

Anwendungsnahe Prüfverfahren für Dauermagnetkomponenten

Von der Fakultät Management und Technologie
der Leuphana Universität Lüneburg zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation von Maximilian Lanz

geboren am 02.07.1993 in Tettnang

Eingereicht am: 04.05.2026

Mündliche

**Verteidigung
(Disputation)**

13.07.2026

am:

Erstbetreuer: Prof. Dr. Anthimos Georgiadis, Leuphana Universität Lüneburg

Zweitbetreuer: Prof. Dr. Dagmar Goll, Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft

Erstgutachter: Prof. Dr. Anthimos Georgiadis, Leuphana Universität Lüneburg

Zweitgutachter: Prof. Dr. Dagmar Goll, Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft

Drittgutachter: Prof. Dr. Ghada Bouattour, Leuphana Universität Lüneburg

Als Dissertation eingereicht unter dem Titel:

Anwendungsnahe Prüfverfahren für Dauermagnetkomponenten

**Veröffentli-
chungsjahr:**

2026

Im Verlag:

PubData - Institutionelles Repositorium der Leuphana Universität
Lüneburg

DOI:

10.48548/pubdata-4028

Kurzfassung

Permanentmagnete sind zentrale Bauelemente zahlreicher industrieller Anwendungen. Ihr Magnetisierungszustand unterliegt zeit-, feld- und temperaturabhängigen Entmagnetisierungseffekten, die das Langzeitverhalten entscheidend beeinflussen und dadurch spezielle Methoden zur Charakterisierung, Bewertung und Prognose unter praxisrelevanten Bedingungen erfordern.

Diese Arbeit stellt darauf aufbauend die Entwicklung und Anwendung eines zerstörungsfreien experimentellen Frameworks zur Analyse von Entmagnetisierungseffekten vor. Vier komplementäre Prüfstandskonzepte ermöglichten kontrollierte Feld- und Temperaturbelastungen sowie lokale und integrale Magnetisierungsmessungen, wodurch reversible, irreversible und zeitabhängige Effekte systematisch unter realistischen Bedingungen untersucht werden konnten.

Die Ergebnisse zeigen, dass Entmagnetisierungsprozesse lokal in Bereichen hoher innerer Entmagnetisierungsfelder beginnen. Zeitabhängige Verluste werden in kritischen Arbeitspunkten signifikant und hängen eng von der Position der Entmagnetisierungskurve relativ zur Koerzitivfeldstärke ab. Der magnetische Viskositätsparameter S_v erweist sich als robuste Größe, die primär von der Koerzitivfeldstärke H_{cj} bestimmt wird. Externe Faktoren wie Probengeometrie und Feldverteilung sowie material- und prozessbedingte Variationen, einschließlich GBD- und Nicht-GBD-Proben, zeigen keinen signifikanten unabhängigen Einfluss. Dies ermöglicht eine zuverlässige quantitative Bewertung zeitabhängiger Entmagnetisierung und Vorhersage langfristiger Verluste. Ergänzend wird ein temperaturbasierter Viskositätsparameter eingeführt, der eine vereinfachte und konsistente Quantifizierung zeitabhängiger Effekte erlaubt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Methoden zur Verlustprognose und magnetischen Stabilisierung entwickelt. Durch gezielte Vorentmagnetisierung können zeitabhängige Verluste innerhalb definierter Betriebsbereiche ausgeschlossen werden. Ein anwendungsorientierter Workflow für Systemauslegung und Materialauswahl ermöglicht eine zuverlässige Langzeitstabilität ohne konservative Überdimensionierung. Das entwickelte Framework liefert eine umfassende Grundlage für zerstörungsfreie Bewertung, Qualitätssicherung und Optimierung von Permanentmagneten unter praxisnahen Bedingungen.

Abstract

Permanent magnets are key components in many industrial applications. Their magnetization exhibits time-, field-, and temperature-dependent demagnetization, which critically affects long-term stability and requires dedicated methods for characterization, evaluation, and prediction under application-relevant conditions.

This work presents the development and application of a non-destructive experimental framework for analyzing demagnetization effects in permanent magnets. Four complementary test bench concepts are introduced, enabling controlled field and temperature loading as well as local and integral magnetization measurements, allowing systematic investigation of reversible, irreversible, and time-dependent effects under realistic operating conditions.

The results show that demagnetization processes originate locally in regions of high internal demagnetizing fields. Time-dependent losses become significant near critical operating points and are closely linked to their position on the demagnetization curve relative to the coercive field. The magnetic viscosity parameter S_v is a robust quantity, primarily determined by the coercive field H_{cj} . External factors, such as sample geometry and field distribution, as well as material- and process-related variations, including GBD and non-GBD samples, show no significant independent effect. These results demonstrate that S_v provides a reliable quantitative measure of time-dependent demagnetization, allowing accurate prediction of long-term magnetic losses under realistic operating conditions. In addition to the established field-based approach, a temperature-based viscosity parameter S_v^T is introduced, enabling simplified and consistent quantification of time-dependent effects.

Based on these findings, methods for loss prediction and magnetic stabilization are developed. Targeted pre-demagnetization enables the elimination of time-dependent losses within defined operating ranges. Furthermore, an application-oriented workflow for system design and material selection is proposed, allowing reliable long-term performance without conservative overdimensioning.

The presented framework provides a comprehensive basis for non-destructive evaluation, quality assurance, and optimization of permanent magnets under application-relevant conditions.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgaben- und Zielsetzung	3
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Magnetische Kenngrößen und Eigenschaften	5
2.2 Magnetkreis: Arbeitspunkt und Entmagnetisierungsfaktor	10
2.3 Magnetisierung und Entmagnetisierung	13
2.3.1 Direkte Verluste	13
2.3.2 Zeitabhängige Verluste.....	16
2.3.3 Magnetische Stabilisierung	20
2.4 Permanentmagnetwerkstoffe	21
2.4.1 Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB).....	21
2.4.2 Samarium-Cobalt-Magnete (SmCo)	23
2.5 Charakterisierungsmethoden und Messprinzipien für Magnetwerkstoffe	24
2.5.1 Induktive Messung mittels Messspule	25
2.5.2 Magnetfeldmessung mittels Hall-Effekt.....	27
2.5.3 Komplettsysteme zur Charakterisierung magnetischer Kennwerte	30
2.5.4 Basistechniken zur digitalen Datenerfassung und Prozesssteuerung	34
3 Konzeption und Aufbau eigener Prüfstandskonzepte zur Charakterisierung von Permanentmagneten.....	36
3.1 Allgemeine Einführung	36
3.2 Konzeption und Aufbau der Prüf- und Belastungsverfahren sowie experimentelle Durchführung	39
3.2.1 Konzept 1: Wechselfeldjoch	39
3.2.2 Konzept 2: Rotierende Probe	46
3.2.3 Konzepte 3 und 4: Offene Magnetkreismessungen mit Probertemperatur.....	54
3.3 Methodisches Vorgehen mit standardisierten Messverfahren und Simulationstools	62
3.3.1 Hysteresegraph	62
3.3.2 VSM-Messungen	62
3.3.3 Field-Mapper	63
3.3.4 Pulsmagnetisierer.....	63

3.3.5 EBSD-Aufnahmen zur Bestimmung der mittleren Korngröße.....	63
3.3.6 Einsatz von Simulationstools	64
3.4 Spezifikation der Prüfkörper	64
3.4.1 Untersuchungsparameter für Viskositätsparametermessungen .	65
4 Technische Kennwerte der Messverfahren.....	68
4.1 Statistische Kennwerte zur Fehler- und Reproduzierbarkeitsbetrachtung	68
4.2 Konzept 1 (Wechselfeldjoch).....	70
4.2.1 Technische Kennwerte.....	70
4.2.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit	73
4.3 Konzept 2 (Rotierende Probe).....	75
4.3.1 Technische Kennwerte.....	75
4.3.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit	77
4.4 Konzepte 3 und 4: Offene Magnetkreismessungen mit Probentemperierung.....	79
4.4.1 Technische Kennwerte.....	79
4.4.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit	79
5 Ergebnisse aus Anwendung der Prüfstandskonzepte.....	81
5.1 Direkte Entmagnetisierung	82
5.1.1 Vergleichende Validierung: Entmagnetisierungskurven.....	82
5.1.2 Feld- und temperaturabhängige Entmagnetisierungskurven	83
5.1.3 Feld- und temperaturabhängige Field Maps.....	89
5.2 Zeitabhängige Entmagnetisierung.....	99
5.2.1 Zeitabhängige Entmagnetisierungsmessungen	99
5.2.2 Zeitabhängige Field Maps	101
5.3 Magnetischer Viskositätsparameter	103
5.3.1 Vergleichende Validierung: Viskositätsparameterbestimmung	104
5.3.2 Gesamtübersicht aller Proben	106
5.3.3 Externe Einflussfaktoren	107
5.3.4 Material- und prozessbezogene Einflussfaktoren.....	110
5.3.5 Temperaturbasierter Viskositätsparameter	118
5.3.6 Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur.....	120
5.4 Magnetische Stabilisierung	121
5.5 Drehmomentmessungen.....	124
6 Praktische Anwendungsbeispiele und Szenarien	127
6.1 Anwendungsszenario: Magnetische Alterung.....	127
6.1.1 Einfluss variierender Temperaturen auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten in Sensorsystemen.....	129

6.1.2 Einfluss externer Temperaturbelastung auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten im offenen Magnetkreis	131
6.1.3 Einfluss externer Feldbelastung auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten in elektrischen Aktoren	132
6.2 Integration zeitabhängiger Entmagnetisierung in FEA	135
6.2.1 Feldbasierter Ansatz.....	135
6.2.2 Temperaturbasierter Ansatz	136
6.2.3 Vergleich von feldbasiertem und temperaturbasiertem Ansatz zur Implementierung in FEA.....	136
6.3 Anwendungsszenario: Zerstörungsfreier Koerzitivfeldstärkenverlauf	138
7 Diskussion	142
7.1 Technische Bewertung der Messverfahren im Vergleich zu konventionellen Methoden	142
7.1.1 Magnetische Kreiskonfiguration und Magnetisierungsmessung	142
7.1.2 Quantifizierung der Feld- und Temperaturstabilität	145
7.1.3 Funktionsbezogene Einordnung der Konzepte	147
7.1.4 Zusammenfassung der Prüfstandstechniken	152
7.2 Ergebnisse und Zusammenhänge aus den Prüfstandsmessungen	153
7.2.1 Direkte und zeitabhängige Entmagnetisierung	153
7.2.2 Field Maps	157
7.2.3 Feldbasierter Viskositätsparameter	163
7.2.4 Temperaturbasierter Viskositätsparameter	169
7.2.5 Vergleich des feld- und temperaturbasierten Viskositätsparameters.....	170
7.2.6 Anwendung von Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur zur Langzeitstabilitätsbetrachtung.....	171
7.2.7 Magnetische Stabilisierung	173
7.2.8 Drehmomentmessungen.....	174
8 Zusammenfassung	175
9 Verzeichnis der wissenschaftlichen Publikationen.....	180
10 Anhang	182
10.1 Tabellen der Messergebnisse	182
10.1.1Temperaturbasierter Viskositätsparameter	182
10.2 Übersichtstabelle Probendaten	184
Literaturverzeichnis.....	187

Fachbegriffe, Abkürzungen und Prozessbegriffe

Aufgrund der Vielzahl von Kombinationen aus Grundgrößen und Index in dieser Arbeit werden die wichtigsten Fachbegriffe, Abkürzungen und Prozessgrößen hier zusammengefasst, um eine schnelle und konsistente Referenz zu ermöglichen.

Grundgröße	Index	Größe	Einheit
B	r / s / t.d.	Flussdichte	T
H	cj / ext / int / eff / self / f / rec / ref / rev / irr	Feldstärke	kA/m
J	r / s / rec / rev / irr / t.d.	Polarisation	T
M	–	Magnetisierung	A/m
T	eff / f / max / rev / irr / tot / t / t.c.	Temperatur	°C
T_Q	–	Drehmoment	N·m
χ	rev / irr / tot	Suszeptibilität	-
Index	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
eff	effektiv	AC	Wechselstrom (bipolar)
f	Fluktuation	ADC	Analog-Digital-Wandler
rec	Rücklauf	DAC	Digital-Analog-Wandler
rev	reversibel	DAQ	Data Acquisition System
ref	Referenz	DC	Gleichstrom (unipolar)
irr	irreversibel	DMS	Dehnmessstreifen
tot	total	FEA	Finite-Elemente-Analyse
max	maximal	GBD	Grain Boundary Diffusion
s	Sättigung	IPM	Interior Permanent Magnet
r	remanent	NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
t	transition, Übergang	PM	Permanentmagnet
t.c.	Temperaturkompensiert auf RT	PMSM	Permanentmagnet-Synchronmotor
t.d.	Zeitabhängig (time dependent)	R^2	Bestimmtheitsmaß
Wichtige Kenngrößen		RT	Raumtemperatur
H_{cj}	Koerzitivfeld	SmCo	Samarium-Cobalt
H_{ext}	externes Feld (äußeres Feld)	SMPM	Surface Mounted Permanent Magnet
H_{int}	internes Feld	SPS	Abtastrate in Messpunkte pro Sekunde
H_{self}	(inneres) Selbstfeld	VSM	Vibrationsmagnetometer
J_r	remanente Polarisation	μ	Mittelwert
$J_{t.d.}$	zeitabhängige Polarisation (time dependent)	σ	Standardabweichung
N	Entmagnetisierungsfaktor	CV	Variationskoeffizient
S	Viskosität		
S_v	Viskositätsparameter		
Wichtige Begriffe			
Entscherung: Anpassung des externen Felds an das interne Feld			
Entmagnetisierung: teilweise bis vollständige Reduktion der Magnetisierung			
Field Mapping: lokale Streufelderfassung			
Field Maps: Streufeldverteilungen ($B(x, y)$ Map)			

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Materialforschung (IMFAA) der Hochschule Aalen unter Betreuung von Frau Prof. Dr. Dagmar Goll und Herrn Prof. Dr. Gerhard Schneider. Die kooperative Promotion wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. Anthimos Georgiadis und Frau Prof. Dr. Ghada Bouattour vom Institut für Produktionstechnik und -systeme (IPTS) der Leuphana Universität Lüneburg durchgeführt. Damit werden die beiden Kernaspekte dieser Arbeit, der Aufbau neuer Prüfstandskonzepte und deren Anwendung zur Materialcharakterisierung, durch die beteiligten Betreuer fachlich und inhaltlich vollständig abgedeckt. Hierfür möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Georgiadis, Frau Prof. Dr. Goll, Herrn Prof. Dr. Schneider und Frau Prof. Dr. Bouattour bedanken.

Mein besonderer Dank gilt außerdem Herrn Gerhard Martinek, der mich seit meiner Masterarbeit kontinuierlich fachlich und persönlich begleitet hat. Ohne seine Unterstützung wäre die Bearbeitung eines derart breiten Spektrums an Verfahren und Fragestellungen nicht möglich gewesen. Seine kritischen und differenzierten Anmerkungen sowie die intensiven wissenschaftlichen Diskussionen waren entscheidend für Umfang und Tiefe dieser Arbeit. Herrn Dr. Thomas Kresse danke ich ebenfalls für seinen fachlichen Rat, seine Hilfsbereitschaft und die Unterstützung durch Vergleichsmessungen mit VSM. Ebenso danke ich Herrn Marius Böttle für die Unterstützung bei der Herstellung der spezifischen Modellproben sowie Herrn Janick Gassmann und Herrn Dominic Hohs für die Unterstützung bei materialspezifischer Mikroskopie.

Allen Studierenden, die im Rahmen von Praktika und Abschlussarbeiten durch die Durchführung von Versuchen sowie die Erhebung und Auswertung von Daten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich ausdrücklich. Ebenso gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Hilfe und Unterstützung.

