



# Integrierte Betrachtung magneto-mechanischer Effekte in der Entwicklung energieeffizienter rotierender Maschinen

Achref Douiri · Danilo Aurich · Simon Steentjes · Nora Leuning

Eingegangen: 26. Januar 2026 / Angenommen: 16. Februar 2026  
 © The Author(s) 2026

**Zusammenfassung** Magneto-mechanische Effekte beeinflussen das magnetische Verhalten ferromagnetischer Werkstoffe in rotierenden elektrischen Maschinen maßgeblich, insbesondere bei hohen Drehzahlen. Mechanische Spannungen, die aus Fertigungsprozessen oder aus Fliehkraftbeanspruchungen resultieren, verändern magnetische Kenngrößen wie Magnetisierung und Permeabilität und mindern dadurch die elektromagnetische Leistungsfähigkeit sowie den Wirkungsgrad. In der Praxis werden diese Wechselwirkungen in konventionellen Maschinenmodellen und Finite Elemente-Simulationen häufig vernachlässigt oder stark vereinfacht. In dieser Arbeit wird ein integrierter Ansatz zur Untersuchung der magneto-mechanischen Kopplung in permanentmagnetenerregten Synchronmaschinen (PMSM) vorgestellt. Hierzu werden spannungsabhängige Magnetisierungskurven experimentell mit einem Universal Single Sheet-Tester charakterisiert und in ein physikalisch motiviertes spannungs- und richtungsabhängiges Materialmodell überführt. Die Implementierung dieses Modells in eine FE-Simulationsumgebung ermöglicht eine gekoppelte magneto-mechanische Analyse. Dabei werden die mechanischen Spannungsverteilungen zunächst mittels strukturdynamischer Finite Elemente-Analyse (FEA) berechnet und anschließend als lokale Eingangsgröße für die magnetische Feldsimulation verwendet. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass magneto-mechanische Effekte lokal zu signifikanten Reduktionen der magnetischen Flussdichte sowie zu Verzerrungen der Flusspfade führen, insbesondere in mechanisch hochbelasteten Rotorbereichen bei erhöhten Drehzahlen. Darüber hinaus wird gezeigt,

dass konstruktive Anpassungen, wie gezielte Aussparungen, Spannungsspitzen effektiv reduzieren und die magneto-mechanisch bedingte Degradation der magnetischen Eigenschaften minimieren können.

**Schlüsselwörter** Weichmagnetische Werkstoffe · Mechanische Spannung · Magneto-mechanische Kopplung · Spannungsabhängige magnetische Eigenschaften · PMSM

**Integrated analysis of magneto-mechanical effects in the development of energy-efficient rotating electrical machines**

**Abstract** Magneto-mechanical effects significantly influence the magnetic behavior of ferromagnetic materials in rotating electrical machines, particularly at high rotational speeds. Mechanical stress arising from manufacturing processes or centrifugal loading can substantially alter magnetic properties such as magnetization and permeability, thereby degrading electromagnetic performance and efficiency. In practice, these effects are often neglected or oversimplified in conventional machine modeling and finite element (FE) simulations. This work presents an integrated approach to investigating magneto-mechanical coupling in permanent magnet synchronous machines (PMSMs). Stress-dependent magnetization curves are experimentally characterized using a universal single sheet tester and incorporated into a physically motivated, stress- and orientation-dependent material model. The implementation of this model into a finite element framework enables a coupled magneto-mechanical analysis of the machine. Mechanical stress distributions are first determined via structural FE analysis and subsequently used as local input parameters for the magnetic field simulation. The results demonstrate that magneto-mechanical effects

A. Douiri (✉) · D. Aurich · S. Steentjes · N. Leuning  
 Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen  
 University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland  
[achref.douiri@iem.rwth-aachen.de](mailto:achref.douiri@iem.rwth-aachen.de)

can cause significant local reductions in magnetic flux density and distortions of the flux paths, especially in highly stressed rotor regions at elevated speeds. Furthermore, it is shown that rotor design modifications such as targeted cut-outs can reduce stress concentrations and mitigate magneto-mechanically induced degradation of the magnetic properties.

**Keywords** Soft magnetic materials · Mechanical stress · Magneto-mechanical coupling · Stress-dependent magnetic properties · PMSM

## 1 Einleitung

Das magnetische Verhalten ferromagnetischer Materialien in rotierenden elektrischen Maschinen wird maßgeblich durch magneto-mechanische Effekte bestimmt. Mechanische Spannungen, die durch Fertigungsprozesse oder den Betrieb entstehen, führen zu signifikanten Änderungen von Magnetisierung, Permeabilität und Verlusten [1, 2]. Trotz ihrer hohen Relevanz werden diese Effekte in klassischen Modellansätzen und Maschinensimulationen häufig nur unzureichend berücksichtigt. Die Vernachlässigung magneto-mechanischer Kopplungseffekte führt zu Ungenauigkeiten bei der Vorhersage der elektromagnetischen Leistung und erschwert ein optimiertes Maschinendesign, insbesondere im Kontext steigender Leistungsdichten und höherer Rotordrehzahlen.

In der Literatur existieren zahlreiche Arbeiten zur experimentellen Charakterisierung dieser Effekte. Viele Ansätze basieren jedoch auf empirischen Modellen, die nur eingeschränkt übertragbar sind oder die mechanische Spannungen lediglich in vereinfachter, skalarer Form berücksichtigen. Der Einfluss mechanischer Spannungen auf magnetische Hysteresis- und Verlusteigenschaften ferromagnetischer Materialien wurde in mehreren Arbeiten untersucht. So stellt [3] einen kontinuierlichen, parameterbasierten Ansatz zur Darstellung spannungsabhängiger Änderungen der elektromagnetischen Hysteresis vor. Der Einfluss mechanischer Spannungen auf verschiedene Eisenverlustkomponenten in Abhängigkeit von Frequenz und magnetischer Flussdichte wurde in [4] experimentell analysiert. Der durch Schneidprozesse verursachte Einfluss sowie geeignete numerische Modellansätze werden in [5] behandelt. Physikalisch fundierte Modellierungsansätze, wie Erweiterungen des Jiles-Atherton-Modells zur Berücksichtigung mechanischer Spannungen, stellen einen wichtigen Fortschritt dar. In [6] wurde ein magneto-mechanisches Hysteresemodell auf Basis der Sablik-Jiles-Atherton-Theorie entwickelt, das den Einfluss mechanischer Spannung auf die Magnetisierung explizit abbildet. Neuere Arbeiten beschäftigen sich zudem mit der numerischen Implementierung spannungsabhängiger Jiles-Atherton-Modelle in Finite-Elemente-Simulationen [7].

Trotz dieser Fortschritte ist die Integration magneto-mechanischer Materialmodelle in maschinennahen Simulationen rotierender elektrischer Maschinen bislang noch begrenzt. Viele physikalisch detaillierte Modelle sind numerisch sehr aufwendig und daher nur bedingt für großskalige FEA-Simulationen geeignet. Darüber hinaus wird die räumliche Orientierung zwischen mechanischer Spannung und Magnetisierung in vielen Arbeiten vereinfacht oder vollständig vernachlässigt, obwohl diese einen wesentlichen Einfluss auf das magnetische Verhalten besitzt.

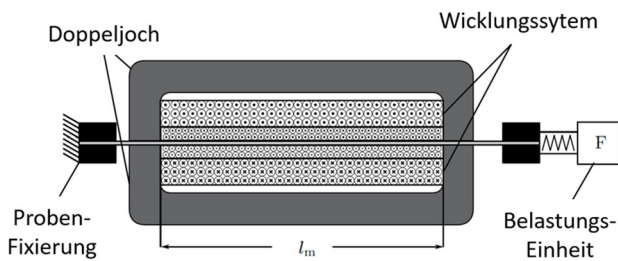
Aktuelle Untersuchungen, wie der zweifach gekoppelte magneto-mechanische Ansatz für permanenterregte Synchronmaschinen in [8], unterstreichen die Bedeutung einer konsistenten Kopplung mechanischer und magnetischer Simulationen. Dennoch besteht weiterhin Bedarf an Modellierungsansätzen, die sowohl physikalisch fundiert als auch numerisch effizient sind und sich nahtlos in maschinenspezifische Finite-Elemente-Simulationen integrieren lassen.

Ziel dieses Papers ist es, diese Forschungslücke zu schließen. Dazu werden magneto-mechanische Effekte umfassend experimentell charakterisiert, ein physikalisch fundiertes und numerisch effizientes Materialmodell entwickelt und dessen Einfluss im Rahmen magneto-mechanisch gekoppelter Simulationen permanenterregter Synchronmaschinen untersucht. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Berücksichtigung der räumlichen Orientierung von mechanischer Spannung und Magnetisierung sowie auf der Ableitung von Designimplikationen für hochdrehende elektrische Maschinen.

