

# Auswirkung von fertigungsbedingten Exzentrizitäten in elektrischen Maschinen auf akustische und elektrische Größen

---

Thomas Windisch, Sonja Wolf, Matthias Pohl, Martin Burkhardt

<http://dx.doi.org/10.25673/103517>

## Kurzfassung

Fertigungsbedingte Exzentrizitäten in elektrischen Maschinen wirken sich nachteilig auf die Produktqualität des E-Antriebs aus, insbesondere auf Geräuschentwicklung, Performance und Lebensdauer. Das gilt sowohl für kleinere BLDC Hilfsantriebe und Nebenaggregate am 12 V Bordnetz, wie auch für den Hauptfahrantrieb am Hochvoltnetz in Elektrofahrzeugen.

Man ist bestrebt, im Rahmen von End-of-Line-Tests herkömmliche Prüfprozeduren abzulösen, die sich ausschließlich auf vibro-akustische Parameter stützen, denn diese verlangen aufwendige und störungsfreie Prüfumgebungen. Elektrische Größen hingegen sind als Indikatoren robust, sie sind unabhängig vom Prüfumfeld, und werden im Rahmen der Leistungsprüfung häufig ohnehin ermittelt.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Auswirkungen einer stufenlos einstellbaren, statischen Rotorexzentrizität an einem 2-poligen 3-Phasen-Demonstrator-Motor (BLDC-Motor) mittels elektrischer Größen fassbar zu machen und mit den herkömmlichen vibroakustischen Methoden abzugleichen.

Zunächst wurden zur theoretischen Betrachtung eine Systemsimulation aus Regelmotormodell, Stromrichtermodell und elektromagnetischem Finite-Elemente-Modell des BLDC-Motors in Dreieckschaltung aufgebaut und die theoretische Auswirkung einer statischen Rotorexzentrizität auf die Messgrößen Strom und Spannung bestimmt. Dieser Ansatz weicht wesentlich vom Stand der Technik ab, in dem mit idealisierten Strömen gerechnet wird.

Der experimentelle Abgleich erfolgte an einem eigens ausgelegten und gefertigten Motorprüfling. Neben den drei Phasenströmen und dem Rotorwinkel wurden auch Beschleunigung, Schalldruck und Drehzahl erfasst. Als Analysen wurden zunächst Clarke- und Park-Transformation der Phasenströme herangezogen. Anschließend wurden arbeitsspielbezogene Orbit-Plots sowie Ordnungsspektren von akustischen und elektrischen Größen ausgewertet. Am Beispielmotor konnte theoretisch und experimentell ermittelt werden, wie sich eine statische Exzentrizität auf die entstehenden Signale des Zuleiter- und Phasenstroms auswirkt und wie diese mit Blick auf einen EOL-Test messtechnisch bestimmt werden muss.

# 1. Einleitung

Vibroakustische Auswirkungen von fertigungsbedingten Exzentrizitäten in elektrischen Maschinen lassen sich mit klassischer NVH-Sensorik in störungsfreien Prüfumgebungen detektieren. Aus ökonomischer Sicht ist es jedoch wünschenswert, nichtinvasiv und prüffeldunabhängig vorzugehen. Die Idee ist deshalb nicht neu, einen Zusammenhang von elektrischen Größen und Exzentrizität zu betrachten. Elektrische Größen sind als Indikatoren robust und unabhängig vom Prüfumfeld.

Speziell bei End-of-Line-Tests (EoL) könnten aufwendige herkömmliche Prüfprozeduren durch eine geeignete Auswertung elektrischer Größen (transformierte Ströme oder Leistungen) vereinfacht oder sogar abgelöst werden.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Auswirkungen einer stufenlos einstellbaren, statischen Rotorexzentrizität an einem 2-poligen 3-Phasen-Demonstrator-Motor (BLDC-Motor) mittels elektrischer Größen fassbar zu machen und mit den herkömmlichen vibroakustischen Methoden abzugleichen.

Bürstenlose Gleichstrommaschinen (auch Brushless-DC oder EC-Motoren genannt) werden bevorzugt in Anwendungen mit kleinerer Leistung und geringer Spannung eingesetzt. Sie zeichnen sich durch einen robusten und kostengünstigen Aufbau aus, benötigen jedoch eine elektronische Steuerung über einen Wechselrichter. Dieser ruft je nach verwendetem Pulsverfahren ebenfalls Stromharmonische hervor, die in einem umfassenden Systemansatz mit untersucht werden können. Zur experimentellen Verifikation kann ein Prüfaufbau verwendet werden, in dem eine Rotorexzentrizität durch eine mechanische Verstellung bewusst hervorgerufen wird. In dieser Arbeit wird simulativ und experimentell nachgewiesen, dass eine statische Exzentrizität zu einer Erhöhung spezifischer Stromharmonischer führt, die zur Detektion herangezogen werden können.

## 2. Rotorexzentrizitäten

Bei rotierenden Systemen wie elektrischen Drehfeldmaschinen mit radialer Flussrichtung nehmen Rotorexzentrizitäten Einfluss auf die Rotordynamik und demzufolge auch auf das elektromagnetische sowie das akustische Verhalten. Dabei ist zu unterscheiden zwischen statischer und dynamischer Exzentrizität, siehe Bild 1, denn die magnetischen Kräfte zwischen Rotor und Stator sind stark abhängig von der Luftspaltlänge [1]. In der Praxis können ebenso Kombinationen (gemischte Exzentrizitäten) auftreten.

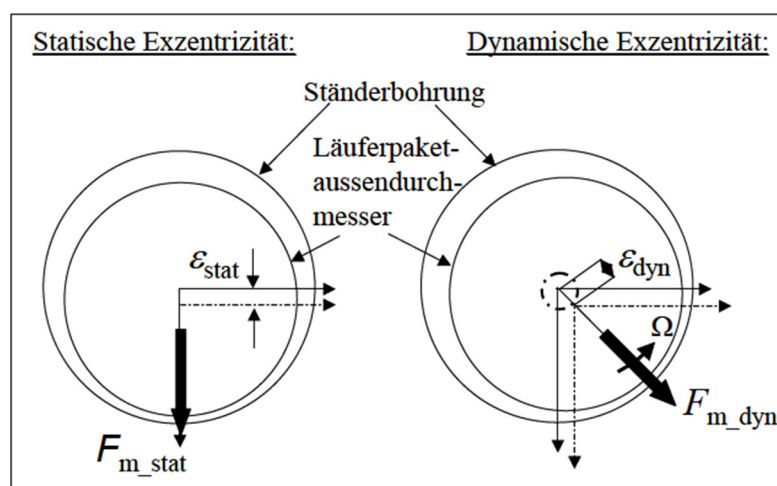


Bild 1: Zur Definition von statischer und dynamischer Exzentrizität [1]

## 2.1 Dynamische Exzentrizität

Bei einer dynamischen Exzentrizität laufen der kleinste Luftspalt und somit auch die magnetische Kraft mit Rotorfrequenz um. Das führt zu einer zusätzlichen Kraftanregung in radialer Richtung. Dynamische Exzentrizitäten haben mehrere Ursachen, die überlagert sind und in Summe eine elastische Auslenkung der Welle und somit eine dynamische Auflagerreaktionskraft zur Folge haben: Rotorverkrümmung (Wellenschlag, bspw. aus thermischem Verzug oder zu hoher Last) und Massenexzentrizität (Unwucht bspw. aus Materialinhomogenitäten, unsymmetrischer Magnetanordnung bzw. Achsversatz von Läuferpaketinnen- und außendurchmesser) bewirken eine fliehkraftbedingte Auslenkung. Radial-magnetische Feldexzentrizität (unsymmetrisches Drehfeld bspw. aus Wicklungsunsymmetrie, unsymmetrischer Bestromung/Induktion) verstärkt den radial-magnetischen Zug bzw. Druck [1].