Aalen, 2026
Maximilian Lanz

1 Einleitung

Die Entwicklung moderner Magnetwerkstoffe bildet eine zentrale Grundlage für zahlreiche Schlüsseltechnologien. Permanentmagnete sind unverzichtbar in permanenterregten Elektromotoren [1], Generatoren [2], Sensoren [3] und Datenspeichersystemen [4]. Mit der zunehmenden Elektrifizierung von Antrieben und dem steigenden Bedarf an energieeffizienten Systemen rücken Zuverlässigkeit und Stabilität dieser Werkstoffe zunehmend in den Fokus [5]. Dabei bestimmen nicht nur feld- und temperaturabhängige Eigenschaften, sondern auch zeitabhängige Veränderungen maßgeblich die Einsatzgrenzen und die Lebensdauer der Systeme [6], [7], [8], [9].

Die Stabilität von Permanentmagneten ist entscheidend für ihre Funktionsfähigkeit in den jeweiligen Anwendungen. Schon geringe Änderungen der Magnetisierung können Leistungsparameter verschieben oder Betriebsgrenzen der Anwendung ändern [10]. Während die feld- und temperaturabhängige Magnetisierung in zahlreichen Studien unter anderem in [9], [11], [12], [13], [14], [15] untersucht wurde, sind zeitabhängige Entmagnetisierungsprozesse im praktischen Kontext bislang weniger systematisch charakterisiert. Zeitabhängige Effekte, die sich in einer langsamen Abnahme der Magnetisierung über Zeiträume von Stunden bis Jahren äußern, gewinnen daher zunehmend an Bedeutung [6], [16].

Die Quantifizierung dieser Prozesse ist sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus technologischer Sicht von Interesse. In industriellen Anwendungen ergeben sich Fragen nach der Langzeitstabilität, nach geeigneten Verfahren zur Charakterisierung und nach Wegen, wie sich Stabilitätseigenschaften zuverlässig vorhersagen lassen. Bestehende Methoden weisen hierbei Einschränkungen auf, da sie zeitabhängige Phänomene oft nur unzureichend erfassen oder deren Übertragung auf reale Betriebsbedingungen nicht ohne Weiteres gewährleisten.

Damit ergibt sich ein klarer Forschungsbedarf an Ansätzen, die ein besseres Verständnis zeit-, feld- und temperaturabhängiger Prozesse erlauben und so zur Bewertung und Optimierung von Magnetwerkstoffen beitragen.

1.1 Motivation

Permanentmagnete werden in zahlreichen technischen und physikalischen Anwendungen eingesetzt, etwa in Sensorsystemen (Positionssensorik, Wägezellen) in Kombination mit Messspulen oder Hall-Sonden zur Positions- oder Kraftmessung [17], in linearen und rotatorischen Aktoren [18], in Lautsprechern, Festplattenlaufwerke (Hard Disk Drives, HDD [4]), permanenterregten Elektromotoren und Generatoren für Windkraftanlagen, Magnetkupplungen sowie in Defence-Systemen. Weitere Anwendungen finden sich in der Medizintechnik (z. B. MRT-Systeme [19]) sowie in physikalischen Systemen mit stabilen statischen Magnetfeldern, beispielsweise in Laufzeitröhren oder Magnetrons [20]. Ein zentrales Einsatzgebiet sind Elektromotoren, wobei permanenterregte Synchronmotoren (PMSM) mit Permanentmagneten Wirkungsgrade über 97 % erreichen [10]. Diese hohe Effizienz leistet einen wesentlichen Beitrag zur Elektrifizierung des Mobilitätssektors [21] und führt zu einer steigenden Nachfrage nach leistungsfähigen und langzeitstabilen Permanentmagneten für elektrische Antriebe [22]. Trotz der Bezeichnung als „Permanent“-Magnete handelt es sich physikalisch um metastabile Systeme, deren Magnetisierung über die Zeit abnehmen kann [8], [16], [23]. Irreversible Entmagnetisierungsprozesse treten unter dem Einfluss externer Magnetfelder, erhöhter Temperaturen, thermischer Fluktuationen [23], [24] sowie ungünstiger Arbeitspunktlagen auf, was als magnetische Alterung [8] beschrieben wird. Magnetische Alterung hat hierbei allerdings nichts mit struktu-

rellen oder chemischen Materialänderung zu tun, sondern bezieht sich ausschließlich auf die Abnahme der Magnetisierung [25]. Insbesondere in Anwendungen mit langen Betriebszeiten und wechselnden thermischen oder magnetischen Belastungen stellt dies ein zentrales Problem dar, da magnetische Verluste direkt die Leistungsfähigkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit der Gesamtsysteme beeinflussen [26]. Zur materialspezifischen Optimierung und für Langzeitprognosen ist daher ein tiefgehendes Verständnis dieser Alterungsmechanismen notwendig. Zur Charakterisierung der Magnetisierung von Permanentmagneten stehen sowohl integrale als auch lokale Messmethoden zur Verfügung. Integrale Verfahren wie Helmholtz-Messspulen [27], Hysteresegraphen [28] und Vibrationsmagnetometer (VSM) [29] liefern Informationen über die Gesamtmagnetisierung eines Permanentmagnets. Der Hysteresegraph erlaubt die Erfassung vollständiger $J(H)$ -Hysteresekurven durch gezielte Variation von Feld und Temperatur, ist jedoch durch die Drift des Fluxmeters nicht für Langzeitmessungen geeignet. Das VSM ermöglicht die Analyse magnetischer Eigenschaften unter variierbaren Temperatur- und Feldbedingungen in einem weiten Feld- und Temperaturbereich und ist besonders geeignet für die Untersuchung viskoser Magnetisierungsprozesse. Jedoch besteht die Einschränkung, dass nur sehr kleine Proben verwendet werden können und externe Belastungen nur langsam variierbar sind [30].

Lokale Messmethoden wie Punktmessspulen, Hall-Sensoren oder Field Mapper [28], [31] liefern orts aufgelöste Informationen über das Streufeld, welches durch inhomogene Materialeigenschaften oder geometriebedingte Feldverteilungen beeinflusst wird. Diese Verfahren sind als reine Messsysteme jedoch auf statische Bedingungen beschränkt, da sie keine aktive Beeinflussung durch variierbare Feld- oder Temperaturbedingungen während der Messung erlauben. Für eine anwendungsorientierte Untersuchung der magnetischen Alterungseffekte von Permanentmagneten ergibt sich daraus ein methodisches Defizit: Es fehlt an Messsystemen, die realitätsnahe Belastungsszenarien unter variierbaren Feld- und Temperaturbedingungen abbilden und sowohl lokale als auch integrale magnetische Zustandsgrößen zeitaufgelöst erfassen können. Die bestehenden Systeme decken jeweils nur Teilaspekte ab und lassen sich nur eingeschränkt auf praxisrelevante Anwendungen übertragen. Zur Schließung dieser Lücke ist eine zerstörungsfreie Prüfmethodik erforderlich, die verschiedene Belastungsformen (statisch und dynamisch) unter kontrollierter Variation der Umgebungsbedingungen abbilden kann und gleichzeitig sowohl die integrale Magnetisierung als auch die lokale Streufeldverteilung präzise orts- und zeitaufgelöst erfasst.

1.2 Aufgaben- und Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, ein umfassendes Verständnis des magnetischen Alterungsverhaltens von Permanentmagneten unter Feld- und Temperatureinfluss über unterschiedliche Zeiträume und Anwendungsszenarien zu erlangen. Neben der Charakterisierung der Langzeitstabilität soll durch die Entwicklung neuer Mess- und Prüfstandskonzepte eine präzise Vorhersage der Leistungsfähigkeit über die gesamte Betriebsdauer ermöglicht werden. Zur Zielerreichung werden zwei Schwerpunkte gesetzt:

1. Entwicklung und Aufbau neuer Prüfstandskonzepte (Framework)

Es werden vier spezifische Prüfstandskonzepte entwickelt, die eine durchgängige Belastungs- und Prüfmethodik ermöglichen. Aufbau und Auswertung erfolgen unter Begleitung von FEA-Simulationen:

- **Prüfstandskonzept 1: Wechselfeldjoch**
Elektromagnetjoch für konstante und schnell variierende Wechselfelder unter Temperatureinfluss
- **Prüfstandskonzept 2: Rotierende Probe**
Rotierende Probe im Elektromagnetjoch mit integraler und lokaler Magnetisierungserfassung unter Feld- und Temperatureinfluss
- **Prüfstandskonzept 3: Momentmessspule mit Probentemperierung**
Probe im Helmholtz-Messspulenaufbau unter Temperatureinfluss
- **Prüfstandskonzept 4: Momentmessspule mit Scanfunktion und Probentemperierung**
Integrale und lokale Magnetisierungserfassung mittels Hall-Mapper und Helmholtz-Messspule unter Temperatureinfluss

2. Erkenntnisse aus der Anwendung der Prüfstandskonzepte

Die entwickelten Prüfstandskonzepte werden eingesetzt, um den Einfluss verschiedener Parameter wie Feld- und Temperaturbelastung, Belastungsform, Probengröße sowie materieller Eigenschaften (z. B. Koerzitivfeld und Remanenz) auf die magnetische Langzeitstabilität zu untersuchen und zu vergleichen.

Im Folgenden werden zunächst Motivation und Forschungsbedarf in Abschnitt 1.1 ausgeführt. Anschließend werden die Aufgabenstellung und die übergeordneten Ziele dieser Arbeit in Abschnitt 1.2 präzisiert. Der Aufbau der Arbeit ist in Abb. 1.1 grafisch visualisiert und gliedert sich in die folgenden Kapitel:

- Kapitel 2 behandelt die physikalischen Grundlagen und den aktuellen Stand der Forschung.
- Kapitel 3 beschreibt die entwickelten Prüfstände und die eingesetzte Messmethodik.
- Kapitel 4 stellt die technischen Eigenschaften und den Leistungsumfang der Prüfstände dar.
- Kapitel 5 präsentiert die Ergebnisse aus der Anwendung der Prüfstandskonzepte.
- Kapitel 6 veranschaulicht die zuvor erarbeiteten Ansätze anhand praktischer Anwendungsbeispiele und Szenarien.
- Kapitel 7 enthält die Diskussion der Prüfstände hinsichtlich ihrer technischen Grundlagen sowie materialbezogener Ergebnisse.

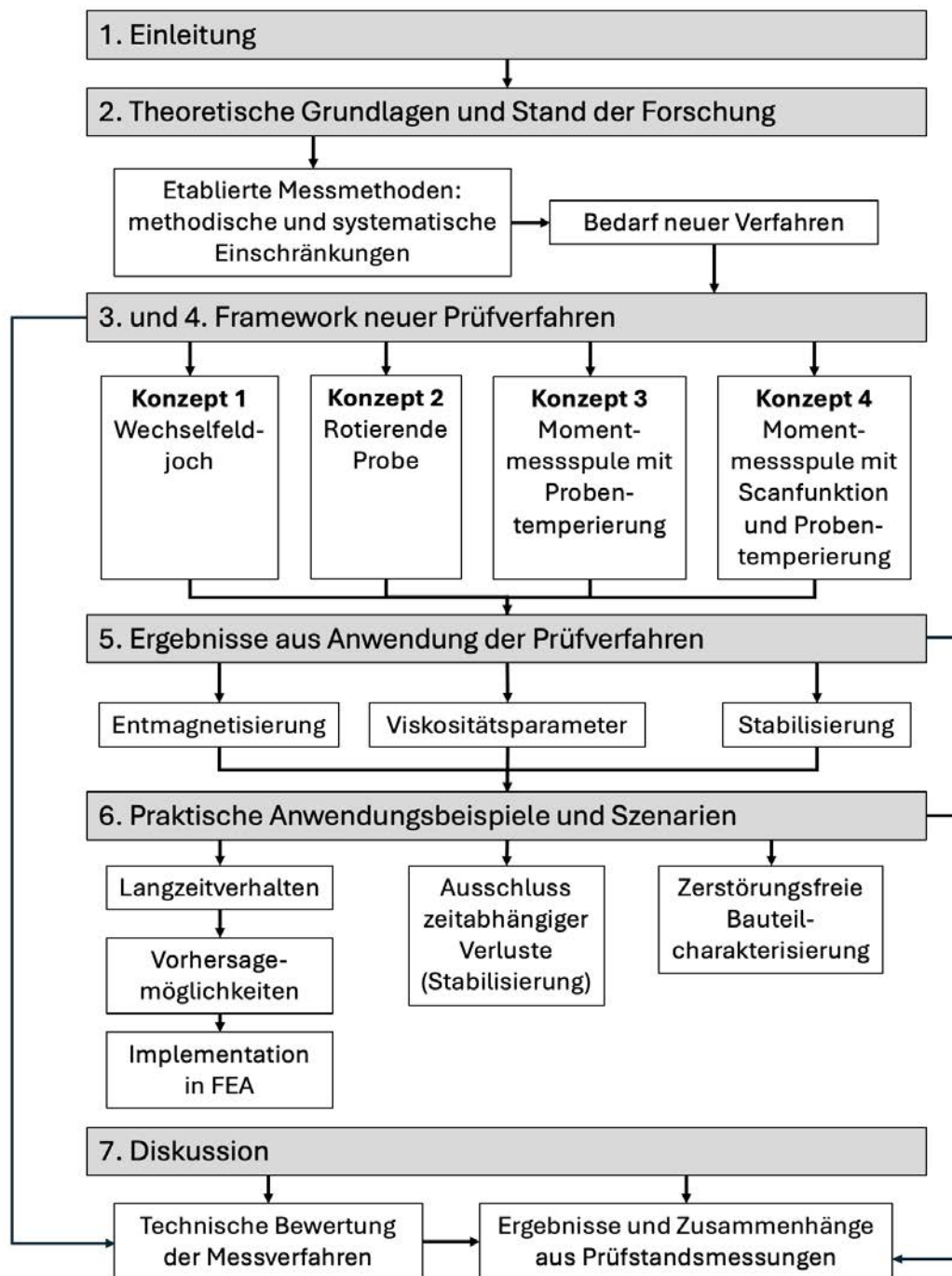


Abb. 1.1: Übersicht über den Aufbau dieser Arbeit. Aufbauend auf Kapitel 2, Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung wird der Bedarf eines neuen Frameworks für Messverfahren motiviert, das insgesamt vier Konzepte für unterschiedliche Anforderungen umfasst. Deren Aufbau wird in Kapitel 3 beschrieben, während die technischen Kenndaten in Kapitel 4 vorgestellt werden. Auf Basis der Anwendung der Prüfverfahren werden in Kapitel 5 die Ergebnisse dargestellt, gegliedert in Entmagnetisierungseffekte einschließlich feld-, temperatur- und zeitabhängiger Beiträge, jeweils in lokaler und integraler Form, sowie Viskositätsparametermessungen und Stabilisierungsverfahren. Kapitel 6 ordnet die Materialmessergebnisse in praktische Anwendungsbeispiele und Szenarien ein, mit Fokus auf Langzeitverhalten, Stabilisierung und zerstörungsfreie Bauteilcharakterisierung. Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgt in Kapitel 7 die Diskussion, zunächst als technische Bewertung der Messverfahren auf Basis von Kapitel 4 und anschließend als Einordnung der Ergebnisse und Zusammenhänge aus den Prüfstandsmessungen gemäß Kapitel 5 und 6.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung

Das Kapitel *Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung* legt die Basis für die folgenden Untersuchungen, indem die zentralen Begriffe, physikalischen Eigenschaften und Methoden im Kontext von Permanentmagneten dargestellt werden. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die wichtigsten magnetischen Kenngrößen und Eigenschaften aufgeführt, die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden. Abschnitt 2.2 erläutert den Magnetkreis, den Arbeitspunkt und den Entmagnetisierungsfaktor von Permanentmagneten. In Abschnitt 2.3 werden die physikalischen Eigenschaften beschrieben, insbesondere Magnetisierung und Entmagnetisierungsvorgänge, einschließlich relevanter Begriffe wie Viskosität und Viskositätsparameter. Abschnitt 2.4 behandelt die Werkstoffe von Permanentmagneten, mit Fokus auf die derzeit wichtigsten Materialien NdFeB und SmCo. In Abschnitt 2.5 werden schließlich die wichtigsten Mess- und Charakterisierungsmethoden für Permanentmagneten vorgestellt.