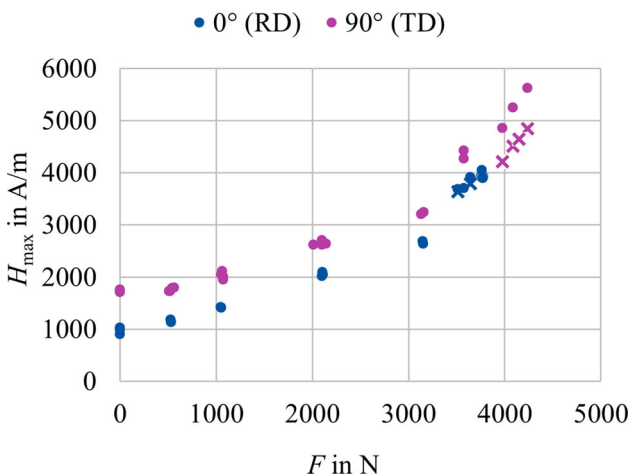
## 2 Experimentelle Untersuchungen der magneto-mechanischen Kopplung

In der Fachliteratur werden verschiedene Messanordnungen zur Untersuchung magneto-mechanischer Kopplungseffekte beschrieben, darunter eindimensionale (1D) und zweidimensionale (2D) Messtechniken [9]. 1D-Ansätze mit alternierender Magnetisierung sind sowohl in der Forschung [10–12] als auch in der industriellen Praxis weit verbreitet, da sie vergleichsweise einfach zu realisieren sind und die Aufbringung definierter mechanischer Beanspruchungen erleichtern. Standardaufbauten wie Epstein-Rahmen und Single-Sheet-Tester berücksichtigten die Auswirkungen mechanischer Spannungen im ursprünglichen Design nicht. Modifizierte Versionen dieser Prüfstände können jedoch zur Untersuchung spannungsabhängiger magnetischer Kennwerte genutzt werden. Die eindimensionalen Messaufbauten zeichnen sich dadurch aus, dass das magnetische Feld kollinear zur aufgetragenen mechanischen Spannung ausgerichtet ist (vgl. Abb. 1).

Abb. 2 zeigt das erforderliche magnetische Feld  $H_{\max}$  zur Erreichung einer magnetischen Polarisation von 1,5 T bei einer Frequenz von 100 Hz in Abhängigkeit der aufgetragenen Zugkraft  $F$  in Magnetisie-

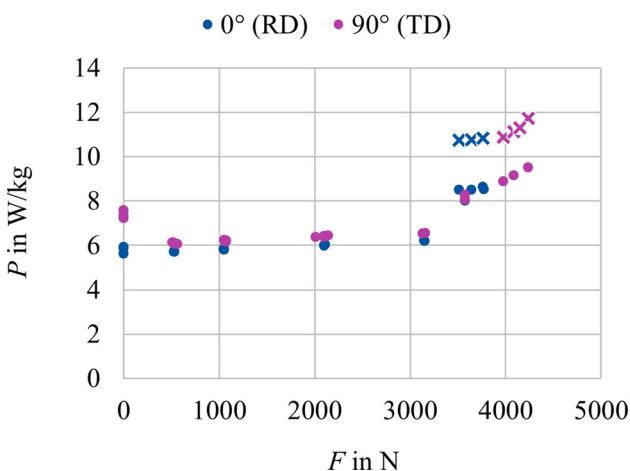


**Abb. 1** Schematische Darstellung eines eindimensionalen Messaufbaus zur Charakterisierung magneto-mechanischer Wechselwirkungen



**Abb. 2** Erforderliche magnetische Feldstärke  $H_{max}$  zur Erreichung einer magnetischen Polarisation von 1,5 T bei 100 Hz in Abhängigkeit der Zugspannung (Kreuze markieren die remanente Degradation nach plastischer Verformung)

rungsrichtung. Es ist zu erkennen, dass das benötigte magnetische Feld mit steigender Zugspannung ansteigt. Die unter denselben Bedingungen gemessenen Eisenverluste sind in Abb. 3 dargestellt. Während die gesamten Eisenverluste bei höheren Spannun-



**Abb. 3** Spezifische Gesamteisenverluste bei 1,5 T und 100 Hz für verschiedene auf die Probe aufgebrauchte Zugspannungen

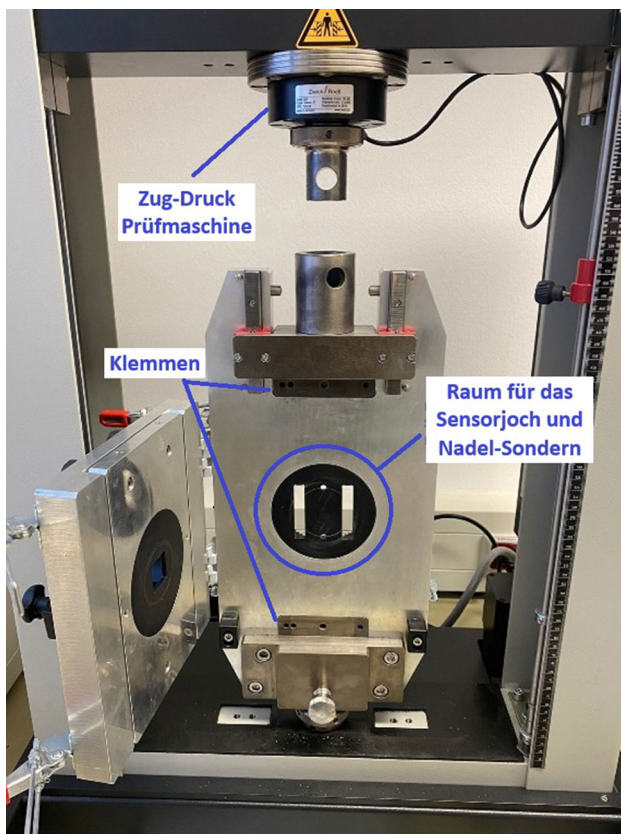
gen zunehmen, kann bei niedrigen Spannungswerten eine leichte Reduktion der Verluste beobachtet werden. Die in Abb. 2 dargestellten Kreuze kennzeichnen Messpunkte oberhalb der orientierungsabhängigen Streckgrenze, nachdem die äußere Zugkraft wieder entfernt wurde. Dies verdeutlicht, dass sowohl das erforderliche magnetische Feld als auch die Eisenverluste nach plastischer Deformation sprunghaft ansteigen. Im elastischen Bereich hingegen führt eine Entlastung der externen Kraft zu Messergebnissen, die den Werten bei 0 N entsprechen. Die beobachtete Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften, d.h. die Zunahme sowohl der benötigten magnetischen Feldstärke als auch der Verluste, ist zum einen auf plastische Deformationen und zum anderen auf im Material verbleibende Eigenspannungen infolge der plastischen Verformung zurückzuführen. Versetzungen sowie mechanische Spannungsfelder behindern die freie Bewegung der Domänenwände erheblich und führen somit zu einer Erhöhung der magnetischen Verluste.

2D-Messverfahren erweitern die Analyse, da sie komplexe magnetische Phänomene erfassen, die in 1D-Messungen nicht zugänglich sind. So können Effekte untersucht werden, die durch die Wechselwirkung von Magnetisierung und mechanischer Spannung in mehreren Richtungen entstehen. Allerdings erschweren die meist komplexe Geometrie der Messanordnung und die Notwendigkeit speziell geformter Proben eine zuverlässige und homogene mechanische Beanspruchung im Messbereich. Besonders die Zuordnung einer exakt definierten Spannung im interessierenden Probenbereich häufig nicht trivial, da deutliche Spannungsinhomogenitäten auftreten können [13, 14].