Durch die Motorgeometrie ohnehin bedingte Rotorschwingungen werden so verstärkt, und in deren Folge auch die Luftspalt-Oberfelder. Diese bewirken wiederum eine Spannungsinduktion in die Ständerwicklungen, und rufen dadurch zusätzliche Stromüberschwingungen hervor.

## 2.2 Statische Exzentrizität

Aus einer statischen Exzentrizität resultiert eine zusätzliche statische Kraftanregung, die an der Stelle des kleinsten Luftspaltes am größten ist. Statische Exzentrizität entsteht aufgrund von statischem Durchhang des horizontal gelagerten Rotors und/oder Koaxialitätsabweichungen der Zentrierungen (Lagergehäuse, Lagerschild, Ständergehäuse). Sie hat eine, verstärkte radial-magnetische Zug-/Druckkraft in Richtung Exzentrizität zur Folge [1].

Die zusätzliche Kraftanregung wird in den Auflagerpunkt und ein evtl. angeschlossenes Untersetzungsgetriebe eingeleitet und führt u.a. zu vibroakustischen Auffälligkeiten.

Dynamische Exzentrizitäten finden in der Literatur bereits vielfach Beachtung. In der vorliegenden Arbeit soll der Fokus auf der statischen Exzentrizität liegen.

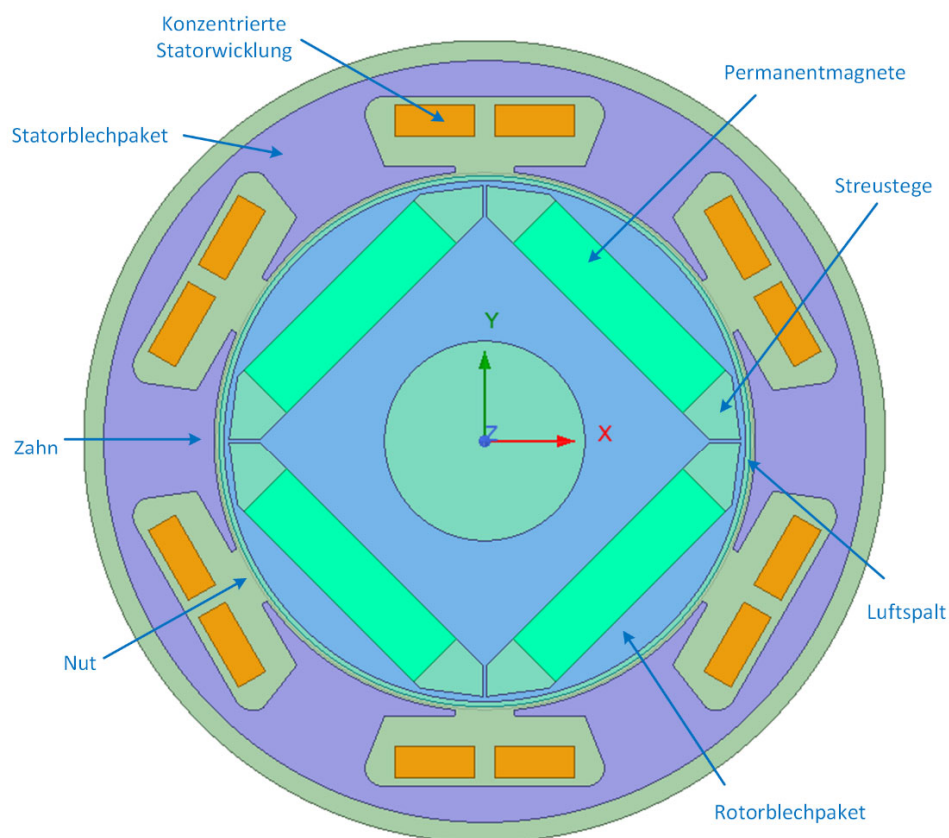
Die qualitative Auswertung von überschwingungsbehafteten Clarke- und Park-transformierten Strömen für End-of-Line-Testing oder Zustandsüberwachungen elektrischer Maschinen anstelle der Analyse von NVH-Größen wird hier als alternativer Ansatz untersucht.

### 3. Systemsimulation von Maschine, Wechselrichter und Regelung

Um zunächst die theoretisch zu erwartenden Auswirkungen einer statischen Exzentrizität zu berechnen, wurde ein Simulationsmodell aufgebaut. Da man in der Praxis bestrebt ist, die in den Statorströmen der Maschine enthaltenen Oberschwingungen zu bewerten, musste es ein spannungseingprägtes Modell sein. Um auch den Einfluss des Umrichters und der Steuerung abzudecken, wurde ein Co-Simulationsansatz gewählt [2]. Ein Vorteil des Modells liegt in der großen Variabilität, denn die Analysen können recht einfach mit unterschiedlichen Modulationsverfahren oder Pulsfrequenzen wiederholt werden.

#### 3.1 Modellaufbau

Der BLDC-Motor wurde in Ansys® Maxwell modelliert. Leider reicht zur Berechnung ein Polausschnitt nicht aus, da sich eine statische Exzentrizität als Verschiebung des gesamten Rotors bemerkbar macht.

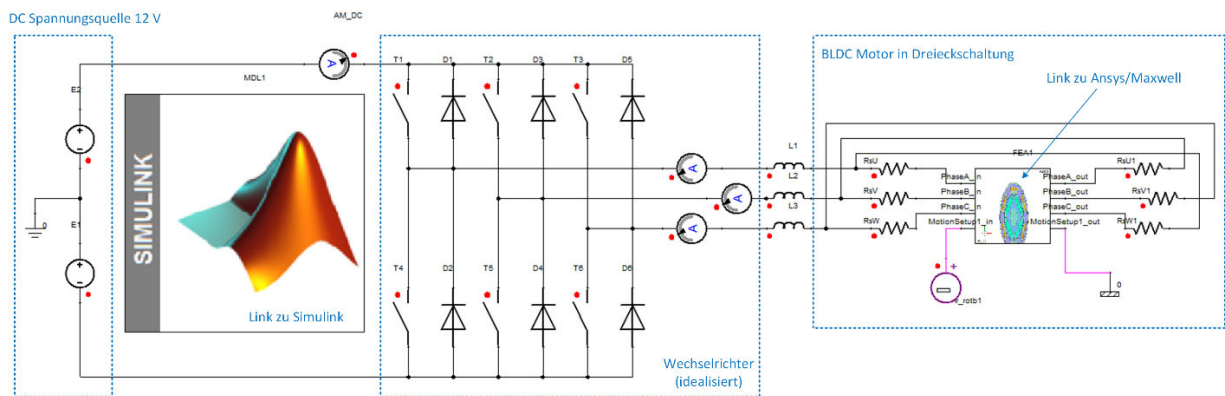


**Bild 2:** Aufbau des 2D-Finite-Elemente-Modells des BLDC-Motors (Ansys® Maxwell)

Bild 2 zeigt das Vollmodell und seine Komponenten. Die konzentrierte Statorwicklung könnte nun in einem klassischen Ansatz mit einem beliebigen Statorstrom versorgt werden. Dabei würde man aber den realen Aufbau, der u.a. eine Dreieckschaltung der Wicklung bedingt, vereinfachen. Realitätsnäher ist ein spannungsgeführter Simulationsansatz, in dem die Maschinenanschlüsse mit korrekter Verschaltung nach außen

geführt und mit Spannung von einem Wechselrichter versorgt werden. Auch der Einfluss der nicht-sinusförmigen Gegenspannung vom Rotor (Back-EMF) wird somit beachtet.

