

Veränderung des weichmagnetischen Verhaltens von Fe-Si Elektroblech unter mechanisch-zyklischer Langzeitbean- spruchung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Rafael Zuber

aus Mannheim

Tag der mündlichen Prüfung: 09. März 2020

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Michael J. Hoffmann

Korreferent: Prof. Dr. Hans-Jürgen Seifert

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle möchte ich mich ganz besonders bei Dr. Oberacker bedanken, der maßgeblich bei der Entstehung dieser Arbeit beteiligt war und stets umfassende Unterstützung in allen Fragestellungen geleistet hat. Dabei möchte ich mich auch für die zahlreichen Anregungen und unzähligen Korrekturen von FVA-Berichten bedanken.

Besonders danke ich auch Prof. Dr. Hoffmann, welcher mir die Durchführung dieser Arbeit am IAM-KWT ermöglicht und mir dabei viele Freiheiten geboten hat. Ich möchte mich auch bei Dr. Bucharsky und Dr. Schell bedanken, die mich von einer Diplomarbeit in der Industrie abgehalten und damit diese Arbeit erst in die Wege geleitet haben.

Ich möchte mich auch bei Prof. Dr. Schneider und Herrn Fotouhi vom LEM für die Durchführung der Transmissionselektronenmikroskopie Untersuchungen bedanken. Meinen Kollegen des IAM-KWT danke ich für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die stete Hilfsbereitschaft. Ich danke zudem Herrn Creek und Herrn Müller für die Unterstützung bei allen technischen Fragestellungen. Weiterer Dank gebührt allen studentischen Mitarbeitern, welche unzählige Stunden am Messplatz saßen.

Für den Rückhalt und die Unterstützung auf dem Weg durch das Studium und die Promotion möchte ich mich auch ganz besonders bei meinen Eltern und meiner Schwester bedanken. Zu guter Letzt möchte ich mich besonders herzlich bei Franziska für die stetige Motivation und ihren uneingeschränkten Rückhalt in allen Lebenslagen bedanken.

Kurzfassung

In den letzten Jahren hat die Entwicklung von Elektrofahrzeugen stark zugenommen. Bei zukünftigen Antriebskonzepten spielen Elektromotoren eine entscheidende Rolle, da von Ihnen die Effizienz des Antriebs abhängt. Der aktuelle Trend geht zu immer kleiner werdenden Elektromotoren mit höheren Drehgeschwindigkeiten, in welchen das Material besonders in den Fokus rückt. Bei den eingesetzten Elektroblechen treten durch stetige Drehzahlwechsel hohe Flieh- und Magnetkräfte auf die zu lokalen Spannungen führen und damit die lokalen magnetischen Eigenschaften beeinträchtigen.

In dieser Arbeit werden die magnetischen Eigenschaften von taillierten Fe-Si Blechstreifen nach zyklischer Beanspruchung für Oberspannungen unterhalb der Streckgrenze untersucht. Die magnetische Charakterisierung erfolgt nach einem genormten Messverfahren mit einem speziell für die Messung von taillierten Blechstreifen konzipierten Single Sheet Tester. Bei der Charakterisierung werden die statischen Kommütierungskurven sowie die statischen und dynamischen Hysteresen gemessen. Mittels Verlustseparation werden die Einflüsse mechanischer Zyklisierung für die Hysterese-, Wirbelstrom- und Anomalieverluste bewertet. Zusätzlich zur spannungskontrollierten mechanischen Zyklisierung wird der Einfluss einer dehnungskontrollierten Zyklisierung bewertet. Als weiteres wird auch der Einfluss verschiedener Spannungsverhältnisse und der Temperatureinfluss bei der mechanischen Zyklisierung auf die magnetischen Eigenschaften untersucht. Aus den gewonnenen Kennwerten wird eine Korrelation zwischen der Mechanik, der Magnetik und der Mikrostruktur abgeleitet. Unter Verwendung der Rasterelektronenmikroskopie und der Transmissionselektronenmikroskopie wird hierfür das Gefüge und die Versetzungsstruktur untersucht.

Abstract

In recent years, the amount of research and development work on electric vehicles has increased greatly. Future concepts on driving, such as electric motors, will play a crucial role in electric vehicles, as their efficiency impacts the performance of the engine. The current trend moves towards small electric motors with high-speed rotations. Particularly in these types of engines, the soft magnetic material becomes a center of the focus. Internal rotors with embedded permanent magnets get affected the most due to the electrical sheet formed by the load-bearing element. Due to smaller cross-sectional areas, centrifugal and magnetic forces increase, which subsequently causes higher local mechanical stress. This effect must be taken into account when designing the rotor geometry.

In this work, the magnetic properties of waisted Fe-Si electrical steel strips are investigated after application of cyclic stress with upper load limits below the yield strength. The magnetic characterization was carried out according to a standardized measuring method with a single sheet tester specifically designed for the measurement of waisted steel strips. To investigate the influence after cyclic stress, the static commutation curve as well as the static and dynamic hysteresis were measured. Loss separation is used to evaluate the effects of mechanical cycling on hysteresis, eddy current, and excess losses. In addition to load-controlled mechanical cycling, the influence of strain-controlled cycling was evaluated. Furthermore, the influence on the magnetic properties of different stress ratios and temperature during the mechanical cycling were also investigated. From the obtained characteristic values, a correlation was observed between the mechanics, the magnetics and the microstructure. To further characterize the effects of this stress, a research on the microstructure and the dislocation structure was performed using scanning and transmission electron microscopy.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Magnetische Felder.....	5
2.2 Ferromagnetische Metalle.....	7
2.2.1 Theorie magnetischer Domänen.....	9
2.2.2 Verhalten im Magnetfeld	10
2.2.3 Ummagnetisierungsverluste.....	13
2.3 Weichmagnetische Elektrobleche	14
2.3.1 Magnetische Charakterisierung mittels Single Sheet Tester.....	17
2.4 Mechanische Ermüdung metallischer Werkstoffe.....	21
2.4.1 Versetzungen	23
2.4.2 Eigenspannungen	25
2.4.3 Plastische Wechselverformung.....	27
2.5 Wechselwirkungen zwischen mech. Ermüdung und magn. Eigenschaften	29
3 Experimentelle Methoden	31
3.1 Spannungs-Dehnungs Kurve	32
3.2 Mechanisch-zyklische Beanspruchung.....	33
3.2.1 Spannungskontrollierte mechanische Zyklisierung.....	35
3.2.2 Dehnungskontrollierte mechanische Zyklisierung.....	36

3.3	Weichmagnetische Charakterisierung mit einem Single Sheet Tester	37
3.3.1	Messung der Kommutierungskurve	40
3.3.2	Statische Hysteresemessung.....	41
3.3.3	Messung der Ummagnetisierungsverluste... ..	42
3.4	Elektrische Widerstandsmessung	43
3.5	Probenpräparation und Mikrostrukturanalyse	45
4	Experimentelle Ergebnisse	47
4.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	47
4.2	Magnetische Charakterisierung im unbelasteten Zustand	49
4.3	Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklisierung	54
4.3.1	Kommutierungskurve	55
4.3.2	Statische Hysterese	61
4.3.3	Ummagnetisierungsverluste.....	69
4.4	Verlustseparation nach Bertotti	77
4.5	Einfluss der Mittelspannung auf die magnetische Degradation	83
4.6	Dehnungskontrollierte Zyklisierung.....	87
4.7	Temperatureinfluss.....	92
4.8	Einfluss der Zyklisierung auf die mechanischen Eigenschaften.....	97
4.9	Gefüge und Mikrostruktur.....	98
4.9.1	Textur Untersuchung.....	98
4.9.2	Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchung	101
5	Bewertung und Diskussion.....	105
5.1	Magnetische Degradation	105
5.2	Einflusskriterien	110
5.3	Bewertung der Ergebnisse	112
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	115

Abbildungsverzeichnis	119
Tabellenverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	127
Entstandene Publikationen	137

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Beschreibung
B	T	Flussdichte
B ₀	T	Flussdichte im Vakuum
B _{cor}	T	Korrigierte Flussdichte
B _L	T	Luftfluss
E	GPa	E-Modul
E _h	mJ/kg	Statischer Hystereseverlust
E _w	J	Energie
ε	-	Dehnung
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
H	A/m	Feldstärke
H _c	A/m	Koerzitivfeldstärke
I	A	Stromstärke
J	T	Polarisation
J _r	T	Remanenz
k	-	Proportionalitätsfaktor (k-Faktor, DMS)
k _{eddy}	-	Koeffizient der Wirbelstromverluste
k _{exc}	-	Koeffizient der Anomalieverluste
k _{hyst}	-	Koeffizient der Hystereseverluste
l _m	m	Magnetische Länge
μ ₀	Vs/Am	Magnetische Feldkonstante
μ	-	Permeabilität

Abkürzungsverzeichnis

μ_r	-	Relative Permeabilität
N_1	-	Windungszahl Primärspule
N_2	-	Windungszahl Sekundärspule
P_s	W/kg	Ummagnetisierungsverluste
P_{eddy}	W/kg	Wirbelstromverluste
P_{hyst}	W/kg	Hystereseverluste
P_{exc}	W/kg	Anomalieverluste
Φ	Tm ²	Magnetischer Fluss
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_e	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Spezifischer elektrischer Widerstand
R_{el}	Ω	Elektrischer Widerstand
R	-	Spannungsverhältnis
R_{eS}	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
σ	S/m	Elektrische Leitfähigkeit
σ_u	MPa	Unterspannung
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_o	MPa	Oberspannung
T	N/m ²	Schubspannung
T_c	°C	Curie-Temperatur
U	V	Elektrische Spannung
U_A	V	Elektrische Ausgangsspannung
U_E	V	Elektrische Eingangsspannung

1 Einleitung

Durch Klimadebatten und politische Strategien zur Energiewende wächst der Bedarf nach alternativen Antriebskonzepten. Langfristig soll dabei auf fossile Rohstoffe verzichtet werden, wodurch elektrische Antriebe immer mehr an Bedeutung gewinnen. Der Einsatz im Kraftfahrzeug bedarf dabei spezieller elektrischer Antriebe, die zum einen leistungsstark und zum anderen energieeffizient sind.

In aktuellen Traktionsantrieben werden hochwertige Elektrobleche eingesetzt, die vor allem im Hinblick auf ihre weichmagnetischen Leistungsdaten konzipiert wurden. Je nach Antriebstyp kommen diese dabei im Rotor oder Stator zum Einsatz. Eine Möglichkeit die Leistung des Antriebes zu steigern, ist die Erhöhung der Drehzahl. Hierbei werden die weichmagnetischen Eigenschaften zusätzlich zu den statischen Belastungen bei der Verarbeitung, durch mechanische Spannungen im Betrieb beeinflusst. In Innenläufermotoren mit eingebetteten Permanentmagneten treten im Bereich dünner Blechquerschnitte, aufgrund von hohen Flieh- und Magnetkräften, lokale Spannungen auf, die bei der Auslegung der Rotorgeometrie berücksichtigt werden müssen [Wöh10].

Die auftretenden Maximalspannungen erreichen dabei unter Umständen das Niveau der Streckgrenze und können diese in Einzelfällen sogar überschreiten. Die vorhandene Mikroplastizität führt bereits unterhalb der makroskopischen Streckgrenze R_{eS} zu Versetzungsbewegungen und plastischen Verformungen in günstig orientierten Körnern. Beides wird in der Entlastungsphase der zyklischen Beanspruchung nicht vollständig in den Ausgangszustand zurückgeführt, sodass mit zunehmender Zyklenzahl die Versetzungsdichte und die mikroplastische Verformung zunehmen. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 1-1 mit einem Wöhler-Diagramm veranschaulicht.

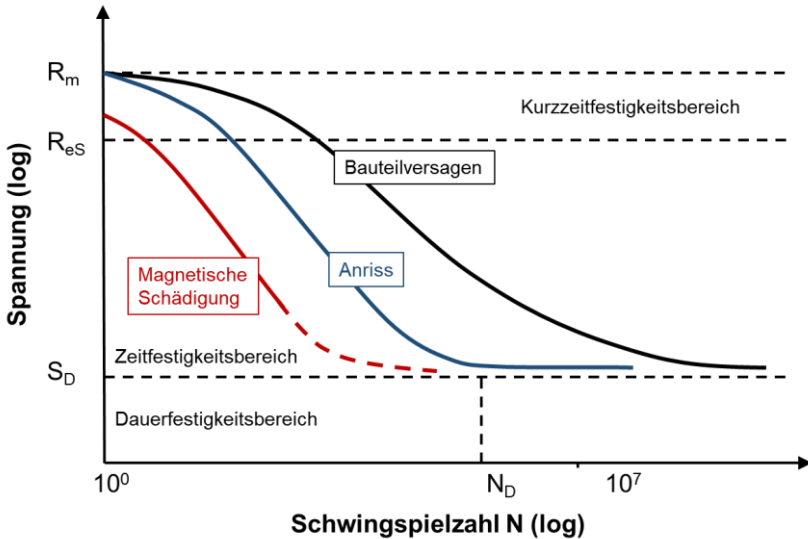


Abbildung 1-1: Auswirkungen mechanischer Spannung und Schwingspielzahl auf das Bauteilversagen, die Anrissbildung und eine mögliche magnetische Schädigung

Das Überschreiten der Zugfestigkeit R_m führt direkt zum Bauteilversagen. Unterhalb der Streckgrenze tritt das Bauteilversagen erst bei einem bestimmten Verhältnis zwischen Spannung und Schwingspielzahl auf. Dem Bauteilversagen geht der Anriss voraus, dessen Entstehung ebenfalls in Abhängigkeit zwischen Spannung und Schwingspielzahl beschrieben werden kann. Der Anriss resultiert aus den bereits erwähnten mikroplastischen Veränderungen der Kristallstruktur, die auch Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften haben. Durch die lokale Veränderung der magnetischen Eigenschaften ist auch hier mit einem Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung und der Schwingspielzahl zu rechnen. Eine Verringerung der magnetischen Permeabilitäten oder eine Erhöhung der Eisenverluste würde, gemessen am Auslegungs- bzw. Neuzustand, zu einer Minderung der Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine führen.

Bisher wurden weder der Einfluss zyklischer Belastungen auf die magnetischen Kennwerte quantifiziert, noch deren Ursachen systematisch erforscht. In dieser Arbeit wird hierfür eine geeignete Methodik erarbeitet und eine Korrelation zwischen den magnetischen Messergebnissen, der mechanischen Belastung und der Mikrostruktur untersucht. Die magnetische Degradation für Spannungen oberhalb der Streckgrenze kann durch Untersuchungen plastisch deformierter Weichmagnete sehr gut abgeschätzt werden, sodass in dieser Arbeit der Fokus auf Spannungen unterhalb der Streckgrenze liegen wird.

In diesem Zusammenhang werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels relevante Forschungsergebnisse, die sich mit der Degradation weichmagnetischer Materialien beschäftigen, vorgestellt. In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Magnetismus und der Charakterisierung von Weichmagneten erklärt. Die magnetischen Eigenschaften sind von der Kristallstruktur und Defekten abhängig. Daher wird in Kapitel 2.4 das Verhalten metallischer Werkstoffe unter zyklisch mechanischer Belastung beschrieben und die dabei auftretenden mikrostrukturellen Prozesse erklärt. Das methodische Vorgehen bei der mechanischen Beanspruchung und bei der magnetischen Charakterisierung wird in Kapitel 3 beschrieben. Die Ergebnisse der mechanischen Zyklisierung und der magnetischen Charakterisierung werden in Kapitel 4 vorgestellt. Mithilfe der Transmissionselektronenmikroskopie wurden die Versetzungsstrukturen bewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Kapitel 4.9 aufgeführt. Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse sowie die Korrelation zwischen Magnetik, Mechanik und Mikrostruktur erfolgt in Kapitel 5 und wird in Kapitel 6 noch einmal zusammengefasst.

Die Teilergebnisse dieser Arbeit sind im Rahmen des Projektes „Ermüdung E-Blech“ der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik e. V. entstanden und wurden im Abschlussbericht mit der Heftnummer 1274 [Mro18] vorab publiziert.

2 Grundlagen

Zu Beginn dieses Kapitels werden die ferromagnetischen Grundlagen erläutert und besonders das Verhalten von Domänen im Magnetfeld hervorgehoben. Darauf folgend werden relevante magnetische Kennwerte beschrieben, die bei der Bestimmung der weichmagnetischen Eigenschaften ermittelt werden. Zudem wird das Verfahren zur Charakterisierung weichmagnetischer Werkstoffe vorgestellt. Abschließend werden die Grundlagen der Entstehung und Wanderung von Versetzungen aufgearbeitet.

2.1 Magnetische Felder

Magnetische Felder werden durch bewegte Ladung erzeugt. Dies erfolgt zum Beispiel in einer stromdurchflossenen Spule, die aus n Wicklungen und einer Länge l besteht. Wenn ein Strom I durch die Spule fließt, berechnet sich die magnetische Feldstärke H mit folgender Gleichung:

$$H = I \frac{n}{l} \quad \text{Formel 2-1}$$

Das magnetische Feld wird von konzentrierten Feldlinien durchzogen, die in ihrer Gesamtheit als magnetischer Fluss Φ bezeichnet werden. Dabei ist die magnetische Flussdichte B umso größer, je dichter der magnetische Fluss pro Fläche ist:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \text{Formel 2-2}$$

2 Grundlagen

Für ein steigendes magnetisches Feld nimmt damit auch die Flussdichte zu. Im luftleeren Raum wird der Zusammenhang der Flussdichte B_0 mit der Feldstärke über die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ zusammengefasst.

$$B_0 = \mu_0 H \quad \text{Formel 2-3}$$

Wird Materie einem magnetischen Feld ausgesetzt, entstehen Wechselwirkungen zwischen der Materie und dem magnetischen Feld. Hierbei wird der luftleere Raum durch die Permeabilität μ_r der eingebrachten Materie verstärkt.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad \text{Formel 2-4}$$

Die verstärkende Permeabilität wird als relative Permeabilität bezeichnet und ergibt multipliziert mit der magnetischen Feldkonstante, die absolute Permeabilität μ . Zum Hervorheben des Unterschiedes zwischen dem magnetischen Feld im Vakuum und dem magnetischen Feld der eingebrachten Materie wird die Differenz gebildet und als Magnetisierung oder Polarisierung J definiert.

$$J = B - B_0 = (\mu_r - 1)\mu_0 H \quad \text{Formel 2-5}$$

Für niedrige Feldstärken ist der Unterschied zwischen J und B vernachlässigbar klein, weshalb $J \sim B$ angenommen werden kann [Ils10].

2.2 Ferromagnetische Metalle

Der Magnetismus ist eine Eigenschaft, die in irgendeiner Form in allen bekannten Materialien auftritt und dabei sehr ausgeprägt oder kaum nachweisbar sein kann. Je nach Stärke und Ursache werden dabei die Formen Dia-, Para-, Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus unterschieden. Bei einigen Metallen z.B. Eisen, Nickel oder Cobalt tritt, je nach Kristallstruktur, der Ferromagnetismus auf und ist die stärkste Form der aufgezählten Magnetismen. [See66b]

Die Ursache des Magnetismus beginnt bereits in der atomaren Ebene, in der mehrere Effekte für die magnetischen Eigenschaften verantwortlich sind. Atome bestehen aus einem Atomkern und aus Elektronen, die auf Bahnen um den Atomkern kreisen. Durch die kreisende Bewegung der Elektronen auf der Bahn wird ein magnetisches Moment erzeugt, welches Bahnmoment genannt wird. Dieser Prozess ist vergleichbar mit der Magnetisierung aufgrund von Ladungsbewegung in einer elektrischen Spule. Die einzelnen Elektronen sind auf ihren Bahnen nicht starr unterwegs, sondern rotieren um ihre eigene Achse. Auf diese Weise erzeugen sie ebenfalls ein magnetisches Moment, das als Spinmoment definiert ist. Der Atomkern, der aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist, erzeugt ebenfalls ein magnetisches Moment, das sich aus dem Spin der Protonen und Neutronen zusammensetzt. Dieses Moment wird als Kernspin bezeichnet und ist gegenüber dem Bahn- und Spinmoment der Elektronen um ein Vielfaches kleiner. Aus der Addition der einzelnen Momente ergibt sich für jedes Atom ein resultierendes Dipolmoment, wobei die Spinmomente der Elektronen den größten Beitrag dazu leisten. Da ein Atom nicht nur aus einem Elektron besteht, kommt es zu Wechselwirkungen, sodass das resultierende Moment von der Größe und der Richtung der einzelnen Beiträge abhängt. Das magnetische Moment eines Elektrons kann vereinfacht als ein Elementarmagnet betrachtet werden. In metallischen Festkörpern bewegen sich Elektronen im Leitungsband. Freie Energiezustände im Leitungsband ermöglichen die Aufnahme von Energie aus dem elektrischen Feld. Die Bewegung der Elektronen erfolgt gemäß dem Bloch-

Theorem. Hierbei sind die Elektronen frei beweglich und nicht an Energieniveaus gebunden, womit sie für die gute elektrische Leitfähigkeit sorgen [Bol90]. Durch die höhere Beweglichkeit können die Elektronen untereinander leichter in Wechselwirkung treten und sich paarweise ausrichten. Diese spontane Ausrichtung ohne äußeres Magnetfeld ist eine Besonderheit des Ferromagnetismus und läuft unter der Berücksichtigung von zwei grundlegenden Bedingungen ab. Zum einen werden nach der Hund'schen Regel alle Orbitale erst einfach besetzt bis alle belegt sind und anschließend doppelt besetzt. Zum anderen besagt das Pauli Prinzip, dass die Elektronenspins nicht in die gleiche Richtung zeigen dürfen und sich deshalb entgegengesetzt anordnen. In dieser Anordnung heben sich ihre magnetischen Momente gegenseitig auf und tragen nicht mehr zur Gesamtmagnetisierung bei.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Ferromagnetismus haben Austauschwechselwirkungen mit benachbarten Atomen, bei denen es zum Überlappen der Bahnen und zum Austausch von Elektronen kommt. An diesem Vorgang sind nicht alle Elektronen beteiligt, sondern nur die Elektronen der 3d-Schale. Diese koppeln sich und sorgen für eine parallele Ausrichtung ihrer Spins, welche kennzeichnend für den Ferromagnetismus ist. Mithilfe der Bethe-Slater-Kurve kann eine Aussage getroffen werden, ob ein Metall ferromagnetisch ist oder nicht. Hierbei wird die Austauschwechselwirkung über dem relativen Atomabstand aufgetragen, mit dem das Verhältnis Atomabstand zum Radius der Schale (a/r) definiert wird. Für Austauschwechselwirkungen kleiner null und zu kleine bzw. zu große relative Atomabstände ist das Metall nicht ferromagnetisch, sondern dia- oder paramagnetisch. [Bec39, Woh88]

Aus der Kristallanisotropie resultierend sind ferromagnetische Eigenschaften anisotrop und orientieren sich entlang einer Vorzugsrichtung im Kristallgitter. In jeder Elementarzelle gibt es dabei eine magnetisch leichte, mittlere und harte Richtung, in denen sich das Material unterschiedlich gut magnetisieren lässt. Für die kubische Elementarzelle bei Eisen ist die $\langle 100 \rangle$ Richtung entlang der Würfelkanten die am

leichtesten und die $\langle 111 \rangle$ Richtung entlang der Raumdiagonalen, die am schlechtesten magnetisierbare Richtung.

Die magnetischen Eigenschaften sind bei Raumtemperatur stabil, weil durch Austauschwechselwirkung verhindert wird, dass die parallele Ausrichtung der Elektronenspins durch die Wärmebewegung verloren geht. Mit steigender Temperatur nimmt die Elektronenbeweglichkeit zu und es kommt zum Verlust der parallelen Ausrichtung. Oberhalb der Curie-Temperatur T_C übersteigt die Bewegungsenergie die Energie der Austauschwechselwirkungen. Hierbei kommt es zum vollständigen Verlust der parallelen Ausrichtung der Elektronenspins und das Material ist nicht mehr ferromagnetisch, sondern paramagnetisch. [Hor12]

2.2.1 Theorie magnetischer Domänen

In einem perfekten Magneten würden alle Elektronenspins ausgerichtet parallel vorliegen. Dadurch würde ein sehr starker Magnet mit einem großen magnetischen Streufeld im Außenraum entstehen. In der Realität liegen die ausgerichteten Spinmomente nicht vereinzelt vor, sondern gruppieren sich in Bereichen, die sich in ihrer Magnetisierungsrichtung unterscheiden, aber die gleiche Magnetisierungsstärke besitzen. Diese besitzen eine Größe von 0,001 bis 0,1 mm³ und werden nach dem französischen Physiker Pierre-Ernest Weiss als Weiss'sche Bezirke [Wei07] oder magnetische Domänen bezeichnet. [Nit86]

Abbildung 2-1 (links) veranschaulicht schematisch den Verlauf des Streufeldes einer magnetischen Domäne. Diese strebt entsprechend der Definition von Landau und Lifshitz [Lan35] die Minimierung der Gesamtenergie an, indem sie ihr Streufeld reduziert. Durch die Bildung einer zweiten Domäne mit entgegengesetzter Magnetisierung wird das Streufeld reduziert (vgl. Abbildung 2-1 (Mitte)). Im optimalen Zustand entstehen weitere 90 ° versetzte Domänen, sodass kein äußeres Streufeld übrigbleibt (vgl. Abbildung 2-1 (rechts)). In kristallinen Materialien besitzen Domänen definierte Orientierungsunterschiede von 90° und 180°. Sie werden von Domänenwänden getrennt, die energetische

Barrieren darstellen. Diese können je nach Rotation der magnetischen Momente als Blochwand oder Neélwand vorliegen. Bei einer Blochwand drehen sich die magnetischen Momente senkrecht zur Wandnormalen und bei einer Neélwand entlang der Wandnormalen. [Bol90]

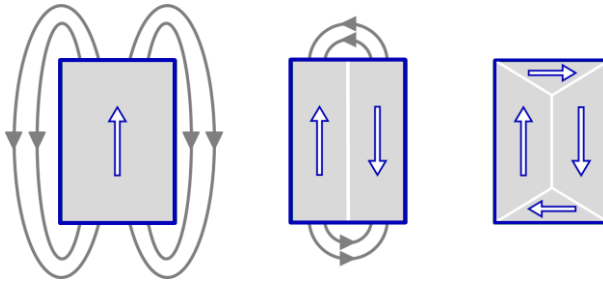


Abbildung 2-1: Energieminimierung magnetischer Domänen: Eine Domäne mit Streufeld (links), zwei Domänen mit reduziertem Streufeld (Mitte) und Domänen ohne Streufeld (rechts)

2.2.2 Verhalten im Magnetfeld

In einem ferromagnetischen Material, das einem äußeren magnetischen Feld H ausgesetzt wird, kommt es zu Domänenwandbewegungen und Domänendrehprozessen. Mit der Minimierung der freien Energie als Triebkraft gewinnen Domänen, deren Magnetisierungsrichtung am ehesten dem angelegten Feld entspricht, an Energie und breiten sich aus. Der schematische Verlauf dieser Ausbreitung wird in Abbildung 2-2 skizziert. Bei einem schwachen äußeren Magnetfeld ist dieser Vorgang reversibel, sodass die Domänen nach dem Entfernen des äußeren Feldes zurück in Ihren Ursprungszustand gelangen. Die Ausbreitung der Domänen wird von Kristallgitterdefekten gestört.

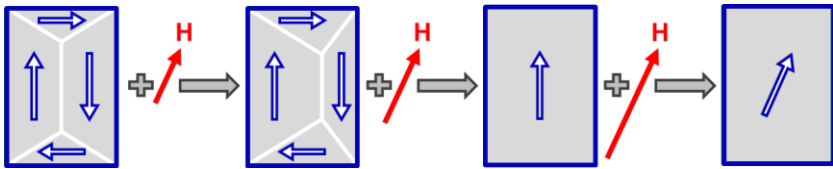


Abbildung 2-2: Ausrichtung von Domänen in einem anliegenden Magnetfeld

Hierbei bleiben diese an den Defekten hängen und werden elastisch gedehnt. Das Überwinden der Defekte ist nur durch zusätzliche Energie möglich, welche dem System über ein steigendes Magnetfeld zugeführt werden kann [Boz93, Ste00]. Das Überwinden der Barrieren ist nicht reversibel, denn die Domänenwände bleiben beim Zurücklaufen an den bereits überwundenen Barrieren erneut hängen. Resultierend daraus bleibt beim Entfernen des Magnetfeldes eine Restmagnetisierung übrig, die als magnetische Remanenz J_r bezeichnet wird. Mit fortschreitender Erhöhung der Feldstärke breiten sich die am günstigsten orientierten Domänen über das ganze Material aus, bis alle ungünstig orientierten Domänen verschwunden sind. Im letzten Schritt kommt es zu Drehprozessen, die zu einer Ausrichtung der Domänenorientierung entsprechend dem anliegenden magnetischen Feld führen. Die Polarisation, die sich dabei einstellt, wird als Sättigungspolarisation J_s definiert. Der Verlauf vom entmagnetisierten bis zum gesättigten Zustand wird genau einmal beim Magnetisieren durchlaufen und als Neukurve bezeichnet. Der schematische Verlauf einer Neukurve wird in Abbildung 2-3 veranschaulicht.

Für das Erreichen des Ausgangszustandes muss dem System erneut Energie zugeführt werden, indem das äußere Magnetfeld in entgegengesetzte Richtung angelegt wird. Die hierfür benötigte magnetische Feldstärke wird als Koerzitivfeldstärke H_c definiert. Wiederholt man dieses Vorgehen für wechselnde magnetische Felder erhält man den Verlauf einer Hysteresekurve. Der Verlauf einer Hysterese wird in Abbildung 2-4 schematisch veranschaulicht.

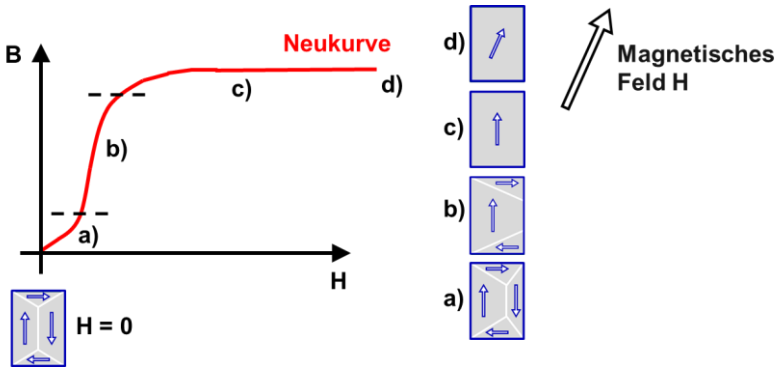


Abbildung 2-3: Magnetisierung entlang der Neukurve mit a) einem reversiblen Wachstum der Domänen, b) irreversiblen sprunghaften Drehprozessen und Blochwandbewegungen, c) Ausbreitung der Vorzugsorientierung und d) Ausrichtung entsprechend dem äußeren Magnetfeld

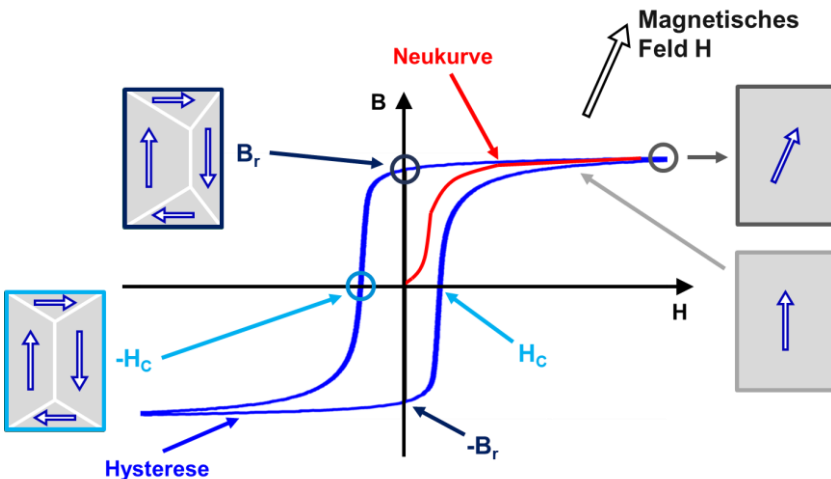


Abbildung 2-4: Statische Hystereseschleife mit schematischer Veranschaulichung der Domänenwandprozesse

Der Hystereseflächeninhalt entspricht der Energie E_w , die für die Domänenwandbewegung und -drehprozesse benötigt und in Form von Wärme abgegeben wird. Da dieser Prozess Frequenzabhängig ist, werden die entstehenden Verluste in statische und dynamische Hystereseverluste (Ummagnetisierungsverluste) unterteilt.

2.2.3 Ummagnetisierungsverluste

Die dynamischen Hystereseverluste bestehen aus mehreren Verlustanteilen und werden in ihrer Gesamtheit als Ummagnetisierungsverluste P_S bezeichnet. Sie werden in Watt pro Kilogramm angegeben und setzen sich nach Bertotti [Ber88] aus der Summe der Hystereseverluste P_{hyst} , der Wirbelstromverluste P_{eddy} und der Anomalieverluste P_{exc} zusammen.

$$P_S = P_{hyst} + P_{eddy} + P_{exc} \quad \text{Formel 2-6}$$

Bei den Hystereseverlusten geht pro Ummagnetisierung Energie E_h in Form von Wärme verloren. Da die Anzahl der durchlaufenen Hysteresen linear von der Frequenz f abhängig ist, werden die Hystereseverluste entsprechend folgender Formel berechnet:

$$P_{hyst} = E_h f \quad \text{Formel 2-7}$$

Wird ein leitfähiges Material einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld ausgesetzt, verändert sich die Flussdichte. Dabei werden Spannungen im Material induziert, die ungeordnete Kreisströme verursachen, welche als magnetische Wirbelströme bezeichnet werden. Weil die Leistung quadratisch mit der Spannung steigt und die Veränderung des Flusses Φ linear von der Frequenz f abhängt, sind Wirbelströme auch quadratisch von der Frequenz abhängig. Die Stärke der Wirbelströme ist zudem von der Dichte ρ und dem spezifischen elektrischen

Widerstand ρ_e des Werkstoffes abhängig. Je niedriger der elektrische Widerstand ist, desto höhere Wirbelströme werden erzeugt. Dieser Zusammenhang wird mit Formel 2-8 beschrieben.

$$P_{eddy} = \frac{(\pi f d B)^2}{6 \rho \rho_e} \quad \text{Formel 2-8}$$

Anomalieverluste beschreiben die Differenz zwischen den gemessenen und den mit den Maxwell'schen Gleichungen berechneten Wirbelstromverlusten. Nach Bertotti resultieren die Anomalieverluste aus der sprunghaften Änderung der Domänen in Richtung des äußeren Feldes und der damit verbundenen Erzeugung von lokalen Wirbelströmen. In einem sinusförmig alternierenden B-Feld können die Anomalieverluste P_{exc} mit dem Anomaliekoeffizienten k_{exc} entsprechend Formel 2-9 zusammengefasst werden. [Ber92, Lev12]

$$P_{exc} = k_{exc} B^{\frac{3}{2}} f^{\frac{3}{2}} \quad \text{Formel 2-9}$$

2.3 Weichmagnetische Elektrobleche

Magnetwerkstoffe werden anhand ihrer magnetischen Eigenschaften in Weichmagnete und Hartmagnete unterteilt. Weichmagnete sind leicht magnetisierbar und besitzen eine geringe Koerzitivfeldstärke $H_c < 10^3$ A/m [Bol90]. Leicht magnetisierbare Weichmagnete besitzen bei geringen Feldstärken H eine hohe Flussdichte B und daraus resultierend eine hohe magnetische Permeabilität, die im Bereich zwischen 10^3 und 10^5 liegt. Durch die hohe Permeabilität reagieren Weichmagnete auf kleine Veränderungen des magnetischen Feldes mit hohen Magnetisierungsänderungen. Die Sättigungspolarisation J_s liegt bei eisenreichen kristallinen Weichmagneten zwischen 1,4 bis 1,85 T und kann durch geeignete Legierungen bis zu 2,35 T betragen [Bol90].

