

Neuaufbau eines Versuchsstandes zur Bestimmung magnetischer Eigenschaften von Werkstoffen

M.Sc. Nikolaus Trnka*, Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Professur für elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, Technische Universität Chemnitz

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der Neuaufbau eines Versuchsstandes beschrieben, der zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften von ferromagnetischen Werkstoffen dient. Angefangen bei der Notwendigkeit eines solchen Versuchsstandes werden der Aufbau, die Komponenten sowie die Besonderheiten beschrieben und erste Messergebnisse nach der Inbetriebnahme gezeigt.

Abstract

This paper describes the new construction of a test bench used to investigate magnetic properties of ferromagnetic materials. Starting with the necessity of a test bench of this kind, the setup, the components and the special features are described and the first measurement results are shown after commissioning.

1 Bestimmung magnetischer Eigenschaften

Zur Charakterisierung von ferromagnetischen Materialien werden i. d. R. die Magnetisierungskennlinie sowie die aussteuerungsabhängigen Verluste in verschiedenen Arbeitspunkten angegeben. Die Magnetisierungskennlinie wird aus den Umkehrpunkten von Hystereseschleifen bei ansteigender Aussteuerung zusammengesetzt. Aus den Zeitverläufen der dazu aufgenommenen Messgrößen können mit Hilfe der Probenparameter die auftretenden Verluste berechnet und in die spezifischen, d.h. die gewichtsbezogenen Verluste umgerechnet werden.

Das Messprinzip basiert i. d. R. auf dem induktiven Verfahren. Eine Materialprobe wird mit zwei Wicklungen versehen. Eine der Wicklungen wird genutzt, um einen magnetischen Wechselfluss im Material zu erzeugen. In der zweiten Leiterstruktur, welche von diesem Fluss durchsetzt wird, kann eine induzierte Spannung gemessen und daraus die magnetische Flussdichte bestimmt werden. Über den zugehörigen Strom der Magnetisierungseinrichtung wird die magnetische Feldstärke bestimmt. Abb. 1(a) zeigt eine Skizze des Messprinzips.

Am weitesten verbreitet, aber auch mit den meisten systematischen Fehlern beaufschlagt, ist die Messung via Epsteinrahmen [1, 2]. Das Verfahren ist hochgradig standardisiert und wird daher vor allem von Blechherstellern genutzt. Alternativ dazu werden ringförmige Materialproben eingesetzt [3], welche die systematischen Fehler - wie verteilte Luftspalte und lokale Sättigungseffekte - umgehen. Nachteil ist der wesentlich höhere Aufwand in der Bewicklung. Mit den beiden genannten Prinzipien ist nur die Abbildung von Wechselmagnetisierung möglich. Vor allem zur Untersuchung von drehender/rotierender Magnetisierung wird das Prinzip

*Corresponding author: N. Trnka (nikolaus.trnka@etit.tu-chemnitz.de)

des Single-Sheet-Testers (SST) genutzt, bei dem eine einzelne Blechprobe über einen hochpermeablen magnetischen Rückschluss magnetisiert wird. Das Prinzip bietet die Möglichkeit über mehrere ausgeführte Teilwicklungen eine mehrdimensionale Magnetisierung einzubringen und zu messen. In Abb. 1(b) sind die drei Verfahren skizziert (links: Epsteinrahmen, mitte: Ringprobe, rechts: SST).

