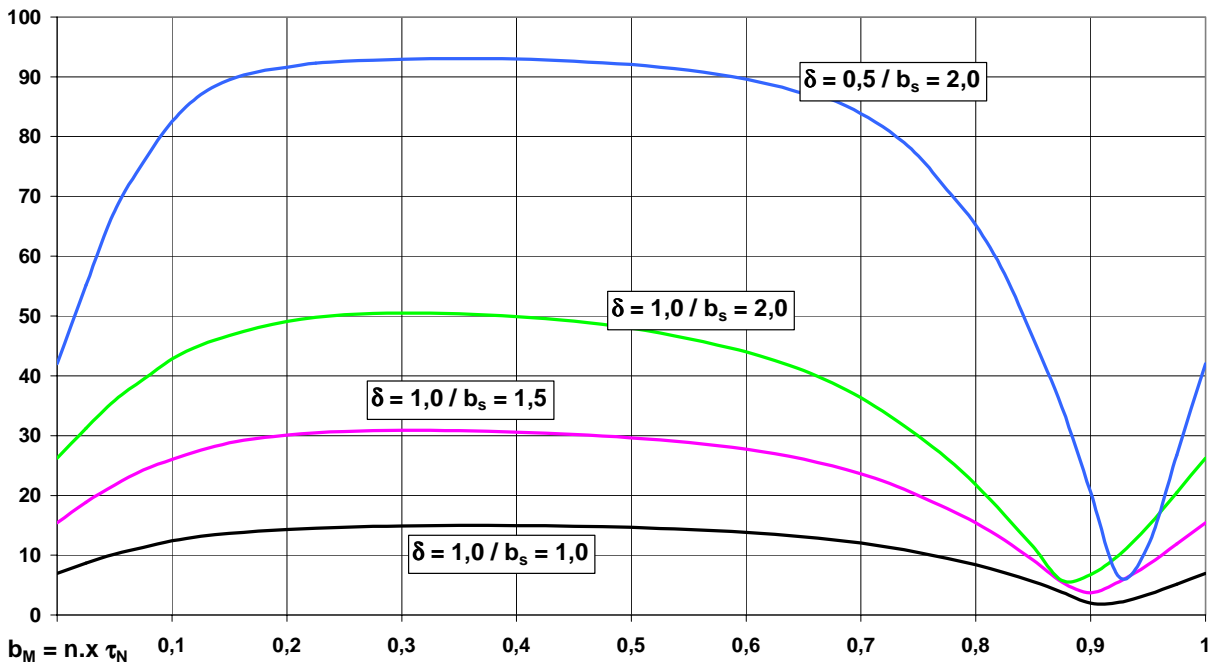


Bild 5: Scheitelwert des Nutrastmomentes in Abhängigkeit von der Magnetbreite bei verschiedenen Luftspalt-/ Nutschlitzabmessungen

3.2 Abhängigkeiten des Nutrastmomentes

Das Rastmoment entsteht aus der Überlagerung der Momentverläufe der einzelnen Magnetkanten. Die Magnetbreite, die den Abstand der beiden Kanten eines Magnet bestimmt, hat – wie aus Bild 5 hervorgeht – Einfluss auf das Rastmoment. Es hängt von der Nutschlitz-Geometrie und dem Verlauf der Polkante zum Nutschlitz ab. Die Luftspaltgeometrie wird durch den Carter'schen Faktor beschrieben. Die Beispiele aus Bild 5 belegen eine direkte Proportionalität der Nutrastmomentamplitude zum Carter'schen Faktor (Bild 6).

