Transiente Rotordynamik elektrischer Drehfeldmaschinen unter Berücksichtigung der vollen elektromagnetischen Kopplung

M.Sc. Felix Boy, Univ. Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hetzler
Institut für Mechanik, Fachgebiet Technische Dynamik, Universität Kassel

Kurzfassung

Höhere Drehzahlen, neue Anwendungen in elektrischen Fahrzeugen und der damit verbundene Leichtbau führen zu stärkeren Schwingungsphänomenen in elektrischen Drehfeldmaschinen. Besondere Bedeutung kommt dabei lateralen Rotorschwingungen zu, die sich akustisch bemerkbar machen und im Extremfall sogar zum Versagen des gesamten Systems führen können. In diesem Beitrag wird ein neuartiges Modell vorgestellt, welches rotordynamische Phänomene beliebiger Drehfeldmaschinen in transienten Fahrzuständen unter Berücksichtigung der vollen elektromagnetischen Kopplung abbilden kann. Im vorliegenden Beitrag wird eine FEM-Validierung des vorgeschlagenen Modells präsentiert. Danach wird ein Szenario vorgestellt, bei dem magnetisch angefachte Lateralschwingungen aufklingen.

Abstract

Higher Speeds, new applications in electric vehicles and the need for lightweight structures lead to increasing occurrence of vibration phenomena in rotating field electrical machines. Lateral rotor oscillations take a particular role in this context, as they produce noise and may cause the entire system to fail in an extreme case. In this contribution, a novel modelling approach is presented, which allows for the fully coupled simulation of transient rotordynamics in all kinds of rotating field machines. This paper includes a FEM-validation of the proposed model. After that a scenario where self-excited lateral oscillations occur is presented.

1 Einführung

Durch die zunehmende Anwendung elektrischer Drehfeldmaschinen in Fahrzeugen verlagern sich die Anforderungen an deren Leistungsdichte und Zuverlässigkeit deutlich. Durch hochausgenutzte Designs, zunehmende Leichtbau-Techniken und immer höhere Drehzahlen treten Schwingungsprobleme vermehrt in den Vordergrund. Einen wichtigen Aspekt in diesem The-

menbereich stellen laterale Schwingungen des Rotors dar. Ihnen kommt aus Sicht der Systemzuverlässigkeit eine besondere Rolle zu, da sie bei zu starker Ausprägung zum Versagen des kompletten Systems führen können. Gleichzeitig stellt ihre Berechnung und Analyse eine beachtliche Herausforderung dar, da sie von einer Vielzahl von Faktoren abhängen und ein stark transientes Verhalten an den Tag legen können. In diesem Beitrag wird ein neuartiges Model zur Beschreibung der Rotordynamik elektrischer Drehfeldmaschinen unter Berücksichtigung der vollen elektromagnetischen Kopplung vorgestellt. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen erlaubt es beliebige transiente Fahrzustände abzubilden, wobei die erforderliche Rechenzeit so gering wie möglich gehalten wird.

Die Beschreibung der elektromagnetischen Kopplung bei lateralem Versatz des Rotors ist seit langem ein vieldiskutiertes Thema. Anfängliche Modelle konzentrierten sich auf die analytische Berechnung des Luftspaltfelds unter Berücksichtigung einer gegebenen Exzentrizität des Rotors und die daraus resultierenden Kräfte, sowie die Modifikation der Induktivitäten bei stationärem Betrieb [1-3]. Schon in den 1980er Jahren wiesen Früchtenicht, Jordan und Seinsch [4] auf die Möglichkeit hin, dass magnetische Kräfte unter bestimmten Umständen die Rotorschwingung anfachen können. Ihre theoretischen Berechnungen wiesen sie experimentell nach. Neuere Veröffentlichungen basieren meist auf numerischen Verfahren, insbesondere auf der Finite Elemente Methode (FEM) (siehe z.B. [5]). Die Forschergruppe um Arkkio [6] leitete aus detaillierten Berechnungen und Messungen ein vereinfachtes Modell zur Analyse der Rotorschwingungen her. Die Autoren konnten zeigen, dass die Ursache dieser Schwingungen – die magnetischen Kräfte – extrem sensitiv sind und unter anderem stark vom Wicklungsdesign (parallele Zweige), der angelegten Last und des Sättigungszustands der Maschine abhängen.

Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass magnetisch hervorgerufene Rotorschwingungen ein komplexes dynamisches Problem darstellen und stark vom Maschinentyp und Betriebszustand abhängen. Ziel des hier präsentierten Forschungsvorhabens ist es deshalb ein allgemeingültiges Modell zur Beschreibung solcher Vorgänge herzuleiten, das sowohl die wesentlichen Aspekte zur Bestimmung der Magnetkräfte abdeckt, als auch beliebige transiente Fahrsituationen beschreiben kann. Im Folgenden wird dazu ein kurzer Überblick über das entwickelte Modell gegeben. Danach wird ein Vergleich zur Finiten Elemente Methode gezeigt und zu guter Letzt ein mögliches Szenario, in dem laterale Rotorschwingungen aufklingen, für das Beispiel einer

Asynchronmaschine beschrieben. Die detaillierte Herleitung, sowie weitere Ergebnisse finden sich in [7].

2 Modell

Zur Beschreibung magnetisch hervorgerufener Lateralschwingungen des Rotors einer elektrischen Drehfeldmaschine ist es nötig drei Teilprobleme zu lösen und miteinander zu koppeln (siehe Abb. 1).

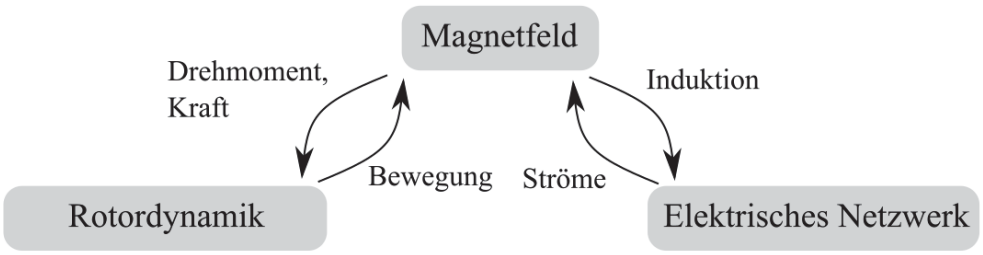

Abb. 1: Elektromechanisches Modell einer elektrischen Drehfeldmaschine. Schematisch dargestellt sind die drei zu lösenden Teilprobleme und deren Kopplung.

Zunächst muss der Rotor als mechanische schwingungsfähige Struktur abgebildet werden. Dazu wird im vorliegenden Modell davon ausgegangen, dass der Rotor aus einer masselosen elastischen Welle und einer zentrischen, starren Scheibe besteht, welche nicht verkippen kann (Lavalrotor). Diese Abstraktion erlaubt es Starrkörperbewegungen, oder die erste Biegemode des Rotors zu beschreiben. Der grundlegende Modellansatz ist nicht auf ein derart einfaches Rotormodell beschränkt und kann problemlos erweitert werden.

Die elektrischen Systemkomponenten werden durch ein Netzwerk abgebildet. So können neben den Phasenströmen in der Statorwicklung auch Ausgleichsströme in parallelen Wicklungszweigen und bspw. einzelne Stabströme in einem Käfigläufer berechnet werden. Als wesentliche Vereinfachungen wird von einer perfekt sinusförmigen Versorgungsspannung und der Vernachlässigung des Skin- und Proximityeffekts ausgegangen.