Zu den Nachteilen von Weichmagneten gehören hohe Wirbelstromverluste in Wechselstromanwendungen, die auf den niedrigen elektrischen Widerstand zurückzuführen sind. [Ils10, Kal12]

Elektrobleche finden überall da Anwendung, wo in elektrischen Maschinen ein magnetischer Fluss geführt werden muss [May75, Tou76]. Zu den praktischen Anwendungsgebieten zählen Relais, Transformatoren, Stromzähler und Elektromaschinen. In modernen Anwendungen werden möglichst dünne weichmagnetische Bleche eingesetzt und zu Blechpaketen zusammengesetzt. Die eingesetzten Blechdicken reichen hierbei von 0,05 mm und bei hochfrequenten Anwendungen bis hin zu 1 mm. Zeitlich veränderliche Wechselfelder im Betrieb von E-Maschinen induzieren magnetische Wirbelströme, die durch eine Verringerung der Querschnittsfläche minimiert werden können.

In Abbildung 2-5 wird die Wirbelstromausbreitung in Abhängigkeit der Querschnittsfläche für einen Eisenkern (links) und mehrere Blechquerschnitte (rechts) veranschaulicht. Im Eisenkern können sich Wirbelströme ungestört über den ganzen Querschnitt ausbreiten. Durch die Verwendung mehrerer Blechquerschnitte werden die Wirbelströme auf die einzelnen Blechquerschnitte reduziert und ergeben im Vergleich zu einem Eisenkern geringere Gesamtwirbelströme.

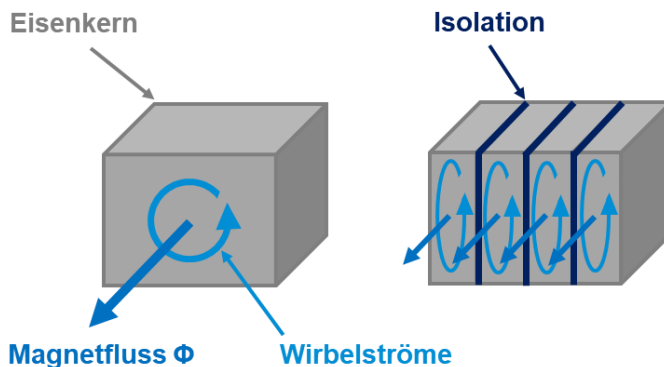


Abbildung 2-5: Wirbelströme in einem Eisenstück (links) und in den Einzelblechen eines Blechpaketes (rechts)

Um die Ausbreitung zwischen den Blechquerschnitten zu unterbinden werden die Oberflächen mit einer Isolationsschicht von 1 bis 3 μm überzogen. Eine weitere Möglichkeit zur Minimierung der Wirbelströme ist die Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes durch geeignete Legierungselemente. Reineisen ist das günstigste weichmagnetische Material und bietet hohe Sättigungspolarisationen von 2,1 T. Allerdings besitzt es einen geringen spezifischen Widerstand und somit hohe Verluste. Für die magnetischen Eigenschaften ist hierbei entscheidend, dass möglichst wenig Kohlenstoff im Eisen enthalten ist. In Anwendungen in denen hohe magnetische Permeabilitäten gefordert werden, kommen Eisen-Nickel Legierungen mit 40 bis 50 % Nickel zum Einsatz. Diese besitzen jedoch eine geringere Sättigungspolarisation. Hohe Sättigungspolarisationen von 2,35 T sind durch die Legierung mit 50 % Kobalt realisierbar. Kobalt ist jedoch teuer weshalb CoFe-Legierungen nur in Kleinserien zur Anwendung kommen [Alv05, Lev12]

Am weitesten verbreitet sind Elektrobleche mit Silizium als Legierungselement, da es den spezifischen elektrischen Widerstand erhöht [Kom02, Oda08]. Silizium wird nur in geringen Mengen von bis zu 5 % zulegiert, weil mit steigendem Silizium Gehalt die Verformbarkeit beeinträchtigt und die Sättigungspolarisation gesenkt wird. Die Bearbeitbarkeit kann durch das Legieren mit Aluminium verbessert werden.

SiFe-Elektroband wird in nicht-kornorientierter und kornorientierter Form angeboten. Die Spezifikationen für das nichtkornorientierte SiFe-Elektroband werden in den IEC Standards 60404-8-2 und 60404-8-4 dokumentiert. In Transformatoren oder Hochleistungstransformatoren, die hohe richtungsgebundene magnetische Eigenschaften benötigen, werden kornorientierte Elektrobänder eingesetzt. Nichtkornorientierte Elektrobänder kommen überall da zum Einsatz, wo quasi isotrope Eigenschaften in Walz- und Querrichtung verlangt werden. Hierbei betragen die Unterschiede der magnetischen Eigenschaften zwischen den Orientierungen maximal 10 % [Wup05].

Entscheidend für die magnetischen Eigenschaften von beiden Elektrobandsorten ist der Herstellungsprozess. Dieser beginnt mit der chemischen Zusammensetzung im Stahlwerk, gefolgt von Kalt- und Warmwalzprozessen sowie Wärmebehandlungen. Kalt- und Warmwalzprozess erzeugen eine Walztextur innerhalb des Werkstoffes bei der sich die Kristallite des Gefüges relativ zur Walzrichtung anordnen. In dieser zweidimensionalen Vorzugsorientierung ordnen sich die Kristallite so an, dass die Würfelkanten in Walzrichtung und die Flächendiagonalen quer zur Walzrichtung ausgerichtet sind. Eine solche Orientierung wird nach ihrem Entdecker Goss-Textur genannt [Gos33]. Kornorientiertes Elektroblech mit einer hohen Permeabilität besitzt eine nahezu perfekte Goss-Textur. Texturen sind im Allgemeinen ungünstig für die mechanischen Eigenschaften, weshalb das Elektroband in einem weiteren Schritt unter Schutzgasatmosphäre im Durchlaufofen schlussgeglüht wird. Hierbei rekristallisiert das Kristallgefüge, sodass sich die aufgestauten Verfestigungen wieder lösen. Als Weiteres wird durch den Glühprozess der Kohlenstoffgehalt abgesenkt und ein grobkörnigeres Gefüge eingestellt. Die Glühbehandlung hat deshalb einen entscheidenden Anteil an den magnetischen Eigenschaften, denn nur mit einem defektfreien Gefüge kann eine schmale Hysterese mit einer geringen Koerzitivfeldstärke realisiert werden [daC03, Dua96].

2.3.1 Magnetische Charakterisierung mittels Single Sheet Tester

Die Charakterisierung weichmagnetischer Elektrobleche- und Bänder mittels Single Sheet Tester (SST) ist ein genormtes Verfahren (IEC Norm 60404-3), das sowohl für Forschungszwecke als auch zur Qualitätskontrolle in der Industrie genutzt wird. Entsprechend der Norm werden quadratische Blechtafeln mit Abmessungen bis zu 500 x 500 mm, sowohl in Walz- als auch in Querrichtung charakterisiert und der Mittelwert als Gesamtergebnis verwendet. In Abbildung 2-6 wird der Aufbau eines Single Sheet Testers schematisch veranschaulicht.

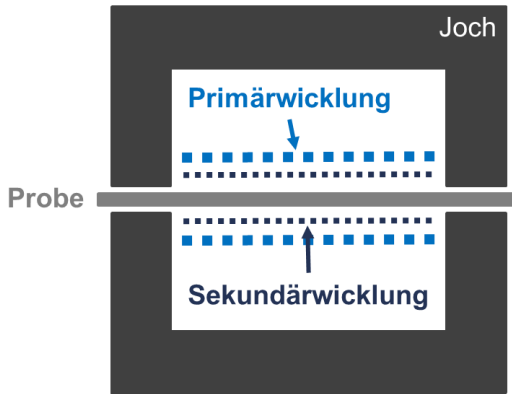


Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau eines Single Sheet Testers zur Charakterisierung weichmagnetischer Blechtafeln

Der Single Sheet Tester beinhaltet eine im Messsystem integrierte Primär- und Sekundärwicklung. Der magnetische Rückschluss erfolgt über ein symmetrisch angeordnetes Doppeljoch, das aus einer Silizium-Eisen- oder einer Nickel-Eisen-Legierung (Permalloy) besteht. Gegenüber dem Probenmaterial liegt der magnetische Widerstand und Verlustanteil bei ca. 1 % [Bus13]. Das Joch wird aus verklebten Blechschichten hergestellt um Wirbelströme zu minimieren [Mic06]. Da elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Doppeljoch und Probe zu Messungenauigkeiten führen können, werden auch Single Sheet Tester bestehend aus einer Jochhälfte entwickelt [Nak99, Yam74]. Die direkte Messung magnetischer Kenngrößen ist nicht möglich und erfolgt deshalb über die zeitliche Veränderung von Spannungen. Kommt es innerhalb der Sekundärwicklung N_2 zu Veränderungen des magnetischen Flusses Φ wird die Spannung U wie folgt induziert [Bro14]:

$$U(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Formel 2-10}$$

Eine Flussänderung kann zum einen durch das Einführen oder Entfernen und zum anderen durch das Auf- und Ummagnetisieren eines magnetischen Werkstoffes in einer Messwicklung ausgelöst werden [Bro14].

Durch die Integration der induzierten Spannung über einen definierten zeitlichen Verlauf wird der magnetische Fluss Φ berechnet.

$$\Phi = -\frac{1}{N_2} \int_{t_1}^{t_t} U(t) dt \quad \text{Formel 2-11}$$

Aus der Menge der magnetischen Flusslinien pro Flächeneinheit A wird die magnetische Flussdichte $B = \Phi / A$ (Formel 2-2) berechnet. In Kombination mit Formel 2-11 folgt der Term für die Messung der magnetischen Flussdichte B , der sich aus der zeitlichen Spannungsänderung $U(t)$, der Probenquerschnittsfläche A und der Wicklungszahl der Sekundärspule N_2 zusammensetzt.

$$B = -\frac{1}{N_2 A} \int_{t_1}^{t_t} U(t) dt \quad \text{Formel 2-12}$$

Nach den Normen IEC 60404-2 und IEC 60404-3 wird bei den Messungen der magnetischen Flussdichte eine sinusförmige Polarisierung vorausgesetzt. Hierfür wird eine sinusförmige Spannung erzeugt und von einem Steueralgorithmus überwacht. Dieser sorgt dafür, dass der zeitliche Feldverlauf bei jeder Abweichung von der Sinusform kontinuierlich nachgeregelt wird. Durch die größere Querschnittsfläche A' der Sekundärspule gegenüber des Probenquerschnitts A , muss die gemessene Flussdichte B um den dazwischen liegenden Luftfluss B_L korrigiert werden. Die Korrektur kann einerseits mathematisch entsprechend Formel 2-13 berechnet werden oder andererseits mit einer separaten Kompensationsspule erfolgen. Das Kompensationsspulensystem misst den Luftfluss, dem die Probe ausgesetzt ist und korrigiert dieses kontinuierlich während der Messung [Bro14].

$$B_{cor} = B - B_L = \frac{\Delta\Phi}{N_2 A} - \left(\frac{A'}{A} - 1\right) \mu_0 H \quad \text{Formel 2-13}$$

Mit dem Zusammenhang aus Formel 2-3 kann die magnetische Feldstärke H in einem Luftspalt mit der Permeabilität μ_0 oder an der Oberfläche eines magnetischen Werkstoffes wie folgt berechnet werden:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad \text{Formel 2-14}$$

Die Bestimmung der Feldstärke in einem Single Sheet Tester ist mit zwei unterschiedlichen Verfahren möglich [Mic06]. Zum einen kann die Feldstärke mathematisch berechnet werden und zum anderen mit einer Feldmessspule gemessen werden. Ein Vorteil der Magnetfeldmessungen mit einer Feldmessspule ist, dass durch die Messung der Feldstärke direkt an der Probenoberfläche, der Einfluss des Jochs und der Flussübergänge vernachlässigt werden kann. Nachteilig ist, dass inhomogene Magnetfelder zwischen Feldmessspule und Probe, die Messergebnisse verfälschen können. Zudem ist die Kalibrierung der Feldmessspule schwierig und beeinflusst somit ebenso das Messergebnis. [Miy06, Nak87]

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke ist das einfachste Verfahren, da nur die magnetische Weglänge l_m benötigt wird. Aufgrund des Doppeljochs des Single Sheet Tester befindet sich die magnetische Probe in einem geschlossenen magnetischen Kreis. Hierbei berechnet sich die Feldstärke H aus dem Erregerstrom I_1 , der von einem Leistungsverstärker zur Verfügung gestellt wird und durch die Primärwicklung N_1 fließt. [Fio04]

$$H = \frac{I_1 N_1}{l_m} \quad \text{Formel 2-15}$$

Die magnetische Weglänge l_m kann nicht exakt bestimmt werden, weshalb der Abstand zwischen den Innenkanten des Joches als Näherungswert verwendet wird [Fio04].

Messsonden erzeugen kontinuierlich geringe Offsetspannungen (Thermospannungen) zu Messfehlern, die in Form von Drifts zu Messungenauigkeiten führen. Da Offsetspannungen sich mit fortlaufender Zeit ändern, können sie nicht durch eine Kompensation korrigiert werden. Aus diesem Grund wird mit einem vom Messsignal unabhängigen resultierenden Eingangsstrom gerechnet, der wie das eigentliche Messsignal dazu integriert wird und damit Messfehler hervorrufen kann [Bro14].

2.4 Mechanische Ermüdung metallischer Werkstoffe

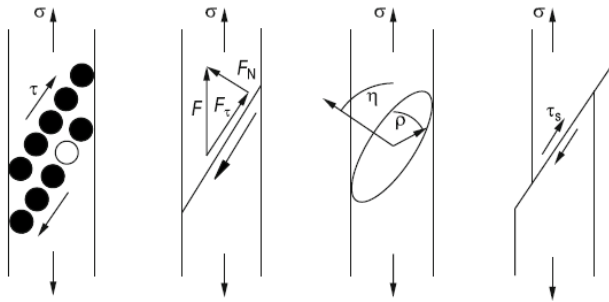
Wird ein Werkstoff mechanisch belastet, reagiert er mit einer Verformung, bei der sich die Atome des Werkstoffes zueinander verschieben. Hierbei werden zwei wesentliche Verformungsarten unterschieden. Zum einen die vollständig reversible elastische Verformung und zum anderen die nichtreversible plastische Verformung. Tritt die plastische Verformung kontinuierlich durch eine zyklische Belastung auf, spricht man von einer mechanischen Ermüdung. Das Verformungsverhalten wird hierbei von der Kristallstruktur, der Kristallorientierung sowie der vorliegenden Mikrostruktur bestimmt. Ausschlaggebend für die plastische Verformung ist das Abgleiten von Versetzungen in Ebenen mit einer hohen Atomdichte, die als Gleitebenen bezeichnet werden. Im kubisch raumzentrierten (krz) Gitter sind die $\{110\}$ oder die $\{112\}$ – Ebene eine bevorzugte Gleitebene und die $\langle 111 \rangle$ Richtung die bevorzugte Gleitrichtung. Die Kombination aus Gleitebene und -richtung wird als Gleitsystem definiert [Hor12].

Im Kristallgitter nehmen Atome zueinander eine energetisch günstige Gleichgewichtslage ein. Unter Last (z. B. Zugbeanspruchung) kommt es zu einer Vergrößerung dieser Gleichgewichtsabstände. Die Vergrößerung ist energetisch ungünstig, sodass die Atome einer Rückkehr in ihre Gleichgewichtslage entgegenstreben. Durch das permanente Aufbringen von Kraft wird dem entgegengewirkt, wobei mit zunehmender Dehnung die rückwirkende Kraft zunimmt und mehr Energie benötigt wird. Bei der reversiblen elastischen Dehnung nehmen die Atome, nach dem Entfernen der äußeren Last, wieder ihre Gleichgewichtslage ein. Die Vergrößerung des Atomabstandes im Kristallgitter erfolgt nicht unbegrenzt. Wird der kritische Atomabstand überschritten, folgt eine irreversible plastische Verformung des Werkstoffes. Die plastische Verformung erfolgt zunächst nur in einzelnen Körnern (Mikroplastizität) und breitet sich mit steigender Belastung über den gesamten Werkstoff aus. Elementar für die plastische Verformung ist das Abgleiten von Halbkristallen auf Gleitebenen unter Schubspannungseinfluss. [Fre26, Tay34]

Wirkt die Kraft F auf eine Probe mit der Querschnittsfläche A_0 , so berechnet sich die Schubspannung τ mit den im Bezug zur Normalspannung stehenden Winkeln ρ und η entsprechend Formel 2-16.

$$\tau = \frac{F}{A_0} \cos\rho \cos\eta = \sigma \cos\rho \cos\eta \quad \text{Formel 2-16}$$

Der mathematische Zusammenhang $\cos\rho\cos\eta$ wird als Schmid-Faktor oder schmidischer Orientierungsfaktor bezeichnet [Sch68]. In Abbildung 2-7 wird die Herleitung der Schubspannungsberechnung veranschaulicht. Für die Winkel $\rho = \eta = 45^\circ$ besitzt der Schmid-Faktor ein Maximum, was im Umkehrschluss auch für die Schubspannung gilt.

Abbildung 2-7: Verlauf der Schubspannung τ [Hor12]

2.4.1 Versetzungen

Versetzungen sind eindimensionale oder linienförmige Gitterfehler und liegen in jedem Kristall vor. Sie sind der elementare Mechanismus der plastischen Verformung. Äußere Kräfte induzieren Schubspannungen und liefern damit die treibende Kraft für die Versetzungswanderung. Dabei wird der Verlauf einer Versetzung als Versetzungslinie und die Richtung der Versetzungsbewegung, nach dem Physiker J. M. Burgers [Bur39] als Burgersvektor definiert. Versetzungslinien werden in Segmente mit Stufencharakter [Oro34, Pol93] und Schraubencharakter [Bur39] unterteilt. Eine Stufenversetzung kann man sich wie eine Halbebene vorstellen, die zusätzlich in den Kristall geschoben wird, wobei der Burgersvektor senkrecht zur Versetzungslinie steht. Bei der Schraubenversetzung windet sich eine Ebene um die Versetzungslinie, wodurch der Burgersvektor und die Versetzungslinie parallel verlaufen [Kop07].

Versetzungen wandern in der Gleitebene, welche durch den Burgersvektor und die Versetzungslinie aufgespannt wird, am leichtesten durch den Kristall. Mit zunehmender Spannung nimmt die Versetzungsbewegung zu. Dabei kommt es oftmals zu einer Behinderung durch Korngrenzen. Nachfolgende Versetzungen werden aufgestaut, wodurch Ansammlungen entstehen. Neben Korngrenzen sind Einschlüsse,

unbewegliche Versetzungslinien und kreuzende Versetzungen weitere Hindernisse, die der Versetzungsbewegung im Weg stehen. Mit steigender plastischer Verformung nimmt die Versetzungsanzahl zu, und es wird eine Verfestigung des Materials bewirkt. All diese Hindernisse sind jedoch ebenso Quellen für neue Versetzungen. Der wichtigste Mechanismus ist dabei die Frank-Read-Quelle [Car77, Fra50].

Bei der Belastung einer Probe, die aus einem polykristallinen Kristallgefüge mit unterschiedlich orientierten Körnern besteht, treten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Körnern auf. Dabei ist der Verformungsgrad ausschlaggebend und sorgt dafür, dass sich die Körner gegeneinander verschieben, um den Kontakt an den Korngrenzen nicht zu verlieren. Aufgrund der unterschiedlichen Kornorientierungen werden unterschiedliche Schubspannungen für die Aktivierung von günstig orientierten Gleitsystemen benötigt. Das Abgleiten beginnt bei günstig orientierten Körnern, sobald die kritische Schubspannung erreicht wird. Ungünstig orientierte Körner behalten dabei ihre Position, da diese eine deutlich höhere Schubspannung benötigen. Dieser Prozess erzeugt hohe Verspannungen im Gefüge und ermöglicht das Abgleiten in Nachbarkörnern. Damit der Zusammenhalt bei einer plastischen Verformung nicht verloren geht, bilden sich Versetzungen, welche die an den Korngrenzen entstehenden Kavitäten sowie Überschneidungen ausgleichen (vgl. Abbildung 2-8).

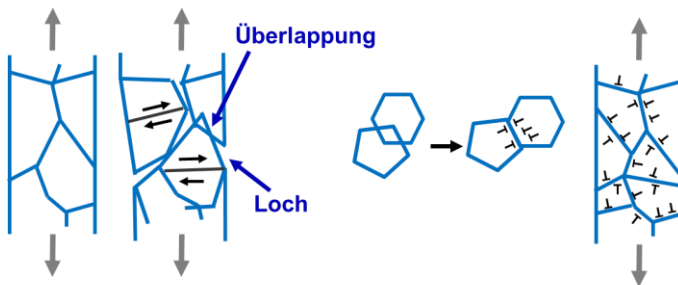


Abbildung 2-8: Schematische Bildung von Versetzungen um an den Korngrenzen entstehende Kavitäten sowie Überschneidungen auszugleichen.

Nach einer ersten Idee von Ashby [Ash70] und einer späteren Ausarbeitung von Nix und Gao [Nix98] werden Versetzungen in zwei Arten unterteilt. Man unterscheidet dabei notwendige Versetzungen, die gebildet werden um die plastische Deformation zu tragen und statische Versetzungen, die vor der plastischen Deformation im Material vorhanden waren. Schon bei relativ niedrigen Spannungsamplituden einer mechanisch zyklischen Belastung, entstehen mikroplastische Verformungen durch Versetzungsbewegungen [Mug76]. Hierbei kommt es oftmals zu einer lokalen Bildung und Auflösung von Versetzungsanhäufungen. Bei einer dynamischen Beanspruchung ist es auch typisch, dass einzelne Versetzungen an die Oberfläche treten und die hierfür charakteristischen Gleitbänder erzeugen [Bar16]. Durch die Richtungswechsel bei der Belastung werden immer wieder andere Gleitebenen aktiviert, womit Extrusionen und Intrusionen gebildet werden. Diese führen letztendlich zu Mikrorissen an der Oberfläche und im äußersten Fall zum Bauteilversagen.

2.4.2 Eigenspannungen

In allen metallischen Werkstoffen liegen mechanische Spannungen vor, auch wenn auf diese keine äußeren Kräfte und Momente wirken. Diese Eigenspannungen können durch verschiedene Einflüsse entstanden sein und befinden sich in einem mechanischen Gleichgewicht. Sie werden in Eigenspannungen I., II., und III. Art unterteilt. Eigenspannungen I. Art, die auch als Makroeigenspannungen bezeichnet werden, sind über größere Werkstoffbereiche homogen und werden über mehrere Körner gemittelt bestimmt. Eigenspannungen II. Art sind Mikro-eigenspannungen und definieren die Abweichungen des Spannungswertes vom Mittelwert der Eigenspannungen I. Art. Sie sind dabei über ein ganzes Korn oder einen Kornabschnitt homogen. Die ebenfalls als Mikro-eigenspannungen bezeichneten Eigenspannungen III. Art sind über kleine Bereiche wie Atomabstände inhomogen und beschreiben in diesen Bereichen die Abweichung der Spannung innerhalb des Kristallits von der Summe der Eigenspannungen I. und II. Art.

Der Zusammenhang zwischen den Eigenspannungen wird in Abbildung 2-9 veranschaulicht. In metallischen Werkstoffen entstehen Makro-eigenspannungen überwiegend während der Bauteilherstellung oder Bearbeitung. Dabei liegt immer eine Kombination zwischen Makro- und Mikro-eigenspannungen vor. Diese Kombination reagiert sehr sensibel auf Veränderungen im Produktions- oder Fertigungsschritt, wodurch eine definierte Aussage über die Größe und Verteilung dieser Spannungen erschwert wird [Mun85]. Wird ein metallisches Bauteil einer Beanspruchung ausgesetzt, überlagern sich die Schub- und Eigenspannungen. Die hierbei entstandene Kombination aus Makro- und Mikro-eigenspannungen kann sich dabei positiv und negativ auf das mechanische Bauteilverhalten auswirken.

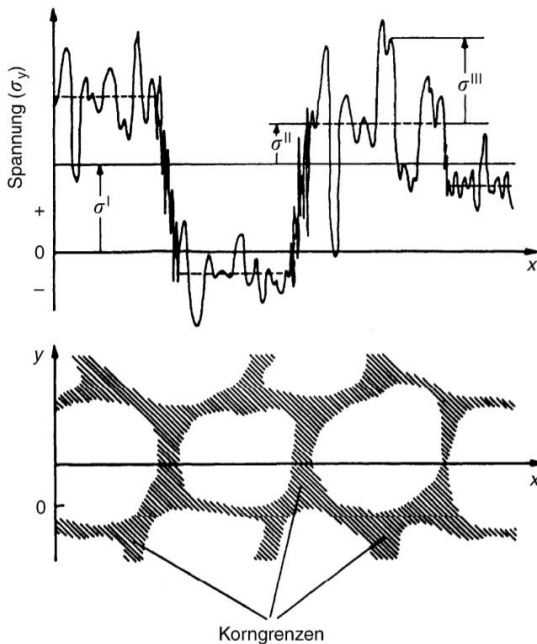


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der Eigenspannungen [Mac73]

2.4.3 Plastische Wechselverformung

Viele Bauteile versagen bei zyklischer Belastung auch dann, wenn die Spannungsamplitude kleiner als die Streckgrenze des Werkstoffes ist. Hierbei werden zwei Fälle unterschieden, die zu einer Materialermüdung und damit zum Versagen des Werkstoffzusammenhalts führen. Erfolgt die Belastungen oberhalb der makroskopischen Fließgrenze spricht man von einer Kurzzeitermüdung (Low Cycle Fatigue - LCF) und bei Belastungen unterhalb der makroskopischen Fließgrenzen von der (Wöhler-) Ermüdung (High Cycle Fatigue - HCF). Während der Kurzzeitermüdung wird eine plastische Wechselverformung hervorgerufen, die zum Werkstoffversagen führt. Das Versagen tritt dabei bereits unter 10^4 Lastwechseln auf und wird zum Beispiel bei der Wechselbiegung von Drähten berücksichtigt [Weg12]. Bei der Wöhlerermüdung, kommt es zu einer Schädigung und Störung der Gitteranordnung. Dies führt zwischen 10^4 und 10^7 Lastwechseln zu einem makroskopischen Anriss, der mit entsprechendem Rissfortschritt bis zu einem Bauteilversagen führt. Die Ursache zyklischer Ermüdung, trotz geringer Belastung, liegt in der Aufsummierung irreversibler Verspannungen im Material, die aus der Bewegung und Überwindung von Hindernissen resultieren. Für die Beurteilung dieser irreversiblen Prozesse ist es deshalb nötig, die Versetzungsstrukturen bei zyklischer Belastung detailliert zu betrachten. Zudem müssen Kenngrößen für die Beurteilung des mechanischen Verhaltens und zur Abschätzung der Bauteillebensdauer gesammelt werden. Dies geschieht in Dauerschwingversuchen mit geeigneten Prüfmaschinen. Dabei werden im einfachsten Fall Spannungs-Wöhlerkurven aufgenommen [Rad07]. Während der Dauerschwingversuche wird die Probe bei einer bestimmten Frequenz zyklisch be- und entlastet. Findet die Beanspruchung mit einer festgelegten Spannungsamplitude σ statt, spricht man von einem spannungskontrollierten und bei einer konstanten Dehnungsamplitude ε von einem dehnungskontrollierten Versuch. Trägt man hierbei die Spannung über der Dehnung auf erhält man eine Hysterese, die abhängig von der plastischen Verformung unterschiedlich ausgeprägt ist.

2 Grundlagen

Eine Beanspruchung, die sich zwischen einer Ober- σ_o und Unterspannung σ_u wiederholt, wird als Schwingbeanspruchung bezeichnet.

Für die Mittelspannung σ_m und die Spannungsamplitude σ_a gilt:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \quad \text{Formel 2-17}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad \text{Formel 2-18}$$

Je nach Lage der Mittelspannung werden mehrere Fälle schwingender Beanspruchung unterschieden. Ein Zusammenhang wird in Abbildung 2-10 veranschaulicht. Bei Schwingbeanspruchungen mit einer konstanten Mittelspannung können Verformungen im Material eine Änderung der Mitteldehnung verursachen. Diese Änderung wird als zyklisches Kriechen bezeichnet. Zyklisches Kriechen kann bereits bei Belastungen unterhalb der Streckgrenze zu irreversiblen mikroplastischen Veränderungen im Kristallgefüge führen. Bei polykristallinen Werkstoffen wird zyklisches Kriechen durch die unterschiedlich orientierten Gleit-ebenen erleichtert [Eic09].

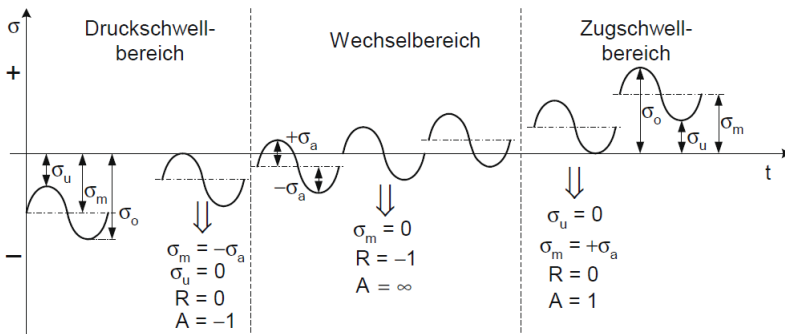


Abbildung 2-10: Spannungs-Zeit-Verläufe mit den kennzeichnenden Spannungswerten gemäß DIN 50100 [Bür14]

2.5 Wechselwirkungen zwischen mech. Ermüdung und magn. Eigenschaften

Die Veränderung des magnetischen Verhaltens von Elektroblechen durch zyklische mechanische Beanspruchung wurde bisher nicht untersucht. In laufenden Forschungsvorhaben wird die mechanische zyklische Ermüdung von Elektroblechen zwar untersucht, konzentriert sich in diesen Arbeiten aber rein auf die mechanische Ermüdung [Bod13]. In weiteren Arbeiten werden zudem der Einfluss des Spannungsverhältnisses und der Temperatur auf die mechanische Ermüdung bewertet [Gao10].

Das magnetische Verhalten von Elektroblechen unter statischer mechanischer Belastung ist dagegen gut dokumentiert [Nau15, Yam15, Noz78, LoB00]. In Zugversuchen werden mit einem in die Prüfmaschine integrierten Single Sheet Tester, die magnetischen Kennwerte bei unterschiedlichen Verformungsgraden gemessen. Die magnetische Charakterisierung der Blechstreifen erfolgt dabei in situ, unter Last und nach der Entlastung [Ior03]. Aus den Ergebnissen der weichmagnetischen Charakterisierung werden vier Bereiche abgeleitet und dem Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve zugeordnet. Die Unterteilung erfolgt in einen perfekt elastischen Bereich, einen makroskopisch elastischen Bereich mit mikroplastischen Verformungsanteilen und zwei plastischen Bereichen nach Überschreiten der makroskopischen Streckgrenze. Hierbei wird bei allen Bereichen, bis auf den perfekt elastischen Bereich, eine Degradation der magnetischen Eigenschaften mit zunehmender Verformung festgestellt. Diese werden zum einen auf eine Beeinträchtigung der Domänenwandbewegung durch Pinning-Effekte und zum anderen auf magnetoelastische Effekte durch mikroskopisch inhomogene Verformungen zurückgeführt [See66a]. In Arbeiten zur plastischen Verformung beim Stanzen [Har14, Hub13], zur plastischen Anisotropie [Hug96] und zur Entwicklung der Domänenstruktur [Hug95] werden weitere Erkenntnisse zu den Degradationsmechanismen mit zunehmender plastischer Deformation gemacht.

Zur Aufklärung der Mechanismen, die für die Hystereseverluste verantwortlich sind, werden für weite Frequenz- und Induktionsbereiche verschiedene Verlustmodelle diskutiert [Ase17, Egg12, Pol99, Van13]. Hierbei ist die Verlustseparation nach Bertotti [Ber88], in dem die dynamischen Ummagnetisierungsverluste in Hysterese-, Wirbelstrom- und Anomalieverluste separiert werden, der gängigste Ansatz.

Im Bereich hoher Flussdichten wirken sich plastische Verformungen deutlich stärker aus und führen zu einer Scherung der Hysteresekurve. Die Scherung wird mit Mikroverspannungen begründet, die neben der höheren Versetzungsdichte wirksam werden [Lan08]. In dieser Arbeit werden nur Spannungsbereiche mit relativ großen plastischen Deformationen bis zu 20 % untersucht, sodass ihre Aussagefähigkeit für Ermüdungsuntersuchungen unterhalb der Streckgrenze beschränkt bleibt.

In weiteren Arbeiten werden Untersuchungen zum Einfluss der plastischen Deformation genutzt, um die Veränderung der Magnetcharakteristik bei der Stanzbearbeitung zu modellieren. Hierbei wurde bei dem untersuchten Elektrobänd in zyklischen Wechselverformungsexperimenten eine Elastizitätsgrenze bei 60 % der Streckgrenze ermittelt. Die magnetischen Eigenschaften der wechselverformten Proben wurden dabei allerdings nicht untersucht [Kas13].