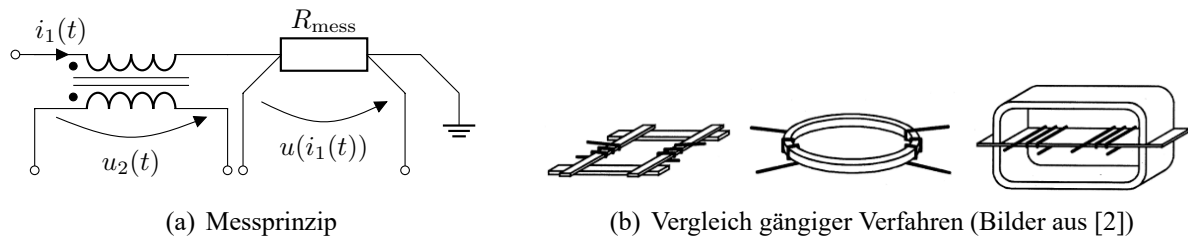


Abb. 1: Prinzipien der Messung magnetischer Eigenschaften

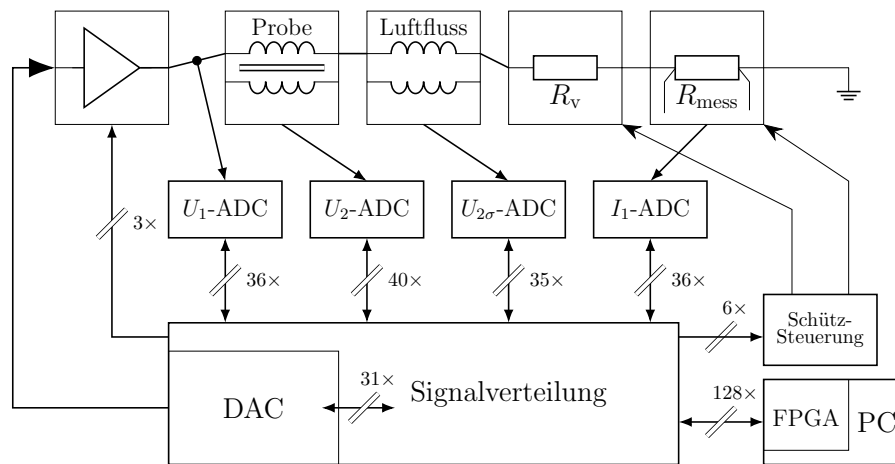
2 Notwendigkeit Neuaufbau

An der Professur für elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe der TU Chemnitz (EWA) wurde im Zuge einer Dissertation ein Versuchsstand zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Werkstoffen unter der Nutzung von Ringproben aufgebaut [4]. Der Versuchsstand wurde für die normgerechte Messung des magnetischen Flusses mit sinusförmigem zeitlichen Verlauf konzipiert. Im Fokus standen dabei insbesondere Untersuchungen zur Degradation von Materialeigenschaften an den Schnittkanten. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Analogverstärker, einer steckbaren Wicklung als Probenhalter sowie einem PC mit einer vierkanaligen Messkarte und einer Analogausgabe sowie einem Analogregler. Die maximal mögliche Messfrequenz ist auf ca. 500 Hz begrenzt und der geregelte Betrieb ist auf sinusförmige Verläufe der Flussdichte beschränkt. Dabei bereitet in vielen Fällen der Analogregler Probleme. Neben einem schwierigen offset-Abgleich des Integrators ist die Regelung im Bereich der höheren Frequenzen sowie hohen Aussteuerungen nur schwer zu parametrisieren. Das führte zu Einschränkungen bei Stabilität und Genauigkeit der gewünschten Zielgrößen.

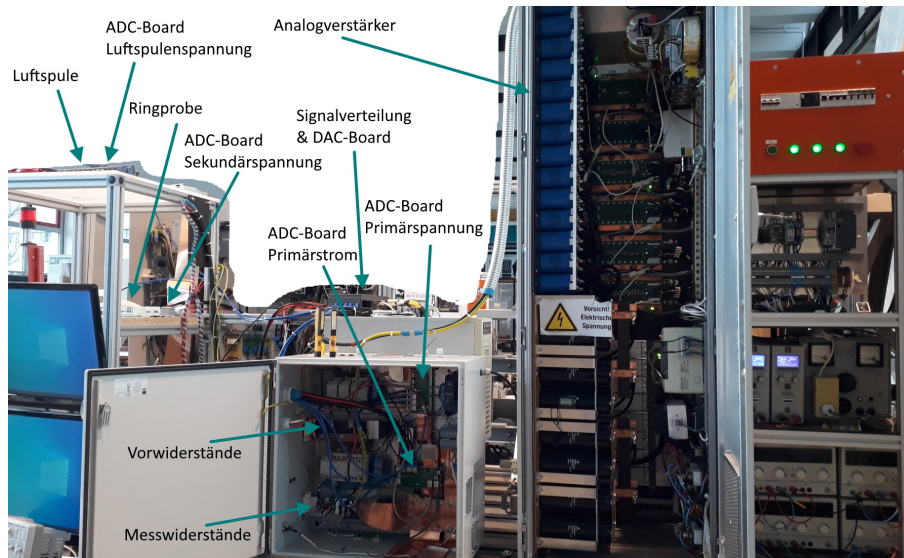
Davon ausgehend soll der mögliche Untersuchungsbereich mit dem Versuchsstand ausgeweitet werden. Einerseits ist die Untersuchung bei höheren Frequenzen wünschenswert, um auch dem Trend zu höherpoligen und/oder schnell drehenden und damit kompakteren Motoren entgegenzukommen, z.B. im Zuge der Entwicklung von E-Autos. Andererseits soll der reale Einsatzfall abgebildet werden können. Das beinhaltet die Untersuchung nichtsinusförmiger Flussverläufe, die z. B. durch Luftspaltharmonische oder Oberschwingungen durch Umrichtertechnik auftreten. Zur systematischen Untersuchung müssen Harmonische eingeprägt werden können. Das impliziert ihre Phasenverschiebung, da diese einen großen Einfluss auf die Hystereseschleife und damit die Verluste hat [5]. Aufgrund dieser Zielstellung ergibt sich die Notwendigkeit der Neukonzipierung und des Umbaus des Versuchsstandes.