Das Magnetfeld wird durch einen neuartigen semi-analytischen Ansatz berechnet. Dabei wird zwischen dem Feld im Luftspalt und in den Stator- und Rotorblechen unterschieden. Das Luftspaltfeld wird hier durch eine so genannte asymptotische Näherung [8] approximiert und in jedem Zeitschritt über den FFT-Algorithmus in (räumlich) harmonische Anteile zerlegt. Der

Feldbereich in den Stator- und Rotorblechen wird durch Magnetisch Äquivalente Kreise (Ostović 1989), also wie auch die elektrischen Komponenten durch ein Netzwerkmodell abgebildet. Beide Feldbereiche werden über die magnetomotorische Kraft und den magnetischen Fluss am Luftspaltrand miteinander gekoppelt. Das resultierende Gleichungssystem (in Matrixschreibweise) hat dann die Form

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{F_{mech}}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) + \boldsymbol{F_{mag}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{i}), \\ \frac{\boldsymbol{d\lambda}}{\boldsymbol{dt}} &= \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t}) - \boldsymbol{Ri}, \\ \mathbf{0} &= \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{i}, \boldsymbol{x}), \end{aligned}$$

wobei $\boldsymbol{x}$ eine Spaltenmatrix ist, die sowohl den aktuellen Rotordrehwinkel, als auch die lateralen Verschiebungen in x und y-Richtung enthält. Drehmomente und Kräfte mechanischen Ursprungs werden in $\boldsymbol{F_{mech}}$ zusammengefasst, solche magnetischen Ursprungs in $\boldsymbol{F_{mag}}$. Die Matrix $\boldsymbol{\lambda}$ sammelt alle Flussverkettungen, $\boldsymbol{v}$ eingeprägte Spannungen und $\boldsymbol{i}$ die elektrischen Ströme. Die Matrizen $\mathbf{M}$ und $\boldsymbol{R}$ fassen die Massenträgheit und die elektrischen Widerstände zusammen. Die Spaltenmatrix $\boldsymbol{h}$ beschreibt ein komplizierteres nichtlineares Gleichungssystem für das magnetische Netzwerk.

Das Modell wurde in MATLAB implementiert und wird durch ein Adams-Bashforth-Moulton Verfahren variabler Ordnung, sowie einem iterativen Newton Verfahren für die (nichtlinearen) Magnetfeldgleichungen gelöst.

3 Validierung

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich zwischen dem vorgeschlagenen Modell und FEM Rechnungen (mittels COMSOL Multiphysics®). In Abb. 2 a) ist die radiale Komponente der magnetischen Flussdichte B_r als Funktion der elektrischen Umfangskoordinate φ im Zentrum des Luftspalts einer 4-poligen Käfigläufer Asynchronmaschine dargestellt. Abb. 2 b) zeigt das Drehmoment M_{mag} und Abb. 2 c) die magnetischen Kräfte F_{mag} für eine Rotorumdrehung (Rotationswinkel ϕ). Wie aus dem visuellen Vergleich hervorgeht, stimmen das Magnetfeld, das Drehmoment und die magnetischen Kräfte gut überein. Ein genauer Vergleich ergibt einen Erwartungswert von -0.44 % und eine Standardabweichung von 8.09 % für den relativen Fehler

in der Flussdichte (bezogen auf den RMS-Wert der FEM Rechnung). Der relative Fehler im Drehmoment und den Kräften (bezogen auf den RMS-Wert der FEM Rechnung) zeigen einen Erwartungswert von -0.29 % bzw. 1.62 %. Die Standardabweichung liegt bei 2.27 % und 2.74 %.