2.1 Magnetische Kenngrößen und Eigenschaften

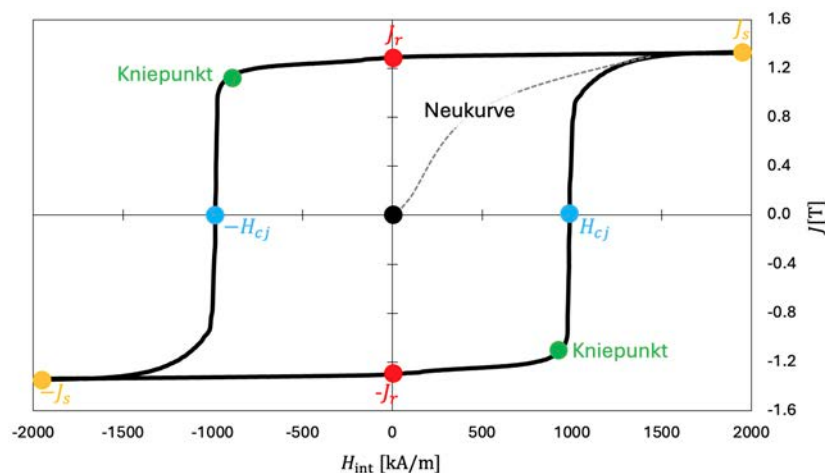


Abb. 2.1: $J(H_{\text{int}})$ -Hystereseschleife eines N52-Permanentmagneten (gemessen mit VSM). Beginnend mit der Neukurve zur initialen Aufmagnetisierung zeigt die Schleife die zentralen Kennwerte: Sättigungspolarisation J_s , remanente Polarisation J_r , dem Polarisationswert ohne externe Feldbelastung, dem Kniefunkt als Wendepunkt von hauptsächlich reversiblen zu hauptsächlich irreversiblen Änderungen und der Koerzitivfeldstärke H_{cj} , dem Feldwert für die Polarisation $J = 0$.

Die magnetische Charakterisierung beginnt an einem ferromagnetischen Werkstoff (z. B. einem N52-Permanentmagneten in Abb. 2.1), dessen elementare magnetische Momente zunächst nur innerhalb einzelner Domänen ausgerichtet sind. Diese Ausrichtungen mitteln sich makroskopisch jedoch aus, sodass die Gesamtpolarisation J zunächst gering ist. Wird ein externes Magnetfeld, beispielsweise durch bestromte Spulen angelegt, richten sich die magnetischen Momente zunehmend entlang der Feldrichtung aus. Dieser Prozess, dargestellt durch die sogenannte **Neukurve**, verläuft im ersten Quadranten der Hysteresekurve und endet in der **Sättigung** (markiert durch J_s), dem Zustand, in welchem alle Momente parallel zum Feld orientiert sind [32]. Wird der Strom anschließend auf null reduziert, verbleiben die meisten Momente in ihrer ausgerichteten Position (leichte Achse, Magnetisierungsachse) [33]. Dieser Zustand wird als **Remanenz** J_r bezeichnet. Im zweiten Quadranten ($H > 0$) beginnt nun die Entmagnetisierung. Zunächst treten dabei überwiegend reversible Verluste auf, erkennbar an einem nahezu linearen Verlauf zwischen Sättigung und Kniefunkt. Der **Kniefunkt** beschreibt den Übergang von überwiegend reversiblen zu zunehmend irreversiblen Verlusten [34]. Bereits geringe Änderungen im äußeren Feld oder der Temperatur können zu einer starken Entmagnetisierung führen. Der Punkt, an dem die integrale Magnetisierung null ist, bezeichnet die

Koerzitivfeldstärke H_{cj} [35]. Sie kennzeichnet die maximale äußere Feldstärke, die erforderlich ist, um das Material vollständig zu entmagnetisieren. Wird das äußere Feld weiter in negativer Richtung verstärkt, gelangt der Werkstoff im dritten Quadranten erneut in die Sättigung, nun jedoch mit entgegengesetzter Magnetisierungsrichtung. Steigt das äußere Feld anschließend wieder in positiver Richtung, kehren die magnetischen Momente im vierten Quadranten zur ursprünglichen Ausrichtung zurück. Damit ist der magnetische Zyklus vollständig durchlaufen. Die Fläche innerhalb der Hysteresekurve beschreibt die Verlustenergie, die pro Zyklus im Material umgesetzt wird [34].

Magnetisches Moment

Das magnetische Moment m beschreibt die Stärke eines Permanentmagneten als magnetischen Dipol. Befindet sich ein solcher Dipol in einem externen Magnetfeld $\vec{B}$, erfährt er ein Drehmoment $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$ [36], das ihn entlang der Feldlinien ausrichtet. In einem räumlich veränderlichen Magnetfeld wirkt zusätzlich eine Kraft $\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$ [37], [38], die zu einer Anziehung oder Abstoßung führen kann.

Magnetisierung

Die Magnetisierung M beschreibt die Dichte der magnetischen Momente innerhalb eines Materials. Sie ist ein Maß dafür, wie stark ein Material auf ein externes Magnetfeld reagiert [39], [40]. Die Magnetisierung ist definiert als die Summe der magnetischen Momente $\sum m$ pro Volumen V : $M = \frac{\sum m}{V}$. Die Einheit ist Ampere pro Meter [A/m] [34].

Magnetischer Fluss

Der magnetische Fluss Φ gibt an, wie viel Magnetfeld durch eine bestimmte Fläche A tritt. Die Beziehung zwischen Flussdichte B und magnetischem Fluss Φ lautet

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\theta)$$

wobei θ der Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung des Magnetfeldes ist [34].

Flussdichte

Die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ beschreibt die Stärke und Richtung eines Magnetfeldes an einem bestimmten Ort [34]. Sie umfasst sowohl das äußere Magnetfeld $\vec{H}$ als auch die Magnetisierung des Materials und gibt die Gesamtwirkung des Magnetfelds an. Die magnetische Flussdichte wird in Tesla [T] gemessen. Die magnetische Feldkonstante, auch Vakuumpermeabilität μ_0 , beschreibt den Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte und magnetischer Feldstärke im Vakuum mit $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]. Allgemein gilt:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Im Vakuum ($\vec{M} = 0$) folgt daraus:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Für die weiteren Analysen wird die magnetische Flussdichte $|\vec{B}|$ aus praktischen Gründen als skalare Größe betrachtet, wobei der Betrag entlang der Hauptmagnetisierungsrichtung des Materials verwendet wird.

Polarisation

Die magnetische Polarisation $\vec{J}$ ist proportional zur Magnetisierung $\vec{M}$ und beschreibt die mittlere Ausrichtung der magnetischen Dipolmomente pro Volumeneinheit. Sie steht in direktem Zusammenhang mit der magnetischen Flussdichte und lässt sich über die Beziehung

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} = \mu_0 \vec{M}$$

definieren [41], [42]. Damit kennzeichnet $\vec{J}$ jenen Anteil der Flussdichte, der durch das Material selbst erzeugt wird. Da $\vec{J}$ in vielen Darstellungen (z. B. Hystereseschleifen) nur durch die Komponente entlang der Magnetisierungsachse beschrieben wird, wird sie analog zu $\vec{B}$ und $\vec{H}$ als skalare Größe J weitergeführt.

Remanenz

Die Remanenz J_r ist die verbleibende magnetische Polarisierung in einem Material, nachdem das externe Magnetfeld entfernt wurde. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Materials, in diesem Fall eines Permanentmagneten, seine Magnetisierung auch ohne externes Feld beizubehalten [34].

Sättigungspolarisation

Die Sättigungspolarisation ist der maximale Wert der Magnetisierung J , den ein Material erreichen kann, wenn alle magnetischen Momente vollständig ausgerichtet sind [34], [32].

Koerzitivfeld

Das Koerzitivfeld H_{cj} ist die magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, um die Magnetisierung eines Materials auf null zu reduzieren [32]. Es ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber Entmagnetisierung und beeinflusst die Stabilität von Permanentmagneten [43].

H_{D5} -Feldstärke

Die H_{D5} -Feldstärke beschreibt die Entmagnetisierungsbeständigkeit eines Permanentmagneten und entspricht der negativen externen Feldstärke, bei der die Remanenz um 5 % irreversibel abnimmt [44]. Sie wird bestimmt, indem der lineare Bereich der $J(H)$ -Entmagnetisierungskurve parallel verschoben wird, bis er bei 95 % der Polarisation die J -Achse schneidet. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der gemessenen Kurve definiert den H_{D5} -Wert. Dieser praxisrelevante Kennwert dient zur Charakterisierung feldabhängiger Eigenschaften.

Maximales Energieprodukt

Das maximale Energieprodukt $(BH)_{\max}$ beschreibt die maximale magnetische Energie pro Volumen, die ein Permanentmagnet abgeben kann [45], [46]. Es ist ein Maß für die magnetische Leistungsfähigkeit des Dauermagneten und ergibt sich im zweiten Quadranten der $B(H)$ -Hysteresekurve (Abb. 2.2) als die maximale rechteckige Fläche unter der Kurve, dargestellt durch das Produkt aus magnetischer Flussdichte B und magnetischer Feldstärke H [34]. Exemplarisch liegen die Werte für NdFeB-Magnete bei N52 bei 52 MGOe ($\approx 414 \text{ kJ/m}^3$), bei N42 bei 42 MGOe ($\approx 334 \text{ kJ/m}^3$) und bei N35 bei 35 MGOe ($\approx 278 \text{ kJ/m}^3$) [47].

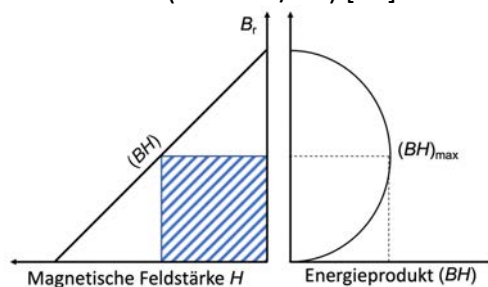


Abb. 2.2: Maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$ als Maß für die magnetische Leistungsfähigkeit eines Dauermagneten. Es ist definiert durch den größten Flächeninhalt der $B(H)$ -Kennlinie und beschreibt die Kombination aus magnetischer Feldstärke H und Flussdichte B . In Anlehnung an [34].

Temperaturkoeffizienten

Der reversible Temperaturkoeffizient α der Remanenz beschreibt die prozentuale reversible Änderung der remanenten Polarisation pro Grad Celsius in Bezug auf die Referenztemperatur T^{ref} [34], [45] und ist definiert als:

$$\alpha(J_r) = \frac{J_r^T - J_r^{\text{ref}}}{J_r^{\text{ref}} * (T - T^{\text{ref}})} * 100 \text{ [\%/}^\circ\text{C]}.$$

Der reversible Temperaturkoeffizient β der Koerzitivfeldstärke beschreibt die prozentuale Änderung der Koerzitivfeldstärke H_{cj} in Abhängigkeit von der Temperatur [34] und ist definiert als:

$$\beta(H_{cj}) = \frac{H_{cj}^T - H_{cj}^{\text{ref}}}{H_{cj}^{\text{ref}} * (T - T^{\text{ref}})} * 100 \text{ [\%/}^\circ\text{C]}.$$

Probennomenklatur (Maximale Einsatztemperatur)

Die maximale Einsatztemperatur bezeichnet die höchste Temperatur T_{max} , bis zu der Permanentmagnete ohne irreversible Beeinträchtigung ihrer magnetischen Eigenschaften eingesetzt werden können. Voraussetzung ist, dass sich der Arbeitspunkt im linearen Bereich vor $(BH)_{\text{max}}$ befindet. Da diese Angabe ohne Bezug auf den Formfaktor erfolgt, ist ihre Anwendbarkeit eingeschränkt. In dieser Arbeit ist die Nomenklatur an den jeweiligen nominalen Koerzitivfeldstärken ausgerichtet und in Tab. 1 aufgeführt. Die Probennomenklatur orientiert sich dabei an industriellen Standards und typischen Herstellerangaben [48], [49], [50]. Diese dienen der Klassifizierung der Proben, stellen jedoch keinen normierten Kennwert dar.

Tab. 1: Nomenklatur der Magnetklassen nach [48], [49], [50]. Übersicht der Temperaturklassen und dazugehörigen Suffixe.

Suffix	Nomenklatur	Nominale Koerzitivfeldstärke: H_{cj} [kA/m]
/	Standard	~955
M	Medium	~1194
H	High	~1273
SH	Super High	~1592
UH	Ultra High	~1991
EH	Extra High	~2389
TH	Top High	~2787

Curie-Temperatur

Die Curie-Temperatur T_c bezeichnet die Temperatur, ab der Magnetwerkstoffe ihre ferromagnetischen Eigenschaften verlieren. Oberhalb dieser Temperatur geht die gerichtete Anordnung der Dipolmomente verloren, und das ferromagnetische Verhalten wandelt sich in ein paramagnetisches Verhalten [41].

Kniepunkt

Der magnetische Kniepunkt bezeichnet den Wendepunkt auf der $J(H)$ -Entmagnetisierungskurve (Hysteresekurve) und liegt im Bereich der größten Steigung, der maximalen differentiellen magnetischen Suszeptibilität: $\chi = dB/dH$ [34].

Physikalisch markiert dieser Punkt den Übergang von einem stabilen Magnetisierungszustand zu einem Bereich, in dem die Magnetisierung stark abnimmt. Während im annähernd linearen Bereich vor dem Kniepunkt überwiegend reversible Änderungen auftreten, dominieren ab dem Kniepunkt zunehmend irreversible Prozesse [51], [52]. Aus diesem Grund ist der Kniepunkt entscheidend für die Festlegung eines sicheren Arbeitspunktes von Permanentmagneten, insbesondere bei Anwendungen, in denen Stabilität gegenüber äußeren Feldern oder Temperaturänderungen gefordert ist.

Übergangstemperatur/Übergangspunkt

Die Übergangstemperatur beschreibt einen in dieser Arbeit eingeführten charakteristischen Punkt auf der $J(T)$ -Kurve, an dem die irreversiblen Verluste erstmals die reversiblen übersteigen. Analog zum Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve markiert sie den Übergang von einem überwiegend reversiblen zu einem irreversiblen Entmagnetisierungsbereich, jedoch temperaturabhängig. Zur Bestimmung werden zwei Tangenten angelegt, wie in Abb. 2.3 visualisiert: eine im näherungsweisen linearen, reversiblen Bereich, eine im steilen, irreversiblen Ab schnitt. Der Schnittpunkt dieser Tangenten definiert die Übergangstemperatur. Sie ermöglicht einen quantitativen Vergleich verschiedener Proben hinsichtlich ihrer thermischen Stabilität und ergänzt den klassischen Kniepunkt als Kenngröße in Bezug auf die Temperatur.

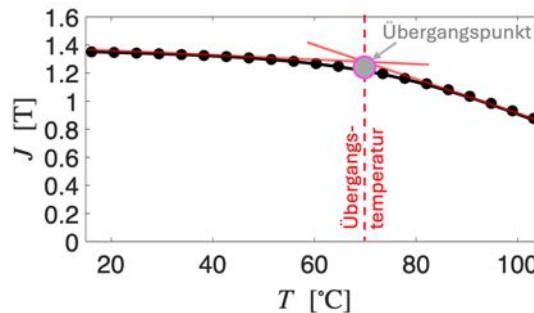


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der Übergangstemperatur und des Übergangspunkts in $J(T)$ -Kurven. Die Übergangstemperatur wird über den Schnittpunkt zweier Tangenten im reversiblen und irreversiblen Bereich bestimmt. Der resultierende Temperaturwert kennzeichnet den Übergang von überwiegend reversiblen zu überwiegend irreversiblen Änderungen und kann als angenäherte maximale Temperatur vor Einsetzen irreversibler Entmagnetisierung betrachtet werden.