3 Experimentelle Methoden

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der durchgeführten Versuche beschrieben. Bei den Versuchen wurde ein weichmagnetisches Eisen-Silizium Blech Typ Sura M270-35A der Firma Cogent Power untersucht, welches im Rahmen des Projektes „Ermüdung E-Blech“ der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik e. V. [Mro18] zur Verfügung gestellt wurde. Bei dem Material handelt es sich um ein nicht Kornorientiertes Elektroblech mit einer Dichte von 7650 kg/m^3 . Aus der Kennzeichnung M270-35A lassen sich die Ummagnetisierungsverluste bei 50 Hz und $J = 1,5 \text{ T}$ mit $2,70 \text{ W/kg}$ und die Materialdicke von $0,35 \text{ mm}$ ablesen.

In der Literatur ist die Bewertung unterschiedlicher Fertigungsverfahren zur Probenherstellung durchgeführt worden [Hof16]. In dieser Arbeit wurden die Fertigungsverfahren Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden und Stanzen verglichen. Bei den lasergeschnittenen Proben wurde eine stärkere Beeinflussung der magnetischen Eigenschaften beobachtet, die aus der thermischen Beeinflussung des Randgefüges resultiert. Eine ausführlichere Betrachtung des Schnittkanteneinflusses, insbesondere des Stanzeinflusses, wurde in verschiedenen Arbeiten ausreichend behandelt [Nau14, Nau15, Har14, Van13].

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der magnetischen Degradation und weniger an den Kanteneffekten, sodass für die Probenherstellung das Wasserstrahlschneiden gewählt wurde. Aus den zur Verfügung gestellten Blechtafeln wurden taillierte Proben entsprechend der Norm DIN 50125 in Walz- und Querrichtung herausgetrennt. Der vorhandene Grat wurde mit Schmirgelpapier entfernt und die Proben mit Ethanol gereinigt, um die Rostbildung zu unterbinden. Die Maße der verwendeten Probengeometrie werden in Abbildung 3-1 gezeigt.

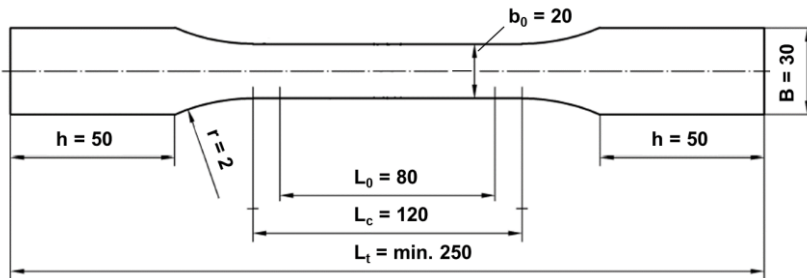


Abbildung 3-1: Taillierte Probengeometrie nach DIN 50125 Probenform H

Die taillierte Probe hat den Vorteil, dass Materialveränderungen nach mechanisch-zyklischer Belastung lokalisiert im taillierten Bereich auftreten und damit der größtmögliche Effekt auf die magnetischen Eigenschaften erwartet werden kann. Die Probe wird daher auch für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften verwendet (vgl. Kapitel 3.1). Die Verwendung der taillierten Probengeometrie hatte die Konzeption eines geeigneten Sensors für die magnetische Charakterisierung zur Konsequenz, welche in Kapitel 3.3 beschrieben wird. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Abläufe der magnetischen Charakterisierung und der Versuchsaufbau der elektrischen Widerstandsmessung erläutert. In Kapitel 3.5 werden die gewählten Schritte der Probenpräparation und abschließend die Methodik der Gefügeanalyse beschrieben.

3.1 Spannungs-Dehnungs Kurve

Die mechanischen Werkstoffkennwerte der Walz- und Querrichtung werden mit quasistatischen Zugversuchen ermittelt. Diese werden an einer Spindelprüfmaschine der Firma UTS Testsysteme GmbH (Typen-Nr.: 010.00) weggeregelt und mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Minute durchgeführt. Zum Festspannen der taillierten Blechproben

werden selbstklemmende Probenhalter verwendet. Aufgrund der endlichen Maschinensteifigkeit, die zu einem nicht unerheblichen Messfehler führen kann, wird die Dehnung direkt an der Probe ermittelt. Hierfür werden Dehnmessstreifen (DMS) Typ: 1-LY41-20/120 der Firma HBM verwendet. Die Probenoberfläche wird mit Isopropanol gereinigt und der Dehnmessstreifen mit dem Schnellklebstoff Z70 der Firma HBM angebracht. Über die gemessene Spannungsänderung des Dehnmessstreifens kann die Dehnung entsprechend Formel 3-1 berechnet werden.

$$\varepsilon = \frac{4 U_A}{k U_E} \quad \text{Formel 3-1}$$

Hierbei ist U_A die Ausgangsspannung, U_E die Eingangs- oder Speisepannung und k ein Proportionalitätsfaktor (k -Faktor), der aus dem Datenblatt des Dehnmessstreifen entnommen werden kann. Der verwendete DMS besitzt einen k -Faktor von 2,04 und ist mit dem Messverstärker (KWS 102.D) der Firma HBM über eine Viertelbrücke verschaltet. Hierfür werden die Kabel des Messverstärkers direkt an dem DMS angelötet. Für eine optimale Verbindung mit den Kontaktfahnen des DMS wird Lötflusmittel verwendet. Bei einer starken Dehnung der Probe löst sich der Dehnmessstreifen von der Probenoberfläche, sodass der restliche Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem Traversenweg ermittelt werden muss.

3.2 Mechanisch-zyklische Beanspruchung

Die mechanisch-zyklische Beanspruchung erfolgt an der servohydraulischen Prüfmaschine Typ VHF 7 der Firma Schenck. Mit einem maximalen Traversenweg von 560 mm bietet die Prüfmaschine nicht ausreichend Platz für lange Proben, Probenhalter und Probenhalterflansche. Bei der gewählten Probe mit einer Länge von 250 mm bleiben insgesamt ca. 400 mm für die Probenhalterung inklusive des Flansches übrig. Eine weitere Bedingung ist zudem, dass die Probenhalterung

wegen der geringen Höhe möglichst steif ist und einen festen Halt bei der mechanischen Zyklisierung gewährleistet. Da keine Standard Probenhalterung diese Rahmenbedingungen erfüllen konnte, wurde eine eigene Probenhalterung konzipiert und extern bei der Fa. Vista Werkzeugbau GmbH gefertigt. Die Probenhalterung wurde, um Platz zu sparen, so entworfen, dass sie ohne Flansch an der Prüfmaschine befestigt werden kann. Die Spannkraft wird über zwei miteinander verschraubte elastische Gelenke erzeugt (vgl. Abbildung 3-2 a)). Zwischen diesen werden Keile eingesetzt, die eine geriffelte Oberfläche besitzen und je nach Probendicke ausgetauscht werden können (vgl. Abbildung 3-2 b)).

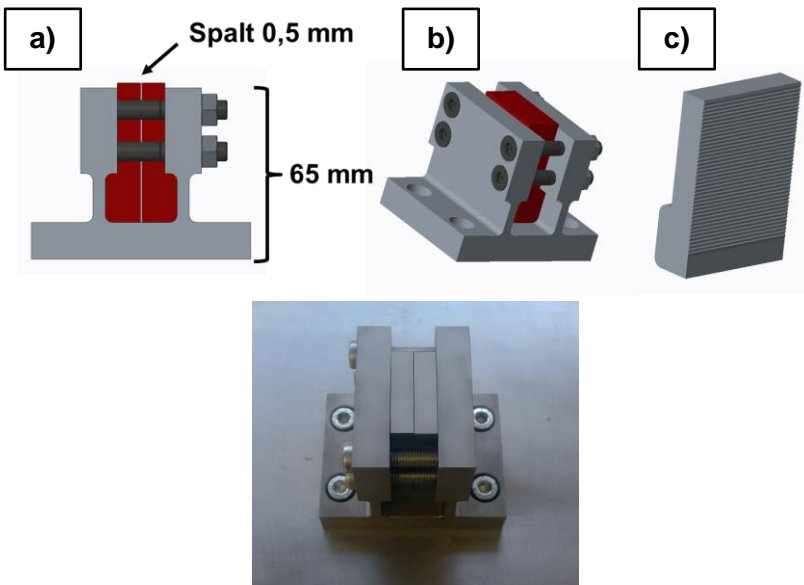


Abbildung 3-2: a) CAD-Modell der konzipierten Probenhalterung für die mechanische Zyklisierung von Blechstreifen, b) CAD-Modell des Keils für die Probeneinspannung und c) gefertigte Spannpacke

Für die verwendete Blechprobe wurden die Keile so ausgelegt, dass Blechproben mit einer Breite von maximal 40 mm und einer Probendicke von maximal 0,5 mm eingebaut werden können. Die Probenhalter wurden aus dem Stahl 42CrMo gefertigt, welche bei Bauteilen mit hohen Zähigkeitsanforderungen zum Einsatz kommen. Für die Keile wurde das Material X153CrMoV12 gewählt, welches vor allem bei Schneid- und Stanzwerkzeugen verwendet wird. In Abbildung 3-2 c) wird die gefertigte Probenhalterung gezeigt. Die Ausrichtung der Probenhalterung an der Prüfmaschine erfolgte mit einem massiven Balken aus Stahl, der genau zwischen die elastischen Gelenke geklemmt wurde. In diesem Zustand wurden die Probenhalter mit der Prüfmaschine verschraubt, damit diese keinen Versatz besitzen und ein einachsiger Spannungszustand gewährleistet wird. Die Probe wird seitlich zwischen die Keile geschoben. Zum Positionieren der Probe in den Probenhalterungen dient eine markierte Mittellinie auf der Probenoberfläche und die Markierung der Mitte auf der Probenhalterung. Ist die Probe sauber ausgerichtet werden die Schrauben zum Fixieren festgezogen.

3.2.1 Spannungskontrollierte mechanische Zyklisierung

Die mechanische Zyklisierung wird in Walz- und Querrichtung im Zug-schwellbereich durchgeführt. Dies erfolgt kraftgeregelt mit 100 Hz und dauert bei 10^8 Zyklen ca. 11 Tage und 14 Stunden. Die Steuerung der Versuche erfolgt über die Software Test & Motion der Firma DOLI Elektronik GmbH. Als Oberspannungen σ_o werden Lastniveaus unterhalb der im Zugversuch ermittelten Streckgrenze R_{eS} gewählt. Die Unterspannung σ_u wurde so gewählt, dass die Probe beim Einschwingen ausschließlich auf Zug beansprucht wird. Die Regelung braucht die ersten Zyklen zum Einschwingen bis die Oberspannung erreicht wird. Zu niedrige Unterspannungen führten dazu, dass die Probe zu schwingen anfängt und die Schwingung von der Regelung nicht mehr aufgefangen werden kann. Durch die Schwingung werden die Lastniveaus wiederum nicht sauber angefahren und es kommt zu undefinierbaren

Belastungszuständen. Die mechanische Zyklisierung startet bei der Mittelspannung, die mit 100 N pro Sekunde angefahren wird. Die Belastung erfolgt sinusförmig mit einer definierten Spannungsamplitude σ_a , die je nach gewählter Ober- und Unterspannung festgelegt wird. Die Versuche wurden mit einer aktivierten Peak-Control durchgeführt, die verhindert, dass die Oberspannung überschritten wird. Nach dem Erreichen der angegebenen Zyklenzahl fährt die Prüfmaschine in den Ausgangszustand auf eine Belastung von 0 N zurück.

3.2.2 Dehnungskontrollierte mechanische Zyklisierung

Gegenüber der spannungskontrollierten mechanischen Zyklisierung wird die Blechprobe bei der dehnungskontrollierten Zyklisierung mit einer konstanten Dehnungsamplitude ε_a belastet. Der Ablauf des Versuchs erfolgt analog dem Vorgehen der spannungskontrollierten mechanischen Zyklisierung. Dabei erfolgt die Regelung über einen mittig auf der Probe in Belastungsrichtung applizierten Dehnmessstreifen (DMS). Der DMS fungiert in diesem Fall als Sensor, für den geeignete Regelparameter eingestellt werden mussten. Die Verschaltung des DMS mit dem Messverstärker erfolgt über eine Viertelbrücke, bei welcher der DMS durch drei passive Widerstände ergänzt wird [Hof87]. Der DMS wurde hierfür mit zwei Kabeln des Messverstärkers verlötet. Damit der DMS beim Löten nicht beschädigt wird, wurden für die Kontaktierung Lötstützpunkte und Verbindungsdrähte verwendet. Für eine optimale Verlotung wurde Lötflussmittel eingesetzt.

Eine taillierte Probe mit angebrachten DMS für die dehnungskontrollierte mechanische Zyklisierung wird in Abbildung 3-3 gezeigt. In der Messsoftware müssen statt der Mittelspannung σ_m und der Spannungsamplitude σ_a , die Ausgangsspannungen angegeben werden. Da der Zugversuch auch mit dem gleichen ebenfalls über eine Viertelbrücke verschalteten Dehnmessstreifen durchgeführt wird, kann die gemessene Ausgangsspannung für die dehnungskontrollierte Belastung genutzt werden.

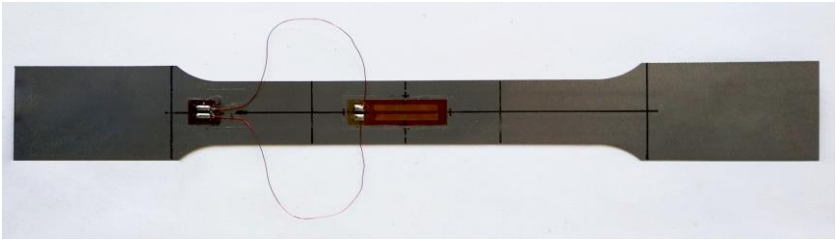


Abbildung 3-3: Taillierte Probe mit Dehnmessstreifen für dehnungskontrollierte mechanische Zyklisierung

3.3 Weichmagnetische Charakterisierung mit einem Single Sheet Tester

Standard Single Sheet Tester (SST) sind für die magnetische Charakterisierung von Blechtafeln ausgelegt. In der Regel haben die verwendeten Blechtafeln einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 150 bis 500 mm. Die Messung von Blechstreifen mit einer deutlich geringeren Querschnittsfläche ist möglich, erfordert jedoch einen konstanten Probenquerschnitt im Messbereich. Hierbei muss auch beachtet werden, dass der Durchmesser der Sekundärspule für die Breite der Tafel ausgelegt wurde. Beim schmaleren Streifen geht dadurch Auflösungsvermögen verloren. Um dennoch ein hohes Auflösungsvermögen zu erzielen wird die interne Sekundärspule durch eine, um den Blechstreifen mit Kupferdraht gewickelte Spule, ersetzt. Das Wickeln erfolgt per Hand, wodurch Wicklungsfehler entstehen können, die wiederum die Reproduzierbarkeit einschränken und zu Messungenauigkeit führen.

Aus den genannten Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein angepasster Sensor entworfen mit dem zum einen taillierte und zum anderen unbewickelte Blechstreifen charakterisiert werden können. Da der vorhandene Messschrank MPG200 der Firma Brockhaus Messtechnik weiterverwendet werden sollte, wurde Brockhaus mit der Fertigung des Sensors beauftragt. Der erstellte Entwurf des Sensors wird in

Abbildung 3-4 zeigt. Bei diesem Messsensor wird die Probe vertikal platziert, damit dieser bei Bedarf an einer Prüfmaschine betrieben werden kann. Die Jochhälften sind auf einer Trägerplatte angebracht und über eine Linearführung verschiebbar. Bei Bedarf können diese auch vollständig entnommen werden. Damit das Joch im taillierten Bereich der Probe angebracht werden kann, besitzt es eine Abmessung von 30 x 60 mm und Polflächen mit der Abmessung von 30 x 10 mm. Zum Fixieren des Jochs werden vier Federn verwendet. Im Spulenkörper des Sensors sind die Erreger- und Messspule untergebracht. Diese besitzen jeweils 120 Windungen, sodass Charakterisierungen mit Messfrequenzen bis 1 kHz und Polarisierungen bis 2,0 T durchgeführt werden können. Die Luftflusskompensation erfolgt analog über eine Kompensationswicklung, die zwischen Messsensor und Steuerschrank angebracht ist. In Abbildung 3-5 a) ist der Spulenkörper des fertiggestellten Sensors zu sehen. Damit der Sensor auch außerhalb der Prüfmaschine verwendet werden kann, wurde er auf einem Stativ angebracht (vgl. Abbildung 3-5 b)). Die Probe wird von oben in den Sensor geschoben und mit den Jochhälften festgespannt. Für eine exakte Positionierung wurde auf dem Joch die Mittellinie markiert und ein Anschlag aus Kunststoff angebracht. Abbildung 3-5 c) zeigt den Sensor mit eingelegter Probe und geschlossenem Joch.

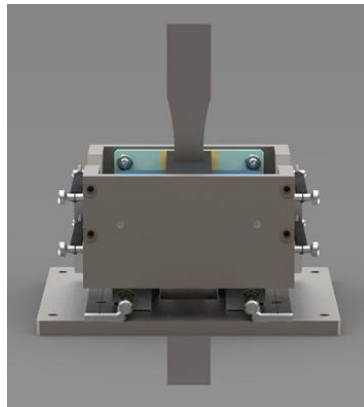
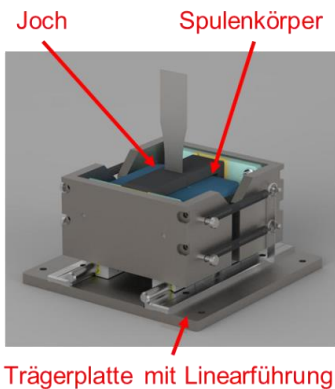


Abbildung 3-4: CAD-Modell des Messensors für die magnetische Charakterisierung von taillierten Blechproben

3.3 Weichmagnetische Charakterisierung mit einem Single Sheet Tester

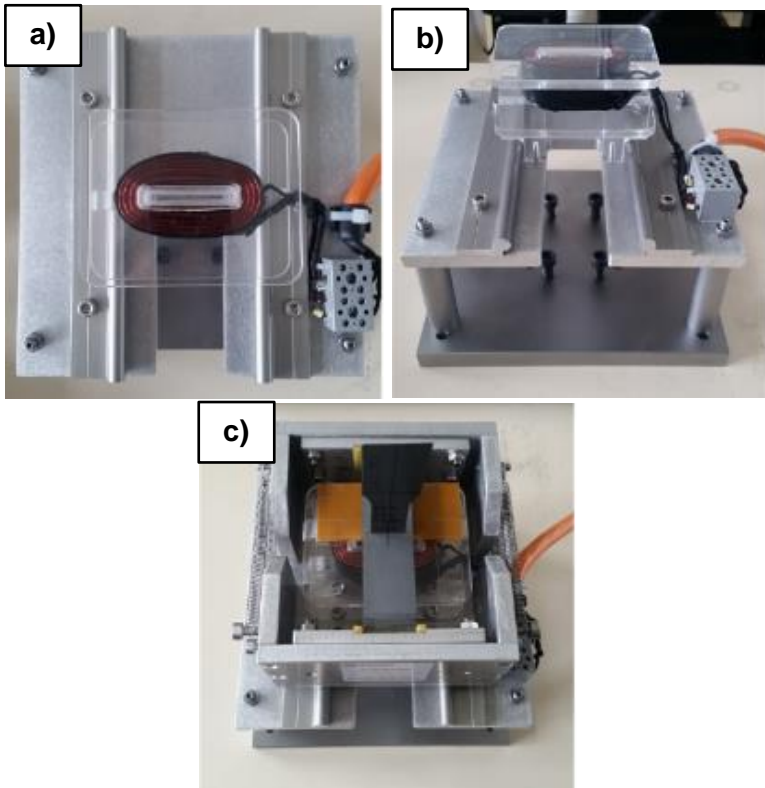


Abbildung 3-5: a) Messsensor für die Charakterisierung von taillierten Blechstreifen: Draufsicht des Spulenkörpers, b) Sensor mit entfernten Jochhälften und c) Sensor mit geschlossenem Joch und eingespannter Probe

Für die Durchführung der Messungen wurde die Brockhaus Software MPG-Expert Version 2.6.7.7 verwendet. Hierbei wurden die statischen Hysteresen, die Kommutierungskurven und die dynamischen Ummagnetisierungsverluste gemessen. Relevante Größen, die in der Software eingestellt werden müssen, sind die Windungszahlen der Primär- (N_1) und Sekundärspule (N_2), deren elektrische Widerstände $R_{N1} = 0,6 \Omega$ und $R_{N2} = 22,6 \Omega$ sowie die magnetische Länge $L_m = 0,044 \text{ m}$.

Des Weiteren müssen für die Probenkenndaten die Breite $b = 20$ mm, die Höhe $h = 0,35$ mm, die Probenlänge $L = 250$ mm und die Dichte 7650 kg/m³ angegeben werden. Die verwendeten Messparameter werden in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

3.3.1 Messung der Kommutierungskurve

Die Maximalpermeabilität μ_{\max} kann zum einen aus der Neukurve und zum anderen aus der Kommutierungskurve berechnet werden. Die Messung der Neukurve erfolgt aus dem unmagnetisierten Zustand bei $H = 0$ A/m, wohingegen die Messung der Kommutierungskurve aus dem gesättigten Zustand beginnt. Hierbei werden für abnehmende Polarisierungen mehrere Hysteresen gemessen und die Eckpunkte verbunden. Die Verbindungslinie wird als Kommutierungskurve bezeichnet und ist nahezu identisch mit der Neukurve. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kommutierungskurven gemessen. Kleinste Defekte haben direkte Auswirkungen auf die Domänendynamik und führen zu einer Zunahme der Hysteresefläche. Bei der Kommutierungskurve werden mehrere Hysteresekurven gemessen, sodass der Einfluss von Defekten am meisten zum Tragen kommt [Kne62, Mor01].

Vor der Messung der eigentlichen Kommutierungskurve wird eine kleinere Kommutierungskurve gemessen, die zum Entmagnetisieren des Materials dient. Bei dieser Messung werden mehrere abnehmende Hysteresen bis nahezu $J = 0$ T gemessen, sodass das Material keine Magnetisierung aufweist. Dieser Zustand bildet den Ausgangszustand für die eigentliche Messung der Kommutierungskurve. In der Software werden für die Messungen die Messgeschwindigkeit, die Abtastrate, die Anzahl der Messpunkte und das Zielkriterium definiert. Als Zielkriterium kann eine definierte Feldstärke H oder eine definierte Polarisation festgelegt werden. Die Messung der Entmagnetisierungskurve erfolgt mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit und weniger Messpunkten, da die Messgenauigkeit hier irrelevant ist. In Tabelle 3-1 werden die Messparameter der Entmagnetisierungs- und der Kommutierungskurve aufgelistet.

	Entmagnetisierungs- kurve	Kommutierungs- kurve
Messgeschwindigkeit [mT/s]	50	20
Abtastrate [ms]	500	500
Messpunkte	50	100
Zielkriterium H [A/m]	2.000	2.500 und 25.000

Tabelle 3-1: Parameter für die Messung der Kommutierungskurven

Die Kommutierungskurve wird mit 100 Messpunkten bis zu einer Feldstärke $H = 25.000 \text{ A/m}$ gemessen und die Maximalpermeabilität hieraus berechnet.

3.3.2 Statische Hysterese-messung

Aus den Messungen der statischen Hysterese lassen sich die Kennwerte Remanenz J_r , Koerzitivfeldstärke H_c , und die Hystereseverluste E_{hyst} ermitteln. Die Messung der Hysterese erfolgt bis zum Erreichen einer definierten Feldstärke $H = 10.000 \text{ A/m}$ oder einer definierten Polarisation von $J = 1 \text{ T}$. Die Messung bei gleicher Feldstärke H wird für die Ermittlung der Sättigungspolarisation und die Messung bei gleicher Polarisation J für den Vergleich der Materialzustände genutzt. Die Sättigungspolarisation hat einen direkten Einfluss auf die Hysterese-fläche sowie die Remanenz, was bei einem Vergleich der Materialzustände berücksichtigt werden muss. Bei der Messung mit gleicher Polarisation erfolgt die Bestimmung der Hysterese deutlich vor dem Abknicken in den gesättigten Bereich bei ca. 1 T , wodurch sich die statischen Hystereseverluste optimal vergleichen lassen. J_r und H_c werden aus dem Mittelwert von $+J_r$ und $-|J_r|$ bzw. $+H_c$ und $-|H_c|$ berechnet.

Wie bei den Messungen der Kommutierungskurve wird das Material bei den Messungen der Hysterese-kurven mit einer kleinen Kommutierungskurve entmagnetisiert.

Die Messparameter der Hysteresemessung werden in Tabelle 3-2 aufgelistet. Die Kennwerte J_r , H_c und E werden direkt von der Software ausgewertet und in einer Excel-Datei gespeichert.

	Entmagnetisierungskurve	Hysterese bei 1 T	Hysterese bei $H = 10.000$ A/m
Messgeschwindigkeit [mT/s]	50	40	40-50
Abtastrate [ms]	500	500	500
Messpunkte	50	-	-
Zielkriterium	2.000 A/m	1 T	10.000 A/m

Tabelle 3-2: Parameter für die Messung der statischen Hysterese

3.3.3 Messung der Ummagnetisierungsverluste

Neben den statischen Kennwerten zählen die dynamischen Ummagnetisierungsverluste P_s oder Eisenverluste zu den entscheidenden weichmagnetischen Materialkennwerten. Sie geben den Energieverbrauch für sich stetig verändernde Magnetisierungen im Material an und sind daher bei der Auslegung von weichmagnetischen Bauteilen von großer Wichtigkeit. Für eine genaue Bewertung des Einflusses der mechanischen Zyklisierung auf die Ummagnetisierungsverluste werden diese für die Polarisierungen 0,2 - 1,6 T sowie mit den Frequenzen 50, 100, 200, 400 und 1.000 Hz gemessen. Damit die Messungen aus einem definierten Ausgangszustand beginnen, wird das Material erst entmagnetisiert, indem vorgeschaltete Polarisierungen $J = 1,5, 1,0$ und $0,5$ T gemessen werden. Bei den Messpunkten ist der Formfaktor $FF = 1,1107$ des Sinusspannungssignals das Gütekriterium für die Messgenauigkeit und sollte die Fehlertoleranz von 0,1 % nicht überschreiten. Damit dieser eingehalten wird, sind geeignete Regelparameter (P und I) für die Regelung des Spannungssignals U und der Polarisierung J für die verwendeten Messfrequenzen notwendig.

Zudem kann mit der Erhöhung des Abbruchkriteriums bei niedrigen Messfrequenzen die Messgeschwindigkeit gesteigert werden. Eine Auflistung der verwendeten Regelparameter und der gewählten Abbruchkriterien ist in Tabelle 3-3 zu sehen.

Frequenz [Hz]	P(x) U	I(x) U	P(x) J	I(x) J	Abbruchkriterium
50	3,6	1,6	2,2	1,6	0,003
100	2,2	1,4	1,6	1,4	0,001
200	2	1	1	1	0,001
400	1,4	0,6	0,6	0,6	0,001
1.000	1,2	0,6	0,6	0,6	0,001

Tabelle 3-3: Regelparameter für die Messung der Ummagnetisierungsverluste

3.4 Elektrische Widerstandsmessung

Der elektrische Widerstand der taillierten Blechstreifen wurde mit dem Vierpunktmessverfahren bestimmt. Dabei wurde auf der Probe über zwei Schrauben der Strom aufgeprägt und die elektrische Spannung zwischen den zwei innen liegende Spannungsschneiden abgegriffen. Unter Verwendung des Ohm'schen Gesetzes kann aus dem gemessenen Spannungsabfall zwischen den Spannungsschneiden der elektrische Widerstand R_{el} berechnet werden. In Abbildung 3-6 ist Aufbau der Widerstandsmessung für die taillierte Blechprobe zu sehen. Über Teflonhalterungen werden die Schrauben auf der Probenoberfläche aufgebracht. Die Teflonhalterungen wurden auf einer Metallschiene fixiert, sodass der Abstand zwischen den Messspitzen beim Probenwechsel unverändert bleibt und eine Reproduzierbarkeit der Widerstandsmessung gewährleistet wird. Für eine ausreichende Kontaktierung zwischen Schrauben und Blechprobe wurde vor der Messung der Isolierlack im Messbereich mit Schmirgelpapier entfernt. Die Bestimmung des Widerstandes wurde über ein LabView Programm gesteuert.

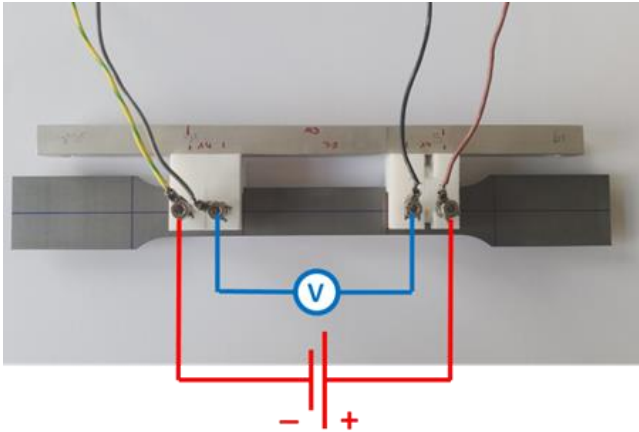


Abbildung 3-6: Aufbau der Widerstandsmessung mittels Vierpunktmessverfahren

Dabei erfolgte die Messung der Spannung für einen Bereich von -0,1 bis 0,1 A mit 10 Messpunkten. Dabei wurden ein Keithley 2000 Multi-Meter für die Messung der Spannung und das programmierbare Keithley 220 als Stromquelle verwendet. Aus den Messpunkten wird die Strom-Spannungs-Kennlinie erstellt und der elektrische Widerstand aus der Steigung ermittelt.

Für eine Vergleichbarkeit mit unterschiedlichen Querschnitten wird der spezifische elektrische Widerstand ρ_e berechnet. Die Berechnung erfolgt mit dem gemessenen Widerstand R_{el} , der Querschnittsfläche A und der Messstrecke zwischen den Spannungsspitzen L entsprechend Formel 3-2.

$$\rho_e = R_{el} \frac{A}{L} \qquad \text{Formel 3-2}$$

Für die untersuchte Probengeometrie beträgt die Querschnittsfläche $A = 7 \text{ mm}^2$ und die Länge zwischen den Spannungsspitzen $L = 75 \text{ mm}$.

3.5 Probenpräparation und Mikrostrukturanalyse

Aus der Blechprobe werden rechteckige Proben mit den Maßen 15 x 10 mm an der Diamantdrahtsäge herausgetrennt. Dabei wird eine Drahtgeschwindigkeit von 1,4 m/s und ein niedriger Vorschub gewählt. Zur Reinigung werden die Proben nach dem Heraustrennen mit Isopropanol gereinigt. Die Schnittflächen werden an einer manuellen Poliermaschine von eventuellen Graten befreit und erneut mit Isopropanol in einem Ultraschallgerät gereinigt.

Für die Herstellung von Flach-, Quer- und Längsschliffen werden die Proben zum Einbetten in 25 mm Formen platziert. Dabei werden die Proben für den Quer- und Längsschliff mit Positionierspiralen fixiert. Zum Einbetten wird ein flüssiges Einbettmittel bestehend aus Einbettharz und Härter (EpoThin2 der Fa. Bühler) verwendet. Die frisch eingebetteten Proben werden für fünf Minuten in einen Vacuumexsikkator gelegt, um die Luftbläschen zu entfernen. Die eingebetteten Proben werden zum Aushärten für etwa 12 Stunden unter einen Abzug gelegt. Nach dem Ausbetten erfolgte die Politur an einer automatischen Poliermaschine Saphir 550 der Firma ATM. Für die Politur wird die in Tabelle 3-4 aufgelistete Polieroutine verwendet. Mit dem ersten Polierschritt wird primär das Einbettmittel entfernt.

3 Experimentelle Methoden

Schleifpapier/ Poliertuch	Wasser/ Suspension	Anpress- druck [N]	U/min	Dauer [min]
SiC 800	Wasser	2	150	1
SiC 1.200	Wasser	2	150	1
SiC 2.500	Wasser	2	150	1
SiC 4.000	Wasser	2	150	1
9 µm Zeta blau	Suspension, Öl-Basis	1,7-2	150	2
3 µm Zeta blau	Suspension, Öl-Basis	1,7-2	150	2
1 µm Zeta blau	Suspension, Öl-Basis	1,7-2	150	1,5 - 2
0,25 µm Zeta blau	Suspension, Öl-Basis	1,7-2	150	1,5 - 2

Tabelle 3-4: Politurroutine für Weichmagneten

Nach jedem Polierschritt werden die Proben mit Isopropanol in einem Ultraschallbad gereinigt und unter einem Olympus AX70 Lichtmikroskop auf vorhandene Kratzer untersucht. Der letzte Polierschritt wird hierbei mehrmals wiederholt, bis nahezu alle Kratzer entfernt wurden.

Die Mikrostrukturanalyse wird mit einem FEI Nova NANOSEM 450 Rasterelektronenmikroskop (REM) im Niedrigvacuum-Modus durchgeführt. Hierfür werden die polierten Proben auf Probenstellern mit doppelseitigem Klebeband angebracht. Weil das Einbettmittel nicht elektrisch leitfähig ist wird die Oberfläche mit Kupferband umklebt und mit der Probe kontaktiert, um die mit dem Elektronenstrahl eingebrachte Ladung abzuführen. Die Aufnahmen wurden mit einer Spannung von 30 kV und sehr geringen Belichtungszeiten von 7 bis 14 ms durchgeführt. Durch die hohe Vergrößerung und hohe Spannungen kommt es zu einer Aufladung der Probe und zum Wandern des Bildes. Das REM besitzt zusätzlich einen e-Flash Detektor der Firma Bruker für die Messung der Textur mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD). Bei den EBSD Messungen wurde eine geringe Auflösung gewählt, um die Aufnahmedauer zu verkürzen und damit die Driftproblematik des Bildes zu unterbinden oder möglichst gering zu halten.

4 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Spannungs-Dehnungs-kurve aufgeführt. Die ermittelte Streckgrenze bildet die Basis für die maximalen Spannungsniveaus der mechanisch-zyklischen Belastung. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden magnetische Kennwerte im Ausgangszustand vorgestellt. Auf diese folgen die Ergebnisse der magnetischen Charakterisierung nach spannungskontrollierter mechanisch-zyklischer Belastung für beide Orientierungen. Um die Wichtigkeit für praktische Anwendung einschätzen zu können, wurde die Zyklisierung für repräsentative Lastniveaus dehnungskontrolliert durchgeführt. Zudem wurden auch weitere Einflüsse wie die Temperatur oder wechselnde Spannungsverhältnisse analysiert. Für die Bewertung der elektro-magnetischen Ergebnisse hinsichtlich materialwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten wurden die Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) eingesetzt. Die transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) von Herrn Prof. Dr. Schneider und Herrn Fotouhi durchgeführt. Die Auswertung der durchgeführten Untersuchungen wird am Ende dieses Kapitels vorgestellt.