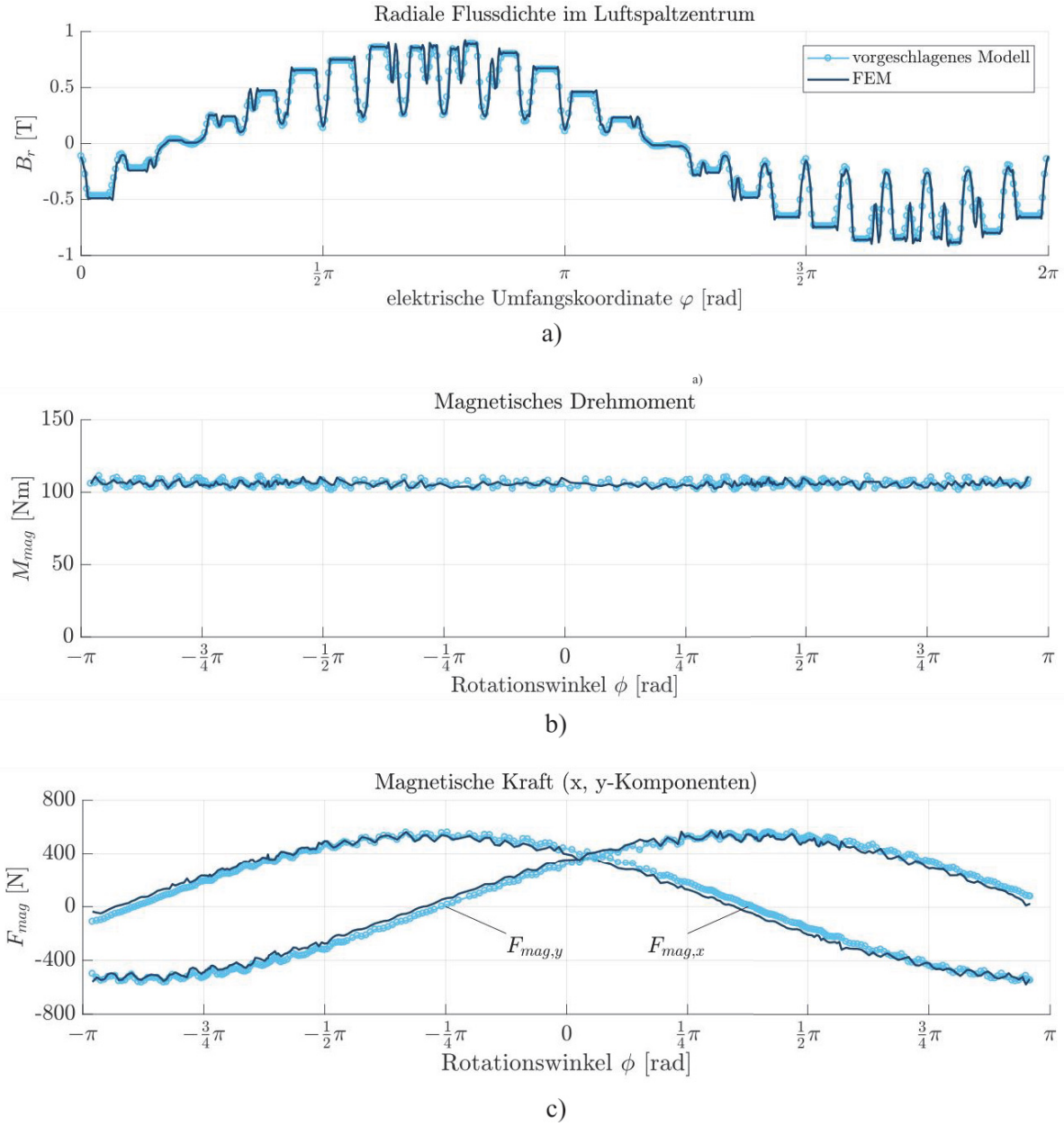

Abb. 2: Validierung des vorgeschlagenen Modells mittels FEM-Rechnungen. a) Radiale Komponente der magnetischen Flussdichte im Zentrum des Luftspalts. b) Magnetisches Drehmoment für eine Rotorumdrehung, c) Magnetische Kräfte für eine Rotorumdrehung.

4 Ergebnisse

Als beispielhaftes Ergebnis soll folgendes Szenario betrachtet werden: Ausgegangen wird wie zuvor von einer 4-poligen 30kW Käfigläufer-Asynchronmaschine. Die kritische Drehzahl für die laterale Biegung des Rotors falle vergleichsweise niedrig aus und liege bei ca. 16000 U/min. Durch diese Parameterkonfiguration lässt sich der auftretende Effekt gut erkennen. Verglichen wird der stationäre Betrieb der Maschine einmal bei 14600 und bei 14900 U/min. Abbildung 3 zeigt jeweils den zeitlichen Verlauf eines Phasenstroms der Statorwicklung, der magnetischen Kräfte, sowie die auf den nominellen Luftspalt δ_0 bezogene radiale Rotorauslenkung $\varrho = \frac{\delta}{\delta_0}$ (sie ist null bei zentrischem Rotor und eins bei Rotor-Stator Kontakt).