Magnetisches Streufeld

Das Streufeld eines Permanentmagneten bezeichnet den Anteil des Magnetfeldes, der außerhalb des Magnetkörpers in den umgebenden Raum austritt, wie schematisch in Abb. 2.4 dargestellt. Dies entsteht durch die endliche Geometrie des Magneten, insbesondere an Kanten und Stirnflächen, an denen die Feldlinien aus dem Material austreten [3], [34], [53], [54]. Die Verteilung und Stärke des Streufeldes (Flussdichte) wird im Wesentlichen durch die Magnetisierung, die Geometrie und das Volumen des Magneten sowie durch den Luftspalt und das umgebende Material bestimmt.

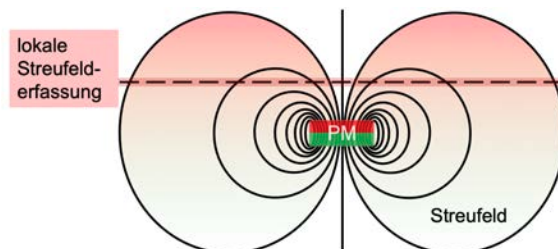


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Streufeldes eines Permanentmagneten, das aufgrund der endlichen Geometrie außerhalb des Magnetkörpers in die umgebende Luft austritt. Die gestrichelte Linie oberhalb der Probenoberfläche kennzeichnet die für lokale Messungen häufig verwendete Field-Mapping-Methode (lokale Streufelderfassung).

Wirbelstromverluste

Wirbelstromverluste entstehen in Permanentmagneten durch zeitlich veränderliche externe magnetische Felder, die elektrische Ströme durch die elektrische Leitfähigkeit des Magnetmaterials induzieren [34]. Diese Ströme führen zu Energieverlusten in Form von Wärme und können die Magnete zusätzlich zur äußeren Feldbelastung und thermischen Beanspruchung beeinträchtigen. Besonders bei hochfrequenten Wechselfeldern, wie sie etwa in Elektromotoren mit oberflächenmontierten Magneten (SMPM) auftreten können, sind Wirbelstromverluste ein relevanter Einflussfaktor [55].

2.2 Magnetkreis: Arbeitspunkt und Entmagnetisierungsfaktor

Die Magnetisierung von Permanentmagneten kann durch ihr eigenes Selbstentmagnetisierungsfeld geschwächt werden. Dieses Feld entsteht aufgrund von Polarisationsladungen an den Oberflächen, die durch die Diskontinuität der Magnetisierung bedingt sind [34], [56]. Je flacher der Magnetkörper in Magnetisierungsrichtung im Verhältnis zur Grundfläche ist, desto geringer ist der Abstand zwischen den entgegengesetzt geladenen Oberflächen, wodurch das Potenzialverhältnis steigt und ein stärkeres inneres Gegenfeld erzeugt wird [34]. Der Entmagnetisierungsfaktor beschreibt den Einfluss der Geometrie eines ferromagnetischen Körpers auf die innere Magnetisierung, insbesondere hinsichtlich der Selbstentmagnetisierung. In einem offenen magnetischen Kreis erzeugen ferromagnetische Materialien ein inneres Gegenfeld, dass durch die Magnetisierung M des Materials sowie durch dessen Form bestimmt wird. Dieses innere Selbstfeld H_{self} ergibt sich aus der Beziehung [34]:

$$H_{\text{self}} = -\frac{N * J}{\mu_0} = -N * M \quad (1)$$

Hierbei stellt N den Entmagnetisierungsfaktor, J die magnetische Polarisation und μ_0 die magnetische Feldkonstante dar. Abb. 2.5 zeigt das Selbstfeld als Verteilung des inneren Feldes H_{int} schematisch als simulierte Schnittdarstellung in Magnetisierungsrichtung. Als Resultat wird die Feldrichtung ($-N \cdot M$) entgegen der Magnetisierungsrichtung ersichtlich.

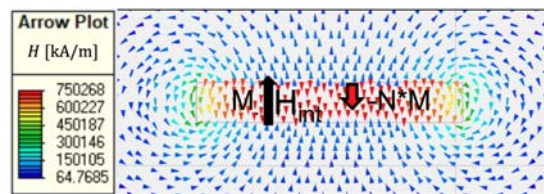


Abb. 2.5: Simulierte Feldverteilung des inneren Feldes H_{int} eines Permanentmagneten (Schnittdarstellung in Magnetisierungsrichtung) mit durch Pfeile markierter Magnetisierungsrichtung M entgegen dem Selbstfeld ($-N \cdot M$).

Eine grobe Annäherung des Entmagnetisierungsfaktors ermöglicht der Ansatz nach Aharoni [57], [58]. Er basiert auf dem Verhältnis der Grundfläche (x, y) zur Magnetisierungsrichtung (z) und setzt eine homogene Magnetisierung über das gesamte Volumen voraus. Der Entmagnetisierungsfaktor ist eine dimensionslose Größe mit Werten zwischen 0 und 1. Für einen Körper gilt, dass die Summe der Entmagnetisierungsfaktoren in den drei Raumrichtungen gleich 1 ist, also: $D_x + D_y + D_z = 1$ [57]. Exemplarisch sind zwei Geometrien in Abb. 2.6 dargestellt.

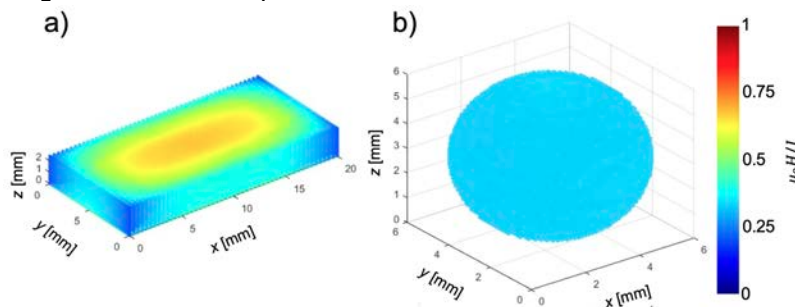


Abb. 2.6: Simulierte Feldverteilung eines N52-Magneten mit Magnetisierungsrichtung entlang der z -Achse, dargestellt als $N = \mu_0 H/J$ für a) einen Quader-Magneten ($20 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$) mit inhomogener innerer Selbstfeldverteilung und durchschnittlichem Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.7$ sowie b) einen Kugelmagneten ($D = 4 \text{ mm}$) mit homogener Selbstfeldverteilung und konstantem $N = 0.33$.

Für eine Quaderprobe mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ergibt sich ein Entmagnetisierungsfaktor von $N_z = 0.7$ in Magnetisierungsrichtung (z) als Durchschnittswert der inhomogenen inneren Selbstfeldverteilung. Für die weitere Betrachtung wird der Entmagnetisierungsfak-

tor über N ohne Angabe der Magnetisierungsrichtung (z) verwendet. Für eine Kugel mit homogener innerer Selbstfeldverteilung ergibt sich $N = 0.33$. Zur weiteren Betrachtung des Einflusses der Probenform auf den Entmagnetisierungsfaktor und den Arbeitspunkt dient eine Quaderprobe mit konstanter Grundfläche von $20 \times 10 \text{ mm}^2$ und drei unterschiedlichen Höhen in Magnetisierungsrichtung (Abb. 2.7). Für eine Höhe von 10 mm ergibt sich $N = 0.4$ (Probe A), bei 5 mm $N = 0.56$ (Probe B) und bei 1 mm $N = 0.82$ (Probe C), wie in Abb. 2.7a dargestellt. Wie in Abb. 2.7b gezeigt, verschiebt sich der resultierende Arbeitspunkt mit zunehmendem Entmagnetisierungsfaktor näher an den Kniepunkt. In einem offenen magnetischen Kreis entstehen um den Magneten ungehinderte Flusslinien (Abb. 2.8a).

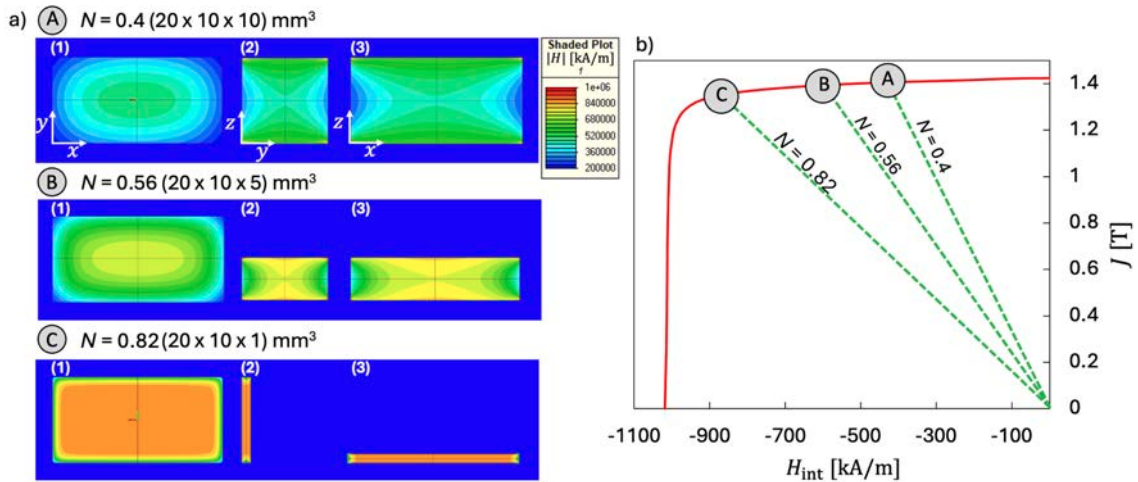


Abb. 2.7: Auswirkungen unterschiedlicher Probenhöhen in Magnetisierungsrichtung (z) mit (A): 10 mm ($N = 0.4$), (B): 5 mm ($N = 0.56$) und (C): 1 mm ($N = 0.82$) bei gleichen Grundmaßen ($20 \times 10 \text{ mm}^2$) eines N52-Magneten auf den Entmagnetisierungsfaktor N und die zugehörigen Arbeitspunkte im offenen Kreis. Die simulierten Feldverteilungen in a) zeigen jeweils die Polflächenansicht in (1) ($x, y: 20 \times 10 \text{ mm}^2$), die rechte Seitenansicht (z, y) in (2) und die vordere Seitenansicht (z, x) in (3) der jeweiligen Konfiguration (A, B, C). Über die jeweiligen Entmagnetisierungsfaktoren ergeben sich in b) unterschiedliche Arbeitspunkte der Proben (A, B, C) entlang der $J(H_{\text{int}})$ -Kurve. In a) zeigt sich, dass mit abnehmender Probenhöhe in Magnetisierungsrichtung die interne Feldverteilung H_{int} zunimmt, was sich in b) in den resultierenden Arbeitspunkten widerspiegelt: Probe (C) mit dem höchsten inneren Selbstfeld befindet sich am nächsten zum Kniepunkt, während Probe (B) und (A) noch im reversiblen Bereich der $J(H_{\text{int}})$ -Kurve liegen.

Wird ein externes Magnetfeld H_{ext} angelegt, wirkt dieses unabhängig von der Probenform und verschiebt die Arbeitslinien der Proben entsprechend um dessen Betrag. Das interne Feld H_{int} ergibt sich als Summe des externen Feldes und des Selbstfeldes H_{self} der Probe gemäß [34], [56]:

$$H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} - \frac{N \cdot J}{\mu_0} \quad (2)$$

Sobald die Polflächen des Magneten jedoch mit einem ferromagnetischen Werkstoff verbunden werden, verändern sich die Flusslinien aufgrund der hohen magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität) des Materials. Wenn der Magnet schließlich auf beiden Seiten mit einem Rückschluss (z. B. einem Magnetjoch) verbunden wird, der eine größere Fläche als die Polflächen des Magneten aufweist, fließt der gesamte magnetische Fluss durch das Joch wie in Abb. 2.8b schematisch dargestellt. In dieser Konfiguration: geschlossener Magnetkreis bildet sich kein inneres Selbstentmagnetisierungsfeld mehr aus, da der Entmagnetisierungsfaktor N nahezu null wird ($N \approx 0$) wodurch das interne Feld H_{int} dem externen Feld H_{ext} entspricht.

In permanenterregten Elektromotoren werden Permanentmagnete entweder in den Rotor eingebettet oder auf dessen Oberfläche montiert. Der Rotor bildet dabei konstruktionsbedingt eine Einheit mit einem weichmagnetischen Rückschluss und ist durch einen Luftspalt vom Stator getrennt.

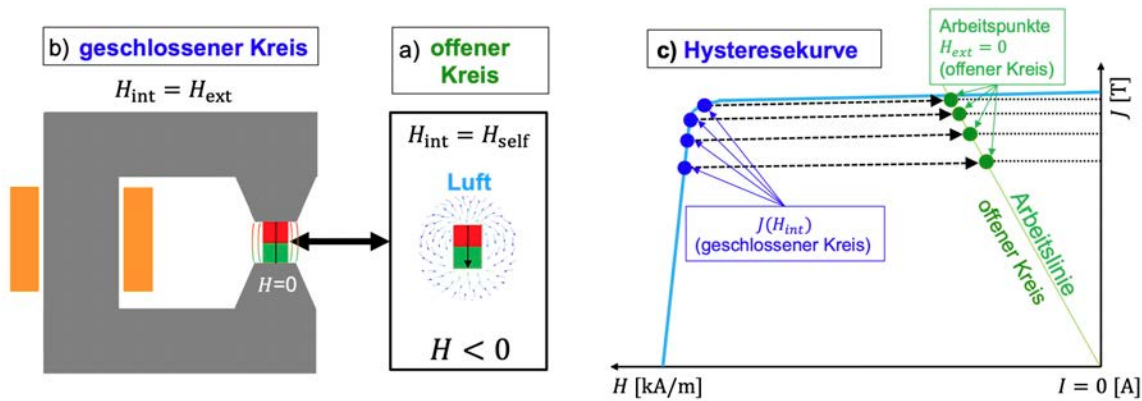


Abb. 2.8: Übersicht der beiden Magnetkreisarten: offener und geschlossener Kreis. a) Permanentmagnetprobe in Luft mit ungehinderten Feldlinien (offener Kreis). b) Mit zunehmendem Kontakt zu ferromagnetischen Werkstoffen mit höherer magnetischer Permeabilität werden die Streufeldlinien eingeschränkt, bis die innere Selbstfeldverteilung dem externen Feld entspricht (geschlossener Kreis). c) Schematische $J(H_{int})$ -Hysteresekurve mit markierten Polarisationszuständen. Unter angelegtem Feld im geschlossenen Kreis ergeben sich $J(H_{int})$ -Werte (beispielsweise blau markiert). Wird die Probe anschließend aus dem geschlossenen Kreis in den offenen Kreis gebracht, zeigt ihre Magnetisierung nicht mehr den Wert bei angelegtem Feld, sondern den Wert des Selbstfeldes bei $H_{ext} = 0$, also den Schnittpunkt der Arbeitslinie mit der $J(H_{int})$ -Kurve (grüne Markierung).

Abb. 2.9 veranschaulicht in einer vereinfachten Darstellung den Einfluss unterschiedlich dimensionierter weichmagnetischer Rückschlüsse (Elektroblech: M270-35A) in Magnetisierungsrichtung auf den Entmagnetisierungsfaktor einer Standardprobe mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$. Mit zunehmendem Anteil des weichmagnetischen Materials nimmt der Entmagnetisierungsfaktor der Probe ab.