3 Versuchsstand

Zentrales Element des Versuchsstandes ist ein FPGA-Board der *Fa. National Instruments*. Das Modul *NI-PCIe7820* verfügt über 128 DIO-Kanäle und übernimmt die Anbindung aller Teile des Versuchsstandes, wie Analog-Digital-Wandler (ADC) und Digital-Analog-Wandler (DAC) sowie die Steuerung der Signalfade, die Auswahl und Zuschaltung der Mess- und Vorwiderstände, die Überwachung der Messgrößen in den Grenzen der Maximalaussteuerung sowie die Regelung. In Abb. 2 ist eine Übersicht über den Versuchsstand gegeben. Abb. 2(a) zeigt das Prinzipschaltbild und Abb. 2(b) ein Foto des fertigen Versuchsstandes in der Laborhalle. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Elemente des Versuchsstandes näher beschrieben.



(a) Prinzipschaltbild Versuchsstand



(b) Versuchsstand in der Laborhalle

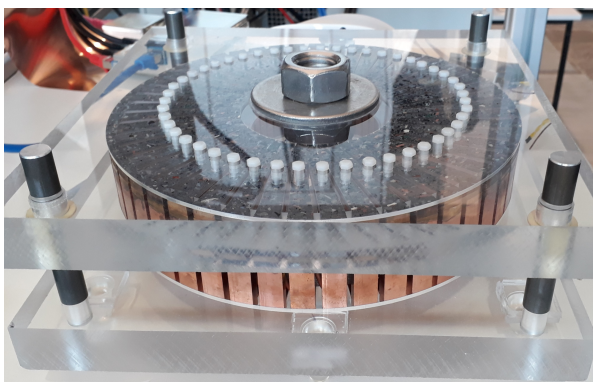
Abb. 2: Versuchsstand zur Bestimmung magnetischer Eigenschaften

3.1 Probenhalter

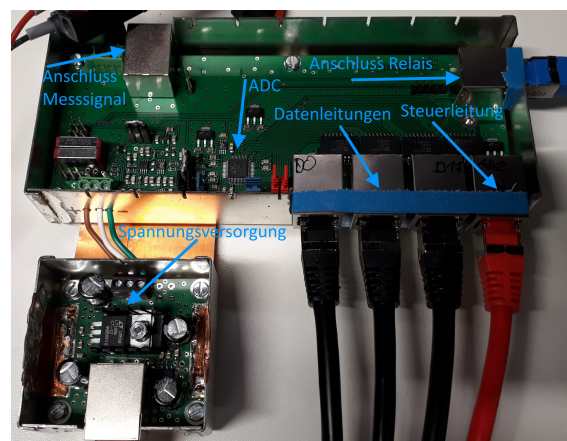
Für den vorhergehenden Versuchsstand wurde ein Probenhalter auf Basis von steckbaren Leiterplatten entwickelt [6]. Damit wurde ein zügiger Probenwechsel ermöglicht sowie eine reproduzierbare Geometrie sichergestellt, was bei einer Bewicklung per Hand nicht gegeben ist. Das Prinzip wurde weiterentwickelt zu einem Probenhalter, welcher nur mit einer zentralen Schraube ausgestattet die innenliegende Sekundär- und außenliegende Primärwicklung gleichzeitig schließt. Die Schraube besteht aus austenitischem nichtrostenden Stahl (Edelstahl A4, nicht magnetisierbar). Die Sekundärwicklung ist voll differentiell ausgestaltet um eine maximale Störfestigkeit zu erreichen. Die Geometrie der Wicklungen ist exakt reproduzierbar, sodass die Messung der induzierten Luftspulenspannung in einem Probenhalter ohne Probe keine systematischen Fehler durch ungenaue Geometrien erfährt. Abb. 3(a) zeigt den neuen Probenhalter.