Zusammenfassend zeigen die experimentellen Untersuchungen, dass mechanische Spannungen die magnetischen Eigenschaften nicht nur quantitativ verändern, sondern bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze zu einer dauerhaften Degradation führen. Die beobachtete Richtungsabhängigkeit und die Nichtlinearität dieser Effekte verdeutlichen, dass einfache skalare Korrekturfaktoren für eine präzise Maschinenauslegung unzureichend sind. Um diese komplexen Wechselwirkungen in der numerischen Simulation berücksichtigen zu können, ist die Überführung der Messdaten in ein physikalisch fundiertes, richtungsabhängiges Materialmodell erforderlich, welches im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

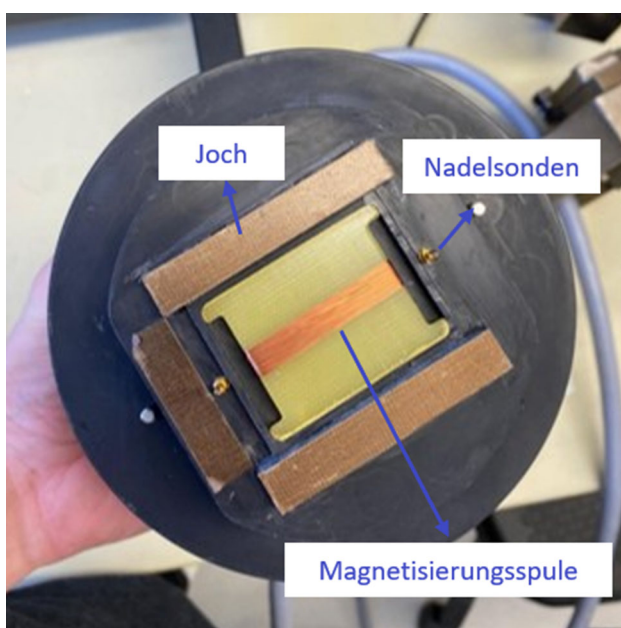
## 2.1 Sensorblock und Messprinzip

Das in dieser Arbeit eingesetzte Messsystem (Abb. 4) stellt einen effizienten Kompromiss zwischen 1D- und 2D-Messansätzen dar. Es basiert auf einer alternierenden Magnetisierung, verfügt jedoch über ein drehbar gelagertes Joch, sodass der Winkel zwischen mechanischer Beanspruchungsrichtung und Magnetisierungsrichtung gezielt variiert werden kann. Damit

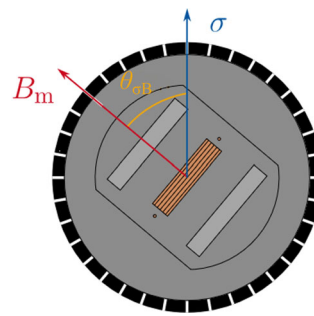


**Abb. 4** Experimenteller Gesamtaufbau des Universal-Single-Sheet-Testers (USST) zur Untersuchung magneto-mechanischer Effekte

lässt sich die Richtungsabhängigkeit magneto-mechanischer Effekte experimentell untersuchen, während gleichzeitig eine einfache Probengeometrie verwendet



**Abb. 5** Foto des Sensorblocks mit drehbarer Basis zur Charakterisierung der magnetischen Anisotropie unter Last



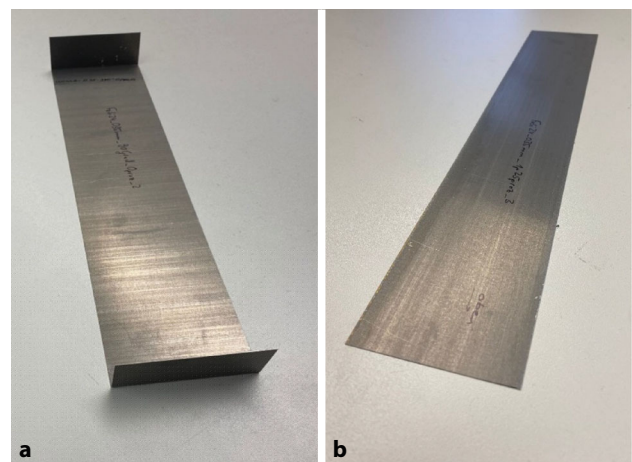
**Abb. 6** Schematische Darstellung des Messprinzips.  $\theta_{\sigma B}$  bezeichnet den Winkel zwischen Magnetisierungsrichtung und angelegter mechanischer Beanspruchung

wird, die eine robuste Bestimmung der mechanischen Spannung über analytische Zusammenhänge ermöglicht.

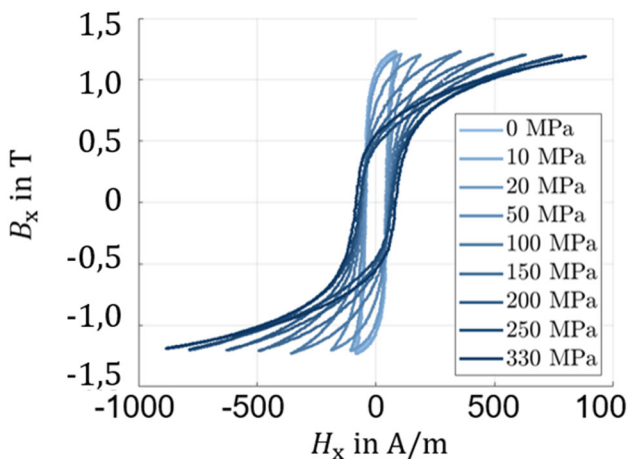
Der Sensorblock umfasst die magnetische Messeinheit bestehend aus einer Magnetisierungsspule zur Erzeugung des Magnetfelds, einem Joch zur Schließung des magnetischen Flusses, einer H-Spule zur Erfassung der magnetischen Feldstärke an der Probenoberfläche sowie Nadelsonden zur Messung der magnetischen Flussdichte im Messbereich der Probe. Ein Foto des Sensorblocks ist in Abb. 5 dargestellt; die schematische Darstellung in Abb. 6 zeigt zudem die Orientierung von mechanischer Beanspruchung und Magnetisierung sowie den zugehörigen Winkel  $\theta_{\sigma B}$ .

Die drehbare Basis ermöglicht Messungen der magnetischen Eigenschaften bei mechanischer Beanspruchung für beliebige Winkel zwischen Spannungsrichtung und Magnetisierung. Dadurch kann die anisotrope Ausprägung magneto-mechanischer Effekte systematisch erfasst werden.

Zur Bestimmung der Flussdichte werden Nadelsonden verwendet, die einen geschlossenen Messkreis auf der Probe definieren. Bei zeitlich veränderlicher Flussdichte  $B(t)$  wird gemäß dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert, die anschließend integriert wird,



**Abb. 7** Probengeometrien für (a) Zugbelastung und (b) Druckbelastung



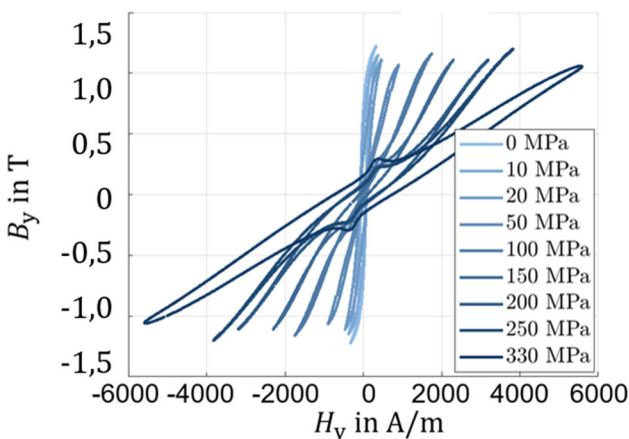
**Abb. 8** BH-Kurven für verschiedene Zugspannungen bei kollinearer Ausrichtung ( $\theta_{\sigma B} = 0^\circ$ )

um  $B(t)$  im Messbereich zu rekonstruieren [15]. Dieses Verfahren ist funktional vergleichbar mit klassischen B-Spulen, jedoch an die spezifische Geometrie des Messaufbaus angepasst.

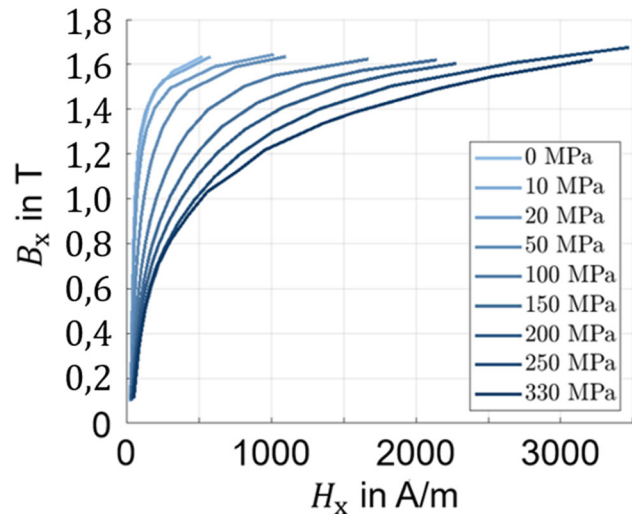
Die verwendeten Proben besitzen eine rechteckige Grundgeometrie mit einer Länge von etwa 300 mm und einer Breite von 60 bis 70 mm. Der Messbereich ist etwa  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  groß, wodurch Einflüsse aus dem Einspannbereich auf das magnetische Verhalten im Messfeld minimiert werden. Abb. 7 zeigt die Probengeometrien für Zug- und Druckbeanspruchung. Die maximal aufbringbare Kraft beträgt 20 kN, was für eine 0,5 mm dicke Probe mit 67 mm Breite einer theoretischen Spannung von etwa 600 MPa entspricht. Damit können die Proben bis in den Bereich oberhalb der Streckgrenze typischer Elektrobleche belastet werden.