4.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Für die genaue Messung des elastischen Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde die elastische Dehnung mittels Dehnmessstreifen gemessen und der restliche Verlauf der Spannungs-Dehnungs-kurve mit dem Traversenweg vervollständigt. In Abbildung 4-1 sind die zusammengesetzten Messkurven in Walz- und Querrichtung zu sehen. Die gepunktete Linie repräsentiert die Messung mit den DMS und die durchgezogene Linie die Messung über den Maschinenweg.

4 Experimentelle Ergebnisse

Beim Vergleich der Orientierungen ist in Walzrichtung eine etwas geringere Streckgrenze R_{eS} sowie auch eine geringere Zugfestigkeit R_m zu erkennen. Der E-Modul liegt in beiden Richtungen bei ca. 179 GPa. Die mechanischen Kennwerte für die Walz- und Querrichtung werden in Tabelle 4-1 gegenübergestellt.

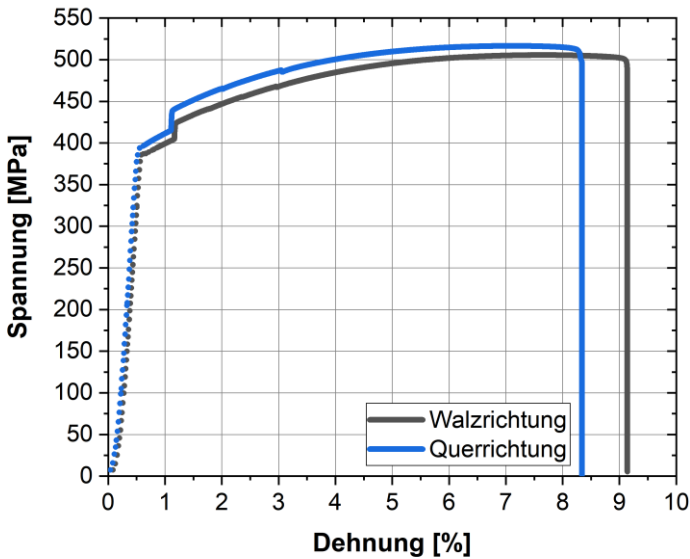


Abbildung 4-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Walz- und Querrichtung

	E-Modul [GPa]	Streckgrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Totaldehnung [%]
Walzrichtung	179,2	392,4	505,7	9,2
Querrichtung	179,3	399,7	521,8	8,4

Tabelle 4-1: Mechanische Kennwerte in Walz- und Querrichtung

4.2 Magnetische Charakterisierung im unbelasteten Zustand

Die taillierten Blechproben wurden vor dem Zyklieren im unbelasteten Zustand magnetisch charakterisiert. Abbildung 4-2 zeigt den Verlauf der Kommutierungskurven der Walz- und Querrichtung. Der Vergleich beider Kurven zeigt eine geringere Sättigungspolarisation in Querrichtung. Bei 25.000 A/m beträgt die Sättigungspolarisation in Walzrichtung (WR) 1.84 T und in Querrichtung (QR) 1,81 T. Aus der Steigung der Kommutierungskurve wird die relative Permeabilität μ_r berechnet (rote Linien in Abbildung 4-2). Aus dem Verlauf der relativen Permeabilität lässt sich die Maximalpermeabilität μ_{\max} ablesen. Diese liegt in Walzrichtung bei $\mu_{\max, WR} = 15.400$ und in Querrichtung bei $\mu_{\max, QR} = 11.800$. Zusätzlich zu den Kommutierungskurven wurden Hysteresemessungen durchgeführt. Diese wurden zum einen bis zu einer Feldstärke von 10.000 A/m (vgl. Abbildung 4-3) und zum anderen bis zu einer Aussteuerung von 1 T (vgl. Abbildung 4-4) gemessen. Ein Vergleich der Messungen bei gleicher Feldstärke zeigt, dass die Sättigungspolarisation in Walzrichtung höher ist als die Sättigungspolarisation in Querrichtung. Hierbei wurde in Walzrichtung eine minimal größere Remanenz J_r als in Querrichtung gemessen.

4 Experimentelle Ergebnisse

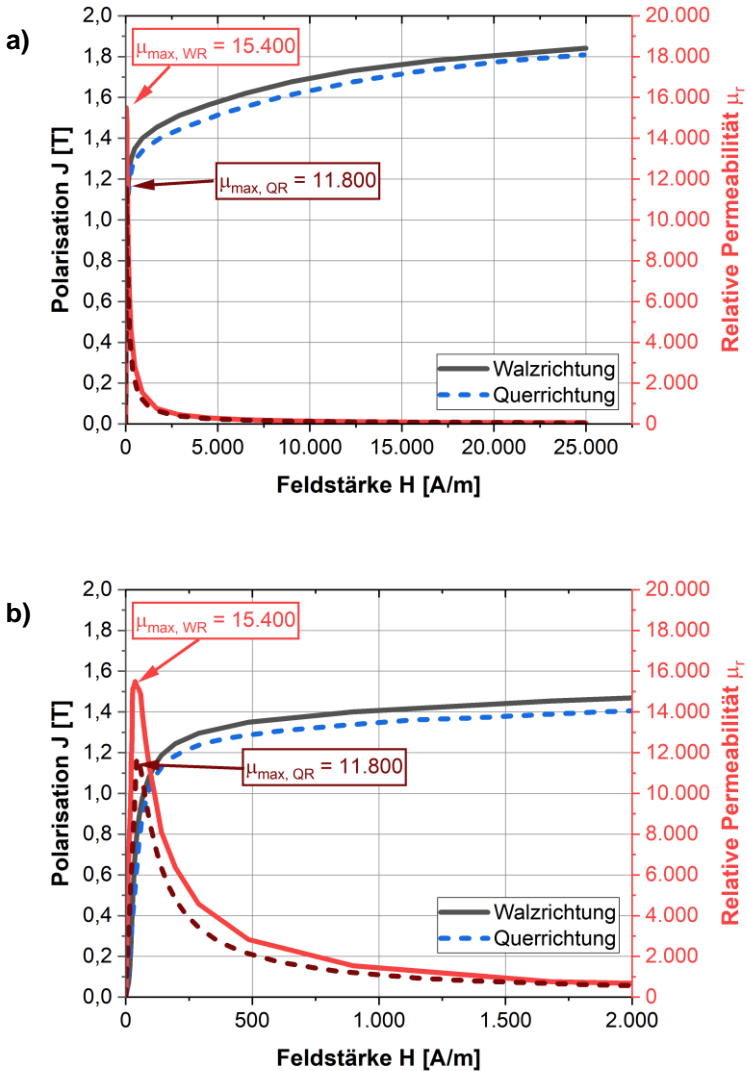


Abbildung 4-2: Kommutierungskurven in Walz- und Querrichtung und daraus berechnete relative Permeabilität für den gesamten untersuchten Feldstärkebereich a) und für den Bereich kleiner Feldstärken b)

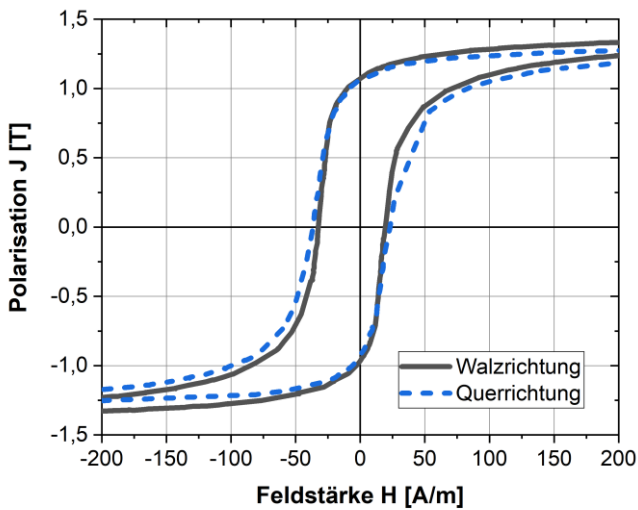
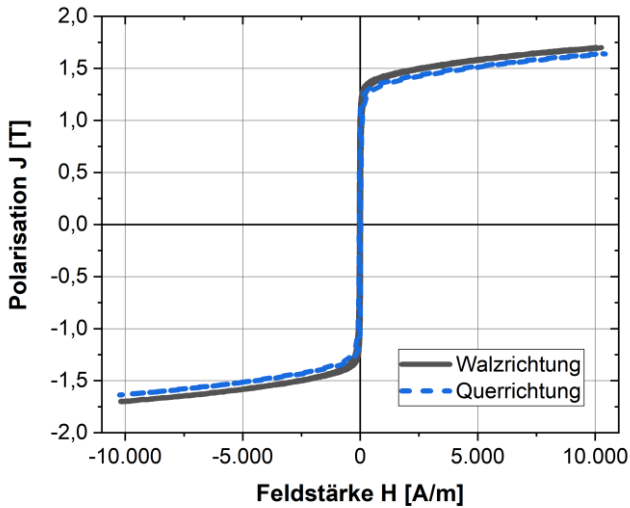


Abbildung 4-3: Hysteresekurven in Walz- und Querrichtung bei gleicher Feldstärke. Komplette Kurven (oben) und vergrößerter Ausschnitt (unten)

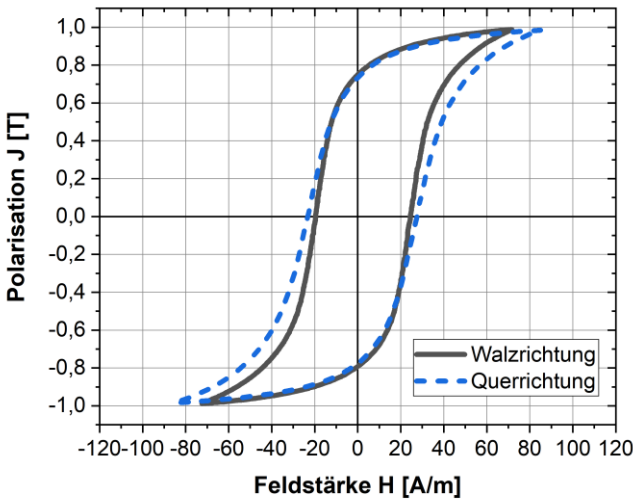


Abbildung 4-4: Hysteresekurven in Walz- und Querrichtung bei gleicher Polarisation

Diese liegt in Walzrichtung bei $J_{r, WR} = 1,1 \text{ T}$ und in Querrichtung bei $J_{r, QR} = 1,0 \text{ T}$ (Mittelwerte aus $+J_r$ und $-J_r$, vgl. Kapitel 3.3.2). Die Hysterese ist in Walzrichtung schmaler als in Querrichtung und besitzt folglich eine kleinere Koerzitivfeldstärke H_c . In Walzrichtung wurde eine Koerzitivfeldstärke von $H_{c, WR} = 26 \text{ A/m}$ und in Querrichtung von $H_{c, QR} = 30,7 \text{ A/m}$. Ein Vergleich des Hystereseverlustes bei den Messungen mit einer definierten Feldstärke ist nicht zielführend, da diese entscheidend von der Sättigungspolarisation abhängen. Für die geeignete Bewertung der Hystereseverluste müssen diese bei gleicher Aussteuerung betrachtet werden (vgl. Abbildung 4-4). Als maximale Aussteuerung wurde hierfür $J = 1 \text{ T}$ gewählt, da das Material bei dieser Polarisation noch nicht in den Sättigungsbereich übergeht. Ein Vergleich der Orientierungen zeigt, dass in Querrichtung eine höhere Feldstärke benötigt wird, um die Polarisation $J = 1 \text{ T}$ zu erreichen. Unter Berücksichtigung der höheren Koerzitivfeldstärke ergeben sich daraus

auch höhere Hystereseverluste in Querrichtung $E_{h, 1 T, QR} = 12,9 \text{ mJ/kg}$ als in Walzrichtung $E_{h, 1 T, WR} = 10,3 \text{ mJ/kg}$. Die höheren Hystereseverluste tragen wiederum auch zu höheren Ummagnetisierungsverlusten P_s bei, welche sich aus den bereits besprochenen statischen Hystereseverlusten, den Wirbelstromverlusten und den Anomalieverlusten zusammensetzen. In Abbildung 4-5 sind die Ummagnetisierungsverluste logarithmisch über der Polarisation für die Frequenzen 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz und 1.000 Hz aufgetragen. Zum einen ist mit steigender Polarisation und zum anderen mit steigender Frequenz eine Zunahme der Ummagnetisierungsverluste zu beobachten. Die Ummagnetisierungsverluste in Querrichtung sind nur unwesentlich höher und fallen mit steigender Frequenz mit denen in Walzrichtung zusammen. Das liegt an den mit steigender Frequenz zunehmenden Wirbelstromverlusten, welche die Hystereseverluste überlagern.

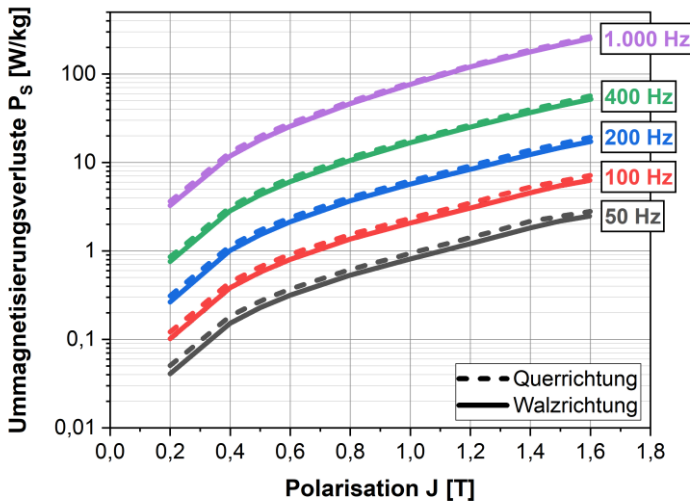


Abbildung 4-5: Ummagnetisierungsverluste in Walz- und Querrichtung in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklisierung

Die zyklische Belastung erfolgte im Zugschwellbereich spannungskontrolliert auf Belastungsniveaus unterhalb der im Zugversuch ermittelten Streckgrenze (vgl. Kapitel 4.1). Als Oberspannung wurden die Spannungen bei 60, 65, 70, 75, 80 und 85 % der Streckgrenze gewählt. Die Unterspannung blieb dabei konstant bei 27 MPa. In Tabelle 4-2 werden die verwendeten Oberspannungen der untersuchten Lastniveaus aufgelistet. Die Zyklisierung erfolgte in Etappen beginnend bei 10^2 Zyklen bis maximal 10^8 Zyklen. Die Proben wurden hierfür zuerst im unbelasteten Zustand und dann nach den einzelnen Etappen aus der Prüfmaschine ausgespannt und magnetisch charakterisiert. Nach der magnetischen Charakterisierung wurden die Proben erneut in der Prüfmaschine eingebaut und weiter zyklisiert. Bei den Messungen wurden bei jeder Etappe die Kommutierungskurve, die Hysterese und die Ummagnetisierungsverluste gemessen. In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der magnetischen Charakterisierung nach der mechanisch-zyklischen Belastung vorgestellt.

	60 % R_{es} [MPa]	65 % R_{es} [MPa]	70 % R_{es} [MPa]	75 % R_{es} [MPa]	80 % R_{es} [MPa]	85 % R_{es} [MPa]
Walz- richtung	235,4	255,1	274,7	294,3	313,9	333,5
Quer- richtung	239,8	259,8	279,8	299,8	319,8	339,7

Tabelle 4-2: Oberspannungen der Belastungsniveaus

4.3.1 Kommutierungskurve

Für die Bewertung der Auswirkungen der mechanisch zyklischen Beanspruchung auf die Sättigungspolarisation wurden die Kommutierungskurven bis zu einer maximalen Feldstärke von 25.000 A/m gemessen (vgl. Abbildung 4-6, oben). Für das 85 % R_{eS} Lastniveau wurde die Probe nach 10^3 und 10^4 Zyklen charakterisiert. Im Anfangsbereich bis $H = 5.000$ A/m ist mit steigender Zyklenanzahl eine irreversible Veränderung der Kommutierungskurve zu erkennen. Die Kurven zeigen nach 10^3 und 10^4 Zyklen ein deutliches Abflachen der Steigung. Beim Vergleich der Sättigungspolarisationen ist kein signifikanter Unterschied feststellbar. Da die steigende Zyklenanzahl sich ausschließlich auf den Anfangsbereich auswirkt, wurden die Messungen der Kommutierungskurven auf Feldstärken bis 2.500 A/m beschränkt. In Abbildung 4-6 (unten) wird der Verlauf der Kommutierungskurven für das 85 % R_{eS} Lastniveau bis 2.500 A/m gezeigt. In dieser Abbildung ist die signifikante irreversible Veränderung der Verläufe für steigende Zyklenzahlen sehr deutlich zu erkennen. Nach 10^4 Zyklen erhöht sich die benötigte Feldstärke zum Beispiel für das Erreichen von $J = 1,4$ T von 750 A/m (Unbelasteter Zustand) auf 1.750 A/m.

4 Experimentelle Ergebnisse

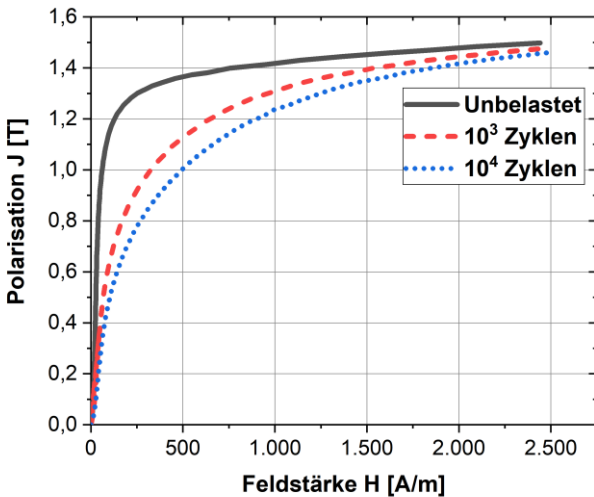
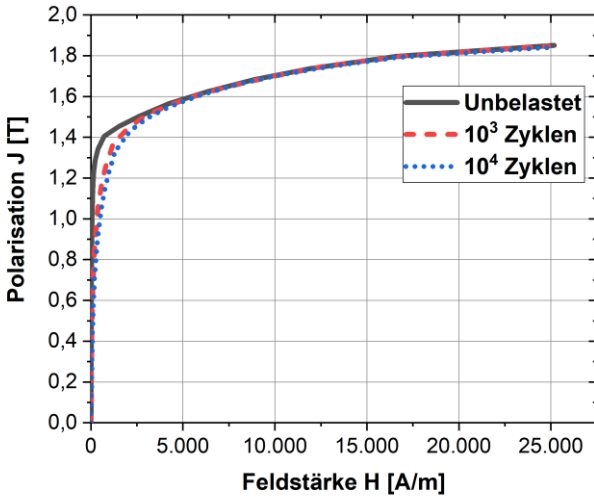


Abbildung 4-6: Kommutierungskurven der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} für Feldstärken bis 25.000 A/m (oben) und 2.500 A/m (unten)

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklisierung

Mit sinkendem Lastniveau verringert sich die magnetische Degradation. Im Vergleich zur Zyklisierung bei 85 % R_{eS} ist bei 70 % R_{eS} und 10^3 Zyklen nur eine geringe Veränderung der Kommutierungskurve erkennbar (vgl. Abbildung 4-7, oben). Auch nach 10^7 Zyklen bei 70 % R_{eS} ist die Degradation geringer, als nach 10^3 Zyklen bei 85 % R_{eS} . Ab dem 60 % R_{eS} Lastniveau konnte selbst nach 10^8 Zyklen keine magnetische Degradation festgestellt werden (vgl. Abbildung 4-7, unten).

In Querrichtung wurde ein analoges Verhalten beobachtet. Mit steigender Zyklenanzahl ist beim 85 % R_{eS} Lastniveau eine zunehmende magnetische Degradation erkennbar (vgl. Abbildung 4-8, oben). Dabei ist auch in der Querrichtung nach 10^3 Zyklen eine Veränderung ersichtlich. Im Gegensatz zur Walzrichtung konnte beim 70 % R_{eS} Lastniveau nur eine sehr geringe und ab dem 65 % R_{eS} Lastniveau nach 10^8 Zyklen keine Veränderung der Kommutierungskurve nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 4-8, unten).

Alle aus den Kommutierungskurven abgeleiteten Maximalpermeabilitäten werden in Abbildung 4-9 in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten) veranschaulicht. Steigende Zyklenzahl für Lastniveaus ≥ 65 % R_{eS} in Walzrichtung und > 70 % R_{eS} in Querrichtung führen zu einer Abnahme der Maximalpermeabilität. Die Abnahme beträgt in Walzrichtung nach 10^4 Zyklen für das 85 % R_{eS} Lastniveau ca. 74 % und in Querrichtung ca. 66 %. Für das 65 % R_{eS} Lastniveau beträgt die Veränderung der Maximalpermeabilität in Walzrichtung nach 10^8 Zyklen nur noch 6,7 %.

4 Experimentelle Ergebnisse

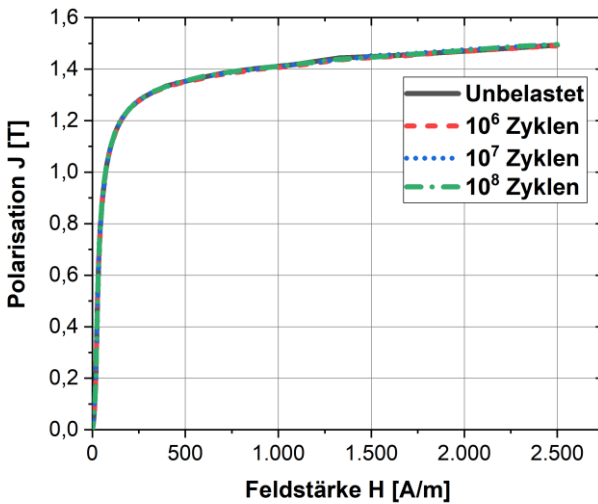
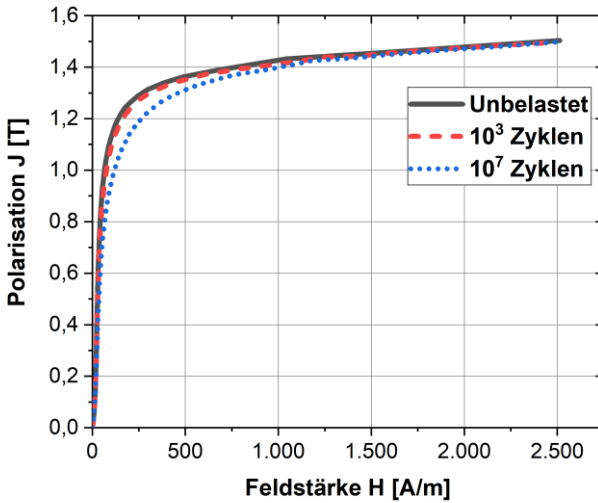


Abbildung 4-7: Kommutierungskurven der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 70 % R_{eS} (oben) und 60 % R_{eS} (unten)

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklierung

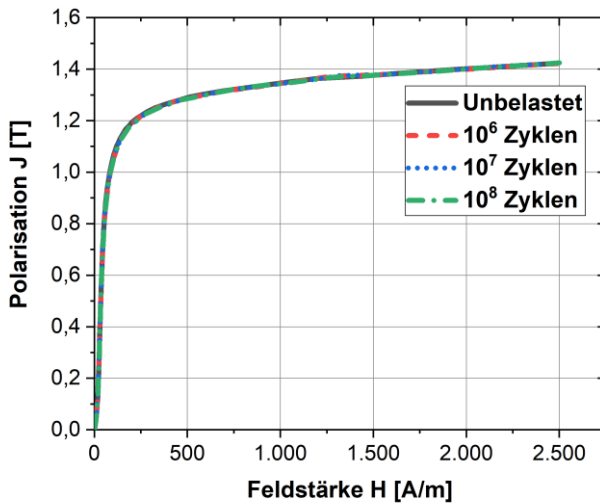
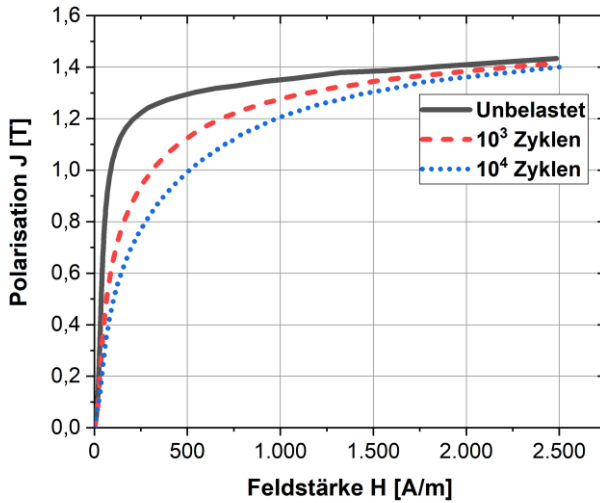


Abbildung 4-8: Kommutierungskurven der Querrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} (oben) und 65 % R_{eS} (unten)

4 Experimentelle Ergebnisse

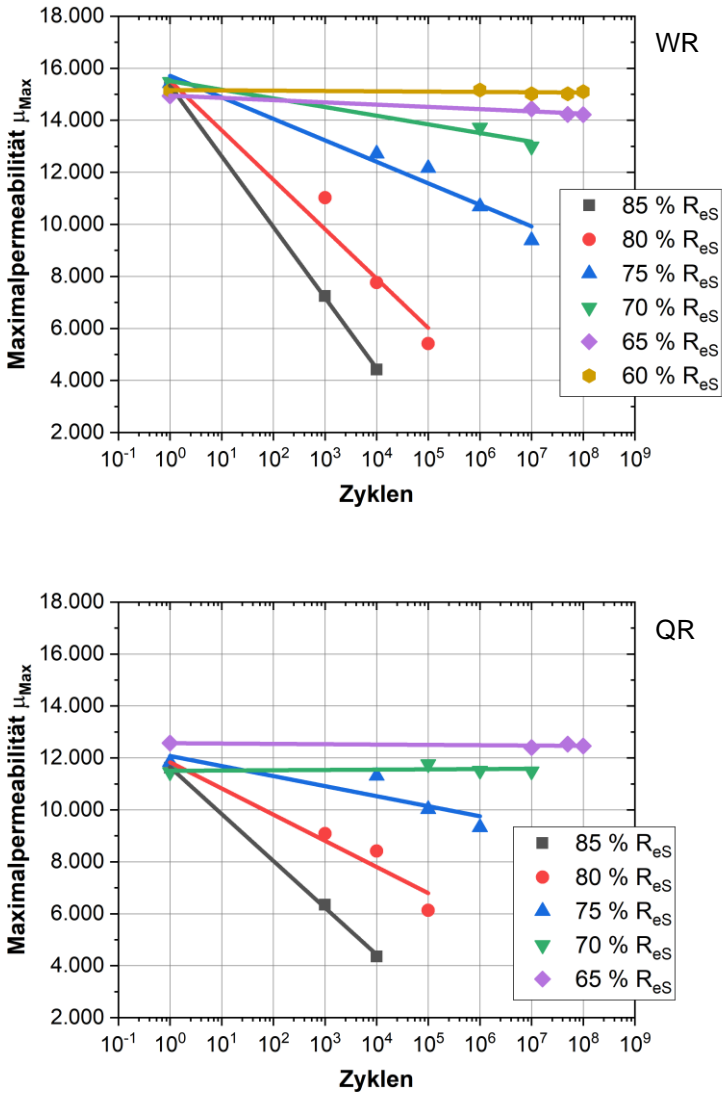


Abbildung 4-9: Maximalpermeabilität in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)

4.3.2 Statische Hysterese

Die Messung der statischen Hysteresen erfolgte analog zu den Messungen der Kommutierungskurven. Dabei wurden die Hysteresen bei gleicher Feldstärke von 10.000 A/m und bei gleicher Polarisation von 1,0 T gemessen. In Abbildung 4-10 (oben) werden die Hysteresen für die 85 % R_{eS} Probe im unbelasteten Zustand sowie nach 10^3 und 10^4 Zyklen gezeigt. Mit steigender Zyklenanzahl ist ein Abflachen der Hysterese ersichtlich. Wie bei den Kommutierungskurven ist keine Verringerung der Sättigungspolarisation mit steigender Zyklenanzahl festgestellt worden. In Abbildung 4-10 (unten) werden die Hysteresen desselben Lastniveaus bei gleicher Polarisation veranschaulicht. Mit zunehmender Zyklenanzahl ist eine Zunahme der Verschiebung der Hysteresespitze nach außen zu sehen. Zudem ist mit steigender Zyklenanzahl eine Abnahme der Remanenz und eine Zunahme der Koerzitivfeldstärke erkennbar. Zwecks Vergleichbarkeit zwischen der Walz- und Querrichtung werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur noch die Hysteresemessungen bei 1,0 T und die daraus ermittelten Kennwerte vorgestellt.

Mit sinkendem Lastniveau ist eine Verringerung der magnetischen Degradation zu beobachten. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 4-11 am Verlauf der Hysteresen nach der Zyklisierung auf 70 % R_{eS} (oben) und 60 % R_{eS} (unten) gezeigt. Zwecks Übersichtlichkeit wurde in diesen Diagrammen die Skalierung angepasst. Für das 70 % R_{eS} Lastniveau ist ebenfalls eine deutliche Verschiebung der Hysterese spitze nach außen erkennbar. Zudem wurden eine geringe Abnahme der Remanenz und eine geringe Zunahme der Koerzitivfeldstärke gemessen. Ab dem 60 % R_{eS} Lastniveau konnte keine Veränderung bei der Hystereseform und der Kenngrößen festgestellt werden.

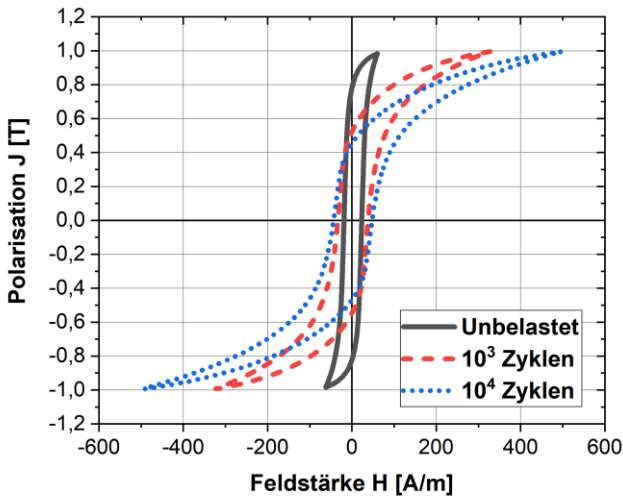
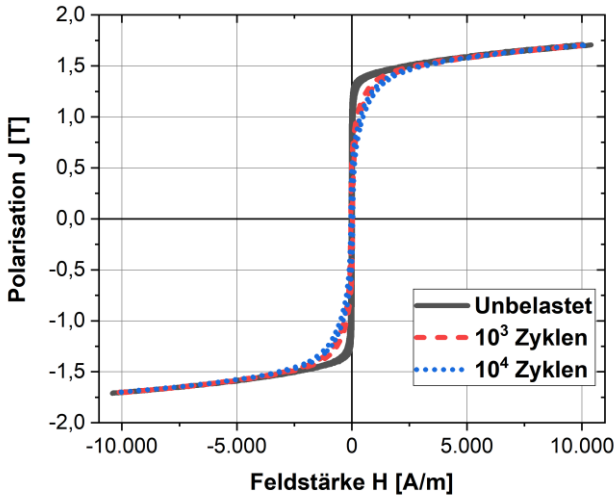


Abbildung 4-10: Hysteresen der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} bei gleicher Feldstärke von 10.000 A/m (oben) und gleicher Polarisation von 1,0 T (unten)

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklierung

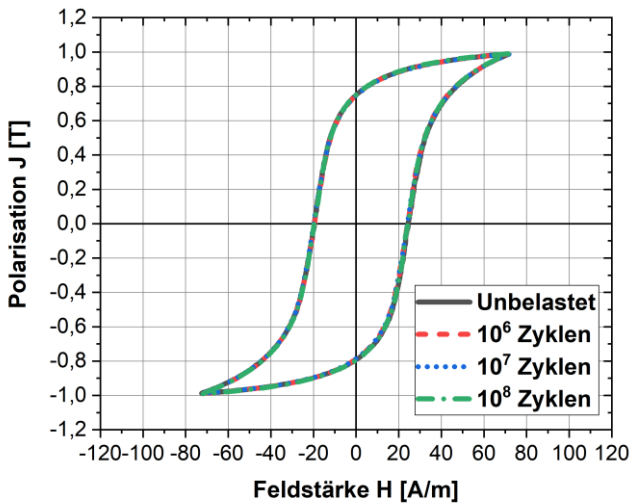
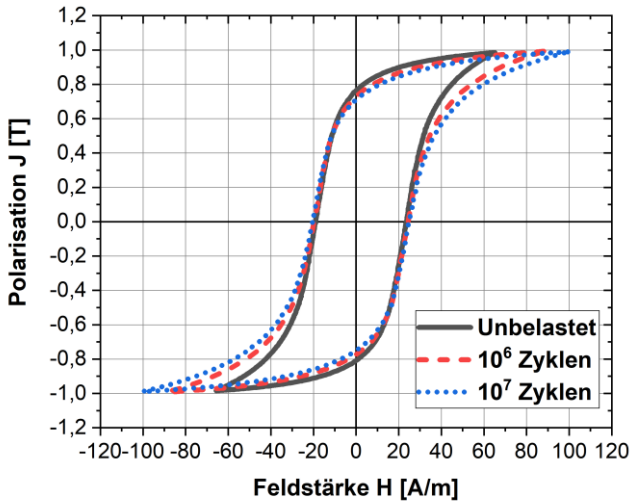


Abbildung 4-11: Hysteresen der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 70 % R_{eS} (oben) und 60 % R_{eS} (unten)

In Querrichtung wurde wie in Walzrichtung eine signifikante Veränderung der Hysteresekurven nach der Zyklisierung bei 85 % R_{eS} beobachtet (vgl. Abbildung 4-12, oben). Dabei liegt die magnetische Degradation der Querrichtung nach 10^4 Zyklen auf einem ähnlichen Niveau wie in Walzrichtung nach 10^4 Zyklen. Wie bei den Kommutierungskurven ist in Querrichtung bei Lastniveaus ≤ 70 % R_{eS} keine signifikante Veränderung der Hysterese erkennbar. In Abbildung 4-12 (unten) ist der Verlauf der Hysterese nach der Zyklisierung auf dem 70 % R_{eS} Lastniveau veranschaulicht. Für steigende Zyklenzahlen konnte selbst nach 10^7 Zyklen weder eine Abnahme der Remanenz noch eine Zunahme der Koerzitivfeldstärke beobachtet werden.