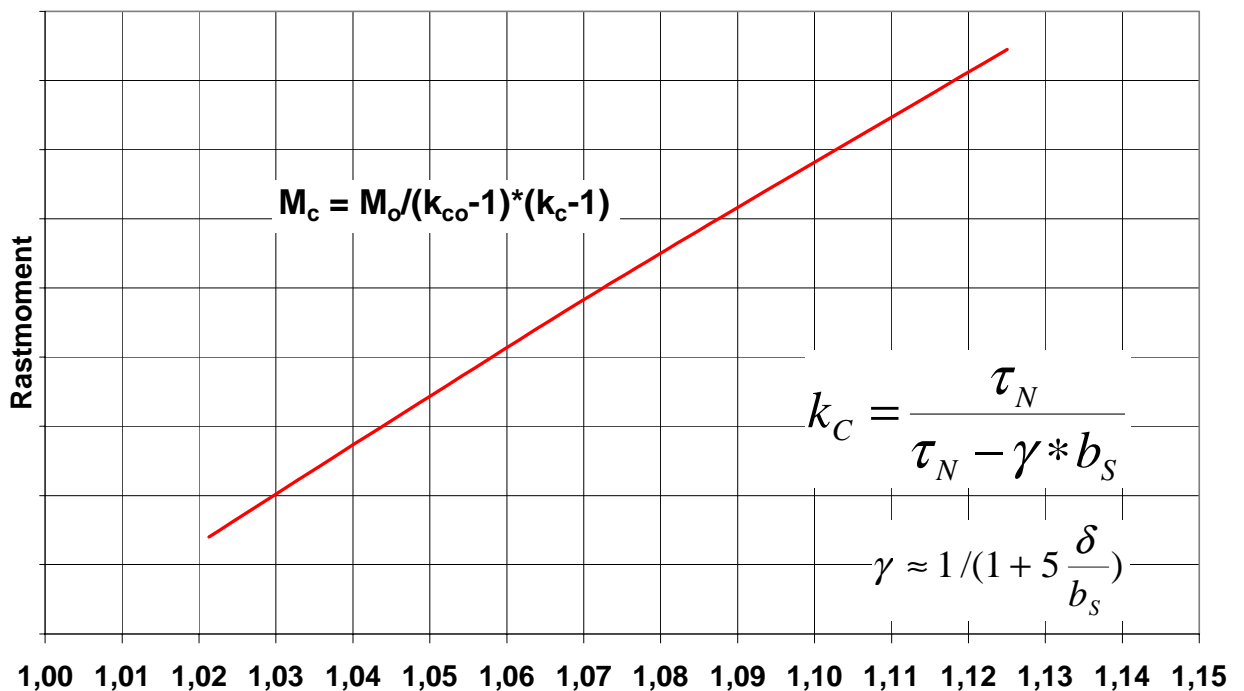


Bild 6: Rastmoment in Abhängigkeit vom Carter'schen Faktor

Mit dem Quadrat der Luftspaltinduktion vergrößert sich das Rastmoment. Eine z.B. durch nichtkonzentrische Radien zurückgesetzte Polkante vermindert das $\text{dB}/\text{d}\alpha$ und vergrößert den Luftspalt. Das Rastmoment wird dadurch kleiner. Bei symmetrischen Anordnungen addieren sich die Momentverläufe der Einzelmagnete. Somit haben Maschinen mit höherer Polzahl auch höhere Rastmomente. Magnetische und geometrische Toleranzen wirken bei symmetrischen Anordnungen rastmomentsenkend, weil nicht alle Magnetkanten zur gleichen Zeit den Nutschlitz passieren.

Asymmetrische Anordnungen zeichnen sich durch geringe Rastmomente aus, reagieren dafür aber empfindlich auf Verstimmungen des Optimums. Die Toleranzempfindlichkeit wird am Beispiel eines 9-nutigen Stators mit 8-poligem Läufer demonstriert. Theoretisch existiert nur eine 72. Rastmomentwelle mit sehr kleiner Amplitude. Aber schon eine Fehlplatzierung eines einzigen Magneten von 1° (entspricht 0,2 mm) ruft Nutharmonische mit 100-facher Amplitude hervor (Bild 7).