## 2.2 Messergebnisse und Winkelabhängigkeit

Abb. 8 zeigt exemplarische BH-Hysteresekurven bei Zugspannungen im Bereich von 0 bis 330 MPa für den Fall einer kollinearen Ausrichtung von Span-



**Abb. 9** BH-Kurven für verschiedene Zugspannungen bei orthogonaler Ausrichtung  $\theta_{\sigma B} = 90^\circ$

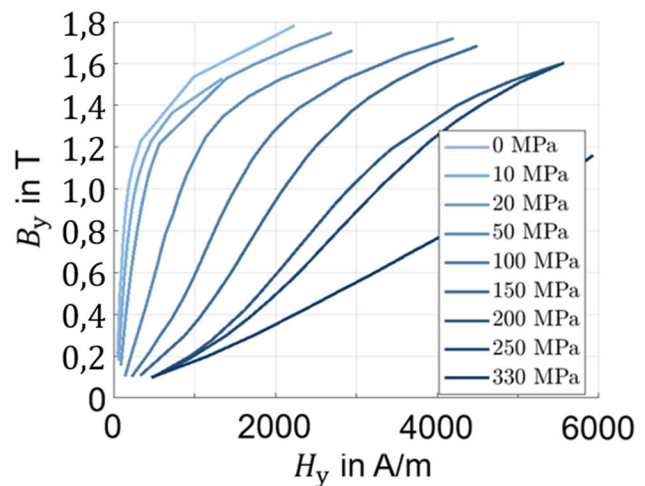


**Abb. 10** Magnetisierungskurven bei kollinearer Ausrichtung von Spannung und Magnetisierung

nungsrichtung und Magnetisierung. Mit zunehmender Spannung ist eine typische Scherung (Neigung) der BH-Kurven sowie eine deutliche Verschlechterung der Magnetisierbarkeit erkennbar.

Abb. 9 zeigt die entsprechenden Kennlinien für denselben Spannungsbereich bei orthogonaler Orientierung von mechanischer Spannungsrichtung und Magnetisierung. Im Vergleich zur kollinearen Ausrichtung ist hier ein deutlich veränderter Einfluss auf die magnetischen Kennwerte zu beobachten, was die Bedeutung der räumlichen Orientierung unterstreicht.

Die zugehörigen Magnetisierungskurven sind in Abb. 10 und 11 dargestellt. Die Ergebnisse bestätigen, dass das magnetische Verhalten von Elektroblechen nicht nur von der Spannungsamplitude, sondern maßgeblich von der Orientierung zwischen mechanischer Beanspruchung und Magnetisierung abhängt.



**Abb. 11** Magnetisierungskurven bei orthogonaler Ausrichtung von Spannung und Magnetisierung

Diese experimentellen Daten bilden die Grundlage für die anschließende Materialmodellierung.

### 3 Entwicklung eines Modells der magneto-mechanischen Kopplung

Aufbauend auf den Messergebnissen wird in diesem Abschnitt ein erweitertes Materialmodell vorgestellt, das den Einfluss der mechanischen Spannung  $\sigma$  sowie der Richtungsabhängigkeit zwischen Magnetisierung und Belastung  $\theta_{\sigma B}$  auf die magnetische Reluktivität  $\nu$  beschreibt. Die experimentellen Untersuchungen zeigen deutlich, dass die magnetische Reluktivität nicht allein von der magnetischen Flussdichte  $B$  abhängt, sondern zusätzlich von der Orientierung des magnetischen Feldes und der Größe der mechanischen Spannung. Diese gegenseitige Beeinflussung der magnetischen und mechanischen Felder wird als magneto-mechanische Kopplung bezeichnet.

Aus den Messungen ergibt sich eine dreidimensionale Look-up-Table (LUT)  $\nu^*(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2)$ , deren Stützstellen durch die experimentellen Parameter definiert sind. Die gemessene magnetische Reluktivität kann allgemein beschrieben werden durch

$$\nu^* = f(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2), \quad \text{mit} \quad \nu^* = \frac{1}{\mu} \quad (1)$$

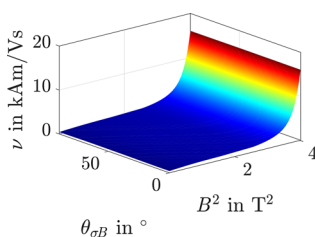
Physikalisch beschreibt die magnetische Reluktivität den Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke  $\mathbf{H}$  und magnetischer Flussdichte  $\mathbf{B}$ :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \frac{1}{\nu^*(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2)} \mathbf{H} \quad (2)$$

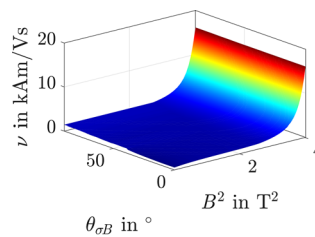
Im spannungsfreien Zustand ( $\sigma = 0$ ) ergibt sich aus den gemessenen Kennlinien die ungestörte Reluktivität  $\nu_0$  des Materials:

$$\nu_0(B^2) = \frac{H(B)}{B} \quad (3)$$

Unter mechanischer Beanspruchung werden die magnetischen Domänen durch die auftretenden Spannungen zusätzlich ausgelenkt. Diese Effekte lassen sich durch eine richtungs- und spannungsabhängige Zusatztermstruktur in der Reluktivität beschreiben. Für die Kopplung von elektromagnetischer und



**Abb. 12** Die magnetische Reluktivität  $\nu^*$  in Abhängigkeit von  $B^2$  und  $\theta_{\sigma B}$  für eine mechanische Spannung von  $\sigma = 0$  MPa



**Abb. 13** Die magnetische Reluktivität  $\nu^*$  in Abhängigkeit von  $B^2$  und  $\theta_{\sigma B}$  für eine mechanische Spannung von  $\sigma = 250$  MPa

mechanischer Simulation wird der Winkel  $\theta_{\sigma B}$  zwischen Flussrichtung und Hauptspannungsrichtung als Kopplungsparameter verwendet.

Zur numerischen Auswertung in der FEA wird die skalare Reluktivität verwendet, da sie die nichtlinearen und richtungsabhängigen Materialeigenschaften kompakt beschreibt und direkt in den Feldgleichungen der Magnetostatik vorkommt.

Abb. 12 und 13 zeigen den Verlauf der magnetischen Reluktivität  $\nu$  in Abhängigkeit des Winkels zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  und der mechanischen Spannung  $\sigma$ , bezeichnet als  $\theta_{\sigma B}$ . Dargestellt sind zwei verschiedene mechanische Spannungszustände: der spannungsfreie Zustand ( $\sigma = 0$  MPa) und eine Zugspannung von  $\sigma = 250$  MPa. Im spannungsfreien Zustand (Abb. 12) zeigt die magnetische Reluktivität über den gesamten Winkelbereich hinweg geringe Werte und nur eine schwache Abhängigkeit vom Winkel. Unter Zugbeanspruchung (Abb. 13) steigt die Reluktivität hingegen deutlich mit zunehmendem Winkel  $\theta_{\sigma B}$  an, insbesondere im Bereich oberhalb von  $60^\circ$ . Dieses Verhalten weist auf den anisotropen Charakter der magneto-mechanischen Kopplung hin, mechanische Zugspannungen führen zu einer Verringerung der magnetischen Permeabilität und damit zu einer Erhöhung der Reluktivität, vor allem in Querrichtung zur Magnetisierung. Diese Beobachtung stimmt mit bekannten magneto-elastischen Effekten überein. Durch die mechanische Spannung werden die Beweglichkeit der magnetischen Domänenwände sowie die Umorientierung von Domänen eingeschränkt, was die Magnetisierbarkeit des Materials reduziert [16, 17]. Die in den Abbildungen gezeigten Reluktivitätsverläufe bilden somit die Grundlage für die numerische Kopplung im magneto-mechanischen Simulationsmodell. Sie werden als Eingangsgrößen für die FEA verwendet, um die Wechselwirkung zwischen mechanischer Spannung und magnetischer Feldverteilung präzise abzubilden.

#### 3.1 Numerische Integration und FEA-Kopplung

Die Einbindung des magneto-mechanischen Materialmodells in die zweidimensionale Finite-Elemente-Formulierung des magnetostatischen Feldproblems erfolgt über einen aufeinander abgestimmten numerischen Prozess. Dabei wird von einer quasi-statischen Annahme ausgegangen, bei der zeitabhängige Effekte

vernachlässigbar sind. Das Magnetfeld wird mithilfe der magnetostatischen A-Formulierung beschrieben, in der sich die magnetische Flussdichte unmittelbar aus dem Vektorpotential ergibt. Die Beziehung

$$\mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{A} \quad (4)$$

definiert damit die Grundlage für die Feldbeschreibung im zweidimensionalen Raum.

