

Bestimmung der magnetischen Flussdichteverteilung in nichtkornorientiertem Elektroblech nach dem Laserschneiden mittels Neutronen-Dunkelfeld-Bildgebung

Von der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. René Siebert
geb. am 21.01.1985 in Bautzen

Tag der Einreichung: 01. Juni 2015

Tag der Verteidigung: 31. August 2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Beyer
Prof. Dr.-Ing. R. Schäfer

Prof. Dr.-Ing. A. F. Lasagni
Vorsitzender der Promotionskommission

Berichte aus der Lasertechnik

René Siebert

**Bestimmung der magnetischen Flussdichteverteilung
in nichtkornorientiertem Elektroblech
nach dem Laserschneiden mittels
Neutronen-Dunkelfeld-Bildgebung**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3956-6

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Ich widme diese Arbeit
meinen Großeltern
Monika Et Lothar

VORWORT

Die analytischen und experimentellen Arbeiten, auf denen die vorliegende Dissertationsschrift basiert, wurden im Rahmen eines Promotionsstipendiums industriell sowie öffentlich gefördert. Die Förderung erfolgte zu gleichen Teilen durch die Sächsische Aufbaubank (SAB) mit Mitteln des Europäischen Sozialfonds (ESF) und durch die Trumpf Sachsen GmbH in Neukirch. An dieser Stelle gilt mein Dank insbesondere Herrn Dr.-Ing. Harry Thonig für die monetäre und fachliche Unterstützung. Die Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Dresden am Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik (LOT) von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Eckhard Beyer. Weiterhin genoss ich das Privileg, auf die technische Infrastruktur sowie auf die wissenschaftliche, technische und technologische Expertise des Fraunhofer Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) in Dresden zugreifen zu können. Gleiches galt für das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) in Dresden. Ein weiterer, signifikanter Teil der experimentellen Untersuchungen fand an der Großforschungsanlage des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) in Villigen (Schweiz) statt.

Viele Personen begleiteten mich auf meinem Weg bis hin zur Erstellung dieser Schrift. Eine solche Arbeit ist natürlich nie das Werk einer einzelnen Person, aus diesem Grund möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und mich bei meinem Entwicklungsprozess direkt sowie indirekt unterstützten. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer danke ich für die fortwährende hervorragende Zusammenarbeit, Betreuung und Unterstützung über den gesamten Zeitraum meiner Promotion. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schäfer spreche ich ebenfalls meinen Dank für die vielen, richtungsweisenden Anregungen und die akademische Betreuung aus. Herrn Prof. Dr.-Ing. Andrés Lasagni danke ich für die Übernahme des Gutachtens. Weiterhin bin ich Herrn Dr. sc. ETH Christian Grünzweig für die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten am Paul-Scherrer-Institut zu Dank verpflichtet. Einen großen Dank möchte ich ebenfalls Herrn Dr.-Ing. Andreas Wetzig aussprechen. Er begleitete meine akademische und persönliche Entwicklung seit meiner Zeit als Diplomand. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Schneider für die vielen Diskussionen und Anregungen, die die Zielsetzung meiner Arbeit positiv beeinflussten.

Zudem bedanke ich mich bei meinen Kollegen und Freunden am Fraunhofer IWS, am LOT, am Leibniz-IFW und am PSI für Ihre Unterstützung und Hilfe.

KURZFASSUNG

Um die Fertigung effizienter, elektrischer Maschinen voran zu treiben, bedarf es eines grundlegenden Verständnisses über die fertigungsbedingte Schädigung weichmagnetischer Werkstoffe. Bei der Formgebung der Rotor- bzw. Statorbaugruppe einer elektrischen Maschine, welche aus geschichteten Einzelblechen besteht, kommt es zur Schädigung im bearbeiteten Randbereich, dem sogenannten Schnitkanteneffekt. Zwischen dem Stator und dem Rotor findet, beispielsweise im Motorbetrieb, die Wandlung von elektrischer in kinetische Energie statt. Das heißt eine fertigungsbedingte Schädigung des weichmagnetischen Materials in dieser Baugruppe führt zu einer Verschlechterung des magnetischen Verhaltens im Betrieb und letztendlich zur Reduzierung des Wirkungsgrades der Maschine. Konventionelle magnetische und optische Messverfahren lassen jedoch keine orts aufgelöste Bestimmung dieser Schädigungseffekte im gesamten Materialvolumen zu. Durch die Weiterentwicklung des relativ jungen Verfahrens der Neutronen-Gitter-Interferometrie zur Charakterisierung magnetischer Materialien wird erstmals diese Lücke geschlossen.