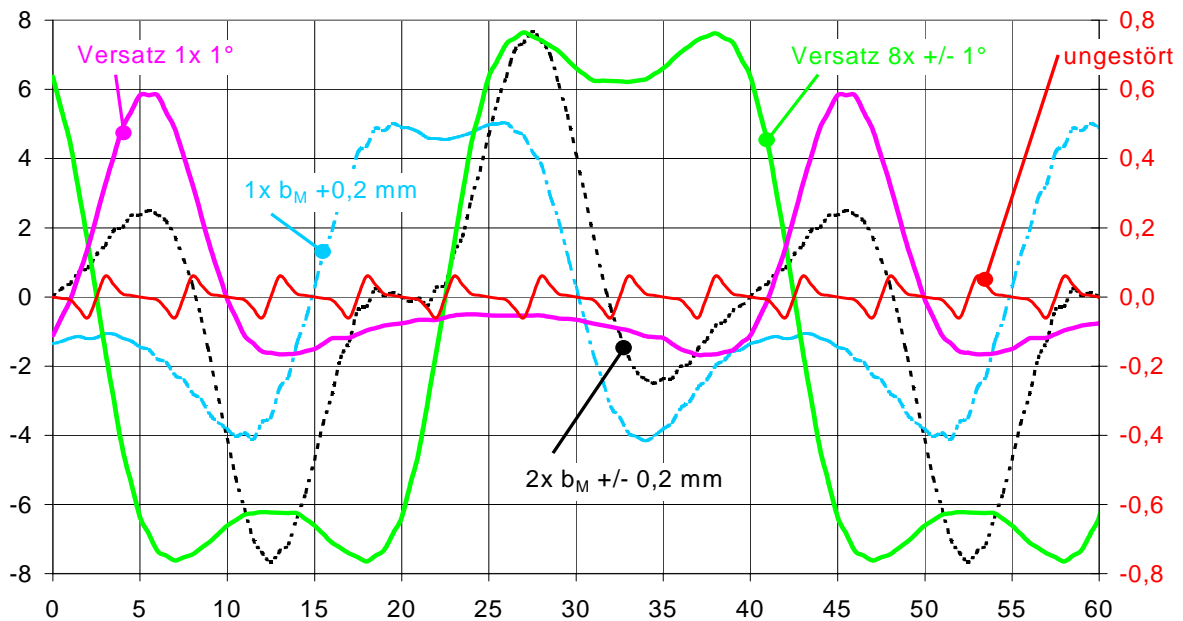
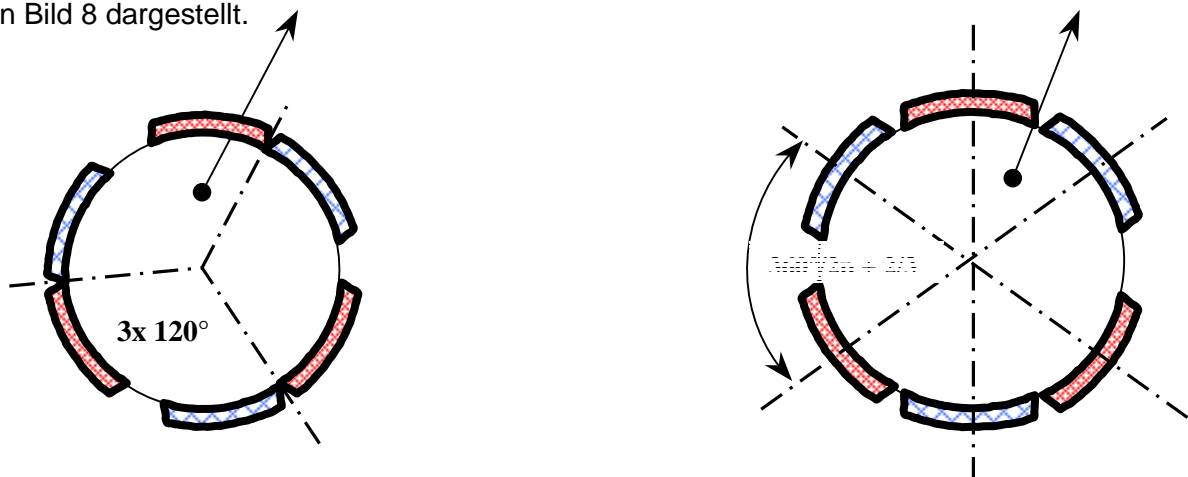


Bild 7: Toleranzempfindlichkeit von Motorauslegungen mit $q < 1$

Es ist aber auch möglich mit gleichem Blechschnitt und gleicher Magnetgeometrie Motoren mit einem Rastmomentunterschied bis 1:5 gezielt aufzubauen, in dem nur die Magnete auf dem Rotor unterschiedlich gruppiert werden. Am Beispiel eines 6-poligen Motors mit 9 Nuten und einer Magnetbreite gleich der Nutteilung sind die Rastmomentverläufe für gleich verteilte Polmagnete, mit **Paarbildung** (je zwei Stück aneinander gerückt) und **achswiseem Versatz** in Bild 8 dargestellt.