Im nächsten Schritt wird das magneto-mechanische Materialverhalten in die Feldgleichung eingebettet. Das Materialmodell liefert eine Reluktivität  $\nu^*(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2)$ , die sowohl von der Hauptspannung als auch vom Winkel zwischen der maximalen Hauptspannungsrichtung und der magnetischen Flussdichte sowie vom Quadrat der magnetischen Anregung abhängt. Durch Einsetzen dieser Größe in die Feldgleichung entsteht die gekoppelte magneto-mechanische Formulierung

$$\text{curl}(\nu^*(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2) \text{curl} \mathbf{A}) = \mathbf{j}_s \quad (5)$$

wodurch die magnetische Antwort unmittelbar durch den mechanischen Zustand des Blechs beeinflusst wird.

Da die Reluktivität  $\nu^*$  nichtlinear vom Betrag der magnetischen Flussdichte  $B = |\mathbf{B}|$  abhängt, wird das resultierende System mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens gelöst. Die linearisierte Form des Systems in der  $k$ -ten Iteration lautet

$$\mathbf{J}^{(k)} (\mathbf{A}^{(k+1)} - \mathbf{A}^{(k)}) = \mathbf{R}^{(k)} \quad (6)$$

wobei  $\mathbf{A}$  den Vektor der magnetischen Vektorpotentiale,  $\mathbf{J}^{(k)} = \partial \mathbf{R} / \partial \mathbf{A}$  die Jacobi-Matrix und  $\mathbf{R}^{(k)}$  den Residuenvektor des nichtlinearen Systems bezeichnen. Die Jacobi-Matrix enthält die differentielle Reluktivität  $\nu_{\text{diff}} = \partial \nu^* / \partial (B^2)$ , welche die lokale Steigung der materialabhängigen Reluktivitätskennlinie beschreibt. Das Newton-Verfahren setzt eine stetige und eindeutig monotone Abhängigkeit von  $\nu^*$  in Bezug auf  $B^2$  voraus, um eine robuste und schnelle Konvergenz zu gewährleisten.

Für jede Iteration und jedes finite Elemente werden die Größen  $\nu^*(\theta_{\sigma B}, \sigma, B^2)$  und  $\partial \nu^* / \partial B$  benötigt. Beide Werte werden durch kubische Spline-Interpolation aus zuvor erzeugten Materialoberflächen bestimmt, wodurch eine glatte und numerisch stabile Abbildung gewährleistet ist. Die mechanischen Eingangsdaten, bestehend aus den Hauptspannungen, der Orientierung der Hauptspannungsrichtung sowie den zugehörigen Elementnummern, werden aus einer externen Textdatei eingelesen und jedem finiten Element zugeordnet. Dadurch kann die Reluktivität für jedes Element individuell entsprechend seinem mechanischen Zustand bestimmt werden.

Dieser vollständig gekoppelte numerische Ablauf ermöglicht die Simulation des magnetischen Feldes unter Berücksichtigung mechanischer Vorbelastun-

gen, anisotroper Magnetisierung und nichtlinearer Materialeigenschaften. Die Integration des magneto-mechanischen Materialmodells in die Zweidimensionalität des FE-Modells führt zu einer physikalisch konsistenten Beschreibung der Flussverteilung in elektrischen Maschinen und erlaubt damit eine realitätsnahe Analyse der magnetischen Auswirkungen mechanischer Belastungszustände.

### 3.2 Mechanischer Spannungszustand und Rotordynamik

Elektrische Maschinen sind während ihres gesamten Lebenszyklus vielfältigen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Bereits im Herstellungsprozess entstehen Eigenspannungen, etwa durch Umform-, Stanz- oder Fügeprozesse. Während des Betriebs kommen drehzahlabhängige Fliehkräfte, elektromagnetische Kräfte sowie thermisch induzierte Spannungen hinzu [18–21]. Insbesondere bei hohen Drehzahlen führen die Fliehkräfte des Rotors zu erheblichen mechanischen Beanspruchungen der magnetisch aktiven Bauteile.

Diese Belastungen überlagern sich und resultieren lokal in komplexen, dreidimensionalen Spannungszuständen, die die magnetischen Materialeigenschaften beeinflussen. Um diese Effekte im Rahmen einer magneto-mechanisch gekoppelten Simulation berücksichtigen zu können, ist eine räumlich aufgelöste Ermittlung der mechanischen Spannungen erforderlich.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

beschrieben wird. Aufgrund der Gleichheit der zueinander zugeordneten Schubspannungen gilt

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (8)$$

sodass der Tensor vollständig durch drei Normalspannungen und drei Schubspannungen bestimmt ist.

Für die Kopplung wird ein ebener Spannungszustand angenommen, da die Blechdicke im Vergleich zur radialen Ausdehnung gering ist. Der Spannungstensor reduziert sich somit auf:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = 0, \quad \tau_{yz} = 0.$$

Dieser Tensor beschreibt vollständig die in der Ebene wirkenden Normal- und Schubspannungen, die in der mechanischen FE-Simulation für jedes Element berechnet werden.

Um das magneto-mechanische Materialmodell an diesem Spannungszustand auszurichten, ist die

Bestimmung der Hauptspannungen und der Hauptspannungsrichtungen erforderlich. Diese Größen ergeben sich durch Eigenwertanalyse des Spannungstensors. Die Hauptspannungen sind die Eigenwerte

$$\det \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma \end{pmatrix} = 0 \quad (10)$$

woraus sich die Hauptspannungen im ebenen Spannungszustand schließen lassen:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (11)$$

Die zugehörigen Hauptspannungsrichtungen ergeben sich aus der Eigenvektoranalyse, was zu dem bekannten Ausdruck

$$\theta_\sigma = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \quad (12)$$

führt. Dieser Winkel beschreibt die Orientierung der Ebene, in der die Schubspannung verschwindet und nur reine Normalspannungen wirken.

### 3.3 Ergebnisse der mechanischen Spannungsverteilung

Um den Einfluss der mechanischen Spannung sowie des Winkels zwischen Magnetisierung und mechanischer Beanspruchung auf die magnetischen Eigenschaften der Referenzmaschine zu untersuchen, ist zunächst die Verteilung der mechanischen Spannungen und der Hauptspannungsrichtungen innerhalb der Maschinengeometrie zu bestimmen. Hierzu wird eine zweidimensionale mechanische FEA durchgeführt.

Die in dieser Arbeit betrachtete elektrische Maschine ist eine dreiphasige, permanentmagneterregte Synchronmaschine mit 48 Statornuten und acht Polen für Anwendungen in der Elektromobilität. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird die Symmetrie der Maschine ausgenutzt und lediglich eine Viertelsymmetrie simuliert. Da für Druckspannungszustände keine ausreichende Anzahl an USST-Messungen vorliegt, wird im Folgenden ausschließlich der Rotor betrachtet und der Einfluss der räumlichen Orientierung der mechanischen Spannungen auf das elektromagnetische Verhalten analysiert.

Für den Rotor wird ein linear-elastisches Materialverhalten mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 200$  GPa sowie einer maximalen Zugfestigkeit von 460 MPa angenommen.

Die mechanische Finite-Elemente-Simulation wurde bei einer Drehzahl von  $n = 12.000$  min<sup>-1</sup> durchgeführt, um die resultierende Spannungsverteilung im Rotor zu analysieren. Abb. 14 zeigt die Verteilung der ersten Hauptspannung im Rotor. Es ist eine stark inhomogene Spannungsverteilung zu erkennen. Hohe

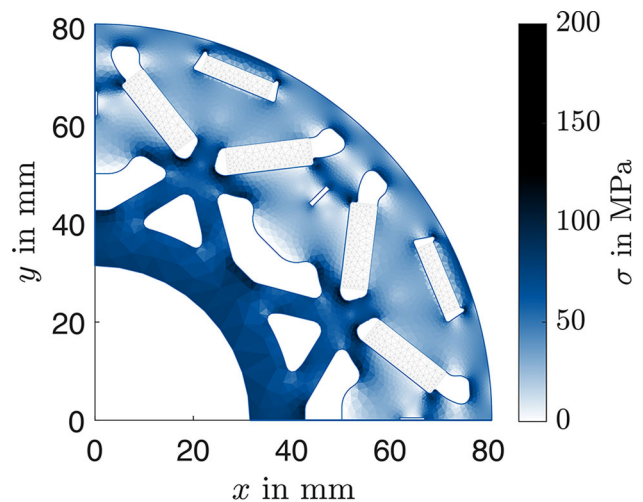


Abb. 14 Verteilung der ersten Hauptspannung im Referenzrotor bei 12000 min<sup>-1</sup>

mechanische Spannungen treten insbesondere im Bereich des Innenradius des Rotors, angrenzend an die Welle, sowie in den schmalen Brücken zwischen den Magnettaschen und in den Übergangsbereichen zum Rotorjoch auf.