In den folgenden Abbildungen werden die gemessenen Kenngrößen Remanenz (vgl. Abbildung 4-13), Koerzitivfeldstärke (Abbildung 4-14) und Hystereseverluste (Abbildung 4-15) für die untersuchten Lastniveaus in Walz- und Querrichtung gegenübergestellt. In Walzrichtung wurde für Lastniveaus ≥ 70 % R_{eS} und in Querrichtung für Lastniveaus ≥ 75 % R_{eS} eine signifikante irreversible Veränderung der magnetischen Eigenschaften festgestellt. Dabei wurde für das 85 % R_{eS} Lastniveau nach 10^4 Zyklen eine Abnahme der Remanenz von ca. 54 % in Walzrichtung und von ca. 52 % in Querrichtung ermittelt. Die Zunahme der Koerzitivfeldstärke beträgt hierbei ca. 110 % in Walzrichtung und von ca. 92 % in Querrichtung. Beides resultierte in einer Zunahme der statischen Hystereseverluste um ca. 120 % in Walzrichtung und ca. 76 % in Querrichtung. In Walzrichtung wurde für das 70 % R_{eS} Lastniveau nach 10^7 Zyklen immer noch eine Zunahme der Hystereseverluste von ca. 12 % festgestellt. Für das 65 % R_{eS} Lastniveau war in Walzrichtung nur eine sehr geringe und ab 60 % R_{eS} keine magnetische Degradation nachweisbar. In Querrichtung konnte bereits für Lastniveaus < 75 % R_{eS} keine signifikante Degradation der magnetischen Eigenschaften beobachtet werden.

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklierung

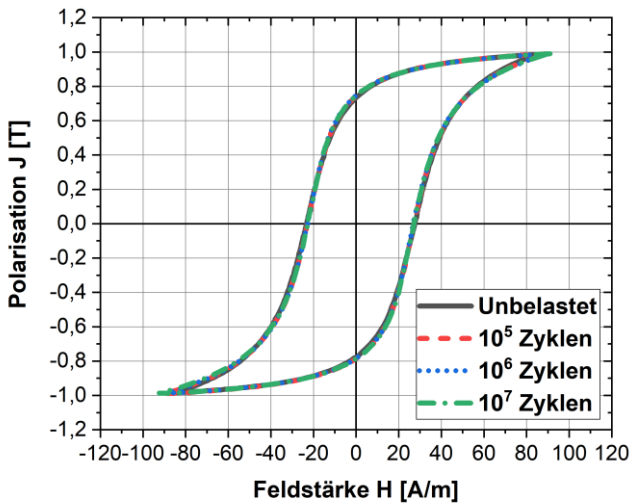
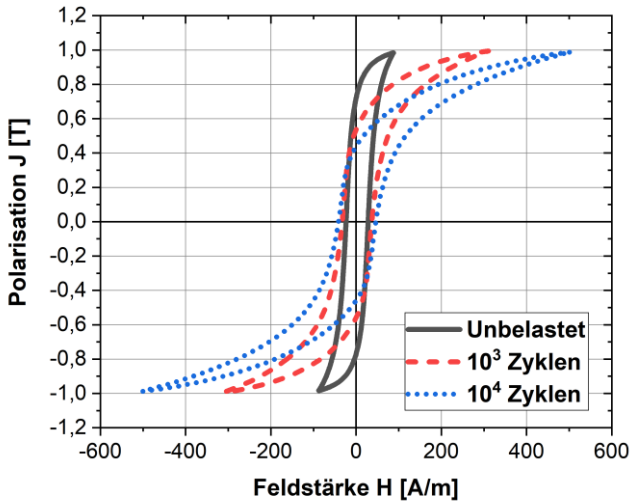


Abbildung 4-12: Hysteresen der Querrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} (oben) und 70 % R_{eS} (unten)

4 Experimentelle Ergebnisse

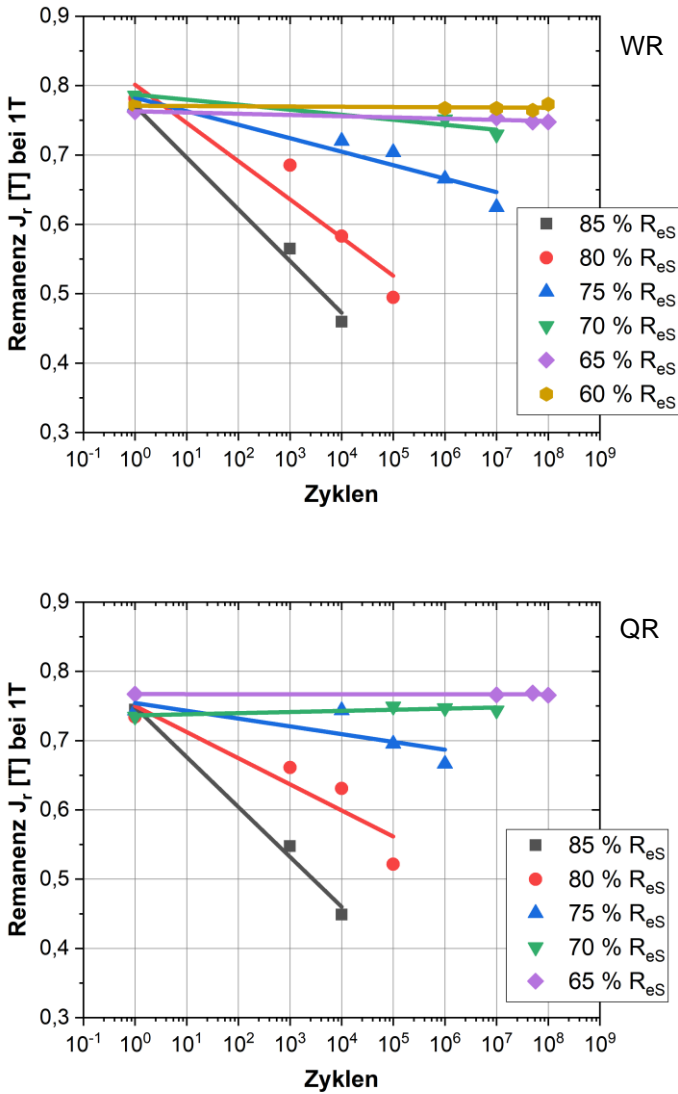


Abbildung 4-13: Remanenz in Abhängigkeit der Zyklenzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklisierung

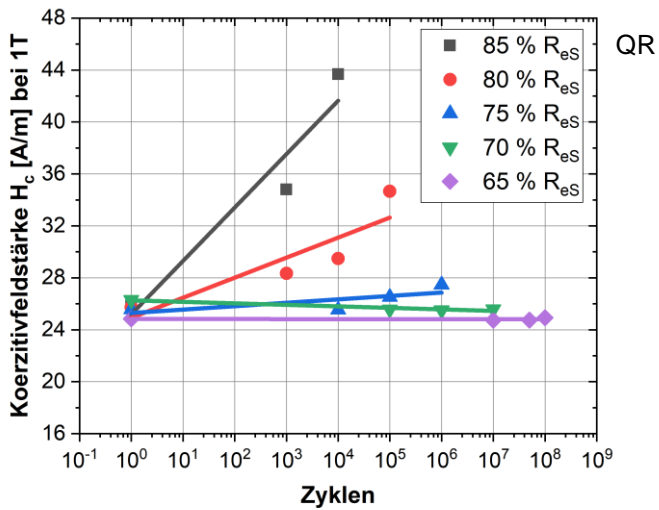
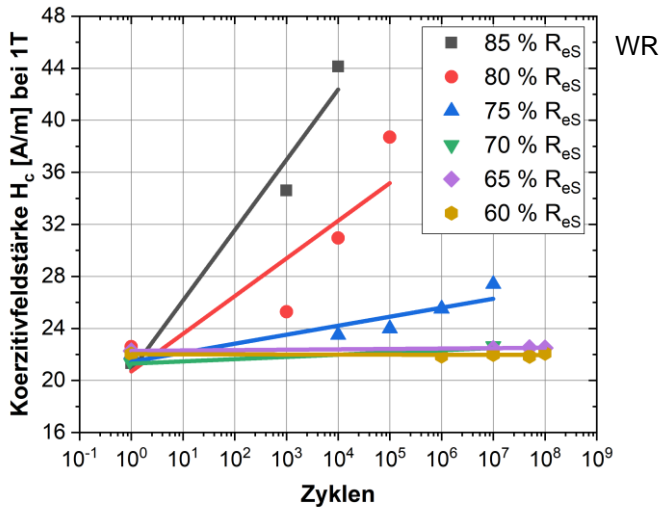


Abbildung 4-14: Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)

4 Experimentelle Ergebnisse

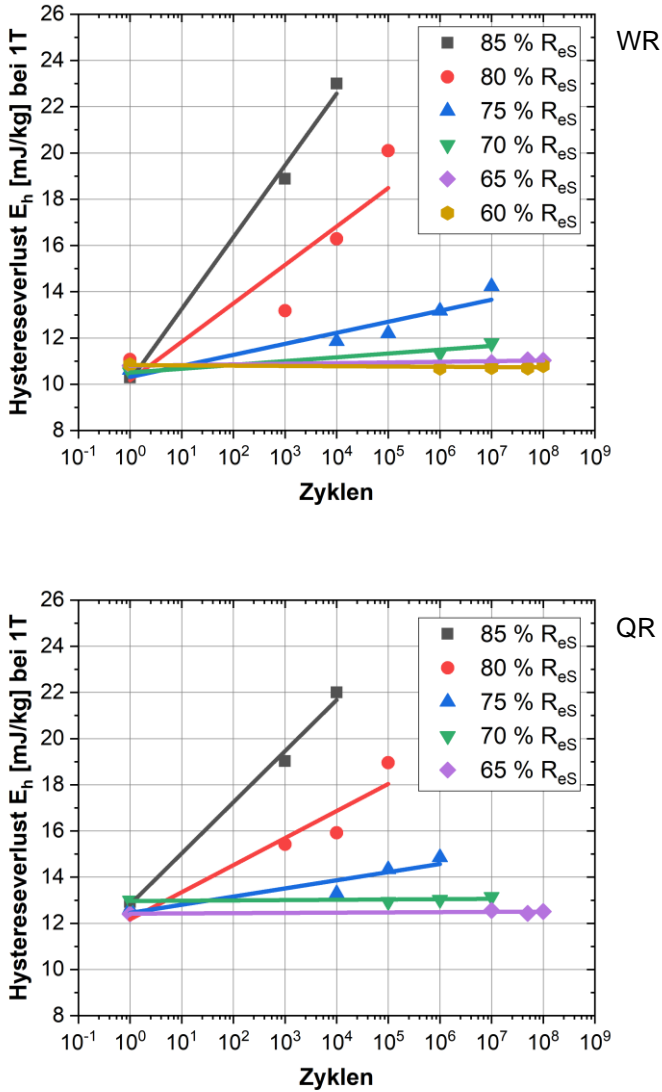


Abbildung 4-15: Hystereseverluste in Abhängigkeit der Zyklanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)

4.3.3 Ummagnetisierungsverluste

Die Ummagnetisierungsverluste wurden bei 50, 100, 200, 400 und 1.000 Hz gemessen für Polarisation von 0,2 T – 1,6 T. In Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19 sind die Ergebnisse der Ummagnetisierungsverlustmessungen in Walzrichtung für die Lastniveaus 85, 75, 70 und 65 % R_{eS} veranschaulicht. Für das 85 % R_{eS} Lastniveau wurde eine deutliche Zunahme der Ummagnetisierungsverluste mit steigender Zyklenanzahl festgestellt. Bei 50 Hz zeigte sich die deutlichste Zunahme der Ummagnetisierungsverluste. Diese ist für niedrige Polarisationen am größten und nimmt mit steigender Polarisation ab. Für Polarisationen $> 0,8$ T ist ein Zusammenlaufen der Kurven des unbelasteten Zustandes und den zyklisierten Zuständen nach 10^3 und 10^4 Zyklen zu sehen. Mit zunehmender Frequenz nimmt die relative Differenz zwischen den zyklisierten Zuständen weiter ab. Für 50 Hz und 1,0 T beträgt die Zunahme der Ummagnetisierungsverluste ca. 79 %. Bei 1.000 Hz und 1,0 T beträgt diese nur noch ca. 38 %. Für kleiner werdende Lastniveaus wurde eine immer schwächer werdende Zunahme der Ummagnetisierungsverluste verzeichnet (vgl. Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-19). Für das 75 % R_{eS} Lastniveau wurde bei 50 Hz und 1,0 T eine Zunahme der Ummagnetisierungsverluste von ca. 23 % nach 10^7 Zyklen gemessen. Bei 1.000 Hz und 1,0 T beträgt die Differenz nach 10^7 Zyklen gegenüber dem unbelasteten Zustand ca. 20 %. Die 70 % R_{eS} Kurve zeigt bei 1.000 Hz und 1 T nur noch eine Zunahme der Verluste von ca. 9 % (vgl. Abbildung 4-18). Bei den Messungen der Ummagnetisierungsverluste wurde gegenüber den statischen Messungen bereits beim 65 % R_{eS} Lastniveau keine signifikante Veränderung der magnetischen Eigenschaften für steigende Zyklenzahlen festgestellt (vgl. Abbildung 4-19). Für 1,0 T und 1.000 Hz liegt die Zunahme der Ummagnetisierungsverluste bei ca. 2,7 %. Diese Differenz kann vor allem bei 1.000 Hz aufgrund von Messfehlern zustande kommen, da mit steigender Frequenz unter anderem Wicklungsfehler bei den Spulen des Messensors eine entscheidende Rolle spielen.

4 Experimentelle Ergebnisse

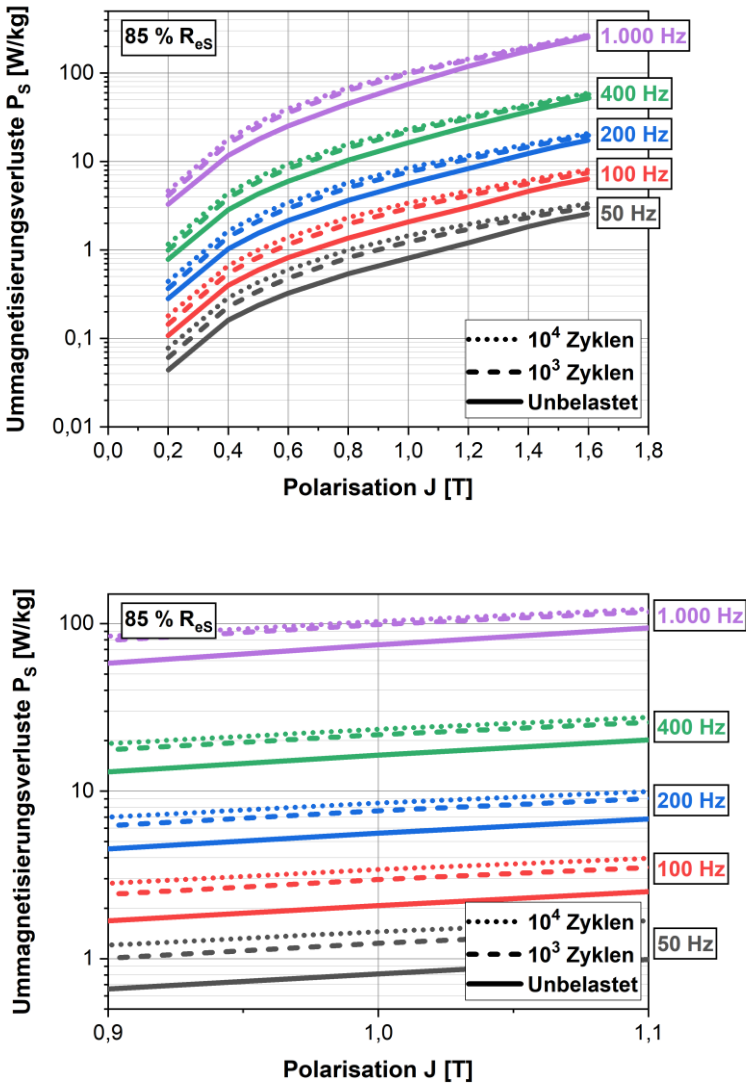


Abbildung 4-16: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveau $85\% R_{es}$ in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklung

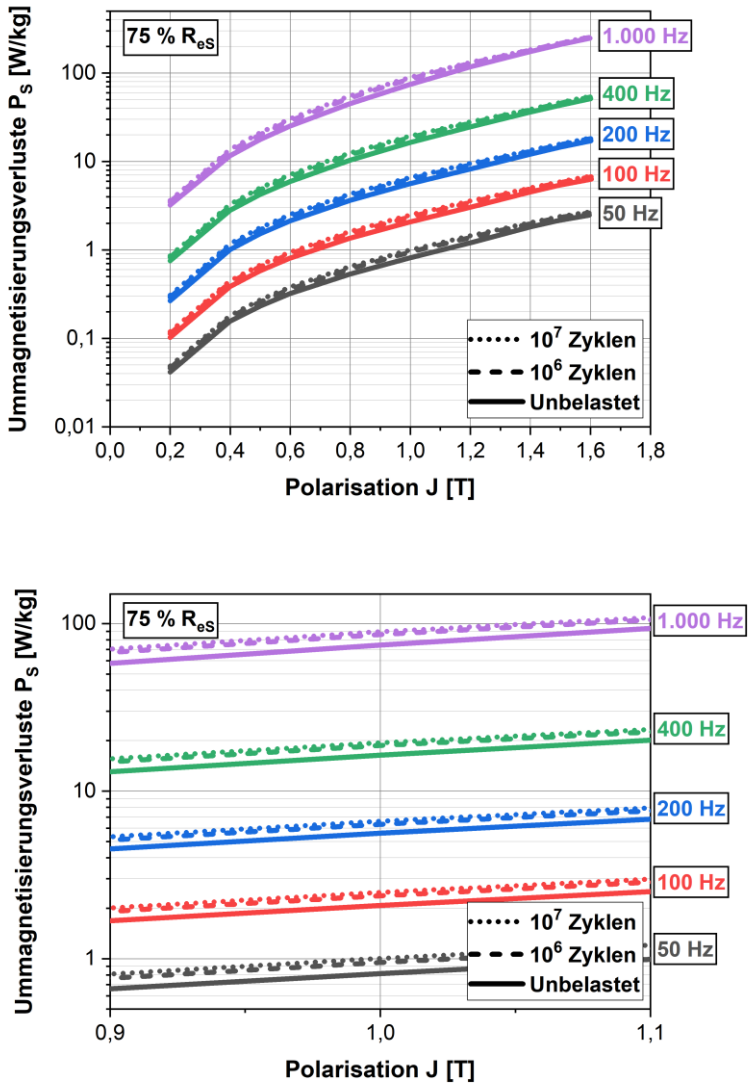


Abbildung 4-17: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveau 75 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4 Experimentelle Ergebnisse

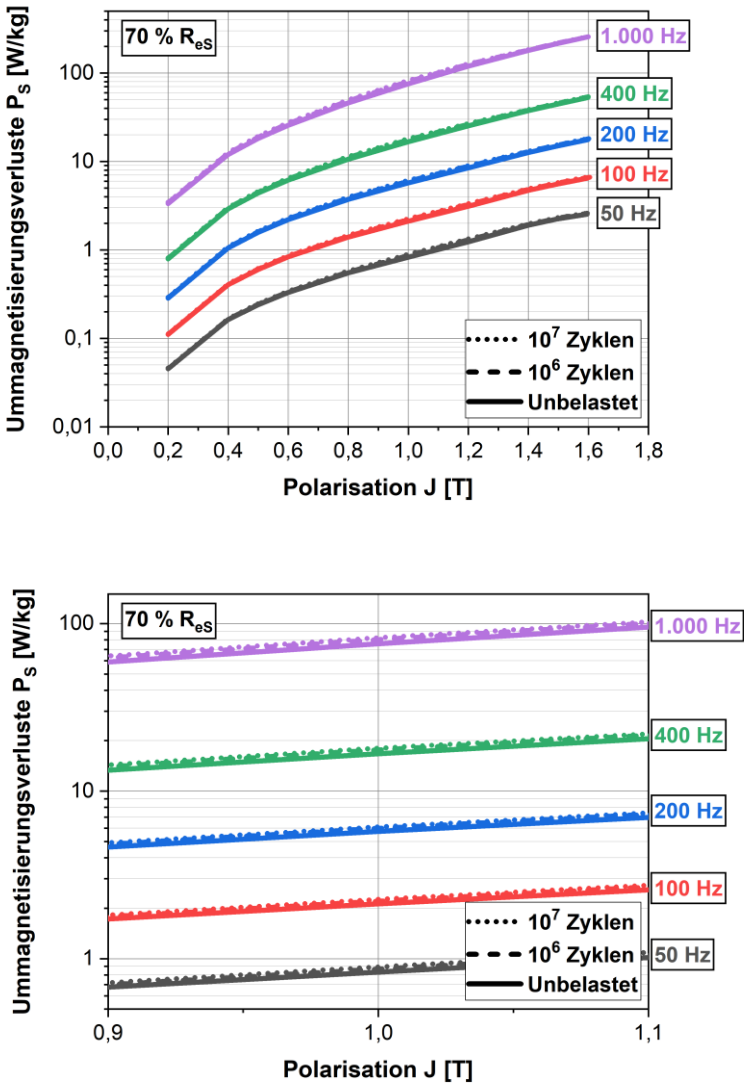


Abbildung 4-18: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveau $70\% R_{eS}$ in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklisierung

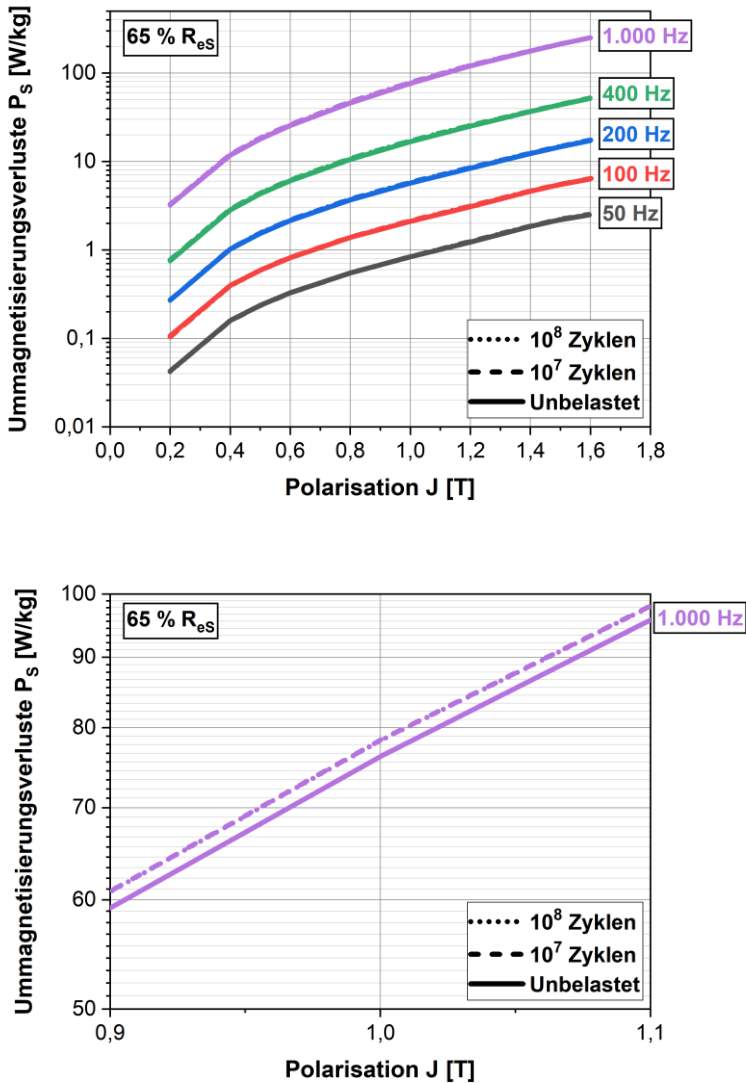


Abbildung 4-19: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveau 60 % R_{es} in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

In Querrichtung wurden vergleichbare Effekte bei den Messungen der Ummagnetisierungsverluste festgestellt. In Abbildung 4-20 und Abbildung 4-21 werden die Ergebnisse der Ummagnetisierungsverlustmessungen in Querrichtung exemplarisch für das 85 % R_{eS} und 70 % R_{eS} Lastniveau gezeigt. Mit zunehmendem Lastniveau zeigt sich bei 85 % R_{eS} eine deutliche Zunahme der Ummagnetisierungsverluste. Hier ist auch wie bei der Walzrichtung ein Zusammenlaufen der Verluste mit zunehmender Polarisierung erkennbar. Die Zunahme der Verluste beträgt nach 10^4 Zyklen bei 1,0 T und 50 Hz ca. 56 %. Bei gleicher Polarisierung und 1.000 Hz liegt diese bei ca. 31 %. Mit sinkendem Belastungsniveau ist auch in Querrichtung eine verringerte Zunahme der Ummagnetisierungsverluste zu erkennen. Bei Lastniveaus ≤ 70 % R_{eS} wurde keine Zunahme der Ummagnetisierungsverluste festgestellt. Eine detaillierte Bewertung der Effekte, die zur Zunahme der Ummagnetisierungsverluste führen, lässt sich mithilfe einer Verlustseparation erstellen. Die Erkenntnisse der Verlustseparation werden in dem nachfolgenden Kapitel 4.4 betrachtet.

4.3 Magnetische Charakterisierung nach spannungskontrollierter Zyklierung

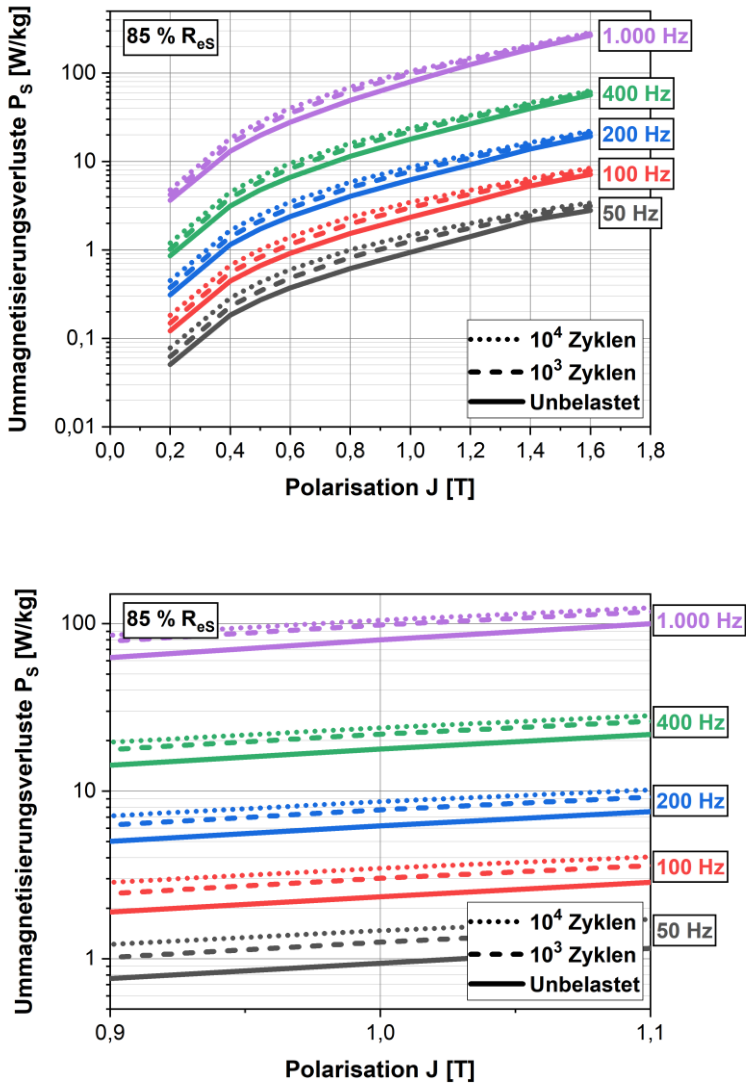


Abbildung 4-20: Ummagnetisierungsverluste in Querrichtung für das Lastniveau 85 % R_{es} in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4 Experimentelle Ergebnisse

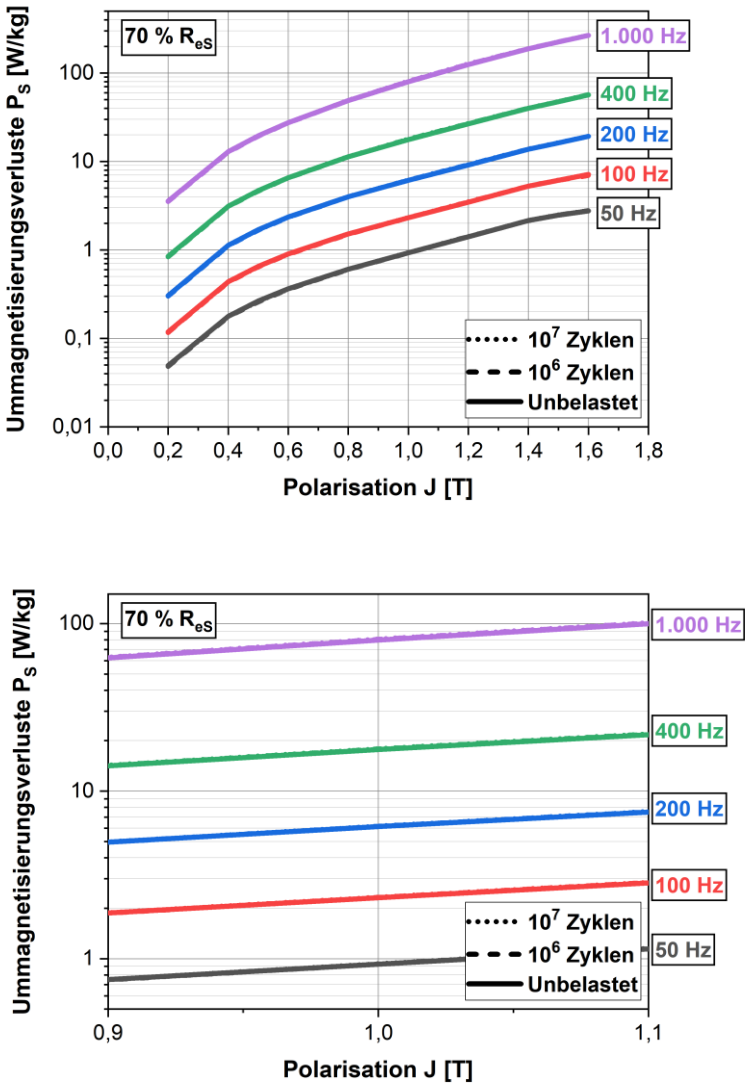


Abbildung 4-21: Ummagnetisierungsverluste in Querrichtung für das Lastniveau 70 % R_{es} in Abhängigkeit der Polarisation und der Frequenz

4.4 Verlustseparation nach Bertotti

Mit der Verlustseparation werden die Auswirkungen der mechanisch-zyklischen Beanspruchung für die einzelnen Verlustkomponenten bewertet. Nach Bertotti [Ber88] lassen sich die Ummagnetisierungsverluste P_s numerisch in die Bestandteile Hystereseverluste P_{hyst} , Wirbelstromverluste P_{eddy} und Anomalieverluste P_{exc} zerlegen. Durch das Ausklammern der Frequenz und der Polarisation können die Ummagnetisierungsverluste mit den Koeffizienten k_{hyst} , k_{eddy} und k_{exc} entsprechend Formel 4-1 beschrieben werden.

$$P_s \cong k_{hyst}(J_{max}^2 f_m) + k_{eddy}(J_{max}^2 f_m^2) + k_{exc}(J_{max}^{1.5} f_m^{1.5}) \quad \text{Formel 4-1}$$

Der Wirbelstromverlustkoeffizient k_{eddy} wird aus den Maxwell-Gleichungen abgeleitet und mit der elektrischen Leitfähigkeit σ , der Dichte $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$ sowie der Probendicke $d = 3,5 \times 10^{-4} \text{ m}$ entsprechend Formel 4-2 berechnet

$$k_{eddy} = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6\rho} \quad \text{Formel 4-2}$$

Für die Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit wurde der elektrische Widerstand mittels 4-Punkt-Verfahren gemessen. Dabei wurden die Strom-Spannungs-Kennlinien nach mechanisch-zyklischer Belastung bei 85 % R_{eS} , nach 10^4 Zyklen, bei 70 % R_{eS} nach 10^6 und bei 65 % R_{eS} nach 10^7 Zyklen bestimmt und mit der Strom-Spannungskennlinie des unbelasteten Zustandes verglichen. Die gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien der zyklisch belasteten Blechstreifen werden in Abbildung 4-22 veranschaulicht. Zwischen den untersuchten Zuständen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Der aus der Steigung ermittelte elektrische Widerstand R_{el} beträgt bei allen Proben $6,3 \text{ m}\Omega$. Mit dem elektrischen Widerstand R_{el} , dem Abstand zwischen den innen liegenden Schrauben (75 mm) und der Querschnittsfläche $A = 7 \text{ mm}^2$ wurde der spezifische Widerstand $\rho_e = 0,53 \text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

4 Experimentelle Ergebnisse

berechnet. Der berechnete spezifische Widerstand entspricht dem spezifischen Widerstand, den der Hersteller Cogent für sein Elektroband isovac 270-35A angibt (Datenblatt: $\rho_e = 0,52 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ [Cog08]). Aus dem spezifischen Widerstand wurde mit $\sigma = 1/\rho_e$ die elektrische Leitfähigkeit der Blechstreifen von $\sigma = 1,88 \times 10^6 \text{ S/m}$ berechnet. Damit erhält man den Wirbelstromverlustkoeffizient $k_{\text{eddy}} = 4,97 \times 10^{-5}$.

$$k_{\text{eddy}} = \frac{\pi^2 * 1,88 * 10^6 * (3,5 * 10^{-4})^2}{6 * 7650} = 4,97 * 10^{-5}$$

Aus den Messungen ist erkennbar, dass die mechanische zyklische Belastung keinen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit hat und sich somit auch nicht auf die Wirbelstromverluste auswirkt ($k_{\text{eddy, Unbelastet}} = k_{\text{eddy, Zyklert}}$).