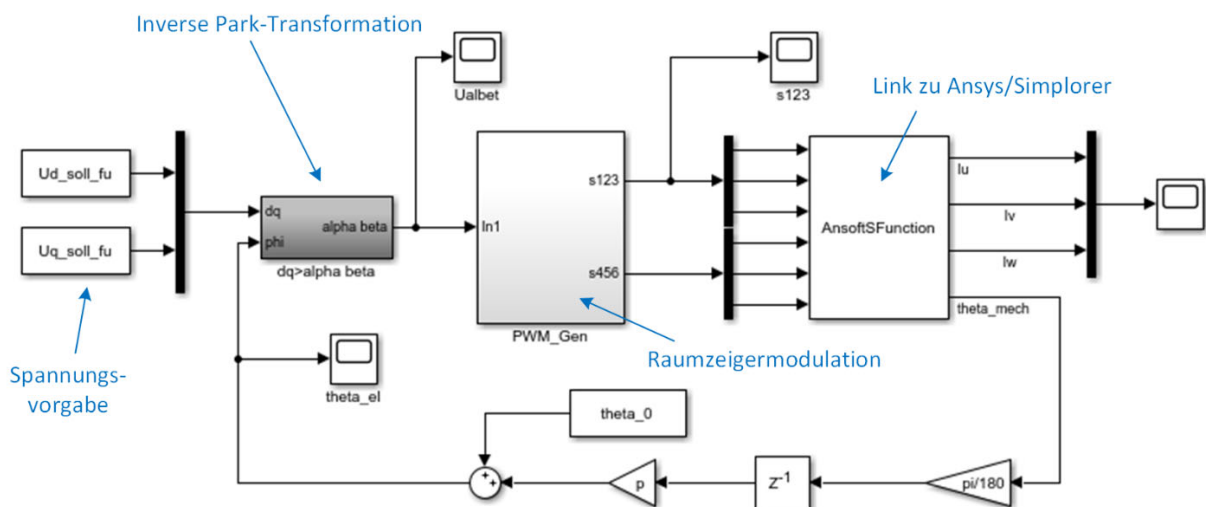
Die Kopplung des FE-Modells zur Schaltungssimulation geschieht via transienten Link zu Ansys® Simplorer, siehe Bild 3. Dabei wird der Rotor der Maschine im FE-Modell mit jedem Zeitschritt einen kleinen Winkelschritt gedreht. Alle sechs Anschlusspunkte der dreiphasigen Statorwicklung sind nach außen geführt und zu einem Dreieck verschaltet. Der Wechselrichter selbst ist als B6-Brücke mit idealen Schaltern und antiparallelen Dioden modelliert. Die idealen Schalter bilden die Transistoren (z.B. MOSFETs) ab, die in einer realen Ansteuerelektronik vorhanden sind.



**Bild 3:** Aufbau der Schaltungssimulation für den BLDC-Motor (Ansys® Simplorer)

Jeder Transistor bekommt ein Gate-Signal vom Modulationsverfahren der Steuerung. Dieser Aufbau ist völlig universell und könnte auch bei einem HV-Antrieb mit IGBT oder SiC-Umrichter in einem Elektrofahrzeug zum Einsatz kommen, wobei die Eingangsgleichspannung statt hier 12 V dann eben 400 oder 800 V wäre.

Bild 4 zeigt die Steuerung des BLDC-Motors per Spannungsvorgabe. Die PWM-Ansteuersignale des Wechselrichters werden per Raumzeigermodulation ermittelt und an die Schaltungssimulation gegeben. Diese ermittelt die Ströme im Zuleiter am

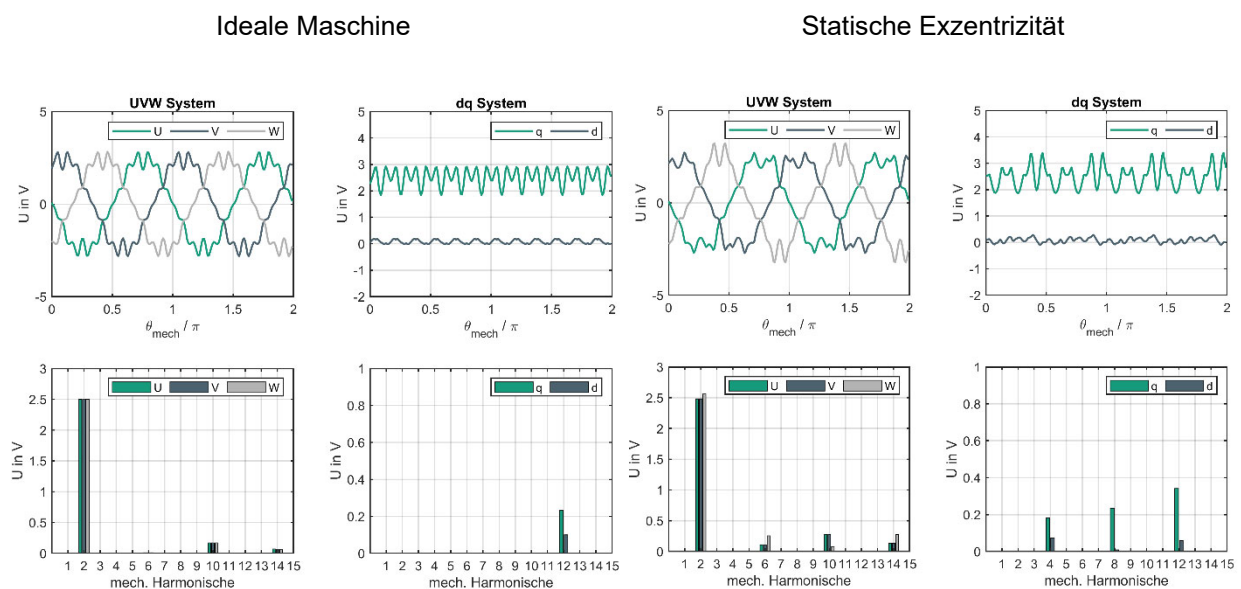


**Bild 4:** Steuerung des BLDC-Motors (Matlab® Simulink)

Ausgang des Wechselrichters, die zur Bewertung herangezogen werden. Die vorgegebenen Spannungen müssen zur aktuellen Drehzahl und den gewünschten Strömen passen, um unnötig lange Rechenzeiten durch ein transientes Einschwingen des Stroms zu vermeiden. Aus diesem Grund werden sie mittels Zeigerbild der Maschine vorherberechnet.

### 3.2 Simulationsresultate

Zur Bewertung welche Ordnungen in der Back-EMF der Maschine im Falle einer Exzentrizität zusätzlich auftreten, reicht eine Spannungsmessung im Leerlauf der Maschine aus. Dazu wird der Rotor des Elektromagnetikmodells gedreht und die induzierte Spannung über eine mechanische Umdrehung ausgewertet.



**Bild 5:** Resultat der simulierten induzierten Gegenspannung (Back-EMF) bei der idealen Maschine und bei statischer Exzentrizität