Diese Bereiche müssen die nach außen wirkenden Zentrifugalkräfte der äußeren Rotorsegmente und der Permanentmagnete aufnehmen, wodurch überwiegend hohe Zugspannungen entstehen. Entlang des radialen Verlaufs nimmt die mechanische Spannung vom Innenradius zunächst ab und erreicht im mittleren Rotorbereich vergleichsweise geringe Werte. In Richtung Außenradius steigt die Spannung lokal wieder an, insbesondere an geometrischen Diskontinuitäten wie den Eckpunkten der Magnettaschen sowie in Bereichen mit geringem Abstand zwischen benachbarten Magneten. Diese Geometrieeffekte führen zu ausgeprägten lokalen Spannungskonzentrationen.

Die in Abb. 15 dargestellten Hauptspannungsrichtungen zeigen, dass die erste Hauptspannung im Großteil des Rotorblechs überwiegend tangential zur Drehrichtung orientiert ist. In den zentralen Brücken zwischen den Magnettaschen ist hingegen eine überwiegend radiale Orientierung der Hauptspannung zu beobachten. Diese Spannungsrichtung ist cha-

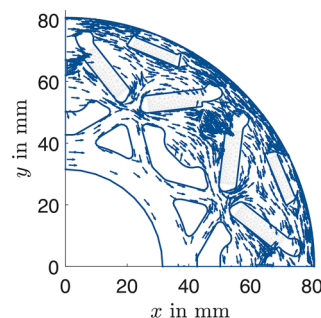
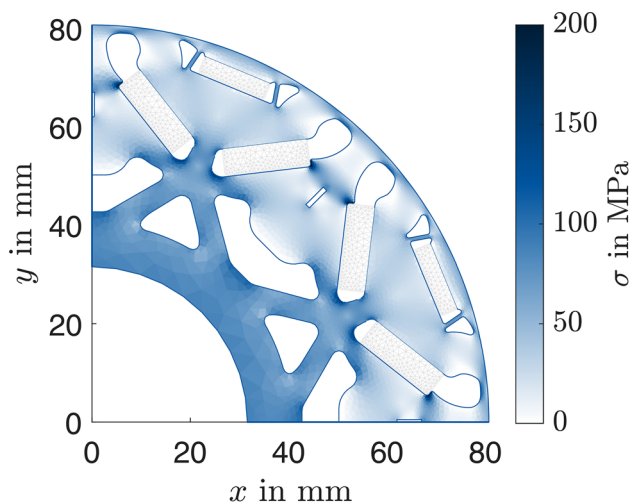


Abb. 15 Orientierung der Hauptspannungsrichtungen (Vektorfeld) im Referenzrotor bei 12000 min<sup>-1</sup>



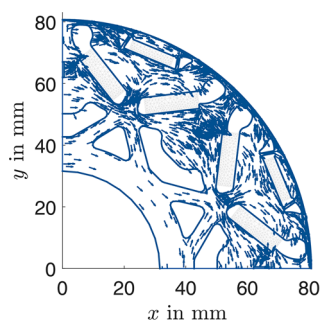
**Abb. 16** Verteilung der ersten Hauptspannung des modifizierten Rotors bei  $12000 \text{ min}^{-1}$

rakteristisch für die radiale Dehnung der äußeren Rotorbereiche infolge der Zentrifugalkraft, die über die Brücken auf das Rotorjoch übertragen wird.

In der in Abb. 16 dargestellten modifizierten Geometrie wurden zusätzliche Aussparungen zwischen den äußeren Permanentmagneten eingeführt. Die mechanischen Simulationen wurden bei identischer Drehzahl von  $12000 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt, um einen direkten Vergleich mit der Referenzgeometrie zu ermöglichen.

Im Vergleich zur ursprünglichen Geometrie zeigt sich eine deutlich homogenere Spannungsverteilung. Insbesondere im Bereich der äußeren Magnettaschen sowie der angrenzenden Brücken werden die zuvor ausgeprägten Spannungsspitzen signifikant reduziert. Die zusätzlichen Aussparungen führen zu einer lokalen Reduktion der strukturellen Steifigkeit und ermöglichen eine gleichmäßigere Umlagerung der durch die Zentrifugalkräfte verursachten Zugspannungen innerhalb der Rotorstruktur.

Während in der Referenzgeometrie hohe mechanische Spannungen an den Eckpunkten der äußeren Magnettaschen auftreten, sind diese in der modifizierten Geometrie deutlich abgeschwächt. Auch im Übergangsbereich zwischen Rotorjoch und äußere



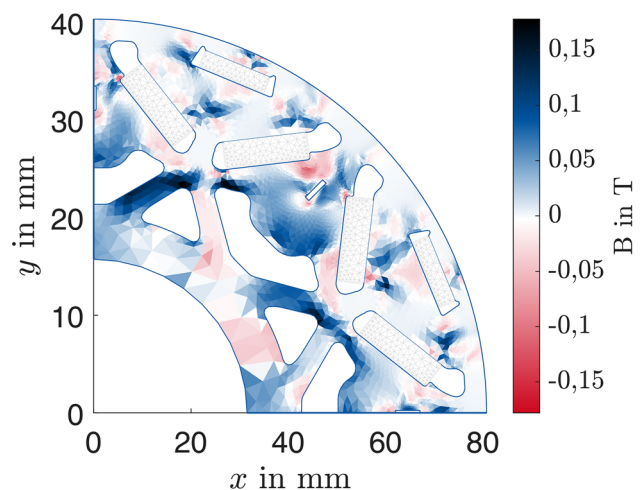
**Abb. 17** Hauptspannungsrichtungen des modifizierten PMSM-Rotors bei  $12000 \text{ min}^{-1}$

ren Brücken werden geringere Maximalspannungen erreicht. Die Hauptspannungsrichtungen gezeigt in Abb. 17 bleiben überwiegend tangential orientiert, weisen jedoch eine geringere Intensität sowie reduzierte lokale Spannungsgradienten auf.

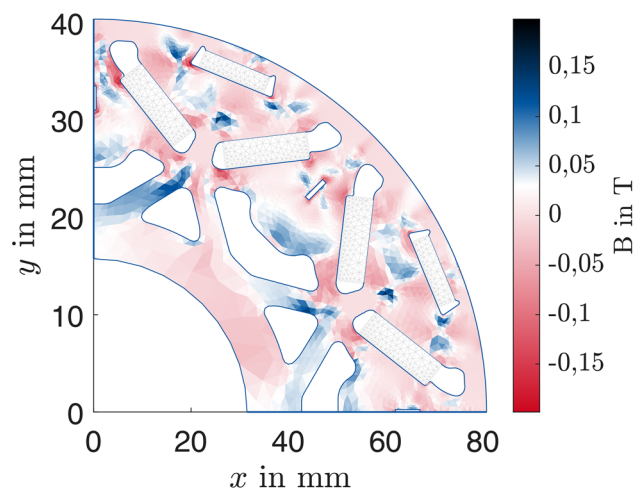
Nach Abschluss der mechanischen Simulation werden auf Basis der Normalspannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  und die Schubspannung  $\tau_{xy}$ , die erste Hauptspannung  $\sigma_1$  sowie der Winkel  $\theta_\sigma$  der Hauptspannung berechnet. Diese Größen dienen anschließend auch als Eingangsgrößen für die magneto-mechanische Simulation.

#### 4 Magneto-mechanische Simulationsergebnisse

Auf Grundlage der zuvor berechneten mechanischen Spannungsverteilungen wurde eine gekoppelte magneto-mechanisch Finite-Elemente-Simulation durchgeführt. Dabei werden die lokalen Normal- und Schubspannungen sowie die Orientierung der Haupt-



**Abb. 18** Differenz der Flussdichteverteilung  $\Delta B$  zwischen belastetem und unbelastetem Referenzmodell bei  $4000 \text{ min}^{-1}$



**Abb. 19** Differenz der Flussdichteverteilung  $\Delta B$  zwischen belastetem und unbelastetem Referenzmodell bei  $12000 \text{ min}^{-1}$

spannungen als ortsabhängige Eingangsgrößen für das Materialmodell verwendet. Ziel ist die Quantifizierung des Einflusses mechanischer Beanspruchungen auf die magnetische Flussdichteverteilung.