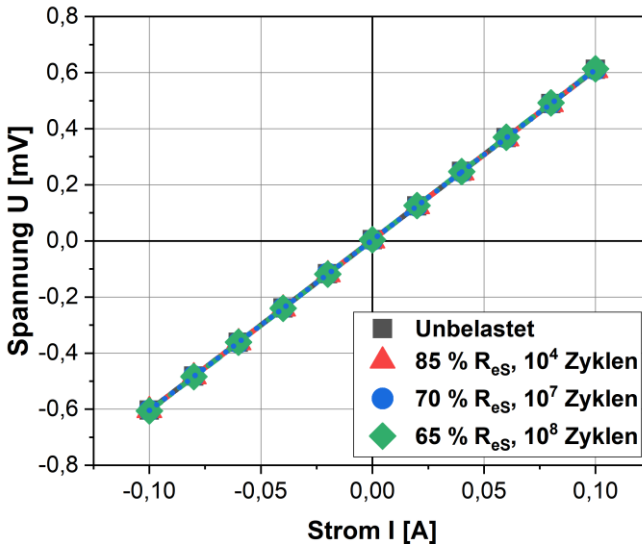


Abbildung 4-22: Strom-Spannungs-Kennlinien zyklisch belasteter Blechstreifen

Die Berechnung der Hystereseverluste und der Anomalieverluste erfolgt über die Koeffizienten k_{hyst} und k_{exc} . Dafür wurden die Polarisationen $J_{\text{max}} = 0,5 \text{ T}$, $1,0 \text{ T}$, und $1,5 \text{ T}$ sowie die Frequenzen $f = 50, 100, 200$ und 400 Hz verwendet. Für ein repräsentatives Ergebnis wurden die Ummagnetisierungsverluste des 85 % R_{eS} Lastniveaus gewählt. In Tabelle 4-3 werden die gemessenen Ummagnetisierungsverluste aufgelistet.

		50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz
0,5 T	Unbelastet [W/kg]	0,24	0,59	1,54	4,29
	Zykliert [W/kg] (85 % R_{eS} , 10^4 Zyklen)	0,43	1,00	2,47	6,69
		50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz
1,0 T	Unbelastet [W/kg]	0,81	2,07	5,62	16,38
	Zykliert (85 % R_{eS} , 10^4 Zyklen)	1,45	3,40	8,50	23,44
		50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz
1,5 T	Unbelastet [W/kg]	2,19	5,51	14,77	44,13
	Zykliert [W/kg] (85 % R_{eS} , 10^4 Zyklen)	2,94	7,03	18,06	51,18

Tabelle 4-3: Gemessene Ummagnetisierungsverluste P_s bei 0,5, 1,0 und 1,5 T

Mit Formel 4-1 und den gemessenen Ummagnetisierungsverlusten sowie dem berechneten Koeffizienten k_{eddy} können die beiden Koeffizienten k_{hyst} und k_{exc} ermittelt werden. Die Berechnung erfolgt hierbei jeweils für 0,5, 1,0 und 1,5 T. Im Folgenden werden die Gleichungen exemplarisch für 0,5 T aufgelistet.

4 Experimentelle Ergebnisse

- I) $0,24 \cong k_{hyst}(0,5^2 * 50) + 4,97 * 10^{-5}(0,5^2 * 50^2) + k_{exc}(0,5^{1,5} * 50^{1,5})$
 II) $0,59 \cong k_{hyst}(0,5^2 * 100) + 4,97 * 10^{-5}(0,5^2 * 100^2) + k_{exc}(0,5^{1,5} * 100^{1,5})$
 III) $1,54 \cong k_{hyst}(0,5^2 * 200) + 4,97 * 10^{-5}(0,5^2 * 200^2) + k_{exc}(0,5^{1,5} * 200^{1,5})$
 IV) $4,29 \cong k_{hyst}(0,5^2 * 400) + 4,97 * 10^{-5}(0,5^2 * 400^2) + k_{exc}(0,5^{1,5} * 400^{1,5})$

Zum Lösen des Gleichungssystems wurden die gemessenen Ummagnetisierungsverluste über der Frequenz aufgetragen und mittels Formel 4-1 gefittet. Die hierbei ermittelten Verlustkoeffizienten werden in Tabelle 4-4 aufgelistet.

In Abbildung 4-23 bis Abbildung 4-25 werden die Ergebnisse der Verlustseparation für 0,5 T, 1,0 T und 1,5 T veranschaulicht. In den Diagrammen stehen die geschlossenen Symbole für den unbelasteten Zustand und die offenen Symbole für die Verluste nach 10^4 Zyklen. Bei allen untersuchten Polarisierungen nehmen die Wirbelstromverluste mit steigender Frequenz am stärksten und die Hystereseverluste am geringsten zu.

		k_{hyst}	k_{eddy}	k_{exc}
0,5 T	Unbelastet	1,47E-02	4,97E-05	2,97E-04
	Zykliert (85 % R _{es} , 10 ⁴ Zyklen)	2,19E-02	4,97E-05	8,87E-04
		k_{hyst}	k_{eddy}	k_{exc}
1,0 T	Unbelastet	1,05E-02	4,97E-05	5,27E-04
	Zykliert (85 % R _{es} , 10 ⁴ Zyklen)	1,85E-02	4,97E-05	1,01E-03
		k_{hyst}	k_{eddy}	k_{exc}
1,5 T	Unbelastet	8,83E-03	4,97E-05	1,24E-03
	Zykliert (85 % R _{es} , 10 ⁴ Zyklen)	1,47E-02	4,97E-05	1,36E-03

Tabelle 4-4: Koeffizienten der Verlustseparation nach Bertotti

Aus den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit resultierend, ist keine Auswirkung der mechanischen Zyklierung auf die Wirbelstromverluste zu sehen. Für Frequenzen ≤ 200 Hz sind die Beiträge der Wirbelstromverluste zu den Gesamtverlusten geringer als die Beiträge der Hysterese- und Anomalieverluste. Die mechanische Zyklierung führt zu einer Zunahme der Hysterese- und Anomalieverluste. Bei 0,5 T ist eine ausgeprägte Auswirkung auf die Anomalieverluste zu sehen. Mit steigender Polarisation nimmt das Delta der Hystereseverluste ΔP_{hyst} bei 1.000 Hz leicht zu ($\Delta P_{\text{hyst}, 0,5 \text{ T}} = 1,8 \text{ W/kg}$, $\Delta P_{\text{hyst}, 1,0 \text{ T}} = 7,9 \text{ W/kg}$ und $\Delta P_{\text{hyst}, 1,5 \text{ T}} = 13,2 \text{ W/kg}$).

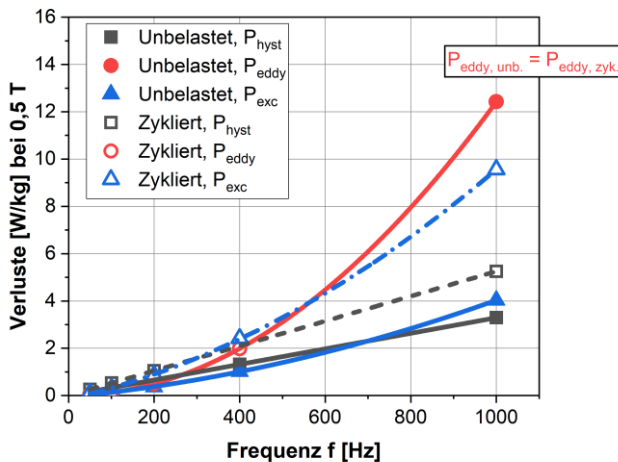


Abbildung 4-23: Verlustseparation nach Bertotti bei 0,5 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen

4 Experimentelle Ergebnisse

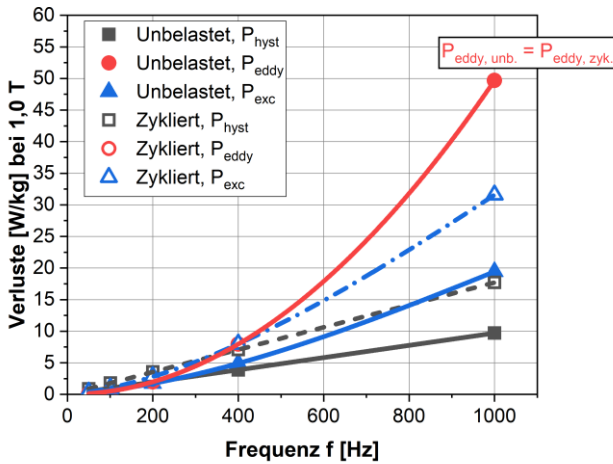


Abbildung 4-24: Verlustseparation nach Bertotti bei 1,0 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen

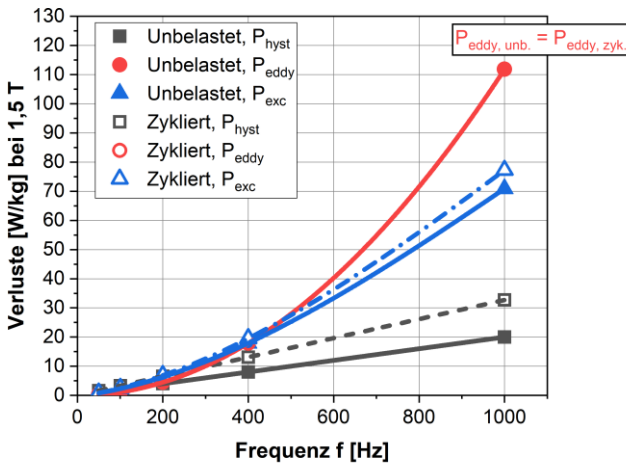


Abbildung 4-25: Verlustseparation nach Bertotti bei 1,5 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen

Für niedrige Frequenzen ≤ 250 Hz und Polarisierungen $\leq 1,0$ T ist die Zunahme der Hystereseverluste am größten. Damit wird begründet, warum die magnetische Degradation bei den statischen magnetischen Messungen und bei den Ummagnetisierungsverlustmessungen mit niedrigen Frequenzen am stärksten ausgeprägt ist. Mit steigender Frequenz und steigender Polarisation überlagern die Wirbelstromverluste die Hysteres- und Anomalieverluste. Dies liefert eine Erklärung, warum der Einfluss der mechanischen Zyklisierung bei hohen Frequenzen und Polarisation schlechter erkennbar ist.

4.5 Einfluss der Mittelspannung auf die magnetische Degradation

Der Mittelspannungseinfluss wurde bewertet, indem die Blechstreifen im Zugschwellbereich mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen mechanisch zyklisiert wurden. Das Spannungsverhältnis R beschreibt hierbei den Quotienten aus Ober- und Unterspannung mit $R = \sigma_u / \sigma_o$. Für das 85 % R_{eS} Lastniveau mit der Oberspannung $\sigma_o = 333,5$ MPa und der Unterspannung $\sigma_u = 27$ MPa beträgt das Spannungsverhältnis $R = 0,08$. Bei der Bewertung des Mittelspannungseinflusses wurden die Spannungsverhältnisse $R = 0,17, 0,3$ und $0,5$ mit den bisherigen Ergebnissen für $R = 0,08$ verglichen. Als Oberspannung wurde für alle Spannungsverhältnisse $\sigma_o = 333,5$ MPa gewählt und die Unterspannung entsprechend angepasst. In Tabelle 4-5 werden die eingestellten Spannungen der mechanischen Zyklisierung für die gewählten Spannungsverhältnisse aufgelistet. Die magnetischen Eigenschaften wurden dabei jeweils nach $10^3, 10^4$ und 10^5 Zyklen bestimmt.

4 Experimentelle Ergebnisse

	R = 0,08	R = 0,17	R = 0,3	R = 0,5
Oberspannung σ_o [MPa]	333,5	333,5	333,5	333,5
Untere Spannungsgrenze σ_u [MPa]	27,0	56,7	100,1	166,8
Mittelspannung σ_m [MPa]	181,3	195,1	216,8	250,1
Spannungsamplitude σ_a [MPa]	154,3	138,4	116,7	83,4

Tabelle 4-5: Spannungswerte der untersuchten Spannungsniveaus

In den bisherigen Ergebnissen wurde gezeigt, dass sich die mechanische Zyklisierung vor allem auf die statischen Messungen auswirkt. In den folgenden Betrachtungen werden deshalb ausschließlich die statischen Kennwerte verwendet, um die Einflüsse zu bewerten. Dabei wurden aus den Kommutierungskurven die Maximalpermeabilität und aus den Hysteresemessungen bei 1 T die Hystereseverluste, die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke ausgewertet. Die gemessenen Kennwerte der untersuchten Spannungsverhältnisse werden in Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 veranschaulicht. Bei allen Spannungsverhältnissen ist mit steigender Zyklenanzahl eine signifikante magnetische Degradation zu beobachten. Dabei ist für steigende Spannungsverhältnisse eine Minderung der Degradation aufgetreten. Für das Spannungsverhältnis $R = 0,5$ beträgt die Abnahme der Maximalpermeabilität nach 10^4 Zyklen ca. 50 %. Diese ist aber ca. 40 % geringer, als beim Spannungsverhältnis $R = 0,08$.

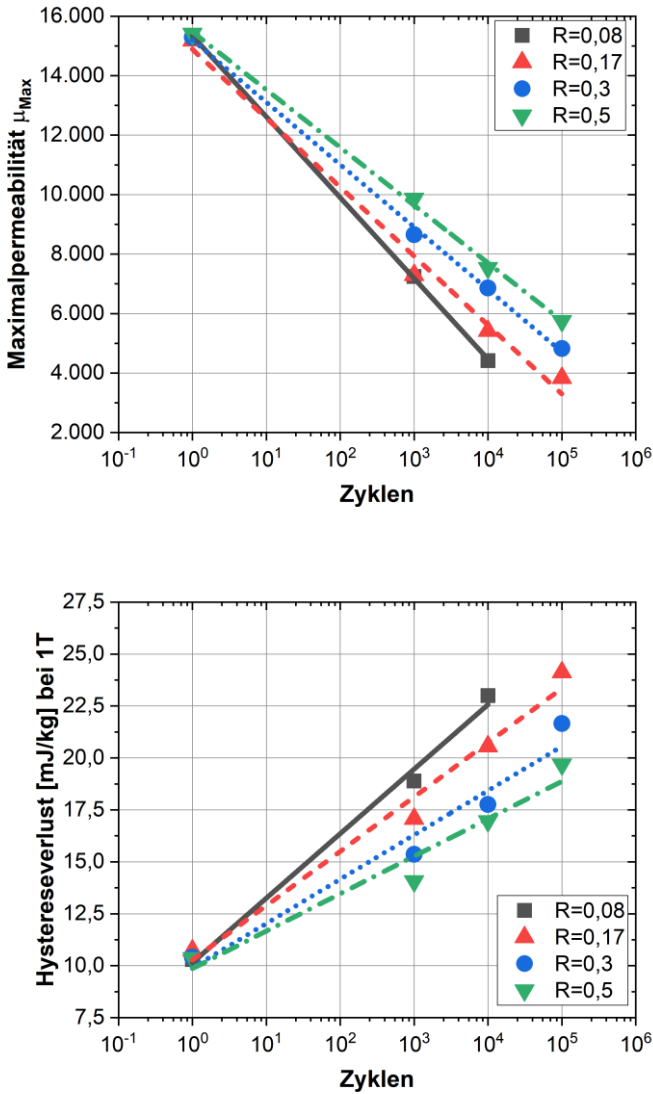


Abbildung 4-26: Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Maximalpermeabilität und Hystereseverluste

4 Experimentelle Ergebnisse

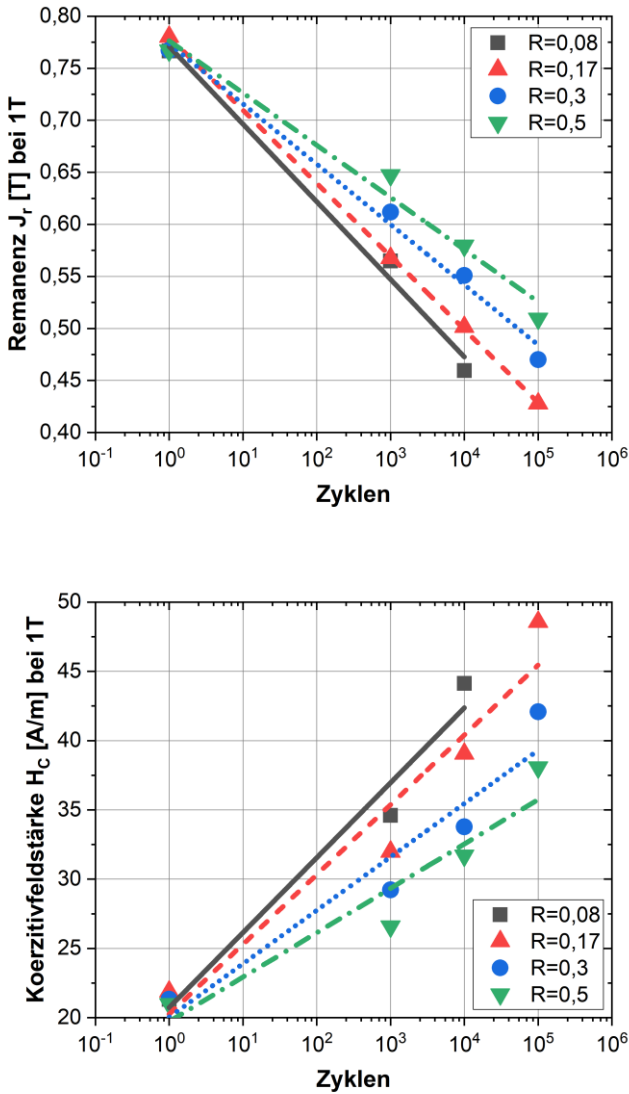


Abbildung 4-27: Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Remanenz und Koerzitivfeldstärke

4.6 Dehnungskontrollierte Zyklisierung

Die bisherigen Versuche waren darauf abgestellt, die Veränderung der magnetischen Eigenschaften nach spannungskontrollierter mechanischer Zyklisierung zu bewerten. Spannungsgeregelte Versuche kommen vor allem bei niedrigen Belastungen $\leq R_{eS}$ zum Einsatz, weil die Änderung der Spannung $\Delta\sigma$ einfacher zu regeln ist als die Änderung der Dehnung $\Delta\varepsilon$. Dem hingegen werden dehnungskontrollierte Versuche vor allem bei hohen Belastungen $\geq R_{eS}$ verwendet, da hier kleine Änderungen bzw. Abweichungen der Spannungsregelung $\Delta\sigma$ zu großen Veränderungen der Dehnung $\Delta\varepsilon$ führen [Fis17]. Als repräsentatives Lastniveau wurden 85 % R_{eS} gewählt, da hier bei den spannungskontrollierten Versuchen eine signifikante Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften beobachtet werden konnte. Aufgrund von zyklischer Entfestigung des Werkstoffs, wird eine Abnahme der Maximallast mit zunehmender Zyklenanzahl erwartet. Damit die Unterspannung nicht gegen 0 MPa wandert, wurde diese erhöht. Eine zu niedrige Unterspannung kann ein Schwingen der Probe verursachen, was zu einer Beeinflussung der Regelung und im schlimmsten Fall zu einer Druckbelastung der Probe führt. In Vorversuchen bewiesen sich 56,7 MPa als ausreichende Unterspannung σ_u . Damit ergibt sich für die dehnungskontrollierten Belastung ein Spannungsverhältnis von $R = 0,17$, was bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der spannungskontrollierten Zyklisierung berücksichtigt werden muss. Die für die Zyklisierung benötigten Ausgangsspannungen wurden aus den Messdaten der Spannungs-Dehnungs-Kurve entnommen. Dabei wurde bei der Mittelspannung $\sigma_m = 195,1$ MPa eine Ausgangsspannung $U_{A, m}$ von ca. 11,53 V und bei der Oberspannung $\sigma_o = 333,5$ MPa eine Ausgangsspannung $U_{A, o}$ von ca. 19,74 V gemessen, wodurch eine Spannungsamplitude von 8,21 V errechnet wird.

4 Experimentelle Ergebnisse

Abbildung 4-28 veranschaulicht den Spannungs-Dehnungs-Verlauf der dehnungskontrollierten Zyklierung für steigende Zyklenzahlen. Mit zunehmender Zyklenanzahl ist eine Abnahme der Maximalspannung um ca. 20 MPa zu erkennen ($\sigma_{o, 0 \text{ Zyklen}} = 333,5 \text{ MPa}$ und $\sigma_{o, 10^5 \text{ Zyklen}} = 314,4 \text{ MPa}$), womit die anfangs erwähnte zyklische Entfestigung des Materials veranschaulicht wird.

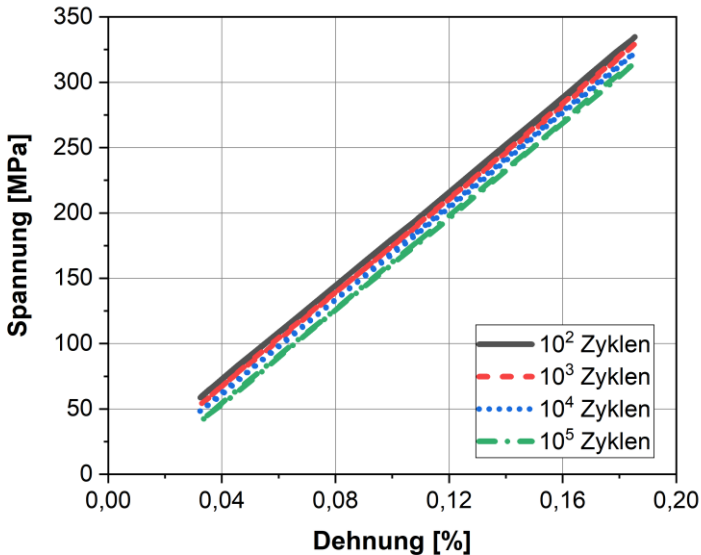


Abbildung 4-28: Spannungs-Dehnungs-Verlauf der dehnungskontrollierten Zyklierung für steigende Zyklenzahlen

Wie in Kapitel 4.5 wurden auch hier nur die Maximalpermeabilität aus den Messungen der Kommutierungskurve und die Hystereseverluste, die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke aus den Messungen der Hysteresen bei 1 T ausgewertet. Die magnetischen Eigenschaften wurden dabei nach 10^3 , 10^4 und 10^5 Zyklen bestimmt. Die gemessenen Kennwerte in Abhängigkeit der Zyklenanzahl werden in Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30 gezeigt. Hierbei werden die Kennwerte nach dehnungskontrollierter mechanischer Belastung mit denen nach spannungskontrollierter mechanischer Belastung verglichen. Für steigende Zyklenzahlen wurde bei der dehnungskontrollierten Zyklisierung eine Abnahme der Maximalpermeabilität und der Remanenz, sowie eine Zunahme der Hystereseverluste und der Koerzitivfeldstärke gemessen. Gegenüber der spannungskontrollierten mechanischen Zyklisierung ist die magnetische Degradation jedoch deutlich geringer.

Die ermittelten magnetischen Kennwerte nach dehnungskontrollierter Zyklisierung mit 10^5 Zyklen liegen etwa im Bereich der spannungskontrollierten Zyklisierung bei 75 % R_{es} nach 10^7 Zyklen. Mit zunehmender Zyklenzahl fällt das Spannungsverhältnis bei der dehnungskontrollierten Zyklisierung von $R = 0,17$ auf $R = 0,13$. Wie in Kapitel 4.5 festgestellt wurde, ist mit abnehmendem Spannungsverhältnis eine Zunahme der Degradation zu erwarten. Bei der dehnungskontrollierten Zyklisierung wurde, trotz sinkendem Spannungsverhältnis, eine deutlich abgeschwächtere Degradation ermittelt. Die Kennwerte der spannungskontrollierten Zyklisierung ($R = 0,5$) sind schlechter als die Kennwerte der Dehnungskontrollierten Zyklisierung ($R = 0,13$). Damit lässt sich zusammenfassen, dass die Abnahme der Maximalspannung einen positiven Einfluss auf die magnetische Degradation hat, als das zunehmende Spannungsverhältnis.

4 Experimentelle Ergebnisse

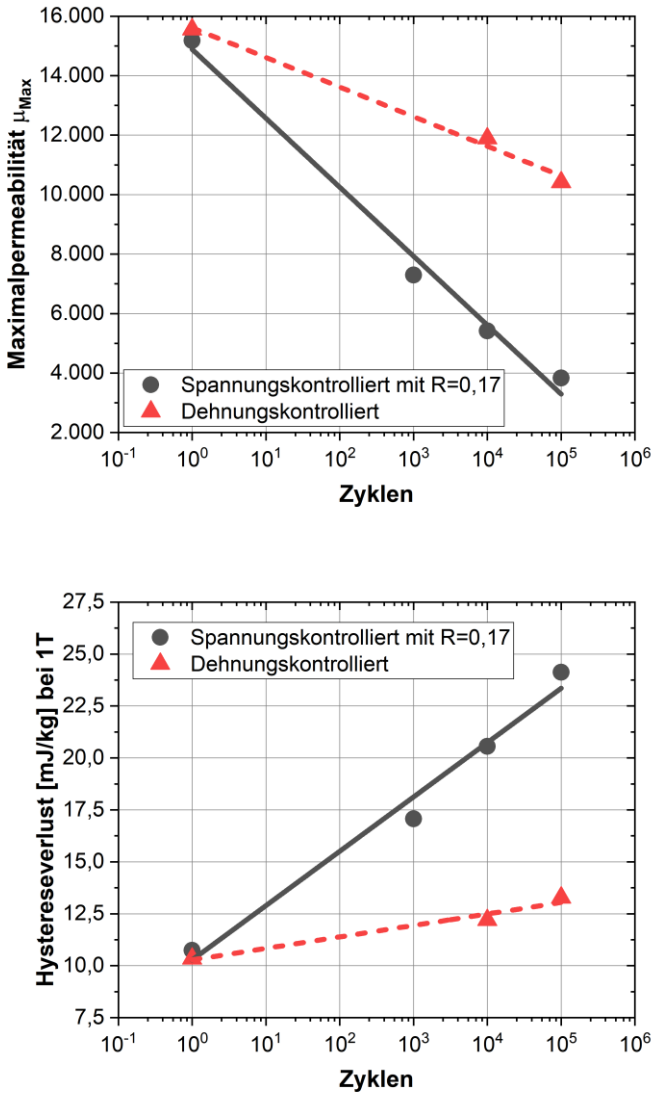


Abbildung 4-29: Vergleich der Maximalpermeabilität und der Hystereseverluste nach spannungs- und dehnungskontrollierter mechanischer Zyklierung

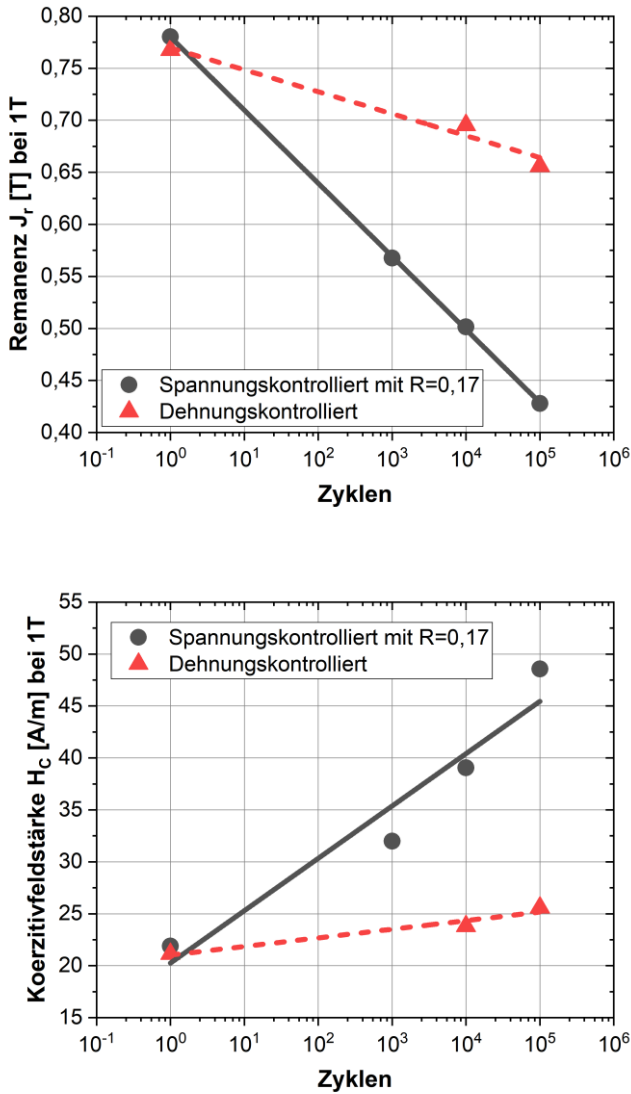


Abbildung 4-30: Vergleich der Remanenz und der Koerzitivfeldstärke nach spannungs- und dehnungskontrollierter mechanischer Zyklisierung

4.7 Temperatureinfluss

Im Betrieb von elektrischen Maschinen wird das Material erhöhten Temperaturen ausgesetzt, die zum einen durch die induzierten Wirbelströme entstehen oder durch die Erwärmung der Kupferspulen ans Material übertragen werden. Dabei können bei hochwertigen Motoren Temperaturen bis zu 80 °C und bei weniger hochwertigen und effizienten Motoren bis zu 100 °C entstehen [Tim07]. Kupferspulen werden je nach Schmelzpunkt der Drahtisolierung in unterschiedliche Klassen unterteilt, die in der höchsten Klasse (H) Temperaturen von bis zu 180 °C aushalten können. In Elektromotoren kommt häufig Kupferdraht der Klasse F zum Einsatz, der bis zu 155 °C genutzt werden kann [Wei02]. Die erhöhten Temperaturen werden an das Material übertragen und führen in der Regel zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften.

Für die Bewertung des Temperatureinflusses auf die Veränderung der magnetischen Eigenschaften bei der mechanischen Zyklisierung wurde deshalb eine etwas niedrigere konstante Temperatur von 140 °C gewählt. Als Oberspannung für die mechanische Beanspruchung wurden 85 % der Streckgrenze gewählt. Für die Bestimmung der Oberspannung bei 140 °C wurde im Vorfeld ein Zugversuch bei dieser Temperatur durchgeführt. Der Blechstreifen wurde dafür mit einem Heißluftföhn temperiert und die Temperatur mit einem Infrarotthermometer überwacht. In Abbildung 4-31 ist das Ergebnis des Spannungs-Dehnungsverlaufs bei 140 °C im Vergleich zum Verlauf bei Raumtemperatur (RT) zusehen. Bei der temperierten Probe wurde eine niedrigere Streckgrenze von 340 MPa und eine niedrigere Zugfestigkeit von 475 MPa gemessen. Der E-Modul wurde von der Temperatur nicht beeinflusst und blieb gegenüber dem E-Modul bei RT unverändert.

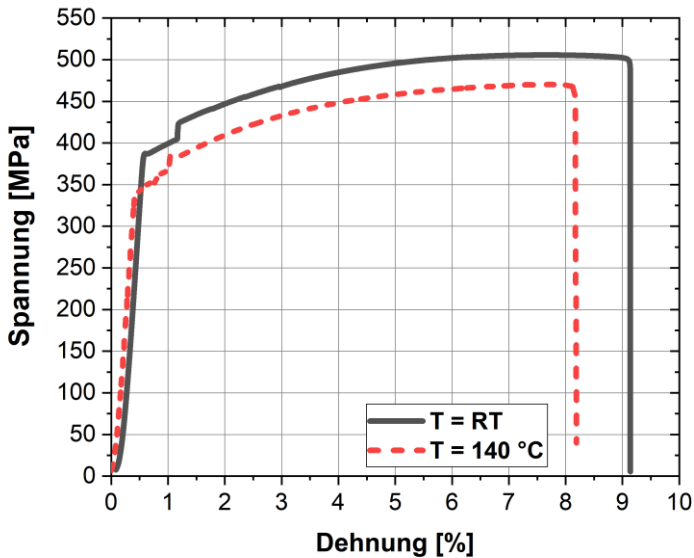


Abbildung 4-31: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien in Walzrichtung bei Raumtemperatur (RT) und bei einer Temperatur von 140 °C

Die Temperierung bei der mechanischen Beanspruchung erfolgte wie beim Zugversuch mit einem Heißluftföhn und wurde mit einem Infrarot-Thermometer kontrolliert. Die temperierte Probe wurde bei 85 % der Warmdehngrenze ($R_{eS} = 340$ MPa) mit einer Oberspannung $\sigma_{o, 140\text{ °C}}$ von 289 MPa und einer maximalen Zyklanzahl von 10^5 Zyklen belastet. Die dabei ermittelten magnetischen Kennwerte werden in Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33 für steigende Zyklanzahlen veranschaulicht. Zum Vergleich sind in dieser Abbildung zusätzlich die Kennwerte der mechanischen Zyklierung bei Raumtemperatur ($R_{eS} = 392$ MPa) mit einer Oberspannung von 85 % R_{eS} aufgeführt.

Bei der temperierten Probe ist für steigende Zyklenzahlen eine Degradation der aller gemessenen Kennwerte erkennbar. Im Vergleich zu der magnetischen Degradation bei Raumtemperatur ist diese jedoch deutlich geringer. Nach 10^4 Zyklen liegen die Kennwerte der temperierten Probe auf dem Niveau der bei Raumtemperatur mit Oberspannungen von 80 % R_{eS} belasteten Probe. Nach 10^5 Zyklen ist gegenüber dem Zustand nach 10^4 Zyklen nur eine geringe Veränderung zu erkennen.

Wenn die Änderung der Warmdehngrenze ($R_{eS} = 340$ MPa) nicht berücksichtigt wird und die mechanische Beanspruchung bei 85 % der ursprünglichen Streckgrenze von $R_{eS} = 392$ MPa durchgeführt wird, kommt es zu einer plastischen Deformation der Probe. Bei der mechanisch zyklerten Probe ohne Berücksichtigung der Warmdehngrenze wurde nach 10^4 Zyklen eine Maximalpermeabilität von 2.400 gemessen (vgl. Abbildung 4-32, oben). Die Permeabilität liegt hierbei deutlich unter der Maximalpermeabilität einer bei Raumtemperatur mit der gleicher Oberspannung mechanisch zyklerten Probe nach 10^4 Zyklen. Bei der Bewertung des Temperatureinflusses ist deshalb zu berücksichtigen, ob die Absolutwerte der Oberspannung oder die Relativwerte im Vergleich zur Streckgrenze betrachtet werden.