Obwohl sich die Betriebspunkte von der Drehzahl her nur wenig unterscheiden, ergibt sich ein völlig anderes dynamisches Verhalten: während sich bei der niedrigeren Drehzahl eine konstante Rotorauslenkung und damit ein kreisförmiger Rotororbit einstellt, tritt im zweiten Fall eine selbsterregte Schwingung auf. Dabei weicht die laterale Bahn der Rotorbewegung zunehmend von der Kreisform ab. Wie aus dem dargestellten Phasenstrom zu erkennen ist, handelt es sich um ein elektromechanisches Phänomen, dass nur beschrieben werden kann, wenn sowohl die Wirkung der magnetischen Kräfte auf die Rotorbewegung, als auch die Rückwirkung der Bewegung auf die elektrischen Ströme berücksichtigt werden: Erst die Interaktion zwischen Strom, Kraft und Bewegung führen zum Aufklingen der Schwingung. Diese Art Dynamik stellt einen kritischen Fall dar, da der Rotor letztendlich in Kontakt mit dem Stator tritt und die Maschine bei einer solchen Drehzahl wohl zerstört würde.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde ein neuartiges Modell zur Beschreibung der Rotordynamik elektrischer Drehfeldmaschinen unter Berücksichtigung der vollen elektromagnetischen Kopplung vorgestellt. Im Vergleich zu ähnlichen Modellen erlaubt es beliebige transiente Betriebszustände zu beschreiben, wobei die erforderliche Rechenzeit möglichst gering gehalten wurde. Das Modell wurde mit FEM-Berechnungen verglichen. Sowohl die magnetische Flussdichte im Luftspalt, als auch das Drehmoment und die lateralen magnetischen Kräfte stimmten gut überein.

Als beispielhaftes Ergebnis wurden selbsterregte Schwingungen in einer 4-poligen 30kW Käfigläufer Asynchronmaschine analysiert. Dazu wurde der stationäre Betrieb bei 14600 und

14900 U/min verglichen. Während sich im ersten Fall eine erwartete Lösung mit kreisförmigem Rotororbit und stationären Strömen einstellte, trat bei der leicht höheren Drehzahl eine aufklingende Schwingung im Strom, den Kräften und der Rotorauslenkung auf. Dieses Szenario zeigt die potentielle Gefahr solcher Schwingungen: im Extremfall können führen sie zum Rotor-Stator Kontakt und damit zur Zerstörung des Systems.