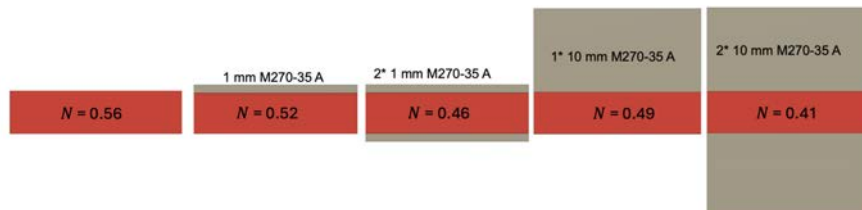


Abb. 2.9: Simulierter Einfluss weichmagnetischer Anteile (Elektroblech: M270-35A) auf den Entmagnetisierungsfaktor N einer Standardprobe (N52) mit Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$. Mit zunehmendem weichmagnetischem Anteil (grau) auf den Polflächen der Permanentmagnetprobe (braun) nimmt der Entmagnetisierungsfaktor ab.

Während die Probenform im magnetisch offenen Kreis über den Schnittpunkt der $J(H)$ -Kurve mit der Arbeitsgeraden den Arbeitspunkt und damit das innere Selbstfeld bestimmt, beeinflusst eine steigende Probentemperatur die magnetischen Eigenschaften durch Abnahme von Remanenz und Koerzitivfeldstärke. Abb. 2.10a veranschaulicht diesen Zusammenhang: Mit zunehmender Temperatur verringert sich das Koerzitivfeld, wodurch sich die abnehmenden $J(H)$ -Kurven dem Arbeitspunkt annähern. Bei 23°C liegen alle drei Proben (A: $N = 0,4$, B: $N = 0,56$, C: $N = 0,82$) noch vor dem Kniepunkt. Bei 50°C liegt Probe C bereits darunter, bei 100°C nur noch Probe A vor dem Kniepunkt. Bei 200°C liegen alle Proben unterhalb des Kniepunktes im irreversiblen Bereich der $J(H)$ -Kurve. Abb. 2.10b zeigt zusätzlich die Verschiebung der Arbeitsgeraden durch ein exemplarisches externes Feld H_{ext} von -300 kA/m , wodurch Probe C bereits bei 23°C unterhalb des Kniepunktes liegt.

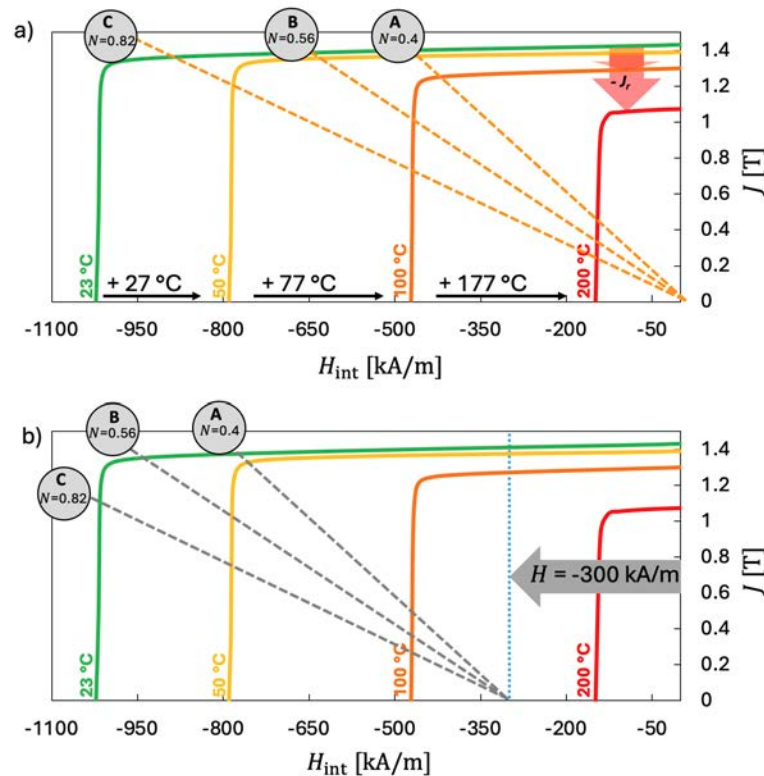


Abb. 2.10: Arbeitspunkte von N52-Proben unterschiedlicher Geometrien (Probe A: $N = 0.4$; Probe B: $N = 0.56$; Probe C: $N = 0.82$) mit den entsprechenden Arbeitsgeraden bei $J(H)$ -Kurven verschiedener Temperaturen (23, 50, 100 und 200 °C). a) Arbeitsgeraden ohne externes Feld. Mit steigender Temperatur nehmen Polarisation und Koerzitivfeldstärke ab. Die Schnittpunkte der Arbeitsgeraden mit den $J(H)$ -Kurven zeigen die jeweiligen Arbeitspunkte der Proben: Bei 23 °C liegen alle drei Proben (A, B, C) im linearen Bereich vor dem Kniepunkt. Bei 50 °C liegt nur noch Probe A vor dem Kniepunkt, während Proben B und C bereits darunter liegen. Bei 100 °C befindet sich nur noch Probe A vor dem Kniepunkt. Bei 200 °C liegen alle Proben unterhalb des Kniepunkts. b) Arbeitsgeraden verschoben durch ein externes Feld von $H_{\text{ext}} = -300 \text{ kA/m}$. Das externe Feld verschiebt die Arbeitsgeraden: Bei 23 °C liegt Probe C bereits unterhalb des Kniepunkts. Bei 50 °C befindet sich Probe A im Kniepunkt, während Proben B und C darunter liegen. Bei 100 °C und 200 °C liegen alle Proben unterhalb des Kniepunkts. Unterschied zwischen Feld- und Temperaturbelastung: Steigende Temperatur reduziert sowohl Remanenz als auch Koerzitivfeldstärke, wodurch der Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve näher an den Arbeitspunkt rückt. Ein externes Feld verschiebt hingegen direkt den Arbeitspunkt entsprechend seiner Feldstärke.

2.3 Magnetisierung und Entmagnetisierung

Abschnitt 2.3 gliedert sich in die Beschreibung direkter Verluste, die feld- und temperaturabhängig auftreten, sowie in zeitabhängige Verluste, beschrieben durch Viskosität, Viskositätsparameter und Fluktuationsfeld. Abschließend wird die magnetische Stabilisierung erläutert.

2.3.1 Direkte Verluste

Wie in Abb. 2.10 dargestellt, beschreibt der Magnetisierungszustand eines Permanentmagneten das Verhältnis zwischen internem Magnetfeld und Temperatur. Im magnetisch geschlossenen Kreis wirken externes und internes Feld gleich ($H_{\text{ext}} = H_{\text{int}}$), sodass Temperatur- und Feldabhängigkeit direkt mit der Materialzusammensetzung zusammenhängen. Im offenen Magnetkreis tritt zusätzlich ein formbedingtes Selbstfeld H_{self} auf, wodurch sich das interne Feld aus externem Feld und dem durch die Probenform bestimmten Selbstfeld zusammensetzt. Die Auswirkungen eines Feldes auf die $J(H, T)$ -Kurven sind in Abb. 2.11a dargestellt. Ein zunehmendes entmagnetisierendes Feld verschiebt die Arbeitsebene entlang der Feldachse, während eine steigende Temperatur die $J(H)$ -Kurven hinsichtlich Polarisation und Koerzitivfeldstärke reduziert, wie in Abb. 2.11b gezeigt. Der Schnittpunkt (Arbeitspunkt) aus beiden Einflussfaktoren mit der $J(H)$ -Kurve der jeweiligen Temperatur ist in Abb. 2.11c (pink) dargestellt.

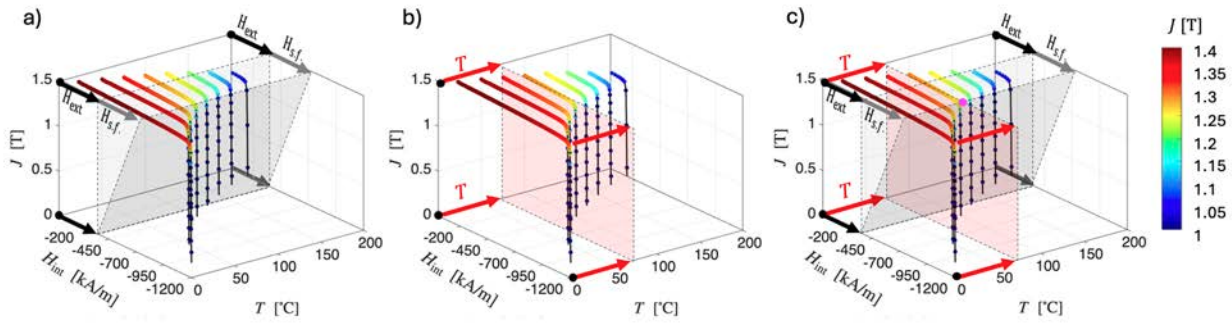


Abb. 2.11: $J(T, H)$ -Kurven einer N52-Probe über einen Temperaturbereich von 20 bis 200 °C zur Veranschaulichung von Feld- und Temperatureinflüssen. a) Verschiebung der Arbeitsebene (graue Fläche) um den Betrag der Summe aus externem Feld H_{ext} und Selbstfeld H_{self} . b) Eine erhöhte Probentemperatur führt zu abnehmender Magnetisierung und Koerzitivfeldstärke (rote Fläche). c) Die Kombination von Feld- und Temperatureffekt ergibt den resultierenden Arbeitspunkt (pink).

2.3.1.1 Feldabhängige Verluste

Magnetische Suszeptibilität

Feldabhängige Magnetisierungsänderungen entstehen durch das Anlegen eines externen Magnetfeldes und werden durch die (differentielle) magnetische Suszeptibilität χ beschrieben, die Fähigkeit eines Materials, auf ein externes Magnetfeld zu reagieren. Sie ist eine dimensionslose Größe und definiert als das Verhältnis von Magnetisierung zur externen magnetischen Feldstärke [34], [56], [59]:

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{\Delta J}{\Delta H} \quad (3)$$

Die magnetische Suszeptibilität setzt sich aus zwei Komponenten zusammen (vgl. Abb. 2.12):

- **Reversible differentielle magnetische Suszeptibilität**

Dieser Anteil beschreibt die vollständig umkehrbare, elastische Reaktion der Magnetisierung auf Änderungen des Magnetfeldes, ohne bleibende Veränderungen im Material. Sie tritt typischerweise im linearen Bereich des Magnetisierungszyklus (orange Markierung in Abb. 2.12a) auf.

$$\chi^{\text{rev}} = \frac{\Delta J^{\text{rev}}}{\Delta H} \quad (4)$$

- **Irreversible differentielle magnetische Suszeptibilität**

Die irreversible Komponente entsteht, wenn das Magnetfeld stark genug ist, um Domänenwände dauerhaft zu verschieben oder Spins umzuklappen. In diesem Fall folgt die Magnetisierung dem Magnetfeld nicht mehr vollständig, sodass nach Entfernen des Feldes eine remanente reduzierte Magnetisierung bestehen bleibt (blaue Markierung für den irreversiblen Anteil in Abb. 2.12a). Dieses Verhalten ist typisch für ferromagnetische Materialien und zeigt sich in der Ausbildung einer Hysteresekurve.

$$\chi^{\text{irr}} = \frac{\Delta J^{\text{irr}}}{\Delta H} \quad (5)$$

Die Gesamtsuszeptibilität (χ^{tot}) ergibt sich aus beiden Anteilen:

$$\chi^{\text{tot}} = \chi^{\text{irr}} + \chi^{\text{rev}} \quad (6)$$

Rücklaufverhalten: Recoil Permeabilität

Das Rücklaufverhalten (Recoil) beschreibt, wie sich die Magnetisierung eines Materials verändert, wenn das zuvor angelegte Entmagnetisierungsfeld wieder reduziert wird. Im linearen Bereich der Hysteresekurve verläuft die Rücklaufkurve in etwa parallel zur ursprünglichen Entmagnetisierungskurve (rote Markierung für den Rücklaufpfad im reversiblen Anteil in Abb. 2.12a). Die Steigung der Kurve wird als Recoil-Permeabilität bezeichnet und definiert durch

[34]: $\mu_{\text{recoil}} = \Delta M / \Delta H$. Dabei beschreibt μ_{recoil} die Änderung der Magnetisierung in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke während des Rückmagnetisierungsprozesses (markiert durch Rücklaufpfad „recoil“ in Abb. 2.12a).

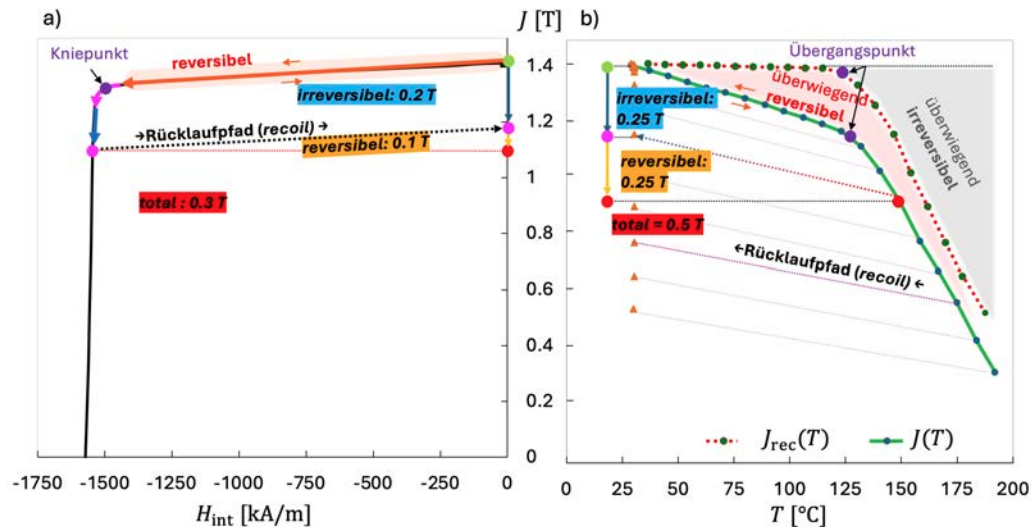


Abb. 2.12: Übersicht der direkten Verlustarten am Beispiel eines N52-SH-Magneten. Gezeigt sind a) die $J(H)$ -Kurve und b) die $J(T)$ -Kurve. Im linearen Bereich führt der Rücklaufpfad nach Feldbelastung in a) bzw. Temperaturbelastung in b) im reversiblen Bereich (rot, transparent) vollständig zum ursprünglichen Anfangswert zurück. Ab dem Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve bzw. dem Übergangspunkt der $J(T)$ -Kurve treten irreversible Verluste auf. Dadurch kehrt der Rücklaufpfad nicht mehr zum ursprünglichen Anfangspolarisationswert zurück (grün markiert bei $H = 0$ bzw. $T = 25 \text{ °C}$), sondern wird um einen irreversiblen Anteil verschoben. Beispiel Feldbelastung a): Eine Feldstärke von $H = -1550 \text{ kA/m}$ führt zu einem totalen Verlust von 0.3 T auf 1.1 T , davon 0.1 T reversibel und 0.2 T irreversibel. Beispiel Temperaturbelastung b): Bei $T = 150 \text{ °C}$ sinkt die Polarisation nach Rückführung auf Raumtemperatur auf 0.9 T , mit einem Gesamtverlust von 0.5 T , aufgeteilt in 0.25 T reversibel und 0.25 T irreversibel.