3.2 Messtechnik

Am Versuchsstand werden vier Messgrößen erfasst, Strom der Primärseite i_1 , Spannung der Primärseite u_1 , induzierte Spannung der Sekundärseite mit Probe u_2 sowie induzierte Spannung der Sekundärseite ohne Probe $u_{2\sigma}$. Für jede Messgröße wurde eigens eine Schaltung mit separatem AD-Wandler vom Typ *LTC 2387-18* entwickelt. Diese bieten eine Auflösung von 18 bit bei einer Messfrequenz von 2,5 MSa/s und sind mit einem Parallelinterface ausgestattet. Die Eingangsschaltungen sind speziell auf die Spannungsbereiche und -konfigurationen der jeweiligen Messgrößen ausgelegt. Wenn nötig sorgen sie via Verstärkungs- bzw. Teilerfaktoren dafür, dass der Messbereich der AD-Wandler voll ausgenutzt werden kann. Die Wandler laufen im voll differentiellen Modus, sodass die Eingangsschaltungen die single-ended gemessenen Signale u_1 und i_1 in den voll differentiellen Zustand überführen müssen. Abb. 3(b) zeigt beispielhaft das ADC-Board zur Aufnahme der Luftspulenspannung $u_{2\sigma}$. Die übrigen Boards ähneln diesem, wobei Beschaltung und Anschlüsse für die Messsignale jeweils unterschiedlich ausfallen.



(a) neuartiger Probenhalter

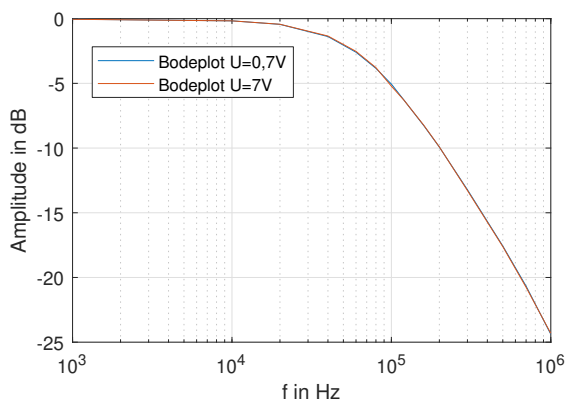


(b) ADC Board $u_{2\sigma}$

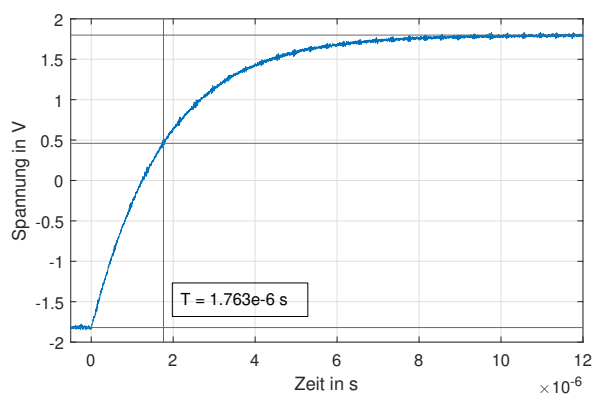
Abb. 3: Probenhalter und beispielhaftes ADC-Board