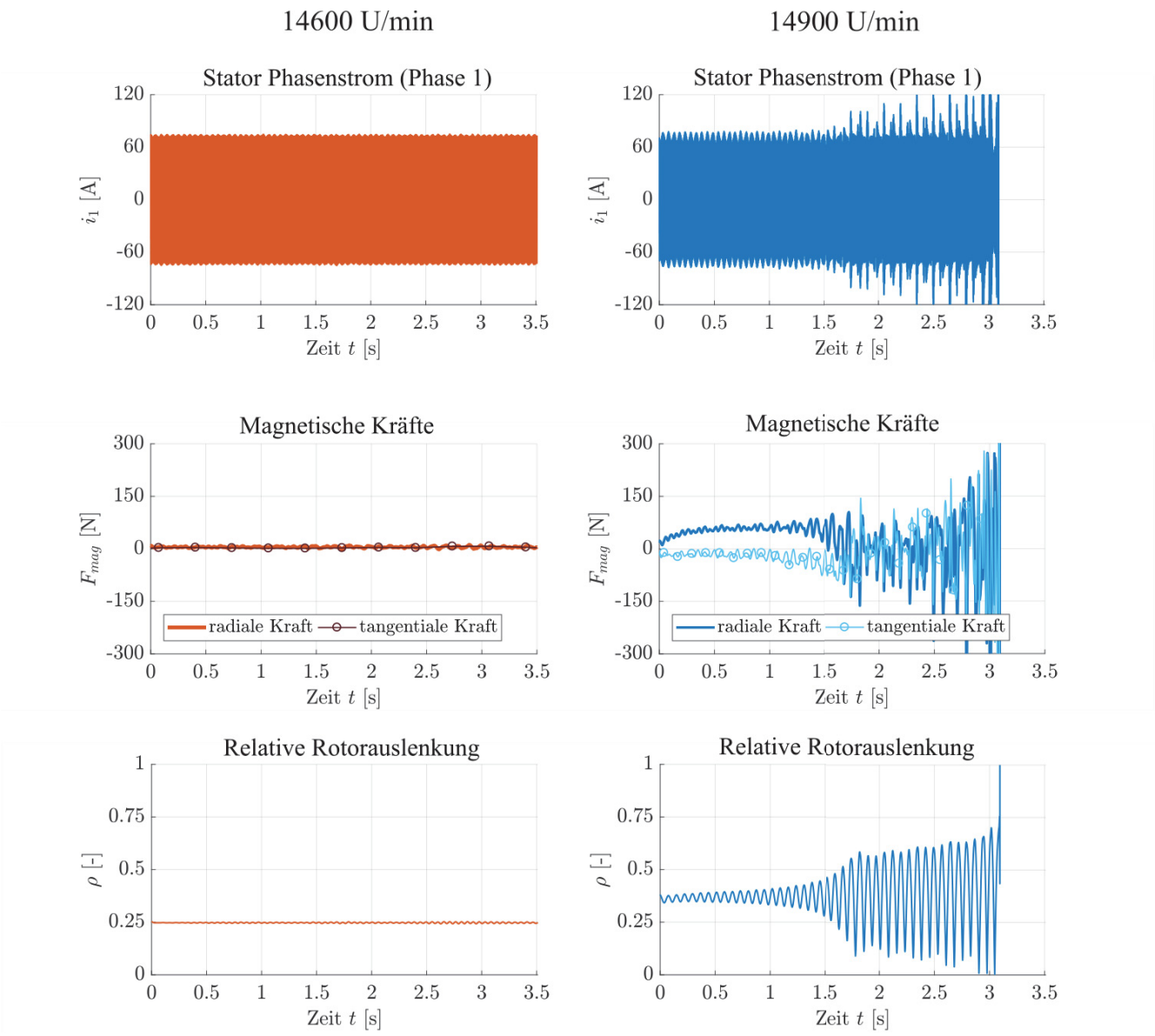

Abb. 3: Beispielhaftes Szenario für eine 4-polige Käfigläufer Asynchronmaschine. Dargestellt sind ein Stator Phasenstrom, die magnetischen Kräfte, sowie die auf den nominellen Luftspalt bezogene radiale Rotorauslenkung.

6 Literatur

[1] Freise, W.; Joran, H.: Einseitige Magnetische Zugkräfte in Drehstrommaschinen. In: Elektrotechnische Zeitung A. Bd. 83, 1962, S. 299-303.

[2] Dorrell, D. G.: Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Machines. Diss. University of Cambridge. Cambridge, 1993.

[3] Toliyat, H. A.; Arefeen, M. S; Parlos, A. G.: A Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines. In: IEEE Transactions on Industry Applications. Bd. 32, 1996, S. 910-918.

[4] Früchtenicht, I. J.; Jordan, H.; Seinsch, H. O.: Exzentrizitätsfelder als Ursache von Laufinstabilitäten bei Asynchronmaschinen. In: Archiv für Elektrotechnik. Bd. 65, 1982, S. 271.281.

[5] Bianchi, N.: Electrical machine analysis using finite elements. CRC Press, Boca Raton, 2005.

[6] Arkkio, A.; Antila, M.; Pokki, K.; Simon, A.; Lantto, E.: Electromagnetic Force on a Whirling Cage Rotor. In: IEE Proceedings-Electric Power Applications. Bd. 147, Nr. 5, 2000, S. 353-360.

[7] Boy, F.: Electromechanical Rotordynamics of Saturated Rotating Field Electrical Machines. Diss. Universität Kassel, Kassel, 2019 (noch nicht veröffentlicht).

[8] Boy, F.; Hetzler, H.: An Asymptotic Approximation of the Magnetic Field and Forces in electrical machines with rotor eccentricity. In: Electrical Engineering, Bd.100, Nr. 2, 2018, S. 389-399.