Mit dieser Arbeit wird ein Beitrag zum allgemeinen Verständnis über die Herkunft und das Ausmaß der verschiedenen Schädigungsmechanismen geleistet. Es findet anschließend eine tiefgründige Betrachtung für das flexible Laserstrahlschneidverfahren statt, um Möglichkeiten zur Reduzierung der laserinduzierten thermischen Schädigung zu ermitteln. Die lokale aufgelöste Analyse der magnetischen Schädigung wird in ein Modell überführt, mithilfe dessen die Abbildung des Schnitkanteneffektes bereits während der Magnetkreisauslegung erfolgen kann. Hierbei wird der sogenannten Geometrieeffekt Berücksichtigung erfahren, d.h. die Wechselwirkung des Abstandes gegenüberliegender, geschädigter Kanten und deren Auswirkung auf die magnetischen Kennwerte.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen wurde das Laser-Remoteschneiden für die Einzelblechfertigung elektrischer Maschinen weiterentwickelt, mit dem Ziel, die thermische Materialschädigung zu reduzieren und die vorteilhaften magnetischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Ausgangsmaterials zu erhalten.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	2
2	Stand der Technik	4
2.1	Verwendung von Elektroblechen in elektrischen Maschinen	4
2.1.1	Anforderungen an den Werkstoff Elektrobund	4
2.1.2	Besonderheiten der Elektrobundherstellung	9
2.1.3	Fertigung der Einzelbleche	11
2.2	Einfluss der Lasermaterialbearbeitung auf magnetische Eigenschaften	15
2.2.1	Problematik des Schnittkanteneffektes	15
2.2.2	Verfahrensspezifische Bauteilschädigung	17
2.2.3	Bisherige Modellvorstellungen der magnetischen Schädigung	18
2.3	Magnetische Domänen und deren Beziehung zur Hysteresekurve	21
2.3.1	Einführung in magnetische Domänen	21
2.3.2	Beziehung der Domänen zur Hysteresekurve	24
2.3.3	Bestehende Verfahren zur Messung lokaler magnetischer Eigenschaften	27
3	Bestimmung der Hysteresekurven mittels induktivem Messverfahren	30
3.1	Probenherstellung und -charakterisierung.....	30
3.1.1	Materialgüte	30
3.1.2	Probenentnahme	32
3.1.3	Angewendete Schneidverfahren	33
3.1.4	Verwendete Messtechnik	35
3.2	Ergebnisse der konventionellen Hysteresemessungen	37
3.2.1	Verfahrensbedingte magnetische Bauteilschädigung	37
3.2.2	Laterale Ausbreitung der magnetischen Schädigung.....	40
3.2.3	Texturabhängigkeit des Schnittkanteneffektes	44
3.2.4	Einfluss der Materialgüte auf den Schnittkanteneffekt	47
3.2.5	Einfluss der Laserprozessparameter auf den Schnittkanteneffekt.....	48
3.2.6	Diskussion der Ergebnisse	50
4	Neutronen-Dunkelfeld-Bildgebung	51
4.1	Wechselwirkung von unpolarisierten Neutronen mit magnetischen Domänen	51
4.2	Prinzip der Neutronen-Gitter-Interferometrie	55

4.2.1	Aufbau und Funktionsweise des Interferometers	55
4.3	Datenerhebung, -verarbeitung und -aufbereitung	61
4.3.1	Datenerhebung	61
4.3.2	Berechnung des Transmissions- und Dunkelfeld-Bild	63
4.3.3	Erweiterung der Probenumgebung mit einem Goniometer	65
4.3.4	Datenaufbereitung	68
4.4	Ergebnisse der Neutronen-Dunkelfeld-Bildgebung	71
4.4.1	Dunkelfeld-Intensitätsverteilung zwischen zwei Schnittkanten.....	71
4.4.2	Untersuchung der verfahrensspezifischen Schädigungsmechanismen.....	72
4.4.3	Untersuchung der lateralen Ausbreitung des Schnittkanteneffekts	77
4.4.4	Einfluss der Materialgüte auf die Flusssdichteverteilung	83
4.4.5	Untersuchung zur Laserprozessparametrisierung	86
4.5	Überführung der Dunkelfeld-Intensität in eine lokale Magnetflusskenngroße ...	89
4.5.1	Trigonometrische Betrachtung der Domänenwanddichteverteilung	90
4.5.2	Kalibrierung der Dunkelfeld-Bildintensität mittels der Neukurve.....	99
4.5.3	Erweiterung der Kalibrierung für beliebige Geometrien	102
4.5.4	Diskussion der Ergebnisse	107
4.6	Technologieentwicklungen zur Beeinflussung magnetischer Eigenschaften ..	108
4.6.1	Präservation magnetischer Materialeigenschaften	108
4.6.2	Degeneration magnetischer Materialeigenschaften	111
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	113
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VIII
	Literaturverzeichnis	XIV