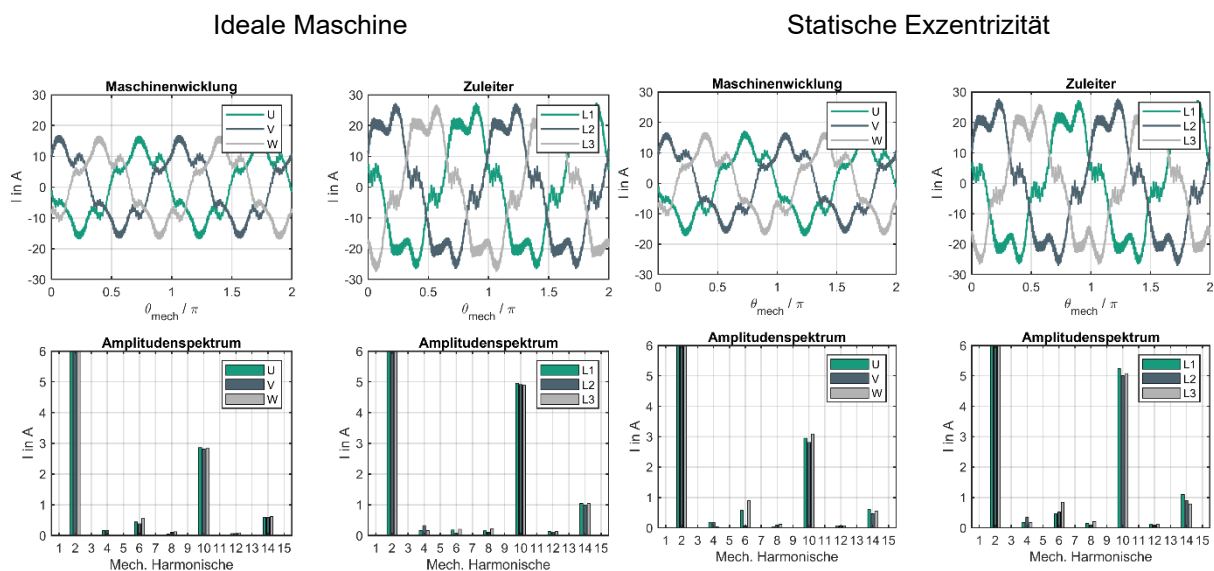
Bild 5 zeigt das Resultat im Vergleich zwischen idealer und exzentrischer Maschine mit 90% veränderter Luftspaltweite. Im statorfesten System unterscheiden sich die Spannungen der drei Phasen je nach Ausrichtung des Rotors. Es entsteht eine zusätzliche 6. Harmonische bezogen auf eine mechanische Umdrehung. In rotorfesten dq-Koordinaten entspricht das einer mechanischen 4. und 8. Harmonischen, deren Amplitude vor allem in der q-Komponente erhöht ist. Diese niederfrequenten Harmonischen in der induzierten Spannung werden auch bei aktivem Betrieb des Motors Stromharmonische hervorrufen, die entsprechend im Strommesssignal nachweisbar sind.

Im Folgenden wurde daher die Systemsimulation genutzt, um einen fiktiven Lastfall ( $I_{d,soll} = 0, I_{q,soll} = 12 \text{ A}$ ) der Maschine mit und ohne Exzentrizitätseinfluss zu simulieren. Die Auswertung soll zeigen, ob ein Unterschied im Amplitudenspektrum der messbaren Ströme vorliegt. Dabei muss man bedingt durch die Dreieckschaltung zwischen den Phasenströmen, die durch die Wicklung fließen, und den Strömen im Zuleiter, die am Ausgang des Wechselrichters gemessen werden können, unterscheiden. Es



wurde eine Pulsfrequenz von  $f_p = 20 \text{ kHz}$  und eine Drehzahl des Motors von  $n_{mech} = 12.000 \text{ min}^{-1}$  gewählt. Das Auftreten von Stromharmonischen wird jedoch auch vom gewählten Modulationsverfahren beeinflusst, weshalb die Ergebnisse für Raumzeiger- und Blockmodulation gezeigt werden.

Bild 6 zeigt das Simulationsresultat für die dreiphasigen Ströme in Zuleiter und Wicklung für beide Fälle. Laut Theorie sind bei der idealen Maschine die Amplituden der Grundschiwingung in den Zuleitern um  $\sqrt{3}$  höher, und es existiert eine Phasenverschiebung zwischen Zuleiter und Strang um  $30^\circ$ . In den Strangströmen tritt eine elektrische 3. Harmonische auf (6. mechanische), die nicht in den Zuleitern zu finden ist; auch das entspricht der Theorie eines dreiphasigen Systems. Im rechten Teil der Abbildung ist zum Vergleich der Fall der Maschine mit statischer Exzentrizität zu sehen. Die 6. Harmonische ist verändert und nun auch im Zuleiter zu erkennen. Jedoch ist diese Betrachtung im statorfesten Koordinatensystem nicht zielführend, da der genaue Ort der Rotorverschiebung gegenüber der Wicklung einen Einfluss ausübt.

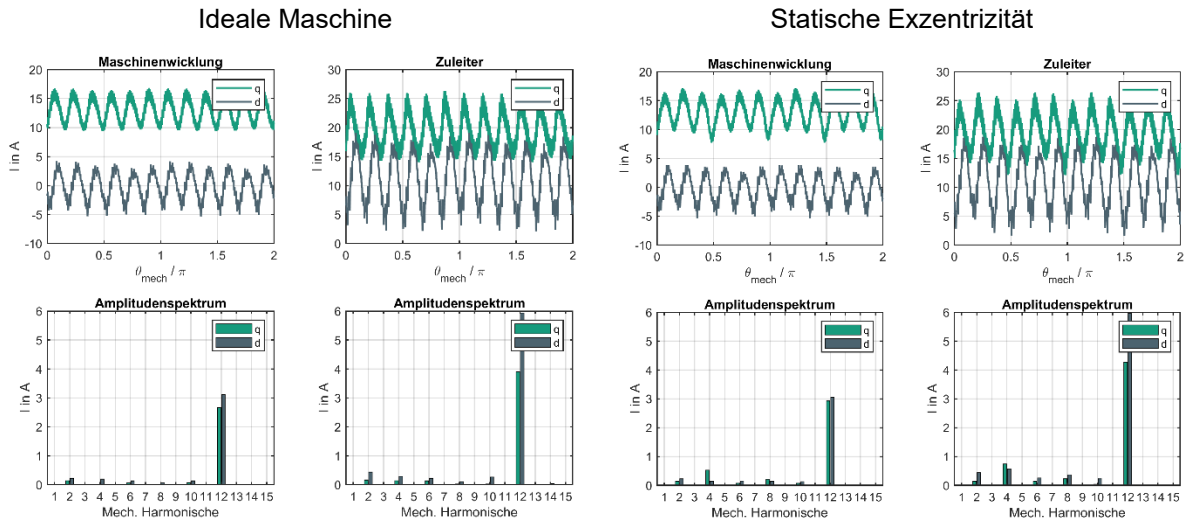


**Bild 6:** Resultat der Systemsimulation mit Raumzeigermodulation bei der idealen Maschine und bei statischer Exzentrizität im statorfesten Koordinatensystem

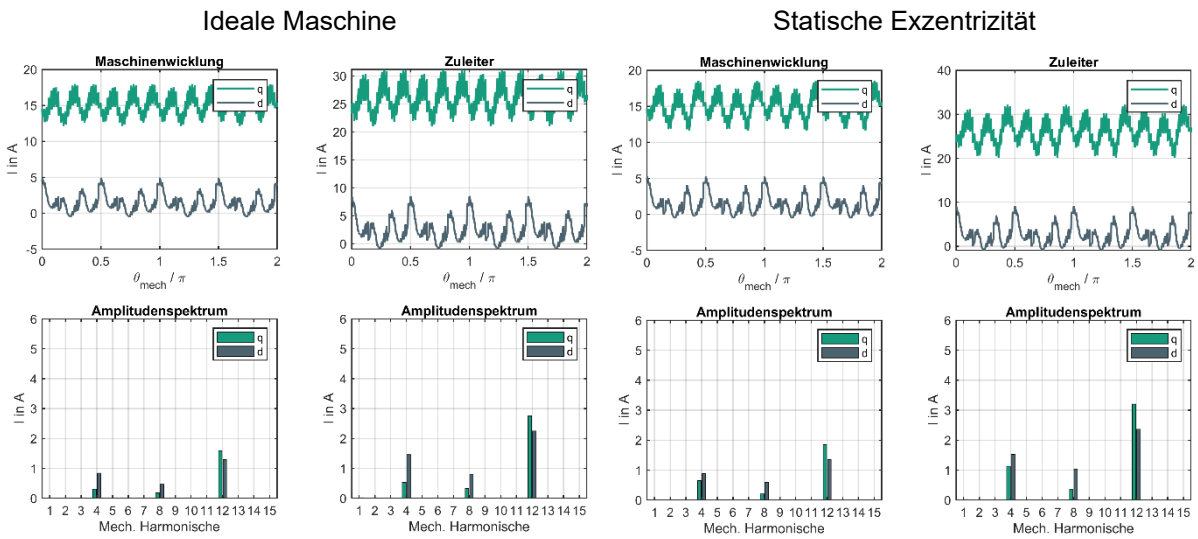
Bild 7 zeigt das Simulationsresultat für beide Fälle, wenn die Ströme per Park-Transformation ins rotorfeste Koordinatensystem transformiert werden. Dabei fällt auf, dass im Falle der exzentrischen Maschine zusätzliche 4. und 8. mechanische Harmonische entstehen, die vor allem in den Zuleiterströmen messbar sind.