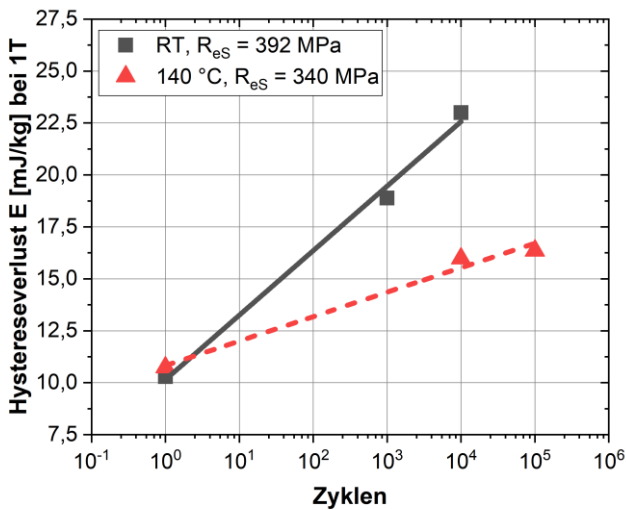
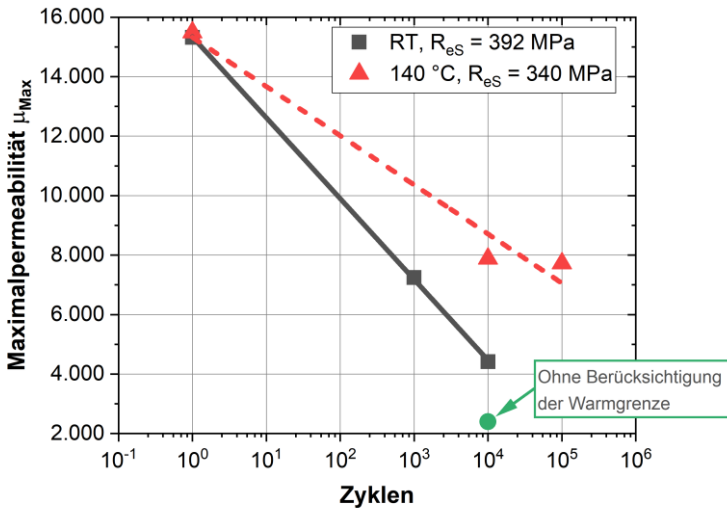


Abbildung 4-32: Vergleich der Maximalpermeabilität und der Hystereseverluste nach mechanischer Zyklierung bei Raumtemperatur (RT) und bei 140 °C

4 Experimentelle Ergebnisse

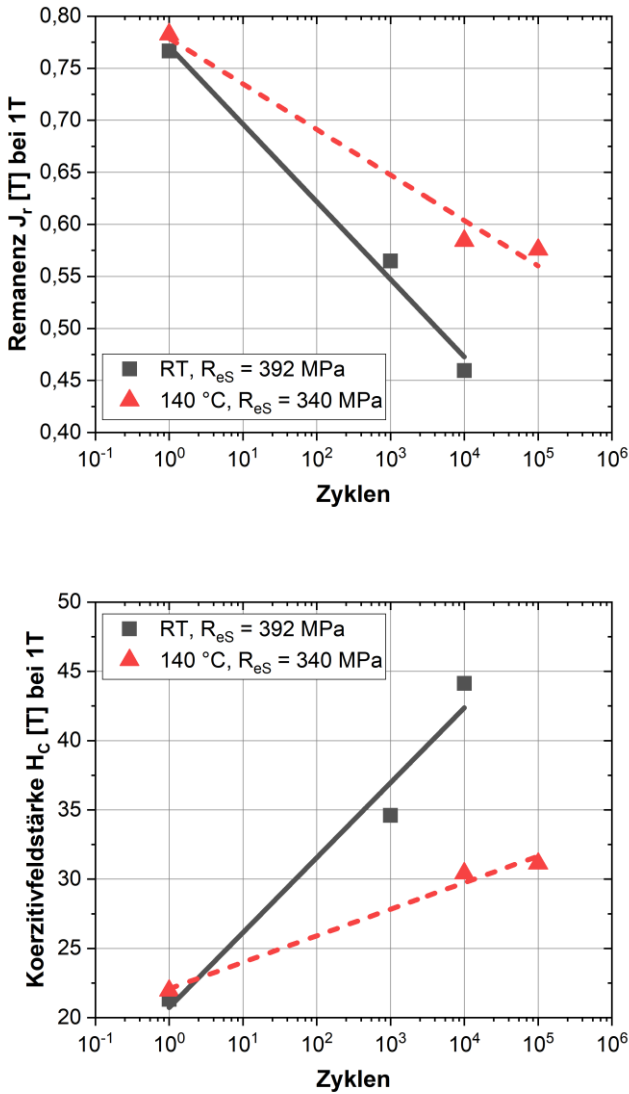


Abbildung 4-33: Vergleich der Remanenz und Koerzitivfeldstärke nach mechanischer Zyklisierung bei Raumtemperatur (RT) und bei 140 °C

4.8 Einfluss der Zyklisierung auf die mechanischen Eigenschaften

Bei der magnetischen Charakterisierung der mechanisch zyklerten Proben wurde eine sehr starke Degradation der magnetischen Eigenschaften bei Lastniveaus $> 80\%$ R_{eS} festgestellt. Hierbei ist nicht auszuschließen, dass die mechanische Zyklisierung zu Verspannungen im Material führt, die sich wiederum auf die mechanischen Eigenschaften auswirken. Für die Prüfung einer möglichen Auswirkung wurde ein Zugversuch einer mit 10^4 Zyklen bei 85% R_{eS} belasteten Probe durchgeführt. In Abbildung 4-34 wird die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie der mechanisch zyklerten Probe der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie einer unbelasteten Probe gegenübergestellt.

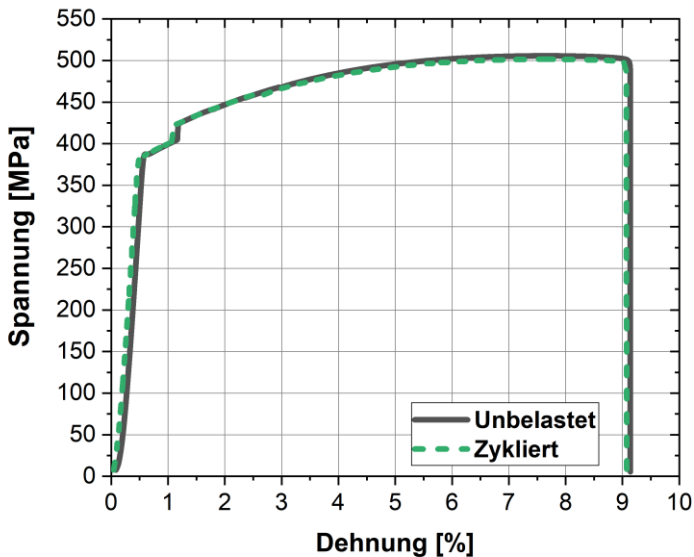


Abbildung 4-34: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien in Walzrichtung einer unbelasteten Probe und einer mechanisch zyklerten Probe nach 10^4 Zyklen bei 85% R_{eS}

Bei der zyklerten Probe wurde keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften festgestellt. Die Streckgrenze der zyklerten Probe liegt mit 387 MPa nur unwesentlich unter der Streckgrenze der unbelasteten Probe (vgl. Kapitel 3.1) und damit noch im Messfehlerbereich. Auch beim E-Modul und bei der Zugfestigkeit ist kein signifikanter Unterschied erkennbar.

4.9 Gefüge und Mikrostruktur

Mit den durchgeführten Versuchen wurde gezeigt, dass die mechanische Zyklierung für Oberspannungen größer 65 % R_{eS} mit zunehmenden Lastniveau und steigender Zyklenzahl zu einer deutlichen Degradation der magnetischen Eigenschaften führt. Daher soll nun eine Korrelation der magnetischen Degradation mit mikrostrukturellen Prozessen geprüft werden. Hierfür wurde die Gefügestruktur mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) bewertet und die Textur mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) analysiert. Des Weiteren wurden am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) des Karlsruher Instituts für Technologie anhand von Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) Untersuchungen die Versetzungsstrukturen bewertet.

4.9.1 Textur Untersuchung

In Abbildung 4-35 werden eine REM Aufnahme des Gefüges (oben) und eine EBSD Aufnahme (unten) gezeigt. Bei den Aufnahmen wurde eine leichte Unschärfe in der linken Bildhälfte beobachtet, die auf die Verkippung der Probe zurückzuführen ist. Für die EBSD wurde eine geringe Auflösung von 160 x120 Pixeln gewählt. Dadurch wurde die Messzeit auf 50 min minimiert und ein starkes Driften der Probe verhindert.

In der Gefügaufnahme ist eine durchschnittliche Korngröße von ca. 200 μm erkennbar. Hierbei sind kleinere Körner mit einer Größe von ca. 20-40 μm und wenige größere Körner mit ca. 300-370 μm vorhanden.

Die kleineren Körner können auch angeschnittene größere Körner sein, was wegen der geringen Blechdicke nicht weiter untersucht wurde. Die EBSD Aufnahme besitzt eine Nulllösung von 4,8 %, was an den schwarzen Pixeln in Abbildung 4-35 (unten) ersichtlich ist.

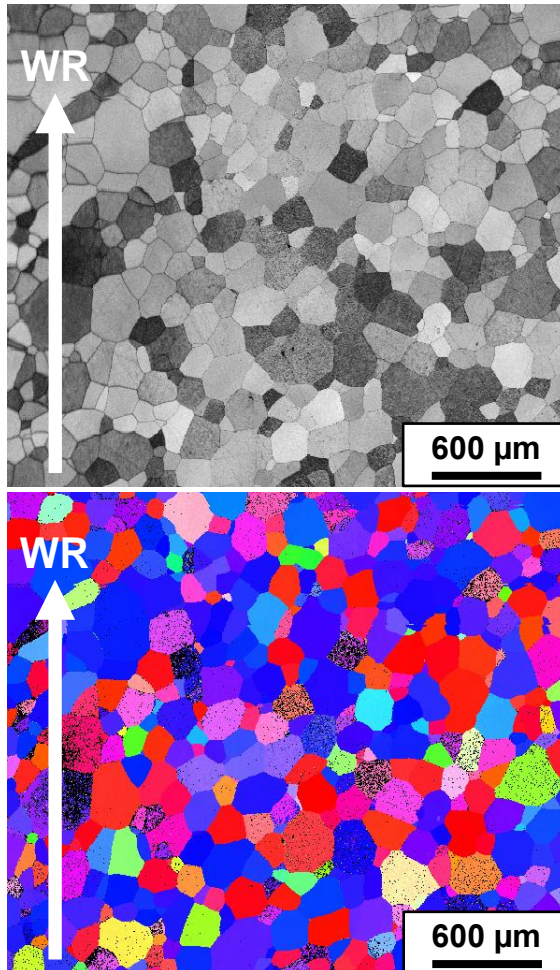
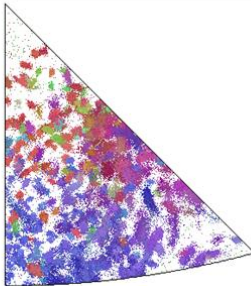


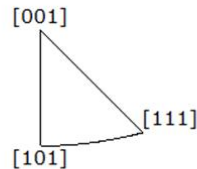
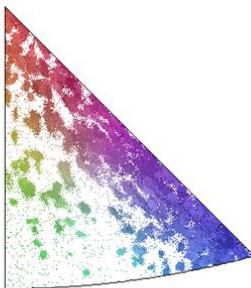
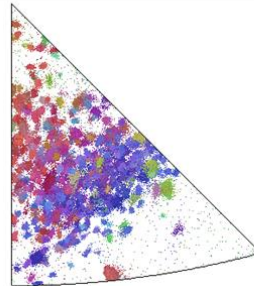
Abbildung 4-35: REM Bild des Gefüges (oben) und EBSD Aufnahme (unten)

In Abbildung 4-36 sind die inversen Polfiguren der Walz- und Querrichtung sowie senkrecht zur Walzebene zu sehen. In Walz- und Querrichtung ist keine bevorzugte Orientierung der Körner vorhanden. In Walzrichtung sind im Vergleich zur Querrichtung einzelne Körner mit einer [001] Orientierung erkennbar. Die Querrichtung besitzt dem hingegen mehr Körner mit einer [101] und einer [111] Orientierung. Senkrecht zur Walzebene ist eine Vorzugsorientierung der Körner in [111] Richtung und eine geringe Orientierung in [001] Richtung zu erkennen.

Querrichtung



Walzrichtung



Senkrecht zur Walzebene

Abbildung 4-36: Inverse Polfiguren der Walz- und Querrichtung sowie senkrecht zur Walzebene

4.9.2 Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchung

Die transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen der Versetzungsstrukturen wurde mit einem Philips CM200 Mikroskop am LEM durchgeführt. Die Proben wurden mit einem 3 mm Durchmesser aus den Blechstreifen gestanzt und elektrolytisch ausgedünnt. Die Orientierung der Proben konnte aufgrund der schwierigen Handhabung nicht berücksichtigt werden. Es wurden vier Proben hergestellt. Die Untersuchung wurde an einer Probe aus dem unbelasteten Material und jeweils einer aus dem Zustand nach 10^4 Zyklen auf 85 % R_{eS} , nach 10^7 Zyklen auf 70 % R_{eS} sowie nach 10^8 Zyklen auf 65 % R_{eS} durchgeführt. Bei den aufgenommenen Bildern wurde der Kontrast nachträglich angepasst, damit die Versetzungsstrukturen deutlich zu erkennen sind.

Im unbelasteten Zustand waren kaum Versetzungen zu finden. Über große Bereiche hinweg waren, wenn überhaupt nur, vereinzelt Versetzungen zu finden. Diese werden exemplarisch in Abbildung 4-37 gezeigt. Die gefundenen Versetzungen sind in beiden Aufnahmen deutlich als „schwarze Linien“ zu erkennen. Die Größe der Versetzungen variierte von ca. 200 bis ca. 350 nm. Bei der Probe, die mit 10^8 Zyklen und einer Oberspannung von 65 % R_{eS} zyklisiert wurde, sind Bereiche mit vielen Versetzungen gefunden worden (vgl. Abbildung 4-38). Die meisten Versetzungen haben dabei eine Länge von ca. 200 nm. Dabei sind auch vereinzelt Versetzungen mit einer Länge von ca. 50 nm und ca. 500 nm zu erkennen. Die Versetzungen verlaufen dabei ausgerichtet in parallelen Linien. Bei der Probe, die auf Oberspannungen von 70 % R_{eS} mit 10^7 Zyklen mechanisch belastet wurde sind ebenfalls Bereiche mit ausgerichteten parallel verlaufenden Versetzungen zu sehen (vgl. Abbildung 4-39).

4 Experimentelle Ergebnisse

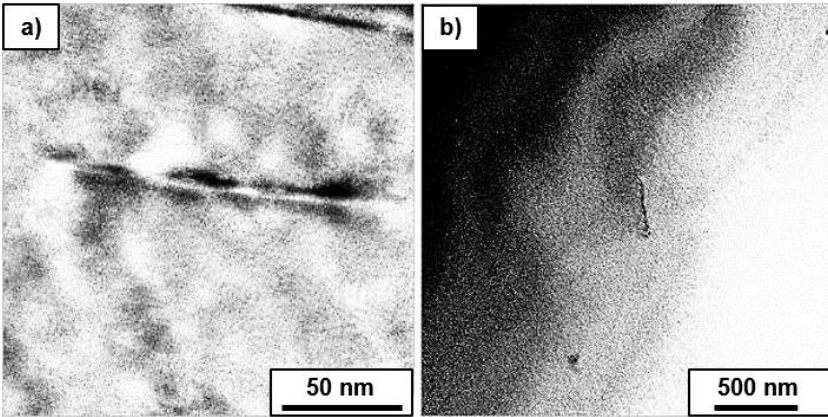


Abbildung 4-37: TEM Aufnahmen der unbelasteten Probe: Einzelne Versetzungen mit unterschiedlicher Länge a) ca. 200 nm, b) ca. 350 nm

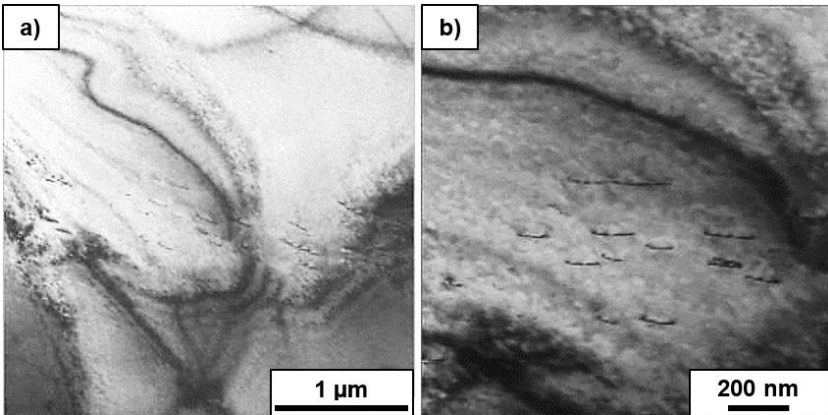


Abbildung 4-38: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^8 Zyklen mit einer Oberspannung von 65 % R_{eS} : Parallel verlaufende Versetzungen a) Versetzungslänge ca. 200-400 nm, b) Versetzungslänge 100-400 nm

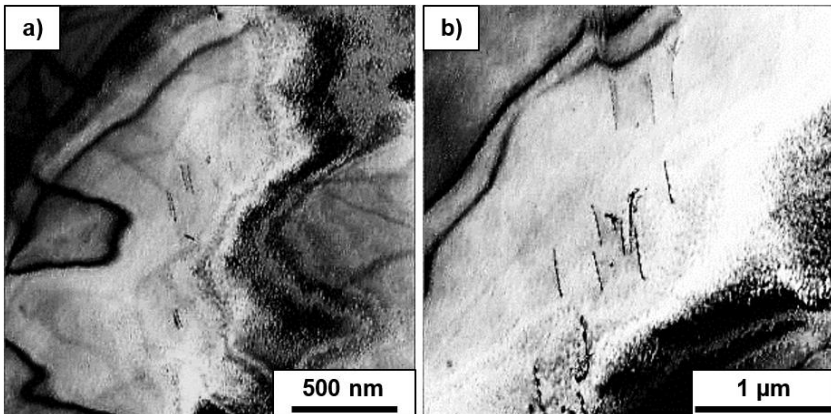


Abbildung 4-39: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^7 Zyklen mit einer Oberspannung von 70 % R_{eS} : Parallel verlaufende Versetzungen a) Versetzungslänge ca. 200-400 nm, b) Versetzungslänge ca. 0,5-1 μm

In den TEM Aufnahmen lassen sich auch bei dieser Probe kleine Versetzungen von ca. 200 nm erkennen. Es wurde aber auch eine deutliche Verlängerung der Versetzungen festgestellt, bei welcher einzelne Versetzungen eine Länge von bis zu 1 μm besitzen. Gegenüber dieser Probe ist nach 10^4 Zyklen mit der Oberspannung von 85 % R_{eS} eine signifikante Zunahme und Verlängerung der Versetzungen beobachtet worden. Die Versetzungslängen reichen bei dieser Probe von ca. 100 nm bis zu 1,5 μm (vgl. Abbildung 4-40 a) - d)). Wobei hierbei deutlich mehr Versetzungen länger als 1 μm zu sehen sind. Deutlich zu erkennen ist hierbei auch, dass die Versetzungen parallel verlaufen. Gegenüber den Proben der niedrigeren Lastniveaus ist bei dieser Probe zudem eine Bildung von Versetzungsnetzwerken zu erkennen (vgl. Abbildung 4-40 c) und d)). Dabei sind zwei Richtungen von parallel angeordneten Versetzungen zu erkennen, die sich in einem Winkel von ca. 60° zueinander schneiden.

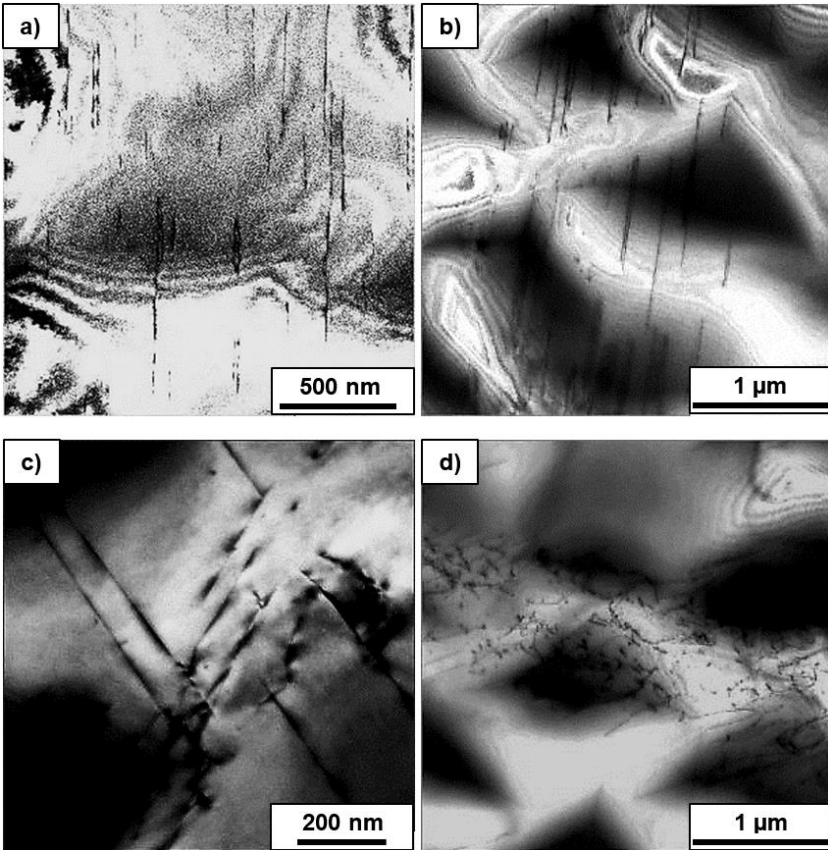


Abbildung 4-40: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^4 Zyklen mit einer Oberspannung von 85 % R_{eS} : a) Lange Versetzungen ca. 1 μm , b) Parallel verlaufende Versetzungen teilweise größer 1 μm , c) Kreuzende Versetzungen, d) Versetzungsnetzwerk

Bei den TEM-Aufnahmen konnte die Orientierung der Proben nicht berücksichtigt werden, weshalb nicht genau gesagt werden kann, welche Orientierung neu hinzugekommen ist. An dieser Stelle lässt sich aber qualitativ zeigen, dass es zu einer Zunahme und Verlängerung der Versetzungen mit zunehmendem Lastniveau gekommen ist.

5 Bewertung und Diskussion

Bei rotierenden Maschinenelementen sind durch stetige Drehzahlwechsel mechanisch-zyklische Beanspruchungen zu berücksichtigen. Die auftretenden Maximalspannungen können unter Umständen das Niveau der Streckgrenze erreichen und lokal sogar überschreiten. In Bereichen mit dünnen Blechquerschnitten ist eine Berücksichtigung besonders wichtig, da die Belastung zu einer Beeinträchtigung des magnetischen Flusses führen kann. Für eine genaue Bewertung der Auswirkungen ist es deshalb wichtig die Degradation der magnetischen Eigenschaften zu prüfen und den Zusammenhang mit mikrostrukturellen Prozessen zu bewerten.

5.1 Magnetische Degradation

Bei der magnetischen Charakterisierung wurden die Eigenschaften für das Elektroblech M270-35A sowohl in Walz- als auch in Querrichtung ermittelt. Dabei wurden im unbelasteten Zustand eine geringere Maximalpermeabilität, eine höhere Koerzitivfeldstärke, eine geringere Remanenz und höhere Ummagnetisierungsverluste gemessen. Die Unterschiede sind auf den Herstellungsprozess zurückzuführen und typisch für nicht kornorientierte Elektrobleche [Wup05]. Bei der Texturuntersuchung mittels EBSD wurde erwartungsgemäß keine deutliche Vorzugsorientierung in der Walzebene festgestellt, jedoch waren in Walzrichtung vereinzelt Körner in der magnetisch bevorzugten [001] Richtung und in Querrichtung in der magnetisch nicht bevorzugten [111] Richtung orientiert. Hiermit lassen sich die schlechteren magnetischen Eigenschaften in Querrichtung auch erklären. Die fehlende Vorzugsorientierung passt sehr gut zu dem untersuchten nicht kornorientierten und schlussgeglühten Elektroblech [Pet10, Tak97], bei dessen Produktion versucht wird eine Orientierung der Körner in [111] Richtung

sowohl in der Walz- als auch in der Querrichtung bestmöglich zu vermeiden (vgl. Abbildung 4-36).

Nach der mechanischen Zyklisierung auf Lastniveaus unterhalb der Streckgrenze wurde eine Veränderung der magnetischen Eigenschaften festgestellt. Dabei wurde eine Verschlechterung der Eigenschaften mit zunehmender Zyklenzahl und zunehmendem Lastniveau beobachtet. Bei Oberspannungen von 85 % der Streckgrenze und einer vergleichsweise geringen Zyklenanzahl von 10^3 Zyklen wurde sowohl in Walz- als auch in Querrichtung eine signifikante magnetische Degradation festgestellt. Nach 10^4 Zyklen beträgt die irreversible Abnahme der Maximalpermeabilität ca. 74 % in Walzrichtung und ca. 66 % in Querrichtung. Bei diesem Lastniveau ist ein Zusammenfallen der magnetischen Eigenschaften der Walz- und Querrichtung zu beobachten. Mit abnehmendem Lastniveau kommt es zu einer Verringerung der magnetischen Degradation. Für Lastniveaus $< 65\%$ R_{eS} in Walzrichtung und $< 70\%$ R_{eS} in Querrichtung konnte selbst nach 10^8 Zyklen keine signifikante magnetische Degradation festgestellt werden.

Die magnetische Degradation nach mechanisch zyklischer Belastung ist am deutlichsten bei den Messungen der Permeabilität zu beobachten. Bei den Ummagnetisierungsverlusten ist die Degradation am wenigsten zu erkennen. Mit der Verlustseparation nach Bertotti ist die Auswirkung der mechanischen Zyklisierung für die einzelnen Verlustkomponenten bewertet worden. Hierbei ist eine deutliche Zunahme der Hysterese- und Anomalieverluste festgestellt worden. Bei den Wirbelstromverlusten wird keine Zunahme beobachtet, da der elektrische Widerstand durch die mechanische Zyklisierung nicht beeinflusst wurde. Für Frequenzen ≤ 200 Hz und Polarisierungen $\geq 1,0$ T sind die Beiträge der Wirbelstromverluste zu den Gesamtverlusten geringer als die Beiträge der Hysterese- und Anomalieverluste. Für Frequenzen > 200 Hz steigt der Beitrag der Wirbelstromverluste signifikant, was auf Bertottis Gleichung zurückzuführen ist, in der die Frequenz nur bei den Wirbelstromverlusten quadratisch einfließt.

Bei niedrigen Polarisierungen ist die Auswirkung der mechanischen Zyklisierung auf die Anomalieverluste am größten und nimmt mit zunehmender Polarisation ab. Für niedrige Frequenzen ≤ 250 Hz und Polarisierungen $\leq 1,0$ T ist die Zunahme der Hystereseverluste am größten. Damit lässt sich begründen, warum die magnetische Degradation bei den statischen magnetischen Messungen und bei den Ummagnetisierungsverlustmessungen, mit niedrigen Frequenzen, am stärksten ausgeprägt ist.

Mit steigender Frequenz und steigender Polarisation überlagert der Beitrag der Wirbelstromverluste die Beiträge der Hysterese- und Anomalieverluste. Dadurch ist der Einfluss der mechanischen Zyklisierung bei hohen Frequenzen und Polarisation schlechter erkennbar.

Die magnetische Degradation ist auf die Behinderung der Domänenwandbewegung durch Versetzungen zurückzuführen. In den TEM Aufnahmen lässt sich sehr gut erkennen, dass mit einem zunehmenden Lastniveau, zum einen neue Versetzungen entstehen und zum anderen die Versetzungslinien sich deutlich verlängern. Zudem kommt es bei hohen Lastniveaus $\geq 85 R_{eS}$ zu einer Bildung von Versetzungsnetzwerken. Nach Furubayashi [Fur69] entstehen bei Raumtemperatur belasteten Fe-Si Elektroblechen hauptsächlich Schraubenversetzungen, die parallel entlang der bevorzugten Gleitebenen verlaufen. Seeger [See66a] untersuchte die Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von vorliegenden Versetzungsstrukturen. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem kreuzende Versetzungen zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Domänedynamik führen. Bei den untersuchten Proben sind nur bei der mit der Oberspannung von 85 % R_{eS} zyklisierten Probe kreuzende Versetzungen zu sehen. Interessant wäre es zu untersuchen, ab welchem Lastniveau und ab welcher Zyklenzahl eine Kreuzung der Versetzungen beginnt und ob diese mit einer signifikanten magnetischen Degradation einhergeht. Dabei könnte auch untersucht werden, wie die Gleitebenen zu Belastungsrichtung verlaufen, da dieser Zusammenhang in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte.

Die entstandenen Versetzungen bilden Pinning-Zentren und stören die Domänenwanderung sowie -rotation. Für die Überwindung dieser Pinning-Zentren wird Energie benötigt, die durch die Erhöhung der Feldstärke zur Verfügung gestellt wird. Dieser Zusammenhang lässt sich sehr gut am Verlauf der statischen Messung der Hysterese und der Kommutierungskurve sehen. Mit zunehmender Belastung und Zyklenzahl und damit einer Zunahme der Versetzungen ist ein Abflachen der Kurvenverläufe zu beobachten.

Für das Erreichen einer bestimmten Polarisation wird nach der mechanischen Schädigung eine deutlich höhere Feldstärke benötigt. Bei Lastniveaus $\leq 65 R_{eS}$ wird nur eine sehr geringe Zunahme der Versetzungen und keine Verlängerung beobachtet. Die eingebrachten Spannungen reichen bei diesen Lastniveaus nicht aus, um weitere Versetzungen zu erzeugen, die wiederum die Domänenbewegung stören würden. Mit einem Zugversuch einer mit 10^4 Zyklen auf $85 \% R_{eS}$ zyklisierten Probe konnte zudem gezeigt werden, dass die entstandenen Versetzungsstrukturen keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Hierbei wurde im Vergleich zum Zugversuch einer unbelasteten Probe, keine Veränderung des E-Moduls, der Streckgrenze und der Zugfestigkeit festgestellt.

An der Degradation der Maximalpermeabilität lässt sich der Einfluss der Spannung und Schwingspielzahl am deutlichsten erkennen. Damit kann die Veränderung der Maximalpermeabilität als Indikator für die Degradation verwendet werden. Aufgrund der starken Degradation nach 10^4 Zyklen bei Oberspannungen von $85 \% R_{eS}$ wird angenommen, dass selbst wenige Zyklen (≤ 100) zu einer deutlichen Abnahme der Maximalpermeabilität führen können (vgl. Verlauf der Kennwerte Abbildung 4-9, Abbildung 4-13, Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15). Daraus lässt sich ableiten, dass bei Spannungen knapp unterhalb der Streckgrenze, einzelne Zyklen ausreichen, um eine Degradation der magnetischen Eigenschaften hervorzurufen. Verbindet man die Oberspannungen in Abhängigkeit der Zyklenzahl, ab denen eine signifikante Veränderung der Maximalpermeabilität gemessen wurde oder erwartet

werden kann, ergibt sich der in Abbildung 5-1 dargestellte Verlauf einer magnetischen Schädigungskennlinie. Die magnetische Schädigungskennlinie steht hierbei für den Zeitpunkt ab dem eine magnetische Degradation festgestellt werden kann. Unterhalb der Linie wird keine magnetische Degradation erwartet. Bei der Kennlinie wird angenommen, dass bereits ein Zyklus mit einer Oberspannung $> R_{es}$ zu einer Degradation führt, weshalb der Punkt bei 10^0 Zyklen liegt.

Die magnetischen Eigenschaften sind vom Herstellprozess (finished, semi-finished) der Korngröße und der Legierungszusammensetzung abhängig. Daher ist zu berücksichtigen, dass der ermittelte Verlauf nur für das untersuchte Material gültig ist. Grundsätzlich kann bei anderen Fe-Si Elektroblechen ein ähnlicher Verlauf angenommen werden. Für eine eindeutige Aussage muss der Verlauf für unterschiedliche Elektrobleche jedoch je Material untersucht werden.

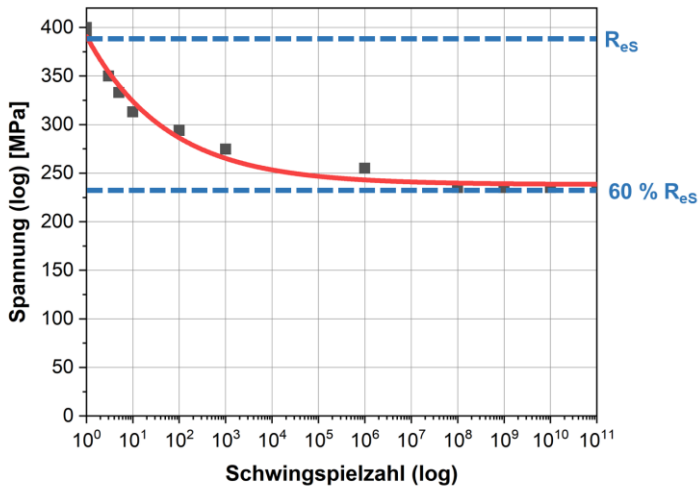


Abbildung 5-1: Spannung als Funktion der Schwingspielzahl. Vierecke beschreiben den Zeitpunkt ab dem eine magnetische Degradation festgestellt werden kann

5.2 Einflusskriterien

Das Verhalten von Metallen bei Dauerschwingversuchen ist abhängig von den Rahmenbedingungen, bei denen diese durchgeführt werden. Elektrobleche, die in Elektromotoren zum Einsatz kommen sind dabei oft erhöhten Temperaturen oder wechselnden Spannungsverhältnissen ausgesetzt. Da Einflussfaktoren unterschiedliche Auswirkungen auf die magnetische Degradation haben können, wurde ihr Einfluss in dieser Arbeit untersucht. Neben der Belastung mit konstanten Spannungen können auch Belastungen mit konstanten Dehnungsamplituden auftreten. Daher wurde in einer weiteren Versuchsreihe die mechanische Zyklisierung dehnungskontrolliert mit einer Oberspannungen von 85 % R_{eS} durchgeführt. Die dehnungskontrollierte Zyklisierung wirkt sich deutlich schwächer auf die magnetischen Eigenschaften aus. Gegenüber einer vergleichbaren spannungskontrollierten Zyklisierung ist eine Abschwächung der magnetischen Degradation um ca. 50 % erkennbar (vgl. Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30). Wird der Spannungsverlauf über der Zyklenzahl betrachtet, ist zu erkennen, dass mit zunehmender Zyklenzahl die Ober- und Unterspannung abnimmt (vgl. Abbildung 4-28). Die Oberspannung sinkt hierbei auf 75 % der Streckgrenze und ist damit ein ausschlaggebender Faktor für die Abschwächung der magnetischen Degradation.