3.3 Analogausgabe

Zur Ausgabe der Eingangsspannung für den Analogverstärker kommt ein DA-Wandler vom Typ *LTC 2757* zum Einsatz. Dieser bietet eine Auflösung von 18 bit bei verschiedenen Spannungsbereichen von $\pm 2,5 \text{ V} \cdots \pm 10 \text{ V}$ und eine parallele Schnittstelle zur Ansteuerung. Das Verhalten entspricht im relevanten Frequenzbereich einem *PT1*-Glieder, wobei die Zeitkonstante zu $1,763 \mu\text{s}$ bestimmt wurde. Der Amplitudengang ist in Abb. 4(a) und die Bestimmung der Zeitkonstante aus der Sprungantwort in Abb. 4(b) abgebildet. Das Board mit dem DAC ist in Abb. 5 am linken Bildrand zu sehen. Mit dem Analogsignal wird der Analogverstärker angesteuert, welcher die Primärwicklung der Probe speist. Dabei kann eine Ausgangsspannung von $\pm 60 \text{ V}$ bei einem maximalen Strom von 400 A ausgegeben werden. Der Verstärker ist in Abb. 2(b) abgebildet.



(a) Amplitudengang des DAC



(b) Bestimmung der Zeitkonstante aus Sprungantwort

Abb. 4: Charakterisierung des DAC

3.4 Signalverteilung und FPGA

Das FPGA-Board ist im Rechner via PCIe-Bus angebunden und über vier 68-Pin VHDCI-Kabel mit einer zentralen Leiterplatte verbunden, welche die Anbindung aller Systemkomponenten übernimmt. Die Triggerung erfolgt über eine gemeinsame Leitung, welche sich aufteilt und mit konstanter Laufzeit alle AD-Wandler anbindet, sodass simultanes Sampling sichergestellt wird. Weiterhin trägt die Leiterplatte Schaltkreise, welche die Signalrelais auf allen Leiterplatten ansteuern, sowie die dafür nötige Stromversorgung. Ein großes Augenmerk wurde bei der Leitungsführung darauf gelegt, keine Masseschleifen entstehen zu lassen, welche am vorherigen Versuchsstand häufig Probleme verursachten. Abb. 5 zeigt die Leiterplatte mit allen Komponenten und Anschlüssen.

4 Software

Der Versuchsstand wird via PC über ein *LabView* Programm gesteuert. Die Programmierung des FPGAs wird ebenfalls über *LabView* realisiert. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Komponenten der Software gegeben.

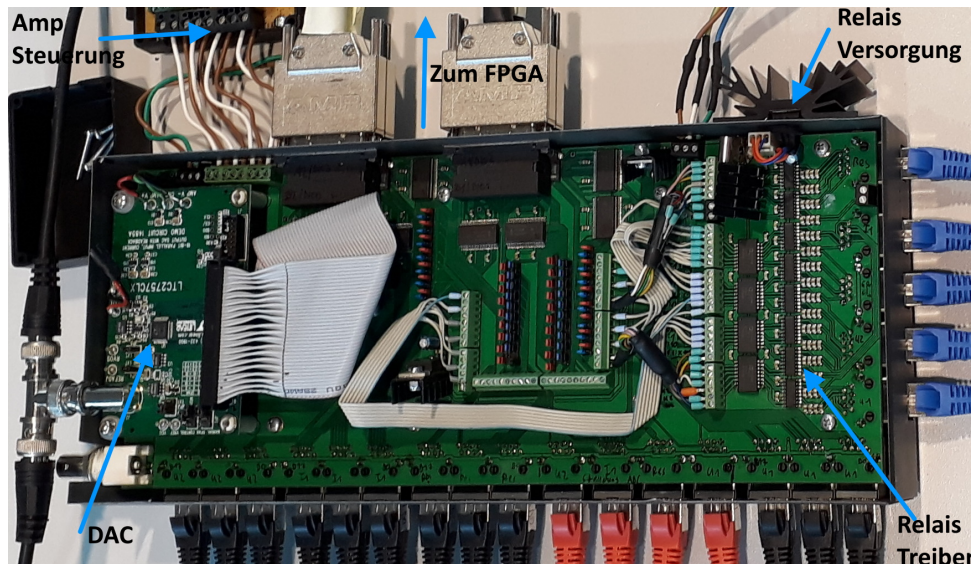


Abb. 5: Leiterplatte zur Signalverteilung mit DAC und Ansteuerungseinheit für Relais

4.1 Ansteuerung ADC

Das Auslesen der ADC erfolgt via Ablaufsteuerung über den FPGA. Die Schleife hat eine Durchlaufzeit von 400 ns, sodass die volle Samplingrate der Wandler von 2,5 MSa/s genutzt wird. Der FPGA triggert über eine zentrale Signalleitung alle ADC gemeinsam und wartet, bis jeder Wandler den Abschluss der eigenen Wandlung zurückmeldet. Erst dann werden die Datenleitungen aller Wandler gleichzeitig über ihre jeweils 18 bit eingelesen.