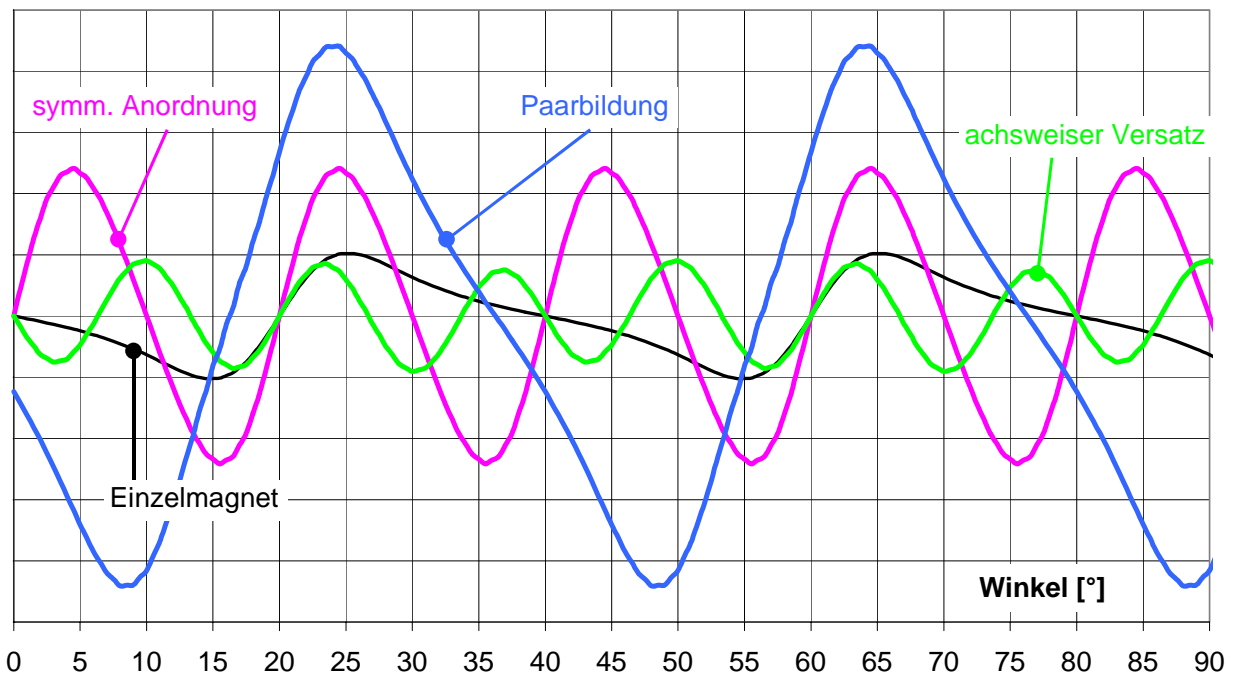


Bild 8: Rastmoment bei symmetrischer und asymmetrischer Anordnung der Magnete in einem 6-poligen Motor mit 9 Nuten

4. Schlussfolgerungen für das Maschinendesign

- Das Zusammenspiel von Magnetkante und Nutschlitz ist entscheidend.
- Je mehr Kanten (also Pole) um so größer wird das Rastmoment.
- Schlitzbreite und Luftspaltlänge bestimmen die Reluktanzunterschiede
- Magnetbreite hat Einfluss mit Faktor 0,25 ... 2.
- Mit dem Quadrat der Luftspaltinduktion steigt das Rastmoment.
- Luftspalterweiterungen an der Magnetkante senken $\frac{dB}{d\alpha}$.
- Symmetrische Anordnungen ($q \geq G$) haben höheres Rastmoment als $q = z_q/n_q$.
- Sie sind aber unempfindlich gegenüber von Toleranzen.
- Bruchlochwicklungen mit $q < 1$ reagieren sehr empfindlich auf Toleranzen.
- Die Schrägung ist bestes Mittel zur Rastmomentunterdrückung.
- Es muss um die Ordnungszahl der Rastmomentwelle geschrägt werden.

Die hier vorgestellte Betrachtungsweise der Entstehung des Nutrastmomentes erlaubt ein relativ einfaches Studium der geometrischen Toleranzeinflüsse. Der Konstrukteur sollte aber bedenken, dass es neben den Abmessungstoleranzen auch noch Fertigungsschwankungen der Remanenzinduktion und gegenüber dem Rechenmodell abweichende Orientierungsrichtungen im Magneten gibt. Man sollte sich nicht allein wegen des vermeintlich theoretisch auftretenden kleinsten Nutrastmomentes für sogenannte Einzelzahnwicklungen ($q < 1$) entscheiden. Die Empfindlichkeit asymmetrischer Anordnungen auf Toleranzen wurde deutlich herausgearbeitet. Bei symmetrischen Anordnungen bewirken die Toleranzen ein „Verschleifen“ und somit Absenken der Rastmomentamplituden.