Die Analyse erfolgt für zwei charakteristische Betriebspunkte der Maschine. Die Drehzahl  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$  repräsentiert den Grunddrehzahlbereich mit moderater mechanischer Last. Die Drehzahl  $n = 12000 \text{ min}^{-1}$  repräsentiert den Feldschwächbereich, in dem hohe Fliehkräfte auftreten und die magnetische Ausnutzung kritisch ist. Die Abb. 18 und 19 zeigen die Differenz der magnetischen Flussdichte

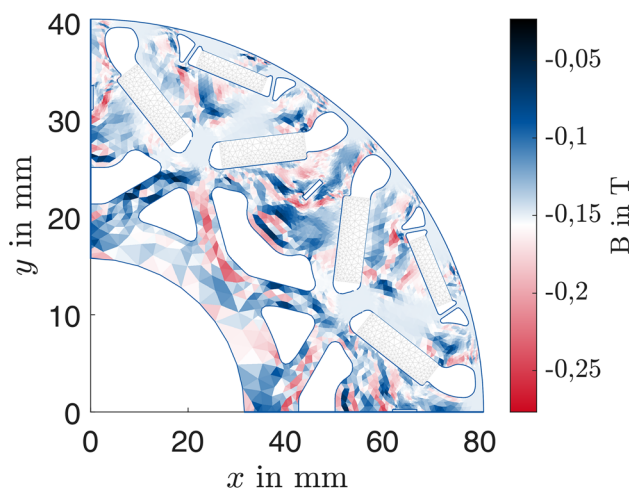
$$\Delta B = B_{\text{belastet}} - B_{\text{unbelastet}} \quad (13)$$

für das Referenzmodell ohne zusätzliche Aussparungen bei den Drehzahlen  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$  und  $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ . Negative Werte von  $\Delta B$  kennzeichnen eine Reduktion der magnetischen Flussdichte infolge der mechanischen Beanspruchung.

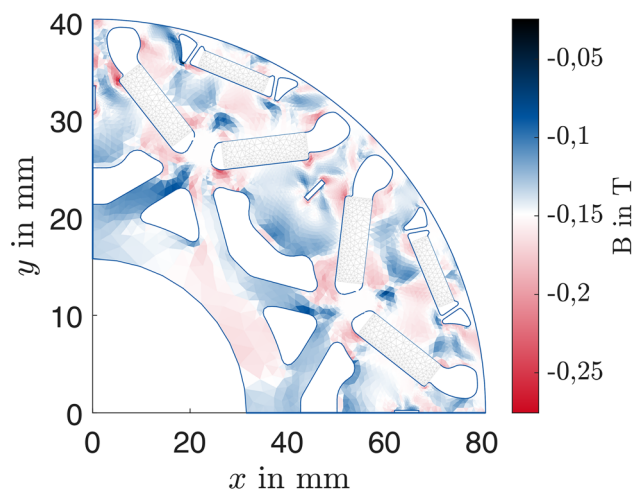
Bei der hohen Drehzahl von  $12000 \text{ min}^{-1}$  treten signifikante Reduktionen von bis zu  $-0,2 \text{ T}$  auf, insbesondere im Bereich der äußeren Permanentmagnete sowie an deren Eckpunkten. Diese Zonen korrelieren direkt mit zuvor identifizierten Spannungskonzentrationen und ungünstigen Winkeln  $\theta_{\sigma B}$  nahe  $90^\circ$ . Die mechanische Belastung führt hier nicht nur zu einer Abschwächung, sondern auch zu lokalen Pfadverzerrungen des magnetischen Flusses.

Darüber hinaus zeigen sich lokale Verzerrungen der magnetischen Flusspfade zwischen benachbarten Magneten.

Bei der niedrigeren Drehzahl von  $4000 \text{ min}^{-1}$  sind die magneto-mechanischen Effekte deutlich abgeschwächt. Die  $\Delta B$ -Werte sind insgesamt geringer und lokal begrenzt, was mit den reduzierten mechanischen Spannungen bei geringerer Zentrifugalbelastung übereinstimmt.



**Abb. 20** Reduktion der magnetischen Degradation im modifizierten Rotor bei  $4000 \text{ min}^{-1}$



**Abb. 21** Reduktion der magnetischen Degradation im modifizierten Rotor bei  $12000 \text{ min}^{-1}$

Zur Bewertung des Einflusses des Maschinendesigns auf die magneto-mechanischen Effekte wurde eine modifizierte Rotorgeometrie mit zusätzlichen Aussparungen zwischen den äußeren Permanentmagneten untersucht. Die magneto-mechanischen Simulationen wurden unter identischen Betriebsbedingungen durchgeführt, um einen direkten Vergleich mit dem Referenzmodell zu ermöglichen.

Abb. 20 und 21 zeigen die Simulationsergebnisse. Die Einführung der zusätzlichen Aussparungen führt zu einer signifikanten Reduktion der mechanisch induzierten Flussdichteänderungen. Insbesondere in den zuvor kritischen Bereichen an den Ecken der äußeren Permanentmagnete werden die negativen  $\Delta B$ -Werte deutlich verringert. Dies ist auf die reduzierte mechanische Spannung sowie auf eine günstigere Orientierung der Hauptspannungsrichtungen relativ zur Magnetisierung zurückzuführen.

Durch die homogenere Spannungsverteilung im Rotor wird die magnetische Flussdichte weniger stark beeinträchtigt. Insgesamt resultiert daraus eine stabilere magnetische Feldverteilung unter mechanischer Belastung.

Die Vergleichsergebnisse verdeutlichen, dass magneto-mechanische Effekte einen signifikanten Einfluss auf die elektromagnetische Performance der Maschine besitzen. Durch eine gezielte Berücksichtigung dieser Effekte im Designprozess, beispielsweise durch geometrische Anpassungen wie zusätzliche Aussparungen, kann die mechanische Belastung reduziert und die magnetische Leistungsfähigkeit verbessert werden. Damit zeigen die Simulationen das Potenzial einer magneto-mechanisch optimierten Auslegung permanenterregter Synchronmaschinen.

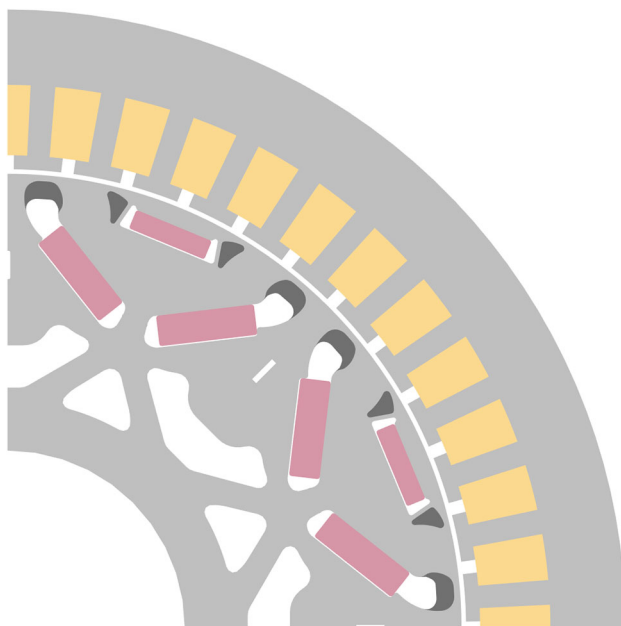
## 5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass mechanische Spannungen das elektromagnetische

Verhalten permanenterregter Synchronmaschinen maßgeblich determinieren. Insbesondere bei hohen Drehzahlen entstehen im Rotor ausgeprägte Spannungskonzentrationen, die über die magneto-mechanische Kopplung eine lokale Reduktion der Magnetisierung sowie eine signifikante Deformation der Flussverteilung induzieren. Während diese Wechselwirkungen in konventionellen Simulationsansätzen häufig unberücksichtigt bleiben, demonstriert diese Arbeit, dass sie die elektromagnetische Performance sowie die Verlustcharakteristik insbesondere im Hochdrehzahlbereich entscheidend beeinflussen. Es konnte nachgewiesen werden, dass gezielte geometrische Modifikationen, wie etwa topologisch optimierte Entlastungsaussparungen, mechanische Spannungsspitzen effektiv reduzieren und die spannungsinduzierte Degradation der Flussdichte erheblich minimieren. Eine integrierte, multiphysikalische Entwurfsstrategie ist somit eine zwingende Voraussetzung für die Auslegung leistungsstarker und effizienter Traktionsantriebe.

Über die reine Kompensation störender Einflüsse hinaus lässt sich aus den Ergebnissen ein innovatives Paradigma zur funktionalen Nutzung magneto-mechanischer Effekte ableiten. Anstatt mechanische Spannungen ausschließlich als parasitäres Phänomen zu betrachten, können diese unter Ausnutzung des Villari-Effekts gezielt zur Flussführung eingesetzt werden. Durch die kontrollierte Einbringung von Eigenspannungen lassen sich spannungsbasierte Flussbarrieren realisieren, die den magnetischen Fluss lokal lenken und Streuflüsse unterdrücken [22, 23].

Diese Form der funktionalen Integration erweitert den Designraum um zusätzliche Freiheitsgrade (vgl.