In BLDC-Antrieben mit kleinerer Leistung wird jedoch aus Kostengründen in der Elektronik oft keine echte Raumzeigermodulation umgesetzt, sondern die einfachere Blockmodulation gewählt. Dies kann unter Umständen auch einen Einfluss auf die Oberschwingungen der Ströme und damit auf die Messbarkeit der Exzentrizität in den Statorströmen haben. Deshalb wurde auch dieser Fall per Systemsimulation untersucht und im Amplitudenspektrum ausgewertet.

Bild 8 zeigt das Resultat. Geradzahlige Harmonische sind bereits bei der idealen Maschine vorhanden. 4. und 8. mechanische Harmonische sind jedoch auch hier bei statischer Exzentrizität vor allem in den Zuleitergrößen leicht erhöht.



**Bild 7:** Resultat der Systemsimulation mit Raumveigermodulation bei der idealen Maschine und bei statischer Exzentrizität im rotorfesten Koordinatensystem



**Bild 8:** Resultat der Systemsimulation mit Blockmodulation bei der idealen Maschine und bei statischer Exzentrizität im rotorfesten Koordinatensystem

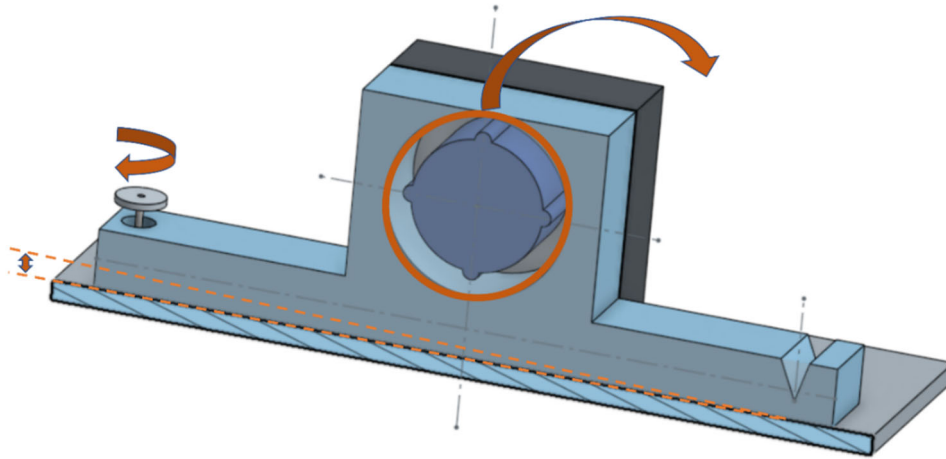


## 4. Experimentelle Ergebnisse am Versuchsmotor

Mit einer eigens konstruierten Versuchsvorrichtung werden im Folgenden die Simulationsergebnisse mit der realen Messung verifiziert. Vorrangig ist dabei die Frage nach der Sensitivität der Ströme als Indikatoren für eine eventuell vorhandene Rotorexzentrität. Beschleunigungen auf Stator und Rotor wurden als klassische Indikatorgrößen mit erfasst und dienen zum Vergleich mit den elektrischen Messungen. Ebenfalls können Analysen aus der NVH-Praxis mit den Simulationsergebnissen abgeglichen werden.

### 4.1 Prüfbjekt

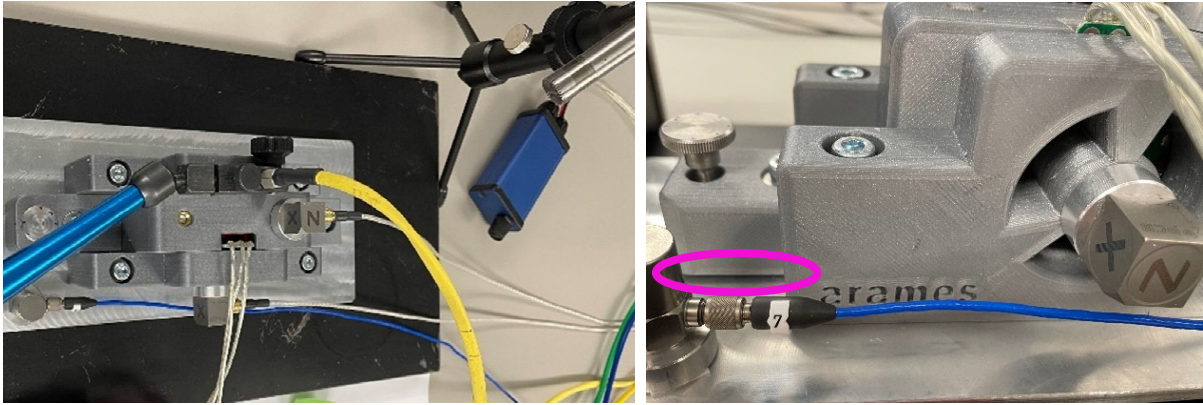
Als Prüfbjekt dient ein 4-poliger BLCD-Versuchsmotor, der in eine von der Firma Arames speziell angefertigte Prüfvorrichtung integriert ist (Bild 9).



**Bild 9:** Prinzipskizze der Prüfvorrichtung: Über eine Einkerbung mittels Rändelschraube verkippbare Statorachse

Der Rotor hat über zwei Auflagerböcke eine feste Verbindung mit einer Bodenplatte. Der Stator kann über eine Rändelschraube stufenlos gegen den Rotor verkippt werden. In der Elektronik ist ein Ansteuerungsverfahren für die Bestromung des BLDC-Motors in Dreieckschaltung hinterlegt, was die Transistoren der Leistungsendstufe per Blockmodulation ansteuert.

Auf Rotor und Stator ist je ein triaxialer ICP-Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Weiterhin ist ein ICP-Messmikrofon über dem Motor positioniert (Bild 10). Ein optischer Drehzahlsensor detektiert eine markierte Schaufel des mitrotierenden Lüfterrades. Strom und Spannung werden direkt an einen Poweranalyzer angeschlossen.

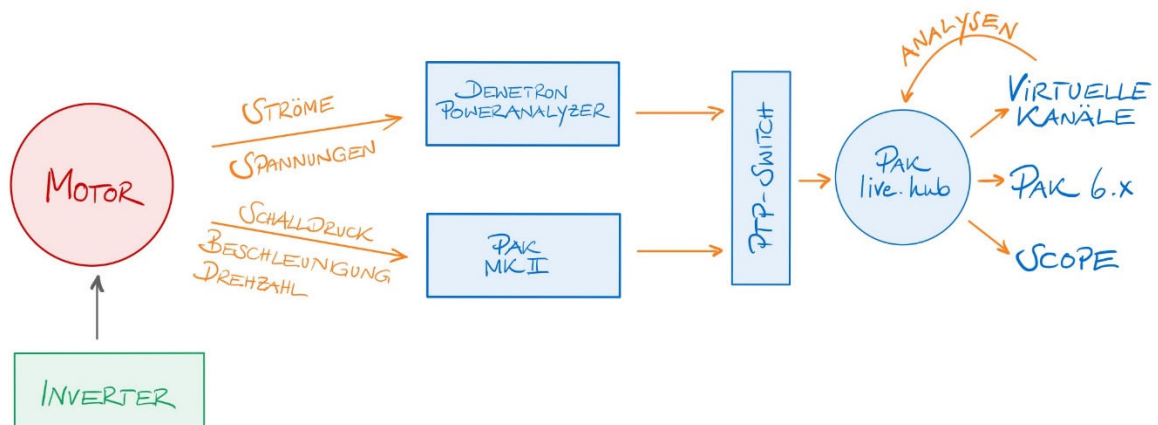


**Bild 10:** (links) Beschleunigungsaufnehmer auf Stator und Rotor, Messmikrofon, Drehzahlsensor, Strom- und Spannungsabgriff, (rechts) Anordnung mit maximaler Statorverkipfung

## 4.2 Datenerhebung

Für eine ganzheitliche Betrachtung, welche elektrische und vibroakustische Größen vereint, wurden die Daten messgeräteübergreifend zeitsynchron erfasst (Bild 11). Hierbei wurden ein PAK-MKII und ein Dewetron Poweranalyzer (PA8) über einen PTP-Switch (PTP V2 1588) synchronisiert.