4.2 Ansteuerung DAC

Eine Ablaufsteuerung sorgt für die Analogausgabe des DAC, wobei der Ausgangsspannungsbereich im laufenden Betrieb geändert werden kann. Die Durchlaufzeit der Schleife und damit die Ausgabegeschwindigkeit des DAC kann während der Laufzeit verändert werden. Die minimale Schleifendurchlaufzeit beträgt wie auch bei den DA-Wandlern 400 ns. Somit wird eine hohe Reaktionsfähigkeit der Ausgangsspannung sichergestellt.

4.3 Regelung

Die bisherige Regelung wurde über einen analogen PI-Regler in Form mehrerer Operationsverstärker realisiert. Zur Unterstützung des linearen Reglers wurde eine modellbasierte Vorsteuerung eingesetzt, welche für eine geringe Eingriffshöhe des Reglers sorgen sollte. P- und I-Anteil konnten dabei stufenweise verstellt werden. Die Parameter mussten in jedem Arbeitspunkt erneut austariert werden, um dem nichtlinearen Streckenverhalten Rechnung zu tragen. Gerade bei hohen Aussteuerungen und Frequenzen wurde dabei die Grenze der Realisierbarkeit erreicht. Mit dem neuen Versuchsaufbau ist eine vollständig digitale Regelung bei voller Flexibilität möglich. Es kann wie bisher die Kombination von modellbasierter Vorsteuerung mit PI-Regler und konstanten Reglerparametern umgesetzt werden. Es ist aber auch der Einsatz eines reinen PI-Reglers möglich. Neben konstanten bzw. manuell umschaltbaren Parametern können adaptive

Parameterveränderungen umgesetzt werden [7]. Auch fortgeschrittene Regelungskonzepte sind mit dem Aufbau implementierbar.

4.4 Sicherheitsfunktionen

Auf dem FPGA werden in Echtzeit die Grenzen der Messgrößen überwacht. Je nachdem welche Spannungsbereiche in den ADC-Boards aktiviert sind, können diese Grenzen kritisch sein. Daher läuft die Überwachung in einer unabhängigen Schleife und begrenzt bei Bedarf die Ausgangsspannung bzw. initiiert einen Notstopp des Systems. Die unterschiedlichen Vor- und Messwiderstände im Lastpfad sind auf jeweils eigenen leistungsfähigen Kühlkörpern montiert und thermisch sehr stark überlastbar, sodass hier selbst im ungünstigsten Fehlerfall bei voller Ausgangsspannung kein Schaden zu erwarten ist. Der Verstärker hat einen zeitgesteuerten Hauptschutz, welcher hardwareseitig nach ca. 8 s wieder öffnet, sodass die Überlastdauer maximal auf diese Zeit begrenzt ist. Kritisch sind z. T. die Eingangsstufen der ADC-Boards, deren Eingangsschutzbeschaltungen nur begrenzt überlastbar sind.

5 Erste Messungen

Mit dem Versuchsstand wurde zu Testzwecken eine Blechprobe gemessen, deren Probenparameter in Tab. 1 aufgeführt sind. Abb. 6 zeigt die aufgenommenen Hystereseschleifen bei verschiedenen Aussteuerungen. Verwendung fand eine Ringprobe, welche aus dem Material *M330-35A* mit dem Herstellungsverfahren Scherschneiden gefertigt wurde. Die Messergebnisse fallen deutlich schlechter aus als die Datenblattwerte des Materials, erweisen sich aber als plausibel im Vergleich zu den Angaben in [4]. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die geringe Probenbreite im unteren und mittleren Aussteuerungsbereich ein starkes Absinken der Flussdichte zur Folge hat (vgl. [4] Abb. (4.1)). Die Fertigungsmethode hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss, wobei Scherschneiden deutlich weniger Degeneration zur Folge hat als Laserschneiden (vgl. [4] Abb. (4.6a)). Weiterhin handelt es sich aus praktischen Gründen um eine alte Probe, welche nicht mehr in sehr gutem Zustand ist und so geringere qualitative Merkmale erwarten lässt.