Neben der spannungskontrollierten Zyklisierung mit der gegen null gehenden Unterspannung ($R = 0,08$) wurde in einem weiteren Versuch die Zyklisierung mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen ($R = 0,17, 0,3$ und $0,5$) durchgeführt. Bei konstanter Maximallast ist mit zunehmendem Spannungsverhältnis eine Abnahme der magnetischen Degradation zu beobachten. Diese Abnahme resultiert daraus, dass mit zunehmendem Spannungsverhältnis die Dehnungsamplituden und damit lokale irreversible Mikrodehnungen abnehmen.

Durch die Erzeugung von Magnetfeldern und immer schneller drehenden E-Motoren kommt es zu erhöhten Temperaturen, die Auswirkungen auf die Materialeigenschaften haben können. Für deren Bewertung

wurden spannungskontrollierte Zyklierungen bei einer Temperatur von 140 °C durchgeführt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Temperatureinfluss zu einer Absenkung der Streckgrenze führt und die an der Streckgrenze orientierte Oberspannung angepasst werden muss. Andernfalls wird das temperierte Elektroblech oberhalb der Streckgrenze belastet und damit plastisch verformt. Die mechanischen Eigenschaften bei 140 °C wurden über einen Zugversuch ermittelt (vgl. Abbildung 4-31). Dabei wurde eine Warmdehngrenze von 340 MPa ermittelt. Die mechanische Zyklierung erfolgte bei 85 % der Warmdehngrenze und wurde mit der Zyklierung bei Raumtemperatur verglichen. Dabei wurde bei der temperierten Probe eine Schwächung der magnetischen Degradation um ca. 30 % festgestellt (vgl. Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass mit zunehmender Temperatur eine Zunahme der Versetzungsdynamik einhergeht. Durch die erhöhte Energie in Form von Wärme wird die Versetzungsdynamik erhöht. Dadurch können die Versetzungen besser aneinander vorbeigleiten und es entstehen weniger Versetzungsnetzwerke. Bei der temperierten Probe ist die Beeinträchtigung der Domänenwandbewegung und -rotation durch Versetzungen dadurch weniger gravierend.

In der Arbeit von Yi Gao [Gao10] wird das mechanische Verhalten des gleichen Materials unter zyklischer Beanspruchung für wechselnde Randbedingungen bewertet. Hierbei wird der Einfluss der Temperatur bei 100 °C und des Spannungsverhältnisses ($R = 0,05$ und $0,3$) untersucht. Die dabei auch untersuchten statischen mechanischen Eigenschaften des M270-35A liegen in einem vergleichbaren Bereich wie die hier ermittelten. In der Arbeit von Gao wurde kein signifikanter Einfluss des Spannungsverhältnisses oder der Temperatur auf das Bauteilversagen festgestellt. Im Gegensatz hierzu sind die Ergebnisse eine passende Ergänzung, denn sie zeigen, dass obwohl makroskopisch kein Einfluss beim Bauteilversagen erkennbar ist, mikroskopisch sehr wohl eine Degradation stattfindet. Diese führt nicht zum Bauteilversagen, aber zum Verlust der der elektromagnetischen Leistungsfähigkeit.

5.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Verwendung einer taillierten Probengeometrie und der angepasste Messsensor haben sich als geeignet erwiesen, um die magnetischen Eigenschaften nach mechanisch zyklischer Belastung für Oberspannungen unterhalb der Streckgrenze zu charakterisieren. Die erarbeitete Methodik für die magnetische Charakterisierung von zyklisch beanspruchten Proben kann des Weiteren als Grundlage für die Untersuchung weiterer Materialien genutzt werden.

Das Material zeigt im unbelasteten Zustand eine Streuung bei den magnetischen Kennwerten, was möglicherweise auf einen Schnittkanten Einfluss und auf Mikroverspannungen zurückzuführen ist. Diese haben Auswirkungen auf die Bildung von weiteren Versetzungen, sodass der Einfluss der Zyklisierung auf die magnetische Degradation mit einer leichten Schwankung behaftet ist. Das Messsystem hat keine signifikante Messgenauigkeit, was sehr gut an den Messergebnissen, in denen keine magnetische Degradation festgestellt wurde, zu erkennen ist (vgl. 60 % R_{eS} in Abbildung 4-9, Abbildung 4-13, Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15). Hierbei wurden auch nach mehrmaligen Ein- und Ausspannen gleiche Messergebnisse ermittelt.

Dabei erweist sich die magnetische Charakterisierung mit dem kleinen Sensor als ein sehr sensibles Verfahren, um Mikroverspannungen zu detektieren. Mit der magnetischen Charakterisierung konnten selbst kleinste Zunahmen von Versetzungen ermittelt werden (vgl. TEM Aufnahmen: Abbildung 4-38 und Messergebnisse für 65 % R_{eS} in Abbildung 4-9, Abbildung 4-13, Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15).

Die gewonnenen Messergebnisse haben eine starke praktische Bedeutung. Mit dieser Arbeit wurde für das Material M270-35A der Firma Cogent eine Datenbasis erstellt, die für die Simulation des magnetischen Verhaltens bei mechanisch zyklischer Belastung genutzt werden kann. Mit den ermittelten Daten lassen sich zudem weitere relevante Kenngrößen für unterschiedliche Lastniveaus sowie Zyklenzahlen

mathematisch abschätzen. Im Bereich dünner Blechquerschnitte ist bei hohen Lastniveaus $> 70 \% R_{eS}$ eine signifikante Beeinflussung des magnetischen Verhaltens zu erwarten. Bei diesen Lastniveaus sinkt die magnetische Permeabilität mit zunehmender Zyklenanzahl, sodass der magnetische Fluss sich in diesen Bereichen deutlich verringern würde. Im Betrieb von Elektromotoren wird das Material jedoch überwiegend mit konstanten Dehnungen belastet. Dadurch ist eine deutlich geringere magnetische Degradation zu erwarten. Zudem ist davon auszugehen, dass die Belastung mit höheren Spannungsverhältnissen erfolgt und das Material erhöhten Temperaturen ausgesetzt wird. Beides sind ebenfalls Faktoren, die einer magnetischen Degradation mit zunehmender Zyklenzahl entgegenwirken. Eine genaue Aussage zu den Auswirkungen auf den Elektromotor kann an dieser Stelle nicht gemacht werden. Die Auswirkungen hängen in komplexer Weise vom Elektromotorentyp ab und müssen für jeden Anwendungsfall individuell bewertet werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit zunehmender Nachfrage an elektrischen Fahrzeugen gewinnt die Entwicklung von Elektromotoren immer mehr Bedeutung. Dabei geht der Trend immer mehr zu kleineren hochdrehenden Elektromotoren. Das Material rückt dabei besonders in den Fokus, weil es durch die stetigen Lastwechsel mechanisch beansprucht wird. In dieser Arbeit wurde deshalb eine Methodik erarbeitet mit der ein Einfluss steigender Zyklenzahlen und Belastungen unterhalb der Streckgrenze auf die magnetischen Eigenschaften bewertet werden kann. Dabei wurden taillierte Elektroblechproben in Walz- und Querrichtung (Material M270-35A der Firma Cogent) bei Oberspannungen unterhalb der Streckgrenze mechanisch zyklert und mit einem speziell hierfür konzipierten Messsensor magnetisch charakterisiert. Im unbelasteten Zustand wurde zwischen der Walz- und Querrichtung eine geringe Abweichung ermittelt. Die besseren magnetischen Eigenschaften in Walzrichtung sind dabei auf den Herstellungsprozess zurückzuführen, bei dem eine geringe Texturierung nicht verhindert werden kann. Für steigende Zyklenzahlen und steigende Lastniveaus wurde eine Degradation der magnetischen Eigenschaften festgestellt. Nach 10^4 Zyklen mit Oberspannungen von 85 % R_{eS} wurde in Walzrichtung eine irreversible Abnahme der Maximalpermeabilität um ca. 74 % ermittelt. Eine vergleichbar starke Degradation war auch bei der Koerzitivfeldstärke, der Remanenz und den statischen Hystereseverlusten erkennbar. Für Oberspannungen kleiner 65 % R_{eS} in Walzrichtung und kleiner 70 % R_{eS} in Querrichtung konnte keine Degradation festgestellt werden.

Diese magnetische Degradation resultiert aus irreversiblen Veränderungen der Mikrostruktur. Mittels TEM Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für steigende Lastniveaus die Anzahl der Versetzungen zunimmt, die Versetzungen sich verlängern und Versetzungsnetzwerke

gebildet werden. Mit einer zunehmenden Anzahl der Versetzungen wird die Domänendynamik gestört, woraus eine niedrigere Maximalpermeabilität, höhere Koerzitivfeldstärke, niedrigere Remanenz sowie steigende statische Hystereseverluste resultieren.

Die mikroplastischen Effekte haben jedoch keinen Einfluss auf die makroskopischen mechanischen Eigenschaften des Materials, was mit einem Zugversuch geprüft wurde. Die magnetische Charakterisierung mit dem angepassten Messsensor erwies sich dabei als ein sehr sensibles Verfahren, um kleinste Veränderungen der Versetzungsstrukturen zu detektieren. Unterhalb 65 % R_{eS} in Walzrichtung sowie unterhalb 70 % R_{eS} in Querrichtung wird die kritische Schubspannung für die Bildung neuer Versetzungen nicht erreicht und somit die Domänendynamik nicht gestört.

Zusätzlich zu den statischen Verlusten wurden die dynamischen Umagnetisierungsverluste untersucht. Mit zunehmender Zyklusanzahl und zunehmendem Lastniveau wurde auch hier eine Zunahme der Umagnetisierungsverluste beobachtet. Diese war aber weniger signifikant als bei den statischen Kennwerten. Mit der Verlustseparation nach Bertotti konnte gezeigt werden, dass die zunehmenden Versetzungen sich vor allem auf die Hysterese- und Anomalieverluste auswirken. Die Wirbelstromverluste nehmen nicht zu, da die mechanische Zyklisierung keine Auswirkungen auf den elektrischen Widerstand hatte.

Die magnetische Degradation ist stark von den Randbedingungen abhängig. Bei dehnungskontrollierter Zyklisierung wurde eine wesentlich geringere Degradation beobachtet, die sich aus der Abnahme der Maximallast mit zunehmender Zyklusanzahl ergibt. Für steigende Spannungsverhältnisse mit einer konstanten Maximallast wurde ebenfalls eine Minderung der magnetischen Degradation festgestellt. Die Minderung resultiert daraus, dass mit zunehmendem Spannungsverhältnis die Dehnungsamplituden und damit die lokalen irreversiblen Mikrodehnungen abnehmen. Die mechanische Zyklisierung wurde des Weiteren bei einer Temperatur von 140 °C durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Warmdehngrenze wurde gegenüber einer mit Oberspannungen

von 85 % R_{eS} bei Raumtemperatur zyklerten Probe eine geringere magnetische Degradation ermittelt. Durch die erhöhte Temperatur wird die Versetzungsdynamik gesteigert, sodass einzelne Versetzungen besser aneinander abgleiten können und die Bildung von Versetzungsnetzwerken minimieren.

Die ermittelten Kennwerte können als Datenbasis für die Simulation des magnetischen Verhaltens unter zyklischer Beanspruchung in Elektromotoren genutzt werden. Die erarbeitete Methodik kann des Weiteren als Grundlage für die Untersuchung weiterer Materialien genutzt werden. Hierbei könnte auch der Einfluss der Legierungselemente untersucht werden. Des Weiteren wäre eine genaue Betrachtung der entstehenden Versetzungsstrukturen und deren Orientierung interessant. Zudem könnte der Einfluss des Spannungsniveaus und der Zyklenzahl bei der Bildung von Versetzungsnetzwerken untersucht werden, da diese den größten Einfluss auf die Domänendynamik haben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Auswirkungen mechanischer Spannung und Schwingspielzahl auf das Bauteilversagen, die Anrissbildung und eine mögliche magnetische Schädigung	2
Abbildung 2-1:	Energieminimierung magnetischer Domänen: Eine Domäne mit Streufeld (links), zwei Domänen mit reduziertem Streufeld (Mitte) und Domänen ohne Streufeld (rechts)	10
Abbildung 2-2:	Ausrichtung von Domänen in einem anliegenden Magnetfeld	11
Abbildung 2-3:	Magnetisierung entlang der Neukurve mit a) einem reversiblen Wachstum der Domänen, b) irreversiblen sprunghaften Drehprozessen und Blochwandbewegungen, c) Ausbreitung der Vorzugsorientierung und d) Ausrichtung entsprechend dem äußeren Magnetfeld.....	12
Abbildung 2-4:	Statische Hystereseschleife mit schematischer Veranschaulichung der Domänenwandprozesse	12
Abbildung 2-5:	Wirbelströme in einem Eisenstück (links) und in den Einzelblechen eines Blechpaketes (rechts)...	15
Abbildung 2-6:	Schematischer Aufbau eines Single Sheet Testers zur Charakterisierung weichmagnetischer Blechtafeln	18
Abbildung 2-7:	Verlauf der Schubspannung τ [Hor12]	23
Abbildung 2-8:	Schematische Bildung von Versetzungen um an den Korngrenzen entstehende Kavitäten sowie Überschneidungen auszugleichen.	24

Abbildung 2-9:	Schematische Darstellung der Eigenspannungen [Mac73]	26
Abbildung 2-10:	Spannungs-Zeit-Verläufe mit den kennzeichnenden Spannungswerten gemäß DIN 50100 [Bür14]	28
Abbildung 3-1:	Taillierte Probengeometrie nach DIN 50125 Probenform H	32
Abbildung 3-2:	a) CAD-Modell der konzipierten Probenhalterung für die mechanische Zyklisierung von Blechstreifen, b) CAD-Modell des Keils für die Probeneinspannung und c) gefertigte Spannpacke.....	34
Abbildung 3-3:	Taillierte Probe mit Dehnmesstreifen für dehnungskontrollierte mechanische Zyklisierung	37
Abbildung 3-4:	CAD-Modell des Messensors für die magnetische Charakterisierung von taillierten Blechproben.....	38
Abbildung 3-5:	a) Messsensor für die Charakterisierung von taillierten Blechstreifen: Draufsicht des Spulenkörpers, b) Sensor mit entfernten Jochhälften und c) Sensor mit geschlossenem Joch und eingespannter Probe	39
Abbildung 3-6:	Aufbau der Widerstandsmessung mittels Vierpunktmessverfahren.....	44
Abbildung 4-1:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Walz- und Querrichtung	48
Abbildung 4-2:	Kommutierungskurven in Walz- und Querrichtung und daraus berechnete relative Permeabilität für den gesamten untersuchten Feldstärkenbereich a) und für den Bereich kleiner Feldstärken b)	50
Abbildung 4-3:	Hysteresekurven in Walz- und Querrichtung bei gleicher Feldstärke. Komplette Kurven (oben) und vergrößerter Ausschnitt (unten).....	51
Abbildung 4-4:	Hysteresekurven in Walz- und Querrichtung bei gleicher Polarisierung	52

Abbildung 4-5:	Ummagnetisierungsverluste in Walz- und Querrichtung in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz	53
Abbildung 4-6:	Kommutierungskurven der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} für Feldstärken bis 25.000 A/m (oben) und 2.500 A/m (unten)	56
Abbildung 4-7:	Kommutierungskurven der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 70 % R_{eS} (oben) und 60 % R_{eS} (unten).....	58
Abbildung 4-8:	Kommutierungskurven der Querrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} (oben) und 65 % R_{eS} (unten).....	59
Abbildung 4-9:	Maximalpermeabilität in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)	60
Abbildung 4-10:	Hysteresen der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} bei gleicher Feldstärke von 10.000 A/m (oben) und gleicher Polarisierung von 1,0 T (unten)	62
Abbildung 4-11:	Hysteresen der Walzrichtung nach zyklischer Belastung auf 70 % R_{eS} (oben) und 60 % R_{eS} (unten)	63
Abbildung 4-12:	Hysteresen der Querrichtung nach zyklischer Belastung auf 85 % R_{eS} (oben) und 70 % R_{eS} (unten)	65
Abbildung 4-13:	Remanenz in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)	66
Abbildung 4-14:	Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten)	67

Abbildung 4-15: Hystereseverluste in Abhängigkeit der Zyklenanzahl und der Spannungsniveaus für die Walzrichtung (oben) und Querrichtung (unten) 68

Abbildung 4-16: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveaus 85 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 70

Abbildung 4-17: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveaus 75 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 71

Abbildung 4-18: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveaus 70 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 72

Abbildung 4-19: Ummagnetisierungsverluste in Walzrichtung für das Lastniveaus 60 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 73

Abbildung 4-20: Ummagnetisierungsverluste in Querrichtung für das Lastniveaus 85 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 75

Abbildung 4-21: Ummagnetisierungsverluste in Querrichtung für das Lastniveaus 70 % R_{eS} in Abhängigkeit der Polarisierung und der Frequenz 76

Abbildung 4-22: Strom-Spannungs-Kennlinien zyklisch belasteter Blechstreifen 78

Abbildung 4-23: Verlustseparation nach Bertotti bei 0,5 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen..... 81

Abbildung 4-24: Verlustseparation nach Bertotti bei 1,0 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen..... 82

Abbildung 4-25: Verlustseparation nach Bertotti bei 1,5 T mit Vergleich der Verlustkomponenten für steigende Frequenzen..... 82

Abbildung 4-26:	Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Maximalpermeabilität und Hystereseverluste	85
Abbildung 4-27:	Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Remanenz und Koerzitivfeldstärke.....	86
Abbildung 4-28:	Spannungs-Dehnungs-Verlauf der dehnungskontrollierten Zyklisierung für steigende Zyklenzahlen	88
Abbildung 4-29:	Vergleich der Maximalpermeabilität und der Hystereseverluste nach spannungs- und dehnungskontrollierter mechanischer Zyklisierung..	90
Abbildung 4-30:	Vergleich der Remanenz und der Koerzitivfeldstärke nach spannungs- und dehnungskontrollierter mechanischer Zyklisierung	91
Abbildung 4-31:	Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien in Walzrichtung bei Raumtemperatur (RT) und bei einer Temperatur von 140 °C	93
Abbildung 4-32:	Vergleich der Maximalpermeabilität und der Hystereseverluste nach mechanischer Zyklisierung bei Raumtemperatur (RT) und bei 140 °C	95
Abbildung 4-33:	Vergleich der Remanenz und Koerzitivfeldstärke nach mechanischer Zyklisierung bei Raumtemperatur (RT) und bei 140 °C	96
Abbildung 4-34:	Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien in Walzrichtung einer unbelasteten Probe und einer mechanisch zyklisierten Probe nach 10^4 Zyklen bei 85 % R_{es}	97
Abbildung 4-35:	REM Bild des Gefüges (oben) und EBSD Aufnahme (unten).....	99
Abbildung 4-36:	Inverse Polfiguren der Walz- und Querrichtung sowie senkrecht zur Walzebene.....	100

Abbildung 4-37: TEM Aufnahmen der unbelasteten Probe: Einzelne Versetzungen mit unterschiedlicher Länge a) ca. 200 nm, b) ca. 350 nm..... 102

Abbildung 4-38: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^8 Zyklen mit einer Oberspannung von 65 % R_{es} : Parallel verlaufende Versetzungen a) Versetzungslänge ca. 200-400 nm, b) Versetzungslänge 100-400 nm 102

Abbildung 4-39: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^7 Zyklen mit einer Oberspannung von 70 % R_{es} : Parallel verlaufende Versetzungen a) Versetzungslänge ca. 200-400 nm, b) Versetzungslänge ca. 0,5-1 μm 103

Abbildung 4-40: TEM Aufnahmen der mechanisch zyklerten Probe nach 10^4 Zyklen mit einer Oberspannung von 85 % R_{es} : a) Lange Versetzungen ca. 1 μm , b) Parallel verlaufende Versetzungen teilweise größer 1 μm , c) Kreuzende Versetzungen, d) Versetzungsnetzwerk 104

Abbildung 5-1: Spannung als Funktion der Schwingspielzahl. Vierecke beschreiben den Zeitpunkt ab dem eine magnetische Degradation festgestellt werden kann 109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Parameter für die Messung der Kommutierungskurven.	41
Tabelle 3-2: Parameter für die Messung der statischen Hysterese ...	42
Tabelle 3-3: Regelparameter für die Messung der Ummagnetisierungsverluste	43
Tabelle 3-4: Politurroutine für Weichmagneten	46
Tabelle 4-1: Mechanische Kennwerte in Walz- und Querrichtung	48
Tabelle 4-2: Oberspannungen der Belastungsniveaus	54
Tabelle 4-3: Gemessene Ummagnetisierungsverluste P_s bei 0,5, 1,0 und 1,5 T	79
Tabelle 4-4: Koeffizienten der Verlustseparation nach Bertotti	80
Tabelle 4-5: Spannungswerte der untersuchten Spannungsniveaus.	84

Literaturverzeichnis

- [Alv05] Alves, F.; Lebourgeois, R.; Waeckerlé, T.: Soft magnetic materials for electrical engineering: state of the art and recent advances. *European Transactions on Electrical Power*, 2005, 15; S. 467–479.
- [Ase17] Asef, P.; Bargallo, R.; Laphorn, A.: Iron Loss Prediction Using Modified IEM-Formula during the Field Weakening for Permanent Magnet Synchronous Machines. *Machines*, 2017, 5, 30; S. 1–15.
- [Ash70] Ashby, M. F.: The deformation of plastically non-homogeneous materials. *Philosophical Magazine*, 1970, 21; S. 399–424.
- [Bar16] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s.l., 2016.
- [Bec39] Becker, R.; Döring, W.: *Ferromagnetismus*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1939.
- [Ber88] Bertotti, G.: General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, 24; S. 621–630.
- [Ber92] Bertotti, G.; Pasquale, M.: Physical interpretation of induction and frequency dependence of power losses in soft magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, 28; S. 2787–2789.
- [Bod13] Bode, B.; Brückner-Foit, A.: Elektroband unter statischer und zyklischer Beanspruchung. *Elektromobilität - Zuverlässigkeit und Sicherheit des Elektrofahrzeugs*, DVM-Tag, 2013; S. 39–46.

- [Bol90] Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe. Einführung in den Magnetismus, VAC-Werkstoffe und ihre Anwendungen. Siemens-Aktienges. Abt. Verl., Berlin, 1990.
- [Boz93] Bozorth, R. M.: Ferromagnetism. IEEE Press John Wiley & Sons Inc; IEEE Xplore, Piscataway, New Jersey, 1993.
- [Bro14] Brockhaus Messtechnik GmbH & Co. KG.: Messtechnik zur Kennwertbestimmung weichmagnetischer Werkstoffe, Lüdenscheid, 2014.
- [Bür14] Bürgel, R.; Richard, H. A.; Riemer, A.: Werkstoffmechanik. Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Bur39] Burgers, J. M.: Some considerations on the fields of stress connected with dislocations in a regular crystal lattice. Proc. Kon. Ned. Akad. Wetenschap, 1939; 42, S. 293-378.
- [Bus13] Buschow, K.H.J.: Handbook of Magnetic Materials. Elsevier Science, Burlington, 2013.
- [Car77] Carter, C. B.: The operation of a dislocation glide source. Philosophical Magazine, 1977, 35; S. 75–79.
- [Cog08] Cogent Surahammars Bruks: Datasheet for SURA M270-35A. https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m270-35a_1.pdf, Abrufdatum 11.07.2018, 2008.
- [daC03] daCunha, M. A.; Paolinelli, S. C.: Effect of the annealing temperature on the structure and magnetic properties of 3% Si non-oriented steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254-255; S. 379–381.

- [Dua96] Duan, X., Huneus, H., Kochmann, T., Leuridan, K., Kaczmarek, R., Protat, F.: Effect of annealing temperature and heating rate on the magnetic and mechanical properties of electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 160; S. 133–135.
- [Egg12] Eggers, D.; Steentjes, S.; Hameyer, K.: Advanced Iron-Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48; S. 3021–3024.
- [Eic09] Eich, P. C.: Zerstörungsfreie Abschätzung der Restlebensdauer metallischer Werkstoffe. Universität Bonn, Dissertation, Bonn, 2009.
- [Fio04] Fiorillo, F.: Measurement and characterization of magnetic materials. Elsevier, Amsterdam, 2004.
- [Fis17] Fischer, C. H.: Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060. Dissertation. TU Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Darmstadt, 2017.
- [Fra50] Frank, F. C.; Read, W. T.: Multiplication Processes for Slow Moving Dislocations, *Phys. Rev.* 79, 722, 1950.
- [Fre26] Frenkel, J.: Zur Theorie der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit kristallinischer Körper. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 37; S. 572–609.
- [Fur69] Furubayashi, E.-I.: Behavior of Dislocations in Fe-3% Si under Stress. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1969, 27; S. 130–146.
- [Gao10] Gao, Y. Long, R., Pang, Y., Lindenmo, M.: Fatigue Properties of an Electrical Steel and Design of EV/HEV IPM Motor Rotors for Durability and Efficiency. SAE 2010 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2010-01-1308, 2010; S. 1–16.

- [Gos33] Goss, N. P.: Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test. US Patent. US1965559A, 1933.
- [Har14] Harstick, H. M. S.; Ritter, M.; Riehemann, W.: Influence of Punching and Tool Wear on the Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50; S. 1–4.
- [Hof16] Hofmann, M., Naumoski, H., Herr, U., Herzog, H.-G.: Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets in Respect of Cutting. Micromagnetic Analysis and Macromagnetic Modeling. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52; S. 1–14.
- [Hof87] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen. Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1987.
- [Hor12] Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [Hub13] Hubert, O.; Hug, E.: Influence of plastic strain on magnetic behaviour of non-oriented Fe–3Si and application to manufacturing test by punching. Materials Science and Technology, 2013, 11; S. 482–487.
- [Hug95] Hug, E.: Evolution of the magnetic domain structure of oriented 3% SiFe sheets with plastic strains. Journal of Materials Science, 1995, 30; S. 4417–4424.
- [Hug96] Hug, E.; Hubert, O.; Clavel, M.: Influence of the plastic anisotropy on the magnetic properties of a nonoriented 3% silicon iron. Journal of Applied Physics, 1996, 79; S. 4571.

- [Ils10] Ilchner, B.; Singer, R. F.: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [Ior03] Iordache, V. E.; Hug, E.; Buiron, N.: Magnetic behaviour versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe–(3 wt.%)Si steel. Materials Science and Engineering: A, 2003, 359; S. 62–74.
- [Kal12] Kallenbach, E.: Elektromagnete. Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Kas13] Kashiwara, Y., Fujimura, H., Okamura, K., Imanishi, K., Yashiki, H.: Estimation model for magnetic properties of stamped electrical steel sheet. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183; S. 1–11.
- [Kne62] Kneller, E.; Seeger, A.; Kronmüller, H.: Ferromagnetismus. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1962.
- [Kom02] Komatsubara, M., Sadahiro, K., Kondo, O., Takamiya, T., Honda, A.: Newly developed electrical steel for high-frequency use. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 242-245; S. 212–215.
- [Kop07] Kopitzki, K.; Herzog, P.: Einführung in die Festkörperphysik. B.G. Teubner GmbH, Wiesbaden, 2007.
- [Lan08] Landgraf, F.J.G.; Campos, M. F. de; Leicht, J.: Hysteresis loss subdivision. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320; S. 2494–2498.
- [Lan35] Landau, L.D.; Lifshitz E.M.: On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. Phys. Zeitsch. der Sowjetunion, 1935; S. 153–169.

- [Lev12] Levin, M. C.: Charakterisierung von weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen für den Einsatz in Traktionsantrieben. Dissertation. TU München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, München, 2012.
- [LoB00] LoBue, M., Sasso, C., Basso, V., Fiorillo, F., Bertotti, G.: Power losses and magnetization process in Fe–Si non-oriented steels under tensile and compressive stress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 215-216; S. 124–126.
- [Mac73] Macherauch, E.: Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen. *Chemie-Ing.-Techn.* 45, 1973; S. 760-764.
- [May75] Mayer, A.; Bölling, F.: Physikalisch-metallkundliche Grundlagen der Elektroblech Herstellung. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1975, 2; S. 151–161.
- [Mic06] Michalowsky, L.; Schneider, J.: *Magnetetechnik. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen.* Vulkan-Verlag GmbH, Leipzig, 2006.
- [Miy06] Miyagi, D. et al.: Development of Measuring Equipment of DC-Biased Magnetic Properties Using Open-Type Single-Sheet Tester. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42; S. 2846–2848.
- [Mor01] Morrish, A. H.: *The Physical Principles of Magnetism.* Wiley-IEEE Press, New York, 2001.
- [Mro18] Mrozek, R.; Oberacker, R.; Hoffmann, M. J.: Ermüdung E-Blech. Abschlussbericht: FVA Forschungsvorhaben Nr. 727 I. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 1274, 2018; S. 1–41.
- [Mug76] Mughrabi, H.; Herz, K.; Stark, X.: The effect of strain-rate on the cyclic deformation properties of α -iron single crystals. *Acta Metallurgica*, 1976, 24; S. 659–668.

- [Mun85] Munz, D.: Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe. Verl. DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, 1985.
- [Nak87] Nakata, T.; Kawase, Y.; Nakano, M.: Improvement of measuring accuracy of magnetic field strength in single sheet testers by using two H coils. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, 23; S. 2596–2598.
- [Nak99] Nakase, T., Nakano, M., Fujiwara, H., Takahashi, N.: Single sheet tester having open magnetic path for measurement of magnetostriction of electrical steel sheet. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35; S. 3956–3958.
- [Nau14] Naumoski, H., Maucher, A., Vandenbossche, L., Jacobs, S., Herr, U., Chassang, X.: Magneto-optical and field-metric evaluation of the punching effect on magnetic properties of electrical steels with varying alloying content and grain size. Published in: 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2014; S. 1–9.
- [Nau15] Naumoski, H.; Maucher, A.; Herr, U.: Investigation of the influence of global stresses and strains on the magnetic properties of electrical steels with varying alloying content and grain size. Published in: 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2015; S. 1–8.
- [Nit86] Nitzsche, K.; Ullrich, H.-J.: Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986.
- [Nix98] Nix, W. D.; Gao, H.: Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46; S. 411–425.

- [Noz78] Nozawa, T., Yamamoto, T., Matsuo, Y., Ohya, Y.: Relationship between total losses under tensile stress in 3 percent Si-Fe single crystals and their orientations near. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1978, 14; S. 252–257.
- [Oda08] Oda, Y.; Kohno, M.; Honda, A.: Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320; S. 2430–2435.
- [Oro34] Orowan, E.: Zur Kristallplastizitaet. III. *Zeitschrift für Physik*, 1934, 89; S. 634–659.
- [Pet10] Petrovic, D. S.: non-oriented electrical steel sheets. *Materials and Technologies*, 2010, 44(6); S. 317–325.
- [Pol93] Polák, J.: Lattice Defects in the Process of Fatigue in Crystalline Materials. *Solid State Phenomena*, 1993, 35-36; S. 405–410.
- [Pol99] Polinder, H.; Hoeijmakers, M. J.: Eddy-current losses in the segmented surface-mounted magnets of a PM machine. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 1999, 146; S. 261.
- [Rad07] Radaj, D.; Vormwald, M.: *Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [Sch68] Schmid, E.; Boas, W.: *Plasticity of Crystals, with special Reference to Metals*. Springer New York, 1968.
- [See66a] Seeger, A.: The effect of dislocations on the magnetization curves of ferromagnetic crystals. *Le Journal de Physique Colloques*, 1966, 27; 68-77.
- [See66b] Seeger, A.: *Moderne Probleme der Metallphysik. Zweiter Band Chemische Bindung in Kristallen und Ferromagnetismus*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1966.

- [Ste00] Stefanita, C. G.; Clapham, L.; Atherton, D. L.: Subtle changes in magnetic Barkhausen noise before the macroscopic elastic limit. *Journal of Materials Science*, 2000, 35; S. 2675–2681.
- [Tak97] Takashima, M.; Komatsubara, M.; Morito, N.: {001}{210} Texture Development by Two-stage Cold Rolling Method in Non-oriented Electrical Steel. *The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ INT)*, 1997, 37; S. 1263–1268.
- [Tay34] Taylor, G. I.: The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Part I. Theoretical. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1934, 145; S. 362–387.
- [Tim07] Timmer, R.; Helinko, M.; Eskola, R.: Effiziente Motoren. Optimieren der Lebensdauerleistung von Elektromotoren. *ABB Technik*, Heft 2, 2007; S. 81–84.
- [Tou76] Toussaint, F.: Bedeutung und Entwicklung des Elektroblech. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1976, 2; S. 132–135.
- [Van13] Vandebossche, L., Jacobs, S., Jannot, X., McClelland, M., Saint-Michel, J., Attrazic, E.: Iron loss modelling which includes the impact of punching, applied to high-efficiency induction machines. *3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2013; S. 1–10.
- [Weg12] Wegner K.; Müller W.: *Werkstoffe und Fertigung 1*. Skript zur Vorlesung, ETH Zürich, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, 2012.
- [Wei07] Weiss, P.: L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 1907, 6; S. 661–690.

- [Wel02] Welch, R.H.J.; Younkin, G. W.: How temperature affects a servomotor's electrical and mechanical time constants: 37th Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2002; S. 1041–1046.
- [Wöh10] Wöhl-Bruhn, H.: Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2010.
- [Woh88] Wohlfarth, E. P.: Ferromagnetic Materials. A handbook on the properties of magnetically ordered substances. Volume 4, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1988.
- [Wup05] Wuppermann, C.-D.; Schoppa, A.: Merkplatt 401: Elektroband und -blech. Stahl-Informations-Zentrum, 2005.
- [Yam15] Yamamoto, K.-i, Toshiyuki, H., Shunji, Y.: Effects of compressive stress normal to the surface of grain-oriented electrical steel sheets. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 48; S. 153–158.
- [Yam74] Yamamoto, T.; Ohya, Y.: Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, 10; S. 157–159.

Entstandene Publikationen

Folgende Publikationen sind im Verlauf der Promotion entstanden:

- [Lam16] Lammers, S.; Adam, G.; Schmid, H. J.; Mrozek, R.; Oberacker, R.; Hoffmann, M. J.; Quattrone, F.; Ponick, B.: Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine. 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), IEEE, 2016; S. 41–45.
- [Lam17] Lammers, S.; Quattrone, F.; Mrozek, R.; Zimmer, D.; Schmid, H.; Ponick, B.; Hoffmann, M. J.: Entwicklung und additive Herstellung einer Leichtbau-Rotorwelle für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine. 14th Rapid.Tech Conference, Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 80-93.
- [Mro18] Mrozek, R.; Oberacker, R.; Hoffmann, M. J.: Ermüdung E-Blech. Abschlussbericht: FVA Forschungsvorhaben Nr. 727 I. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 1274, 2018; S. 1–41.