Das Mecalc-MKII erfasste die Beschleunigungen der triaxialen ICP-Aufnehmer und den Schalldruck des ICP-Elektretmikrofons mit einer Abtastrate von 51,2 kHz. Die Drehzahlen wurden mit dem optischem Pulsgeber über eine Reflektormarke auf 12 ns genau bestimmt.



**Bild 11:** Messgeräteübergreifende zeitsynchrone Messdatenerfassung via PTP-Switch sowie Datenverfügbarkeit via PAKliv.hub-Datenstreaming

Der Poweranalyzer der Firma Dewetron erlaubt Abtastraten bis zu 10 MHz. Aus den mit 2 MHz abgetasteten Zuleiterströmen und -spannungen wurden diverse Leistungsgrößen online berechnet und zur Verfügung gestellt.

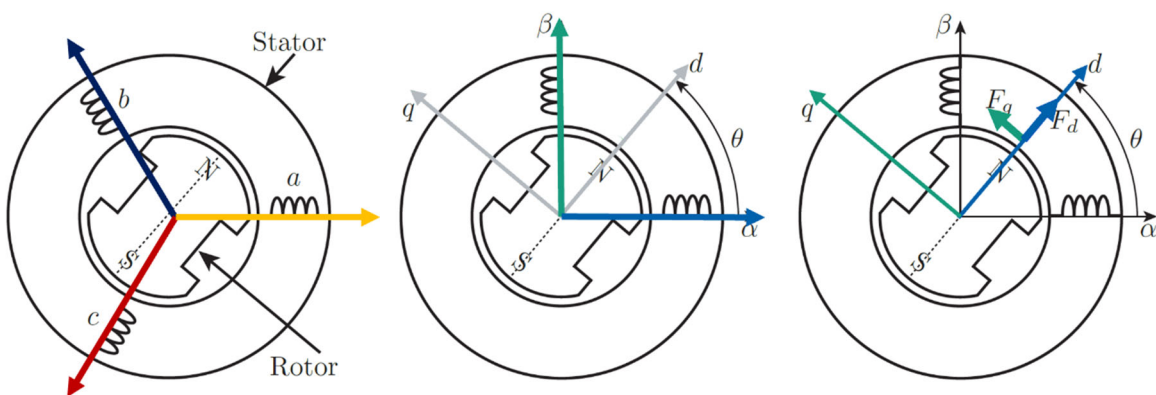
In den ‚PAK Virtual Channels‘, einer Art Online-Rechenkanäle, wurden im Zeitbereich weitere analyserelevante Größen, wie bspw. der Rotorlagewinkel und die Clarke- und Park-transformierten Ströme berechnet.

Die von der Nulllage aus über der Zeit anwachsende Rotorexzentrizität wurde mit einer Rändelschraube in 45°-Schritten per Hand eingestellt und die Exzentrizitätsstufen mit 0 bis 6 benannt.

### 4.3 Datenkonditionierung

Das vorliegende dreiphasige Bestromungssystem  $(i_a, i_b, i_c)$  des Drehstrommotors ist als Bezugssystem zu komplex, um es mit vibroakustischen Größen in Zusammenhang zu bringen. Für Analysezwecke wurde daher das Drei-Phasen-Drehstromsystem in Zweiphasen-Orthogonalsysteme überführt (Bild 12).

Der rotierenden Raumzeiger des Drehfeldes kann statorfest mit der Clarke-Transformation oder auch rotorfest mit der Park-Transformation dargestellt werden.



**Bild 12:** (Links) Dreiphasiges Drehfeld-System, (Mitte) Statorfestes Orthogonalsystem (Clarke-Transformation), (Rechts) Rotorfestes Orthogonalsystem (Park-Transformation) [5]

Mit der Clarke-Transformation, sprich der orthogonalen Darstellung des umlaufenden Drehfeldes im statorfesten System:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

lassen sich Deformationen des Stroms über eine Orbit-Darstellung der arbeitsspielbezogenen Zeitrohdaten visualisieren. Durch Extraktion einzelner Ordnungen von  $i_\alpha$  und  $i_\beta$  im Zeitbereich, kann deren Reaktion auf eine Änderung der Exzentrizität visualisiert werden.

Um eine Korrelation der NVH-Größen, wie Schalldruck und Beschleunigung zur ursächlichen Kraftanregung der Ströme herzustellen, werden die Ströme mit Hilfe der Park-Transformation in das rotorfeste System überführt:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Die Oberschwingungen, also die höherharmonischen Ordnungen von  $I_d$ , stehen in guter Näherung direkt mit der Radialkraftanregung und somit der radialen Beschleunigung auf dem Statorgehäuse im Bezug.

Die dem Strom  $I_q$  aufgeprägten Ordnungen können mit der Tangentialkraft und noch entscheidender mit der Ungleichförmigkeit des Motordrehmoments in Beziehung gebracht werden.

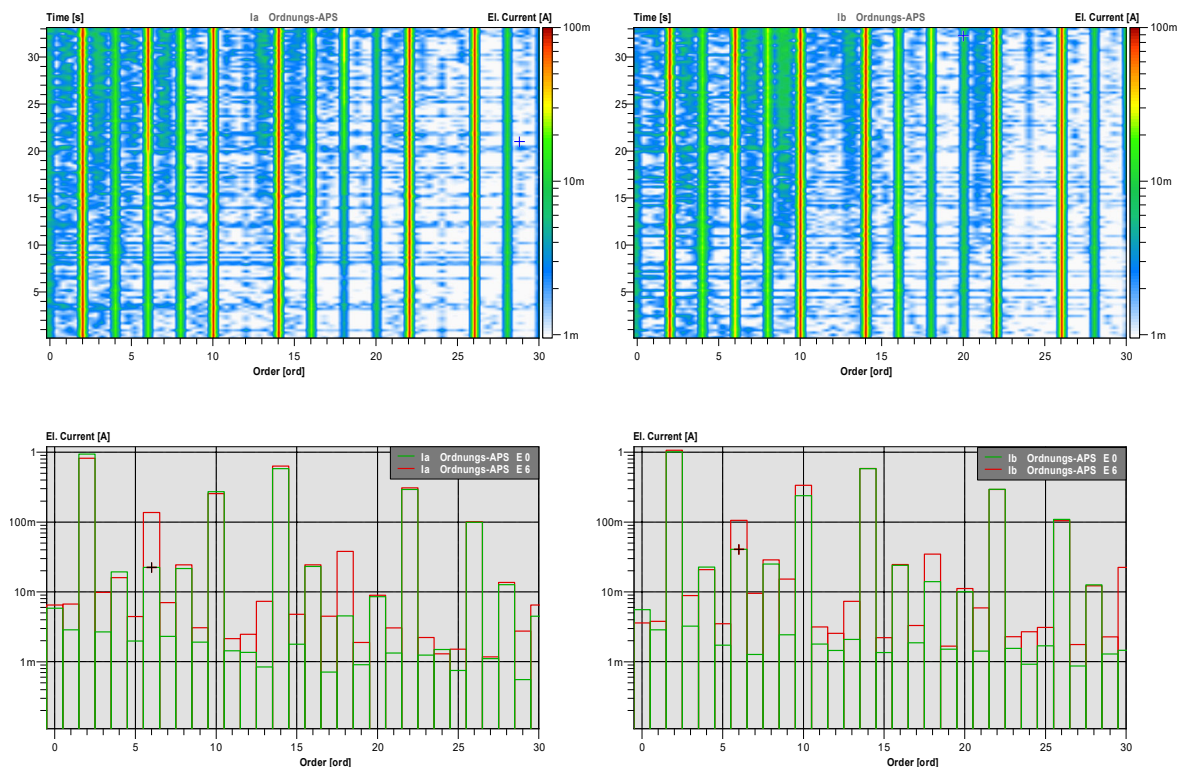
Es lässt sich ein direkter Vergleich der einzelnen Ordnungen von NVH-Größen und den Park-transformierten Strömen anstellen.