Dieses Verhalten ist insbesondere bei Messungen im offenen magnetischen Kreis von Bedeutung. Hier beeinflusst das Selbstentmagnetisierungsfeld (bedingt durch die Probenform) den Recoil-Prozess: Beim Reduzieren des externen Entmagnetisierungsfeldes wird nicht die gesamte Rücklaufkurve durchlaufen, sondern nur der Bereich bis zum aktuellen Arbeitspunkt der Probe (Abb. 2.8). Für externe Felder, die kleiner als das Selbstentmagnetisierungsfeld sind, ist eine Umpolung des externen Feldes erforderlich, um eine vollständige Rückführung auf das interne Feld $H_{\text{int}} = 0$ zu ermöglichen.

2.3.1.2 Temperaturabhängige Verluste

In bisherigen Betrachtungen wurde ausschließlich das äußere Magnetfeld bei konstanter Temperatur variiert. Es treten jedoch zusätzlich temperaturabhängige Verluste auf, ähnlich zur feldabhängigen magnetischen Suszeptibilität Gl. (5) jedoch in Form einer thermischen Änderungsrate $\Delta J / \Delta T$, die auf der Wechselwirkung zwischen Proben temperatur und dem Selbstfeld der Probe basiert. Hierbei führen thermische Fluktuationen zu einem instabileren Energiezustand, wodurch sich nicht nur der Magnetisierungszustand verringert, sondern auch seine Kraft gegenüber äußeren Entmagnetisierungsfeldern. Dadurch sinkt die Koerzitivfeldstärke [12], [24]. Diese thermischen Effekte können, wie die feldabhängigen, sowohl reversibel als auch irreversibel sein.

Auch bei thermischer Beanspruchung lassen sich sowohl ein Rücklauverhalten (Recoil) als auch der in Abschnitt 2.1 im Zusammenhang mit der Hysteresekurve beschriebene Übergangspunkt beobachten. Abb. 2.12b zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel einer $J(T)$ -Kurve im offenen Magnetkreis. Während anfängliche Temperaturänderungen bis zum Übergangspunkt überwiegend reversibel sind und der Rücklaufpfad dem ursprünglichen $J(T)$ -Verlauf entspricht, treten bei Temperaturen oberhalb der Übergangstemperatur zunehmende irreversible Änderungen auf, wodurch der Rücklaufpfad um einen irreversiblen Anteil nach unten verschoben wird.

2.3.2 Zeitabhängige Verluste

Abb. 2.13 zeigt beispielhaft die Unterschiede zwischen direkten (feld- und temperaturabhängigen) und zeitabhängigen magnetischen Verlusten. Direkte Verluste entstehen durch sofortige Änderungen des externen Magnetfeldes oder der Temperatur und wirken sich unmittelbar auf die Magnetisierung aus. Zeitabhängige Verluste treten hingegen im Schnittpunkt mit der $J(H, T)$ -Kennlinie verzögert auf und basieren auf thermisch aktivierten Prozessen, die über längere Zeiträume eine allmähliche Veränderung der Magnetisierung bewirken.

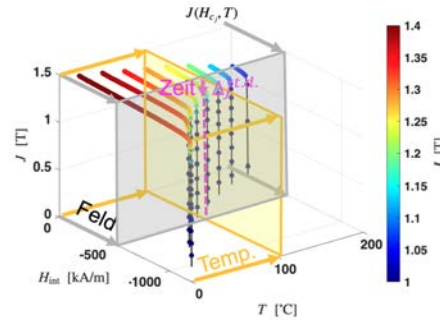


Abb. 2.13: Darstellung der $J(H, T)$ -Kurven einer N52-Probe mit dem resultierenden Arbeitspunkt, der sich aus dem Schnittpunkt der Feldfläche, Temperaturfläche und der $J(H)$ -Kurve ergibt. An diesem Schnittpunkt (Arbeitspunkt) treten über die Zeit irreversible, zeitabhängige Verluste $\Delta J^{\text{t.d.}}$ auf (pinkle Markierung).

2.3.2.1 Magnetische Viskosität (Nachwirkung)

Permanentmagnete zeigen unter dem Einfluss eines entgegengesetzten Magnetfeldes eine logarithmische Abnahme der Magnetisierung über die Zeit. Diese Abnahme wird durch die magnetische Viskosität S beschrieben, die zeitabhängige Änderungen der Magnetisierung aufgrund thermisch aktivierter Prozesse erfasst [16], [23], [59], [60], [61].

Dadurch verändert sich die Magnetisierung irreversibel über die Zeit. S wird definiert als die zeitliche Änderung der Polarisation $\Delta J^{\text{t.d.}}$ (time dependent) bezogen auf den natürlichen Logarithmus der Zeit, wobei t_0 als den Zeitpunkt des Beginns der zeitabhängigen Entmagnetisierung beschreibt und t das Ende des betrachteten Zeitverlaufs angibt [59], [62]:

$$S = \frac{\Delta J^{\text{t.d.}}}{\ln(t/t_0)} \quad (7)$$

Das experimentelle Vorgehen zur Bestimmung von S besteht darin, die Probe über eine feld- oder temperaturinduzierte Belastung bei konstanter Intensität über einen definierten Zeitraum zu untersuchen. In Abb. 2.14a wurde eine Temperaturbelastung verwendet. Die resultierende zeitliche Abnahme der Polarisation $J(t)$ wird gegen den natürlichen Logarithmus der Zeit in Abb. 2.14b aufgetragen. Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht dem Wert der magnetischen Viskosität S .

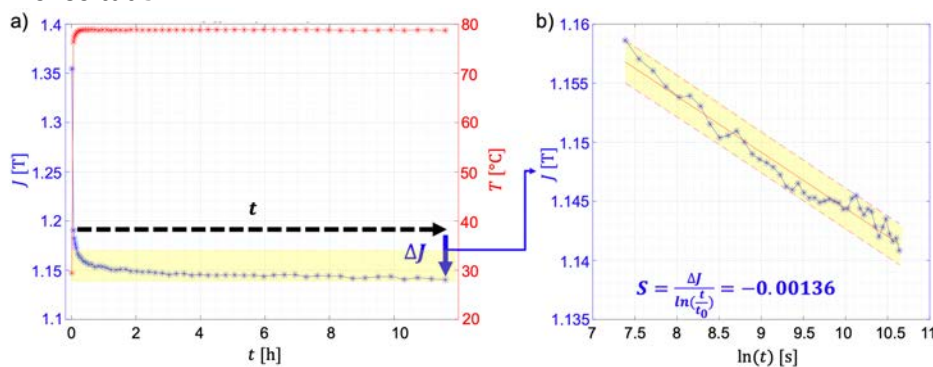


Abb. 2.14: Zeitabhängige Entmagnetisierung im offenen Magnetkreis einer N52-Probe mit Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.56$. a) Verlauf der Polarisation $J(t)$ (blau) bei konstanter Temperatur von 80 °C (rot). b) Gelb markierter Ausschnitt aus a), dargestellt über die logarithmierte Zeit, wobei t_0 den Beginn der zeitabhängigen Entmagnetisierung und t das Ende des betrachteten Zeitverlaufs angibt. Die lineare Regressionsgerade beschreibt die magnetische Viskosität S , die in diesem Beispiel $S = -0.00136$ beträgt.

2.3.2.2 Magnetischer Viskositätsparameter

Der magnetische Viskositätsparameter beschreibt das Verhältnis von zeitabhängigen Verlusten zu direkten (feldinduzierten) Verlusten. Zur Bestimmung wird die Probe zunächst durch Anlegen eines Magnetfeldes ΔH oder einer Temperaturänderung ΔT vom ursprünglichen Arbeitspunkt (A) in einen teilentmagnetisierten Zustand (B) überführt, wie in Abb. 2.15a als Übersicht schematisch gezeigt, sowie in b) für das feldbasierte Vorgehen und in c) für das temperaturbasierte Vorgehen dargestellt. Die dabei auftretende sofortige Änderung der Magnetisierung charakterisiert die direkten Verluste. Anschließend verbleibt die Probe über einen längeren Zeitraum unter konstantem Feld ($H^{B,C}$) und oder Temperatur ($T^{B,C}$) in diesem neuen Arbeitspunkt. Die daraufhin beobachtete, zeitlich verzögerte Änderung der Magnetisierung von Punkt (B) zu (C) beschreibt die zeitabhängigen Verluste ($J^{t.d.}$). Das Verhältnis beider Effekte definiert den magnetischen Viskositätsparameter, welcher primär feldbezogen als Viskositätsparameter S_v definiert ist und zusätzlich temperaturbezogen als temperaturbasierter Viskositätsparameter S_v^T neu eingeführt wird, wobei beide Größen jeweils ein Maß für die zeitliche Stabilität der Magnetisierung unter konstanter Belastung darstellen.

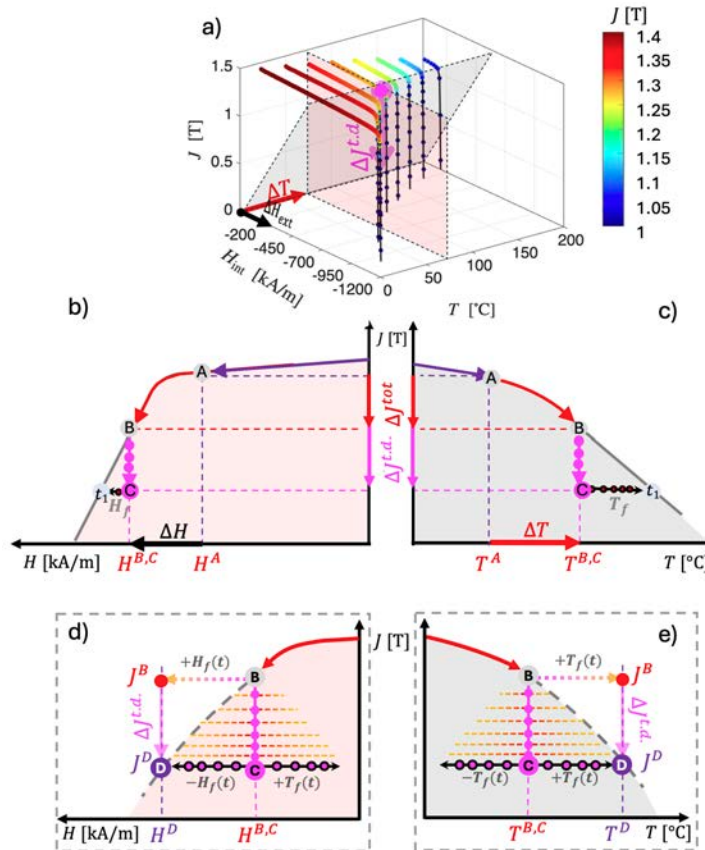


Abb. 2.15: Schematische Abbildung des Verhaltens der magnetischen Polarisation in Abhängigkeit von Feld und Temperatur zur Bestimmung des magnetischen Viskositätsparameters. a) $J(H, T)$ -Kurven (N52) in Abhängigkeit von Feld und Temperatur mit markierter Feldebene in grau (Selbstfeld, $N = 0.82$) und Temperaturebene in rot (70°C). b) Schematischer Ansatz zur Bestimmung von S_v : Zunächst wird durch eine externe Feldänderung ΔH von Punkt (A) zu (B) die differentielle Suszeptibilität χ bestimmt, anschließend bei konstantem Feld die zeitabhängigen Verluste $\Delta J^{t.d.}$ von J^B (Punkt B) zu J^C (Punkt C) zur Bestimmung der magnetischen Viskosität; dieser Ablauf erfolgt entlang der roten Ebene in a) bei konstanter Temperatur. c) Schematischer Ansatz zur Bestimmung von S_v^T ohne externes Feld ($H_{\text{ext}} = 0$): Ein Temperaturanstieg ΔT von Punkt (A) zu (B) dient zur Bestimmung der temperaturabhängigen Verluste, gefolgt von der Messung der zeitabhängigen Verluste $\Delta J^{t.d.}$ von J^B (Punkt B) zu J^C (Punkt C) bei konstanter Temperatur. Der Ablauf erfolgt entlang der grauen Ebene in a) im Selbstfeld der Probe. Die zeitliche Polarisationsabnahme von J^B (Punkt B) zu J^C (Punkt C) kann alternativ durch ein äquivalentes Fluktuationsfeld H_f in d) sowie durch eine äquivalente Fluktuations-temperatur T_f in e) beschrieben werden. Dabei ist H_f das zusätzliche Feld, das ausgehend vom maximalen Feld $H^{B,C}$ erforderlich ist, um auf der $J(H)$ -Kurve denselben Polarisationswert zu erreichen wie nach zeitabhängiger Entmagnetisierung, d. h. $J^D = J^C$. Analog ist T_f als diejenige Temperatur definiert, die ausgehend von der maximalen Temperatur $T^{B,C}$ erforderlich ist, um auf der $J(T)$ -Kurve ebenfalls den Polarisationswert $J^D = J^C$ zu erreichen. Die zeitabhängige Fluktuation ist in pink symbolisch dargestellt und zeigt mit zunehmender Zeit ansteigende Fluktuationen in positiver und negativer Richtung.

2.3.2.2.1 Feldbasierter Viskositätsparameter

Der feldbasierte magnetische Viskositätsparameter S_v beschreibt das Verhältnis zwischen zeitabhängigen, thermisch aktivierten Verlusten und den direkten, feldinduzierten Verlusten.

Die thermisch aktivierten Verluste werden durch die magnetische Viskosität Gl. (7) beschrieben und führen wie in Abb. 2.15(b, d) zu einer zeitabhängigen Entmagnetisierung $J^{t.d.}$. Die feldbasierten Änderungen werden über die differentielle irreversible Suszeptibilität χ_{int}^{irr} nach Gl. (5) quantifiziert und sind in Abb. 2.15b von Punkt (A) zu Punkt (B) markiert. Nach Néel [62], [63] können die zeitabhängigen Verluste auch durch ein zusätzliches Fluktuationfeld

$$\Delta H = -S_v * \ln(t/t_0) \quad (8)$$

quantifiziert werden, wie in Abb. 2.15b bei J^C auf Basis von $H^{B,C} + H_f$ mit $H_f = \Delta H$ visualisiert. Der resultierende Polarisationswert J^C ergibt sich somit aus der zeitabhängigen Entmagnetisierung $\Delta J^{t.d.}$ oder äquivalent aus maximalem Feld und dem Fluktuationfeld. Damit haben zusätzliche Felder ΔH denselben Effekt wie eine zeitabhängige Entmagnetisierung in der Zeitspanne t/t_0 .

Aus Gl. (5) folgt nach ΔJ umgeformt:

$$\Delta J_{\chi}^{irr} = \chi^{irr} * \Delta H \quad (9)$$

Aus Gl. (9) mit ΔH aus Gl. (8) ergibt sich:

$$\Delta J_{\chi}^{irr} = \chi^{irr} * S_v * \ln(t/t_0)$$

Dies entspricht demselben Beitrag wie aus den zeitabhängigen Verlusten umgeformt aus Gl. (7):

$$\Delta J_{t.d.}^{irr} = S * \ln(t/t_0) \quad (10)$$

Beide Beiträge können gleichgesetzt werden ($\Delta J_{\chi}^{irr} = \Delta J_{t.d.}^{irr}$), sodass gilt:

$$\chi^{irr} * S_v * \ln(\Delta t) = S * \ln(t/t_0)$$

Hieraus ergibt sich der Quotient aus magnetischer Viskosität S und irreversibler Suszeptibilität χ^{irr} , der als magnetischer Viskositätsparameter S_v bezeichnet wird:

$$S_v = \frac{S}{\chi_{int}^{irr}} \quad (11)$$

Dieser Quotient zeigt das proportionale Verhältnis von S zu χ^{irr} [64].