**Abb. 22** Konzeptstudie: Spannungsinduzierte Flussbarrieren zur gezielten Lenkung des magnetischen Flusses im Rotorjoch

Abb. 22). Die vorliegenden Ergebnisse bilden damit eine fundamentale Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten, in denen die magneto-mechanische Kopplung als aktives Gestaltungselement zur Steigerung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen erschlossen wird.

**Förderung** Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Arbeit im Rahmen der Fördernummer 532773068.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. Leuning N, Steentjes S, Hameyer K, Schulte M, Bleck W (2016) Effect of material processing and imposed mechanical stress on the magnetic, mechanical, and microstructural properties of high-silicon electrical steel. *steel research international* 87(12):1638–1647
2. Leuning N, Schauerte B, Hameyer K (2023) Interrelation of mechanical properties and magneto-mechanical coupling of non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 567:170322
3. Schauerte, B., Steentjes, S., Leuning, N., Hameyer, K.: A continuous parameter-based approach to model the effect of mechanical stress on the electromagnetic hysteresis characteristic. In: 2018 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), pp. 1–5 (2018). IEEE
4. Karthaus J, Steentjes S, Leuning N, Hameyer K (2017) Effect of mechanical stress on different iron loss components up to high frequencies and magnetic flux densities. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 36(3):580–592
5. Leuning N, Elfgen S, Weiss HA, Volk W, Hameyer K (2019) Der einfluss des schneidens von elektroblechlamellen und die geeignete numerische modellierung. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 136(2):184–194
6. Li, J., Xu, M.: Modified jiles-atherton-sablik model for asymmetry in magnetomechanical effect under tensile and compressive stress. *Journal of Applied Physics* 110(6) (2011)
7. Lombard, P., Hubert, O., Van Den Berg, E: Formulation of a mechanical stress dependent macroscopic magnetic model for incremental permeability simulation. In: European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT) (2023)
8. Liu XF, Liu CH, Zheng Y, Yu JF, Zhou W, Wang MX, Liu P, Zhou YF (2024) Numerical simulation of the elec-

tromagnetic torques of pmsm with two-way magneto-mechanical coupling and nonuniform spline clearance in electric submersible pumping wells. *Petroleum Science* 21(6):4417–4426

9. Zurek S (2017) Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation. CRC Press Taylor Francis CRC Press, Boca Raton
10. Landgraf FJG, Ragusa C, Rodrigues L, Dias MBS, de la Barrière O, Mazaleyrat F, Fiorillo F, Appino C, Martino L (2020) Loss decomposition in plastically deformed and partially annealed steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 502:166452
11. El Youssef M, Van Gorp A, Clenet S, Benabou A, Faverolle P, Mipo J-C (2020) Experimental set up for magnetomechanical measurements with a closed flux path sample. *Open Physics* 18(1):517–525
12. Domenjoud M, Daniel L (2023) Effects of plastic strain and reloading stress on the magneto-mechanical behavior of electrical steels: Experiments and modeling. *Mechanics of Materials* 176:104510
13. Aydin U, Martin F, Rasilo P, Belahcen A, Haavisto A, Singh D, Daniel L, Arkkio A (2019) Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets. *IEEE Transactions on Magnetics* 55(3):1–10
14. Dou Y, Li Y, Yue S, Li Y, Zhu J (2023) Measurement of alternating and rotational magnetostrictions of non-oriented silicon steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 571:170566
15. De Wulf M, Dupré L, Makaveev D, Melkebeek J (2003) Needle-probe techniques for local magnetic flux measurements. *Journal of Applied Physics* 93(10):8271–8273
16. Bozorth RM (1993) *Ferromagnetism*, pp 1–968
17. Ebrahimi H, Gao Y, Kameari A, Dozono H, Muramatsu K (2013) Coupled magneto-mechanical analysis considering permeability variation by stress due to both magnetostriction and electromagnetism. *IEEE transactions on magnetics* 49(5):1621–1624
18. Vandenbossche L, Jacobs S, Van Hoecke D, Attrazic E (2015) Impact of mechanical stresses on the magnetic performance of non-oriented electrical steels and its relation to electric machine efficiency. In: 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, pp 1–6
19. Karthaus J, Groschup B, Krüger R, Hameyer K (2019) Mechanical stress distribution and the utilisation of the magneto-elastic effect in electrical machines. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 38(4):1085–1097
20. Harstick HM, Ritter M, Riehemann W (2014) Influence of punching and tool wear on the magnetic properties of non-oriented electrical steel. *IEEE transactions on magnetics* 50(4):1–4
21. Bourchas K, Stening A, Soulard J, Broddefalk A, Lindemo M, Dahlén M, Gyllensten F (2017) Quantifying effects of cutting and welding on magnetic properties of electrical steels. *IEEE Transactions on Industry Applications* 53(5):4269–4278
22. Stöcks-Morgan, P., Neuwirth, T., Douiri, A., Sebold, S.R., Kaestner, A., Hartmann, C., Leuning, N., Schulz, M., Volk, W.: Towards large-scale production of improved magnetic flux guidance structures in non-grain-oriented electrical steel. *CIRP Annals* (2025)
23. Douiri, A., Stöcks-Morgan, P., Gilch, I., Neuwirth, T., Volk, W., Schulz, M., Steentjes, S., & Leuning, N. (2025, November). Finite Element Analysis of Residual-Stress-Based Flux Barriers on the Performance of PMSMs. In 2025 28th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 211–216). IEEE.

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.



eigenschaften neue Ansätze zur Effizienzsteigerung und Leistungsoptimierung elektrischer Antriebe zu entwickeln.

**Achref Douiri**, schloss 2024 seinen Bachelor- und Masterstudiengang in Elektrotechnik, Informationstechnik und Technischer Informatik an der RWTH Aachen University ab. Seit September 2024 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IEM tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf weichmagnetischen Werkstoffen und deren Anwendung in elektrischen Maschinen. Ziel seiner Arbeit ist es, durch ein besseres Verständnis der magnetischen Materialeigenschaften neue Ansätze zur Effizienzsteigerung und Leistungsoptimierung elektrischer Antriebe zu entwickeln.



**Danilo Aurich**, absolvierte den Bachelorstudiengang Elektrotechnik (B.Sc., 2022) und den Masterstudiengang Elektrotechnik (M.Sc., 2023) an der Federal University of Santa Catarina in Brasilien. Seit Februar 2024 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IEM tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in den Bereichen Weichmagnetischer Materialien.



**Simon Steentjes**, erhielt das Diplom und den Doktorgrad (Dr.-Ing.) in Elektrotechnik und Informationstechnik an der RWTH Aachen, Aachen, Deutschland. Von 2011 bis 2018 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen tätig, wo er wegweisende Forschung zur multiphysikalischen Charakterisierung und Modellierung weichmagnetischer Materialien betrieb. Nach seiner Promoti-

on war er als Fachexperte für die Auslegung elektrischer Traktionsmaschinen für xEV-Anwendungen bei der Audi AG tätig. Dabei lag sein Schwerpunkt auf dem Einfluss von Fertigungsprozessen und Betriebsbelastungen auf die Leistungsfähigkeit elektrischer Maschinen. Anschließend übernahm er Führungspositionen bei der Hilti Group, wo er die multiphysikalische Entwicklung fortschrittlicher elektrischer Antriebssysteme leitete. Im Oktober 2024 wurde er zum Universitätsprofessor (W3) und Leiter des Instituts für Elektrische Maschinen (IEM) an der RWTH Aachen ernannt. Er ist Autor bzw. Koautor von mehr als 170 wissenschaftlichen Publikationen. Seine Forschung folgt einem ganzheitlichen, modellbasierten Ansatz mit dem Ziel, die Lücke zwischen Materialphysik und elektromagnetischem Design zu schließen. Er ist spezialisiert auf die Integration magneto-mechanischer Kopplungen und spannungsabhängiger Materialeigenschaften in hochauflösende Finite-Elemente-(FE)-Simulationen. Seine Arbeiten ermöglichen die Entwicklung hochdrehender, energieeffizienter elektrischer Maschinen, indem sie die komplexen Wechselwirkungen zwischen mechanischer Belastung, magnetischer Permeabilität und Eisenverlusten berücksichtigen.



**Nora Leuning**, ist seit 2022 Juniorprofessorin für weichmagnetische Werkstoffe für den Einsatz in elektrischen Maschinen an der RWTH Aachen. Nach ihrem Studium des Werkstoffingenieurwesens an der RWTH Aachen promovierte sie dort 2020 im Fach Elektrotechnik mit summa cum laude. Am Institut für Elektrische Maschinen betreut sie Forschungsthemen zur Materialanalyse und Werkstoffmodellierung sowie das MagLab. Ihre Forschung kon-

zentriert sich auf die experimentelle Charakterisierung und physikalisch fundierte Modellierung weichmagnetischer Werkstoffe sowie auf den Einfluss von Herstellungsprozessen und Betriebsbedingungen auf Material- und Maschineneigenschaften.