Tab. 1: Kennwerte der Blechprobe

Außendurchmesser	D	200 mm
Innendurchmesser	d	190 mm
Durchmesserverhältnis	D/d	1,05
Höhe	h	7 mm

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neu aufgebauter Versuchsstand zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften von Werkstoffen vorgestellt. Dabei wurden die einzelnen Komponenten dargestellt und beschrieben, sowie erste Messwerte präsentiert. Der Versuchsstand soll zur Charakterisierung von Werkstoffen bei erhöhten Frequenzen genutzt werden sowie um außerhalb der DIN-gemäßen sinusförmigen Messbedingungen den Einfluss von Harmonischen in der Flussdichte

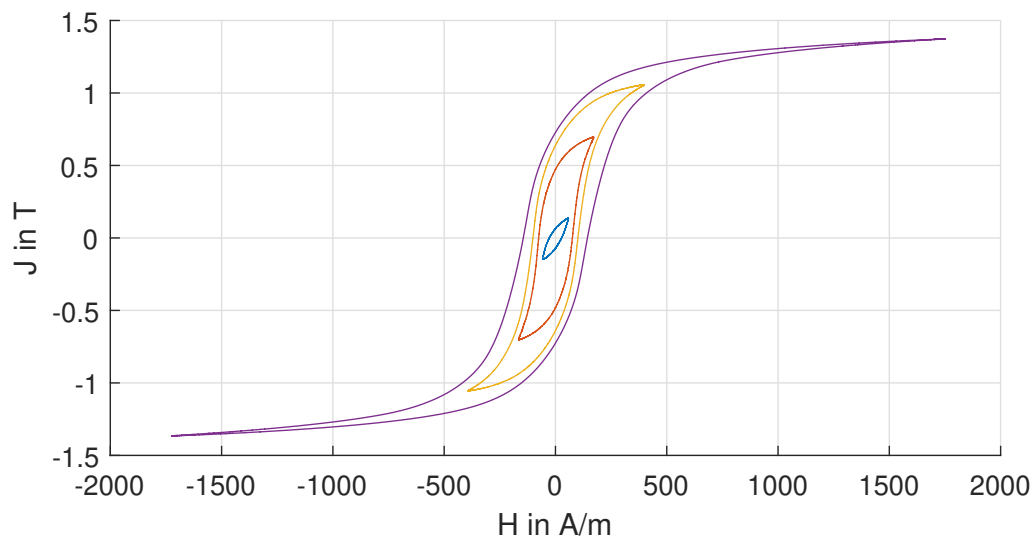


Abb. 6: Erste Messergebnisse mit dem neuen Versuchsstand

zu untersuchen. Die Kalibrierung der einzelnen Messmodule zur Sicherstellung der Qualität der Messergebnisse steht noch aus. Weiterhin muss die Regelung in Betrieb genommen werden, wobei mit der jetzt vorhandenen Technik verschiedene Regelungskonzepte umsetzbar sind.

Literatur

- [1] DIN EN 60404-2 Magnetische Werkstoffe – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech mit Hilfe eines Epsteinrahmens, 2009
- [2] J. Sievert, The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel - Survey on methods and situation of standards, J. Magn. Magn. Mater., vol. 215–216, pp. 647–651, 2000, doi: 10.1016/S0304-8853(00)00251-1
- [3] DIN EN 60404-6 - Magnetische Werkstoffe - Teil 6: Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer und pulverförmiger Werkstoffe bei Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 200 kHz mit Hilfe von Ringproben, 2004
- [4] M. Lindner, Ermittlung der Degeneration weichmagnetischer Werkstoffe durch Trennverfahren und ihre Berücksichtigung im Kontext elektrischer Maschinen, Dissertation 2018, urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-325897
- [5] J. Geisinger and A. M. Knight, Investigation of Iron Losses in Mixed Frequency Flux Density Waveforms, IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 11, pp. 2–5, 2014, doi: 10.1109/TMAG.2014.2320636
- [6] M. Lindner and R. Werner, Hysteresis-model oriented test procedure for soft-magnetic properties of printed or laminated toroids, 2014, DOI 10.1109/EDPC.2014.6984408
- [7] O. Radler, Ein Beitrag zur Messung statischer und dynamischer Eigenschaften von elektromagneto-mechanischen Energiewandlern und deren Komponenten, Dissertation 2011, urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000252