Für Proben mit einem Entmagnetisierungsfaktor $N \neq 0$ muss S_v mit der reversiblen Suszeptibilität sowie eines Entmagnetisierungsfaktors angepasst werden [61]:

$$S_v(\chi_{int}^{irr}) = S_v(\chi_{ext}^{irr}) * 1 - N * \chi_{ext}^{rev} \quad (12)$$

Thermisch aktivierte Prozesse treten auf, wenn die Summe aus äußerem Magnetfeld H_{ext} und dem Selbstentmagnetisierungsfeld H_{self} eine kritische Schwelle überschreitet. In diesem Fall überwinden Domänenwände energetische Barrieren, was zu einer zeitabhängigen Reduktion der Magnetisierung führt [8]. Ein hoher S_v -Wert stellt eine verstärkte, zeitabhängige Entmagnetisierung und damit geringere Stabilität des Magnetisierungszustands dar, während ein niedriger Wert auf zeitliche Robustheit hinweist.

2.3.2.2.2 Temperaturbasierter Viskositätsparameter

Da thermische Fluktuationen den Grund für die zeitabhängige Entmagnetisierung darstellen, bisher jedoch primär der Einfluss variierender Gegenfelder bei konstanter Temperatur betrachtet wurde, verfolgt der neu erarbeitete Ansatz die Temperatur als Stellgröße anstelle des Feldes, definiert als temperaturbasierter Viskositätsparameter S_v^T . Abb. 2.15 zeigt das konventionelle (feldabhängige) Verfahren zur Bestimmung des Viskositätsparameters im Vergleich zum neuen, temperaturbasierten-Ansatz in c). Hierbei wird die direkte feldabhängige Entmagnetisierung von Punkt (A) zu Punkt (B) (differentielle Suszeptibilität Gl. (5)) durch die Abnahme der magnetischen Polarisierung infolge eines Temperaturanstiegs ($\Delta J/\Delta T$) ersetzt, wodurch die

Temperaturabhängigkeit anstelle der Feldabhängigkeit betrachtet wird. Die magnetische Viskosität S , definiert als Steigung der Polarisationsabnahme in Abhängigkeit vom Logarithmus der Zeit (z.B. in c) von Punkt (B) zu Punkt (C)), ist thermisch bedingt und maßgeblich vom Arbeitspunkt der Probe abhängig.

Ein angelegtes Gegenfeld bei konstanter Temperatur führt zur Verschiebung des Arbeitspunkt in Richtung H_{cj} , während die Temperatur primär die Koerzitivfeldstärke und Remanenz der Probe verringert. Der temperaturbasierte Viskositätsparameter wird mit ansteigender Proben-temperatur ohne externes Feld gemessen, sodass im offenen Kreis ausschließlich das selbst-entmagnetisierende Feld H_{self} der Probe über deren Form und Magnetisierungszustand (Arbeitspunkt) relativ zum temperaturbedingt reduzierten Koerzitivfeld wirkt. Erst das Verhältnis, ähnlich zum feldabhängigen Viskositätsparameter S_v ,

$$S_v^T = \frac{S}{\frac{\Delta J_{irr}}{\Delta T}} \quad (13)$$

ergibt eine nahezu probenformunabhängige Größe.

2.3.2.2.3 Fluktuationenfeld und Fluktuationstemperatur

Der magnetische Viskositätsparameter S_v beschreibt die Resistenz eines Permanentmagneten gegenüber zeitabhängiger Entmagnetisierung. Die zeitliche Entwicklung des Fluktuationfeldes ergibt sich logarithmisch zu

$$H_f(t) = S_v * \ln(t/t_0) \quad (14)$$

Wobei t eine normierte Zeit darstellt, bezogen auf eine konstante Referenzzeit t_0 (vgl. Gl.(8), [62]). Damit lässt sich abschätzen, wie stark die Magnetisierung im Laufe der Zeit zusätzlich geschwächt wird. Die Basis wird in Abb. 2.15 (b, d) ersichtlich, in welcher der Polarisationszustand J^c gleich dem Schnittpunkt von $H_f(t)$ mit der $J(H)$ -Kurve entspricht.

Für praktische Anwendungen kann somit die maximal auftretende Gegenfeldstärke H_{max} , beispielsweise aus Simulation, mit dem zeit- und feldabhängigen Beitrag $H_f(t)$ kombiniert werden. Daraus ergibt sich das effektive, zeitabhängige Feld:

$$H_{eff}(t) = H_{max} + H_f(t) \quad (15)$$

Der Polarisationswert der $J(H)$ Entmagnetisierungskurve beim zeitabhängigen Effektivfeld $H_{eff}(t)$ beschreibt die nach der Zeit t zu erwartende magnetische Polarisation (vgl. Abb. 2.16a, grüne Markierungen). Daraus lässt sich quantifizieren, wie stark das Magnetfeld eines Magneten im Laufe der Betriebszeit abnimmt.

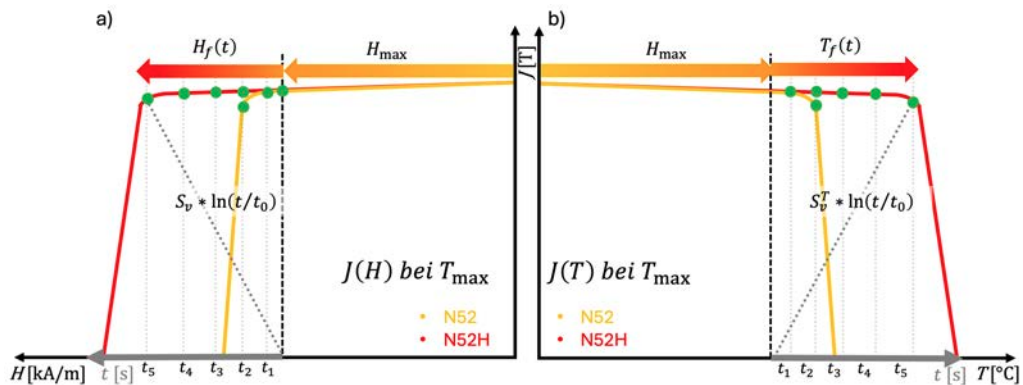


Abb. 2.16: Schematische Darstellung zum funktionalen Vergleich des Fluktuationfeldes $H_f(t)$ in $J(H)$ -Kurven in a) und der Fluktuationstemperatur $T_f(t)$ in $J(T)$ -Kurven in b), jeweils für eine N52- und eine N52H-Probe. Über das Fluktuationfeld bzw. die Fluktuationstemperatur als Funktion der Zeit t (hier t_1 bis t_5) lassen sich die zukünftigen Polarisationszustände aus den Schnittpunkten von $H_f(t)$ mit $J(H)$ in a) bzw. von $T_f(t)$ mit $J(T)$ in b) bestimmen (grüne Markierungen).

Neben dem klassischen Fluktuationsmodell basierend auf Gl.(14) lässt sich durch die Einführung des temperaturbasierten Viskositätsparameters S_v^T , eine zeitabhängige Fluktuationstemperatur definieren:

$$T_f(t) = S_v^T * \ln(t/t_0) \quad (16)$$

Diese kann als thermisches Äquivalent zum Fluktuationsfeld betrachtet werden und führt, wie in Abb. 2.15 (c, e) gezeigt, zum Polarisationszustand J^C , der dem entsprechenden Wert bei $T_{\text{eff}}(t)$ mit der $J(T)$ -Kurve entspricht. Durch Addition der maximalen Anwendungstemperatur T_{max} mit der Fluktuationstemperatur ergibt sich ein effektiver Gesamttemperaturwert:

$$T_{\text{eff}}(t) = T_{\text{max}} + T_f(t) \quad (17)$$

Dieser dient als Näherung für die Proben temperatur in der zeitabhängigen Betrachtung der $J(T)$ - oder $J(H)$ -Kurve. Dieses Vorgehen ist exemplarisch im Vergleich zum Fluktuationsfeld in Abb. 2.16b schematisch als Funktion der Zeit dargestellt, wobei die prognostizierten Magnetisierungswerte aus den Schnittpunkten mit grüner Markierung hervorgehen.

2.3.3 Magnetische Stabilisierung

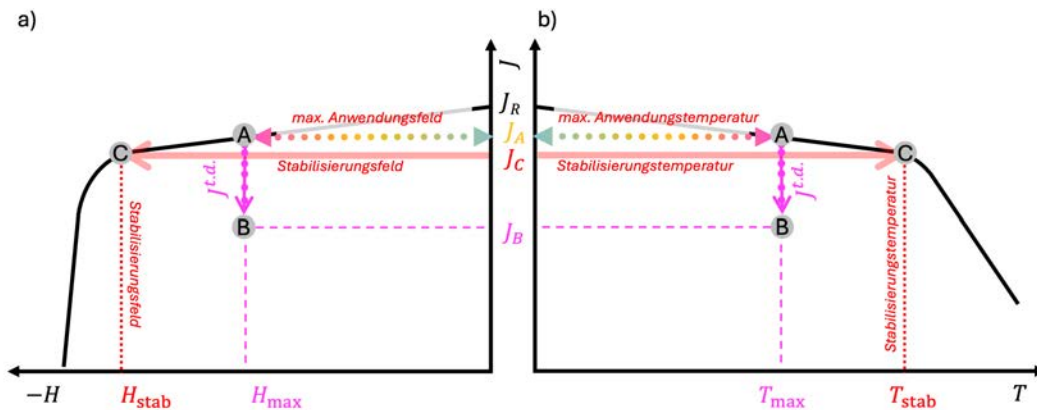


Abb. 2.17: Schematische Darstellung der magnetischen Stabilisierung. a) Feldstabilisierung durch ein definiertes Gegenfeld H_{stab} . b) Temperaturstabilisierung durch eine Stabilisierungstemperatur T_{stab} . Im nicht stabilisierten Betrieb eines Permanentmagneten führen Anwendungsfeldstärken bis H_{max} beziehungsweise Anwendungstemperaturen bis T_{max} zunächst zu einer Polarisationsabnahme auf J_A und in der Folge zu zeitabhängigen Entmagnetisierungsverlusten $J^{\text{t.d.}}$ bis J_B . Durch gezielte Vorstabilisierung mittels eines stärkeren Gegenfeldes H_{stab} beziehungsweise einer erhöhten Stabilisierungstemperatur T_{stab} wird der Magnet in einen niedrigeren Polarisationszustand J_C überführt. Dieser Zustand ist für Felder $H < H_{\text{stab}}$ und Temperaturen $T < T_{\text{stab}}$ stabil und zeigt keine weiteren zeitabhängigen Entmagnetisierungsverluste.

Magnetische Stabilisierung bzw. Voralterung bezeichnet die kontrollierte Vorentmagnetisierung auf einen stabilen Arbeitspunkt, um irreversible Verluste während des Betriebs zu vermeiden, sowohl direkte als auch zeitabhängige Verluste. Dazu wird der Magnet gezielt auf einen Punkt der Entmagnetisierungskurve gebracht, der außerhalb des zu erwartenden Betriebsbereichs liegt [65]. Im stabilisierten Zustand treten im vorgesehenen Einsatzbereich ausschließlich reversible Änderungen auf, sodass keine weitere Entmagnetisierung unter normalen Betriebsbedingungen erfolgt. Erst beim Überschreiten der Stabilitätsgrenze, etwa durch höhere Temperaturen oder stärkere Felder als während der Stabilisierung angewendet, treten irreversible Entmagnetisierungen auf. Abb. 2.17 veranschaulicht das Prinzip der Stabilisierung anhand eines Stabilisierungsfeldes in a) und einer Stabilisierungstemperatur in b). Im nicht stabilisierten Betrieb eines Permanentmagneten können bis zum maximalen Anwendungsfeld H_{max} bzw. Anwendungstemperatur T_{max} irreversible, zeitabhängige Entmagnetisierungsprozesse $J^{\text{t.d.}}$ von bspw. J_A (Punkt A) zu J_B (Punkt B) auftreten. Nach gezielter Vorstabilisierung auf J_{stab} durch ein stärkeres Gegenfeld (Stabilisierungsfeld) H_{stab} in a) bzw. Stabilisierungstemperatur T_{stab} in b) befindet sich der Magnet in einem vordefinierten, niedrigeren Magnetisierungszustand $J(H_{\text{stab}})$ bzw. $J(T_{\text{stab}})$. Diese Methode stellt eine Alternative zur überdimensionierten Auslegung von Magnetsystemen dar, bei der Magnete mit überhöhter Koerzitivfeldstärke gewählt werden. Experimente von Haavisto et al. [66], [67] mit temperaturinduzierter Stabilisierung und Webb [68] mit feldinduzierter Stabilisierung zeigen, dass durch diese Vorgehensweise langzeitstabile Zustände realisierbar sind. Während Haavisto et al. die Langzeitstabilität mit Tem-

peraturstabilisierung untersuchten, lag der Fokus von Webb auf Feldstabilisierung und darauf-folgender Temperaturbelastung. Da weder die Arbeiten von Haavisto et al., Webb sowie Glass et al. [25] noch Zingery et al. [69] einen quantitativen Vergleich zwischen Feld- und Temperaturstabilisierung darstellten, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit beide Vorgehensweisen experimentell untersucht. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.4 vorgestellt.

2.4 Permanentmagnetwerkstoffe

In diesem Kapitel werden die beiden im späteren Verlauf verwendeten Permanentmagnetmaterialien NdFeB und SmCo vorgestellt.

2.4.1 Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB)

Die wichtigsten Permanentmagnete in modernen Anwendungen sind Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB), die zu den stärksten bekannten Magnetwerkstoffen zählen [70]. Sie weisen Koerzitivfeldstärken zwischen 870 und 2790 kA/m sowie Remanenzwerte von etwa 1.2 T bis 1.5 T auf [48]. Das maximale Energieprodukt liegt bei aktuellen Proben bei bis zu größer 420 kJ/m³ [50], was NdFeB-Magnete besonders geeignet für kompakte und leistungsstarke Anwendungen macht [71], [72]. Es existieren zahlreiche Varianten dieser Magnete mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen. Die gezielte Zugabe schwerer Seltenerdmetalle wie Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb) erhöht insbesondere die Koerzitivfeldstärke [71], [73], [74]. Ein Beispiel ist ein NdFeB-Magnet mit der Zusammensetzung Nd₁₄Fe₈₀B₆, der bei einer Betriebstemperatur von 80 °C eine Remanenz von etwa 1.45 T erreicht. Wird ein Teil des Neodyms durch Dysprosium ersetzt, wie bei Fe₈₀(Nd₁₀Dy₄)B₆, steigt die Temperaturbeständigkeit (maximale Einsatztemperatur) auf bis zu 220 °C. Gleichzeitig sinkt die remanente Polarisation auf etwa 1.15 T, wie in Abb. 2.18 dargestellt. Dieser Zielkonflikt zwischen maximaler Einsatztemperatur und magnetischer Leistung (Polarisation und Energieprodukt) ist ein zentrales Kriterium der werkstofftechnischen Optimierung von NdFeB-Magneten. Die magnetischen Eigenschaften dieser Proben beruhen auf dem Zusammenspiel der einzelnen Elemente: Neodym trägt wesentlich zur hohen Kristallanisotropie und damit zum hohen Koerzitivfeld bei, Eisen erhöht durch seine weichmagnetischen Eigenschaften die Sättigungsmagnetisierung und damit Remanenz und das maximale Energieprodukt, während Bor zur Stabilität der Kristallstruktur beiträgt [75].