#### 4.4 Datenanalyse

Für die spektrale Analyse vibroakustischer Größen kommen vornehmlich Ordnungsspektren zum Einsatz, die mittels digitalem Ordertracking gerechnet werden. Zur qualitativen Erfassung einer Exzentrizität sollen aber auch arbeitsspielbezogene Orbitplots Anwendung finden.

Bild 13 zeigt sowohl 3D-Ordnungsspektren der Clarke-transformierten Ströme  $i_\alpha$  und  $i_\beta$  als auch daraus abgeleitete 2D-Ordnungsspektren für die Exzentrizitätsstufen 0 und 6 im farblichen Vergleich. Da die Ordnungsanalyse hier auf eine mechanische Umdrehung bezogen ist, treten die Ordnungen aufgrund der Polpaarzahl 2 als Zweifache der elektrischen Ordnungen auf.

Neben der moderaten Amplitudenänderung der Strom-Grundordnung (2. mechanische Ordnung) ist ein merklicher Amplitudenanstieg für die 6. mechanische Ordnung (3. elektrische Ordnung) und ihrer Harmonischen zu erkennen, ganz in Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

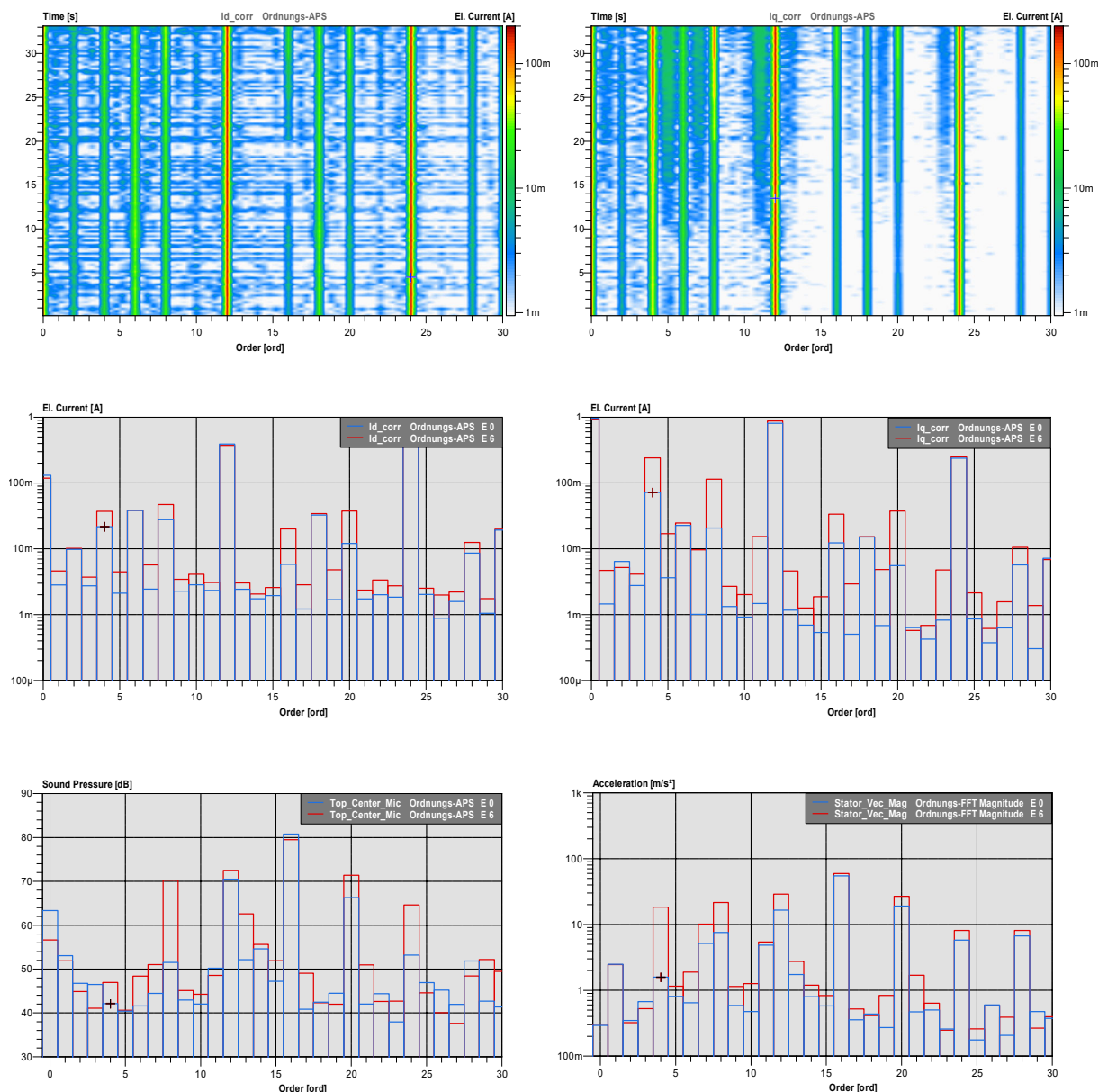


**Bild 13:** (Oben) 3D-Ordnungsspektrum für  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ ,  
(Unten) 2D-Ordnungsspektrum für  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  der Exzentrizitätsstufen 0 (grün) und 6 (rot) im Vergleich



Bild 14 zeigt entsprechend 3D-Ordnungsspektren der Park-transformierten Ströme  $I_d$  und  $I_q$  und analog die daraus abgeleiteten 2D-Ordnungsspektren für die Exzentrizitätsstufen 0 und 6 im farblichen Vergleich. Die Ordnungsanalyse ist hier ebenso auf ein mechanisches Arbeitsspiel bezogen, d.h. die mechanischen Ordnungen treten als Zweifache der elektrischen Ordnungen auf.

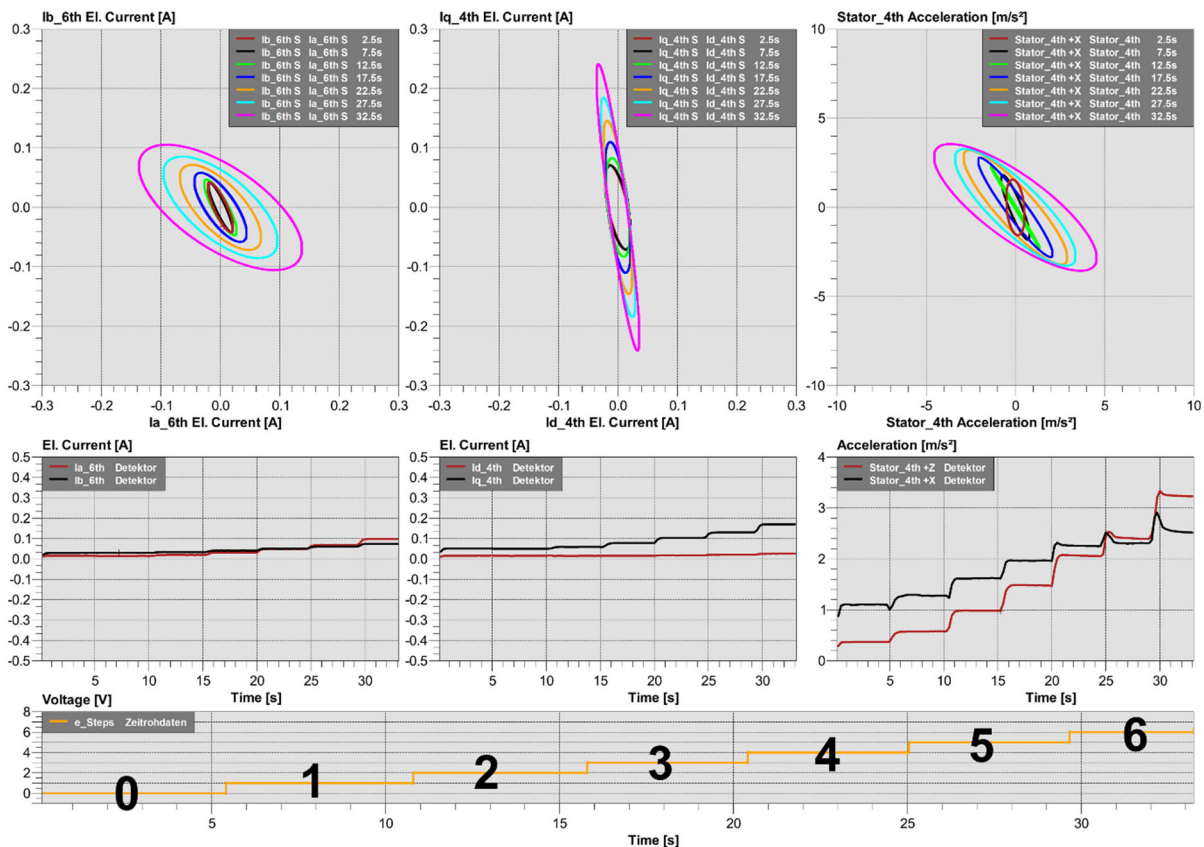
Ein merklicher Amplitudenanstieg ist für die 4. mechanische Ordnung (2. elektrische Ordnung) und ihrer Harmonischen zu sehen. Dies ist auch in den Spektren des Schalldrucks und der Beschleunigung wiederzufinden.



**Bild 14:** (Oben) 3D-Ordnungsspektrum für  $I_d$ ,  $I_q$ ,  
 (Mitte) 2D-Ordnungsspektrum für  $I_d$ ,  $I_q$  der Exzentrizitätsstufen 0 (blau) und 6 (rot) im Vergleich  
 (Unten) 2D-Ordnungsspektrum für  $L_p$ ,  $a_v$  der Exzentrizitätsstufen 0 (blau) und 6 (rot) im Vergleich

Einzelordnungen orthogonaler Messgrößen können mit Blick auf eine Orbit-Darstellung schon während der Messung im Zeitbereich mittels Kalman-Filter extrahiert und anschließend in den Winkelbereich für eine mechanische Umdrehung überführt werden. Dies erfolgte für die 6. mechanische Ordnung der Clarke-transformierten Ströme  $i_\alpha$  und  $i_\beta$ , für die 4. mechanische Ordnung der Park-transformierten Ströme  $I_d$  und  $I_q$  und für die 4. mechanische Ordnung der Rotor-Beschleunigungen in radialer und tangentialer Richtung  $a_x$  und  $a_z$ .

Bild 15 zeigt in der ersten Zeile (Oben) die Orbit-Darstellung der Einzelordnungen von  $i_\alpha$  vs.  $i_\beta$ ,  $I_d$  vs.  $I_q$  und  $a_x$  vs.  $a_z$  für die Exzentrizitätsstufen 0 bis 6 im farblichen Vergleich. Zu erkennen ist eine Vergrößerung der großen aber teils auch kleinen Ellipsen-Halbachse mit steigender Exzentrizität. In der zweiten Zeile (Mitte) ist der ansteigende Amplitudenverlauf der Einzelordnungen mit zunehmender Exzentrizität veranschaulicht. In der dritten Zeile (Unten) stellt die Exzentrizitätsstufen über der Zeit dar, für die die Arbeitsspiele der Orbitplots ausgeschnitten wurden.



**Bild 15:** (Oben) Orbitplots für die 6. Ordnung in  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  sowie die 4. Ordnung in  $I_d$ ,  $I_q$  bzw.  $a_x$ ,  $a_z$ , (Mitte) Amplitudenverlauf der 6. Ordnung in  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  sowie der 4. Ordnung in  $I_d$ ,  $I_q$  bzw.  $a_x$ ,  $a_z$ , (Unten) Exzentrizitätsstufen-Hochlauf 0 bis 6 über der Zeit

Aus allen Analysen wird deutlich, dass sich eine statische Exzentrizitätssteigerung auf die Amplituden sowohl der NVH-Messgrößen, als auch der elektrischen Größen auswirkt. Elektrische Größen sind demnach als Indikatoren für statische Exzentrizität geeignet.



## 5. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass elektrische Ströme als robuste, nichtinvasive und prüffeldunabhängige Indikatoren für statische Rotorexzentritäten in elektrischen Maschinen genutzt werden können. Gerade EoL-Tests und Zustandsüberwachungen könnten effizienter erfolgen, da sowohl auf klassische NVH-Sensorik als auch auf störungsfreie Prüfumgebungen verzichtet werden könnte. Wenn möglich, kann ein einfacher Auslaufversuch mit Auswertung der induzierten Spannung bereits Aufschluss über vorhandene Exzentritäten geben.

Um das Verfahren in einer realen Produktionsüberwachung einsetzen zu können, sind jedoch weitere Untersuchungen nötig. Wichtig wären Validierungsmessungen unter Last. Im Prüfaufbau konnte lediglich der lastfreie Zustand gemessen werden. Die Simulation zeigte für den Lastfall einen Zusammenhang zwischen Exzentrität und den relevanten Stromharmonischen.

Darüber hinaus könnte man prüfen, wie sich die Blindleistung unter Last verhält. Im lastfreien Fall konnte ein deutlicher Blindleistungsanstieg mit wachsender Exzentrität festgestellt werden.

Für eine dynamische Exzentrität zeigen die Simulationsergebnisse ebenfalls eine Änderung der Stromharmonischen. Mit einem geeigneten Prüfaufbau sollten auch hier Validierungsmessungen erfolgen.

## Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Dr. Dejan Arsić für die Anregung des Themas [6] und das Erwirken der Prüflings-Finanzierung.

Andreas Schneider sei herzlich gedankt für seine Begeisterung und Findigkeit, einen geeigneten Prüfling auszudenken und anzufertigen.

## Literatur

- [1] U. Werner: "Rotordynamische Analysen einer Läuferexzentrität in einer Drehfeldmaschine", VDE/VDI-Conference: Elektrisch-Mechanische Antriebssysteme, 2004
- [2] C. Schulte, J. Böcker: "Co-Simulation of an Electric Traction Drive", IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2013
- [3] J. F. Gieras, C. Wang, J. C. Lai: Noise of Polyphase Electric Motors, Taylor and Francis, 2006
- [4] N. P. Quang, J.A. Dittrich: Vector control of three-phase AC machines / System Development in the Practice, Springer, 2008
- [5] D. Schubert, R. Henneberger, S. Hecker, S. Sentpali, S. Marburg: "Active Noise Cancellation in Passenger Cars using the Electrical Power Steering Motor", IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2017
- [6] U. Khaliq, G. Xu, Z. Xining, L. Fei, S. Ahmad, Xun, Z. Jin: "A novel detection method for diagnosis of rotor eccentricity in three-phase induction motor", Measurement Science and technology, 2021