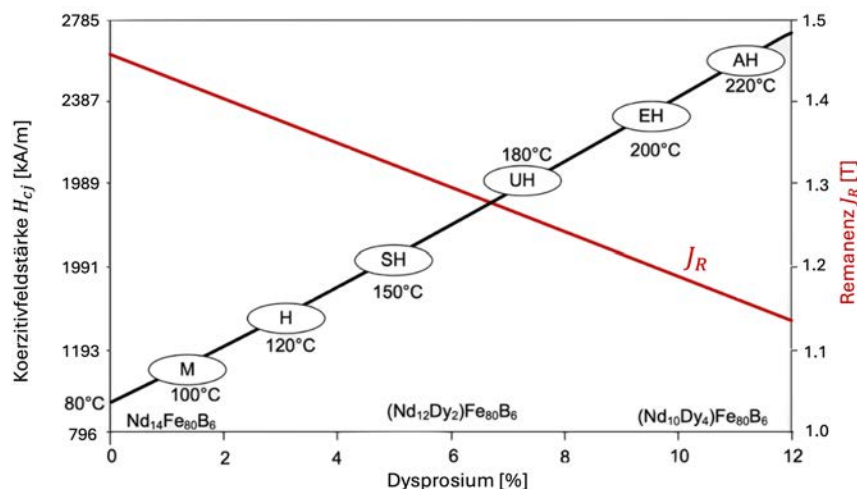


Abb. 2.18: Schematische Darstellung der Koerzitivfeldstärke H_{cj} und der Remanenz J_r von NdFeB-Magneten bei variierendem Dysprosiumgehalt (Dy), bearbeitet nach [76]. Mit steigendem Dy-Gehalt zeigt sich eine zunehmende Koerzitivfeldstärke H_{cj} (schwarz) bei gleichzeitig abnehmender Remanenz J_r (rot). Zusätzlich sind die maximalen Betriebstemperaturen der jeweiligen Probengüten angegeben. Die Probe (M) mit $H_{cj} \approx 1150$ kA/m ($T_{\max} = 100$ °C) als Nd₁₄Fe₈₀B₆ weist eine Polarisation von über 1.4 T auf, während die hochkoerzitive Probe (AH) mit $H_{cj} \approx 2380$ kA/m ($T_{\max} = 220$ °C) als (Nd₁₀Dy₄)Fe₈₀B₆ nur noch etwa 1.15 T erreicht.

Abb. 2.19 zeigt die Gefügeaufnahme eines exemplarisch ausgewählten NdFeB-Magneten mit markierten Bereichen der Φ -Phase, der Korngrenzphase sowie eines Oxids. Die Φ -Phase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ bestimmt die intrinsischen magnetischen Eigenschaften und weist eine hohe Sättigung sowie eine starke magnetokristalline Anisotropie auf. Die Nd-reiche Korngrenzphase wirkt als Austauschbarriere zwischen den Körnern, reduziert die magnetische Kopplung und erhöht dadurch den Widerstand gegen Entmagnetisierung, was zu einer erhöhten Koerzitivfeldstärke führt [77], [78], [79]. Oxide entstehen als Nebenprodukt während der Herstellung infolge der Oxidation der Seltenerd-Elemente.

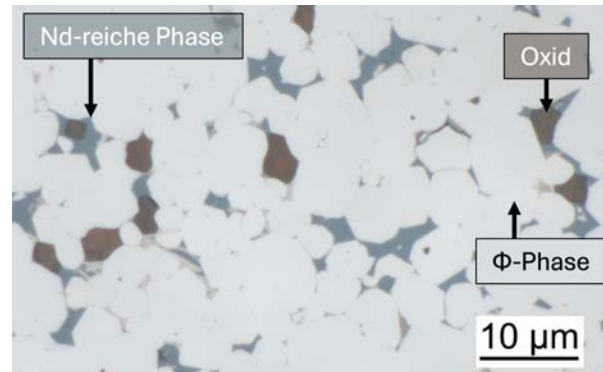


Abb. 2.19: Gefügeaufnahme eines ausgewählten NdFeB-Labormagneten mit markierter Φ -Phase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (hellgrau, weiß), Nd-reicher Korngrenzphase (grau) und Oxiden (braun).

2.4.1.1 Grain Boundary Diffusion (GBD) und lokale GBD-Verfahren

Die Koerzitivfeldstärke von NdFeB-Magneten nimmt mit steigender Temperatur ab, weshalb gezielte Stabilisierungen notwendig sind. Ein etabliertes Verfahren zur Erhöhung der Koerzitivfeldstärke und dadurch auch der maximalen Einsatztemperatur von NdFeB-Magneten ist der Grain-Boundary-Diffusion (GBD) Prozess, bei welchem Elemente wie Dy oder Tb entlang der Nd-reichen Korngrenzphase bei knapp unter Sinterntemperatur eindiffundieren. Von dort diffundieren diese Elemente in die angrenzende Φ -Phase und bilden eine Dy- oder Tb-angereicherte Randzone (core-shell-Struktur) um die Körner [80], [81]. Die eigentliche Erhöhung der Koerzitivfeldstärke entsteht überwiegend in dieser Randzone der Φ -Phase, da dort die magnetokristalline Anisotropie erhöht wird [74], [81], [82].

Neuere Ansätze wie die lokale GBD ermöglichen eine gezielte Anwendung nur an den Bereichen, in denen eine höhere Koerzitivfeldstärke erforderlich ist, z. B. durch Feldbelastung im Elektromotor. Durch diesen Ansatz kann der Einsatz schwerer seltenerd Elementen drastisch reduziert werden [73], [83], [84].

2.4.1.2 Korngröße

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Koerzitivfeldstärke ist die Korngröße des Magnetmaterials. Mit abnehmender Korngröße steigt die Koerzitivfeldstärke, da kleinere Körner eine geringere Wahrscheinlichkeit für starke Oberflächendefekte aufweisen und dadurch die Keimbildung umgekehrter Domänen an den Korngrenzen erschwert wird, sodass die Magnetisierung stabiler bleibt [86].

2.4.1.3 Segmentierung

Eine Methode zur Reduzierung von durch Wirbelströme verursachten Temperaturanstiegen bei hohen Frequenzänderungen in Permanentmagneten ist die Segmentierung [88]. Hierfür werden Permanentmagnete in kleine Einheiten, sogenannte Segmente, getrennt, die jeweils elektrisch isoliert verklebt sind. Durch die Segmentierung werden die Wirbelströme auf die einzelnen Segmente verteilt, wodurch sich die Länge der Strompfade verkürzt und der effektive

elektrische Widerstand des Gesamtmagnets erhöht, wie in Abb. 2.20 für unterschiedliche Anzahlen von Segmenten schematisch dargestellt. Dies begrenzt die Stärke der Wirbelströme und reduziert somit die verursachten Wärmeverluste [89].

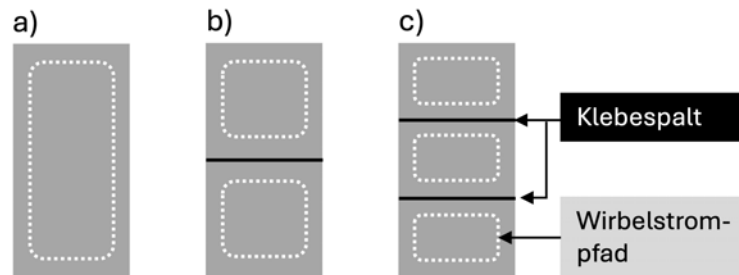


Abb. 2.20: Schematische Darstellung der Reduzierung von Wirbelströmen durch Segmentierung der Magnetprobe. Die Wirbelstrompfade sind in Weiß, die Klebespalten (elektrische Isolation) in Schwarz dargestellt. a) unsegmentiert, b) einfach segmentiert (2 Segmente), c) zweifach segmentiert (3 Segmente). Durch die Segmentierung werden die Wirbelströme auf einzelne Segmente verteilt, wodurch sich der elektrische Widerstand erhöht und sich dadurch die Wirbelstromverluste verringern. In Anlehnung an [89].

2.4.2 Samarium-Cobalt-Magnete (SmCo)

Samarium-Cobalt-Magnete weisen im Vergleich zu Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB) eine geringere Remanenz von etwa 0.86 bis 1.16 T [90] bei Raumtemperatur auf. Auch ihr maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$ fällt mit bis zu 250 kJ/m^3 deutlich geringer aus als das von NdFeB-Magneten. Der entscheidende Vorteil von SmCo-Magneten liegt jedoch in ihrer deutlich höheren Temperaturbeständigkeit: Sie können in Anwendungen mit Einsatztemperaturen von bis zu 350°C verwendet werden, während NdFeB-Magnete bei diesen Temperaturen nur noch eine sehr geringe Magnetisierung aufweisen. Dieses Verhalten ist in Abb. 2.21 anhand des Temperaturverlaufs des maximalen Energieprodukts $(BH)_{\max}$ mehrerer NdFeB- und SmCo-Proben dargestellt, worin der Vorteil besonders bei Temperaturen über 180°C deutlich wird: Ab dieser Temperatur übertreffen SmCo-Magnete wie R35E oder R33E des Herstellers A [91] die gängigen NdFeB-Magnettypen (z. B. N52, N55) hinsichtlich ihres Energieprodukts.

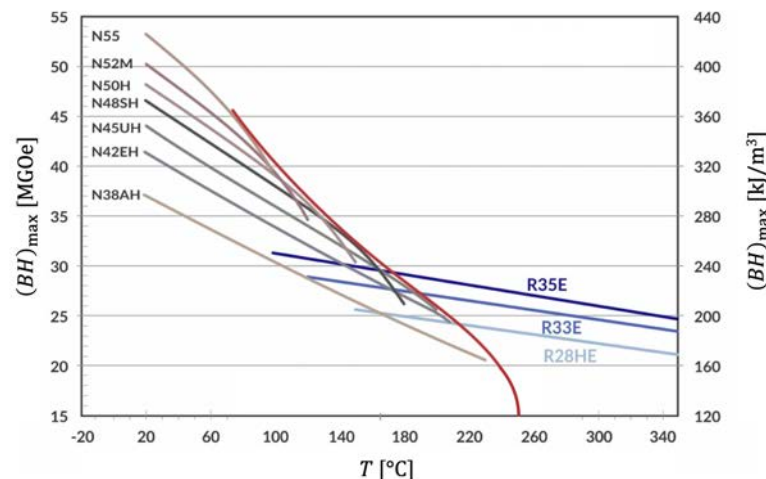


Abb. 2.21: Verlauf des Energieprodukts $(BH)_{\max}$ von NdFeB- und SmCo-Magneten im Vergleich als Funktion der Temperatur. Bis etwa 180°C weisen NdFeB-Magnete ein höheres Energieprodukt auf, während oberhalb dieser Temperatur SmCo-Magnete überlegen sind. Bearbeitet nach [92]. Zudem zeigt sich das bessere Temperaturverhalten der SmCo-Proben durch eine geringere Abnahme des Energieprodukts mit steigender Temperatur (Temperaturkoeffizient) im Vergleich zu den NdFeB-Proben.

Ein weiterer Vorteil liegt im reversiblen Temperaturverhalten speziell kompensierter SmCo-Proben mit einem Temperaturkoeffizient von etwa $\alpha(B_r) = 0.02 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ im Vergleich zu NdFe-Proben mit $\alpha(B_r)$ ca. 0.1 to 0.12 $\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [93], [94]. Wie in Abb. 2.22 im Vergleich zu konventionellen SmCo- und NdFeB-Proben sowie ebenfalls kompensierten SmCo-Proben dargestellt, zeigt sich insbesondere im praxisrelevanten Temperaturbereich von 20 bis 100°C ein sehr stabi-

les Polarisationsverhalten mit nur geringer temperaturabhängiger Abnahme der Polarisation im Vergleich zur hochkoerzitiven N33-EH NdFeB-Probe (Abb. 2.22b) [95]. Dies macht diese Magnete besonders geeignet für Anwendungen, die eine möglichst konstante Magnetisierung erfordern sowie für Hochtemperaturanwendungen [76], wie sie unter anderem in der Luft- und Raumfahrt auftreten [91].

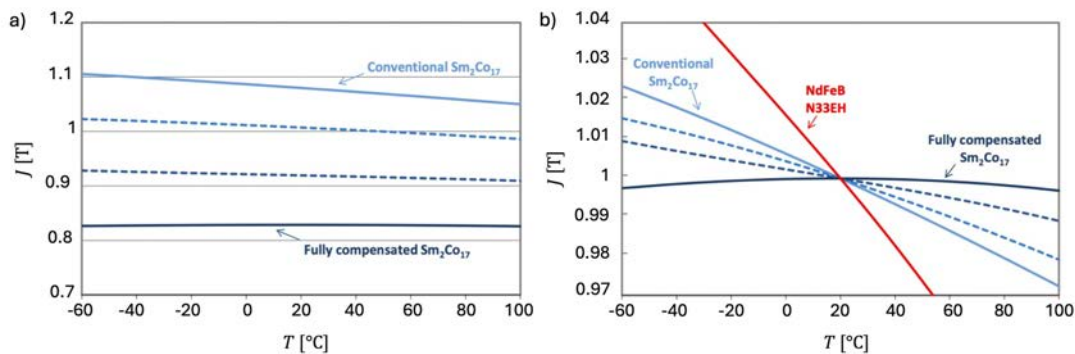


Abb. 2.22: Polarisation zu Temperatur $J(T)$ -Verlauf verschiedener SmCo-Proben im Vergleich zu konventioneller und temperaturkompensierter Güten. a) Vergleich der magnetischen Polarisation $J(T)$ einer konventionellen SmCo-Probe (Conventional) und einer temperaturkompensierten SmCo-Probe (Fully compensated). b) Vergleich der beiden SmCo-Proben mit einem NdFeB-Magneten (N33-EH) bei normierter Polarisation $J/J(20^\circ\text{C})$. Bearbeitet nach [92]. Es zeigt sich der deutlich bessere Temperaturverhalten der temperaturstabilisierten SmCo-Proben im Vergleich zur NdFeB-Probe.

2.5 Charakterisierungsmethoden und Messprinzipien für Magnetwerkstoffe

Tab. 2: Übersicht über die wichtigsten magnetischen Messgeräte unterteilt in integrale und lokale Verfahren.

	Messgerät	Technik	Magnetische Konfiguration	Messziele	Messgrößen	Aktive Stellgrößen
Integral	Hysteresegraph	Elektromagnet mit Messspulen	geschlossener Kreis	Hysteresekurven (Direkte Entmagnetisierung)	$J(H)$ $B(H)$ $J(T)$	Magnetfeld, Temperatur
	VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	Linear bewegte Probe in Elektromagnet mit Messspulen	offener Kreis	Hysteresekurven, Viskositätsmessungen (Zeitabhängige Entmagnetisierung)	$J(H)$ $B(H)$ $J(H, t)$	Magnetfeld, Temperatur, Zeit
	Helmholtz-Messspule	Helmholtz-Spule mit Fluxmeter	offener Kreis	Momentmessungen, Winkelmessung (Magnetisierungsachse)	J M	-
	Pulsmagnetometer	Gepulste Magnetfelderzeugung	offener Kreis	Aufmagnetisierung, Quasi Hysteresekurven	$J(H)$ $B(H)$	Magnetfeld
Lokal	Messspule	Messspule mit Fluxmeter	offener Kreis	Lokale Streufelder	B, Φ	-
	Teslameter Gaussmeter	Hall-Sonde	offener Kreis	Lokale Streufelder	B	-
	Hall-Array	Flächenverteilte Hall-Sonden	offener Kreis	Lokale Streufelder, orts aufgelöste Streufeldplots	$B(x, y, z)$	-
	3D-Hall-Mapper	Bewegte Hall-Sonde	offener Kreis	Lokale Streufelder, orts aufgelöste Streufeldplots, Momentmessung	$B(x, y, z)$	Position

Zur Analyse von Materialeigenschaften kommen häufig Messverfahren zum Einsatz, die auf Spannungsinduktion oder dem Hall-Effekt basieren. Spulenmessungen nutzen die Spannungsinduktion, die durch eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses in einer Spule erzeugt wird. Im Gegensatz dazu beruhen Hall-Sensoren auf dem Hall-Effekt, bei dem eine Spannung

proportional zur angelegten magnetischen Flussdichte entsteht [96]. Ein wesentlicher Vorteil von Hall-Sensoren gegenüber Spulenmessungen ist ihre Fähigkeit, auch statisch positionierte und zeitlich konstante Magnetfelder zu erfassen [97]. Sie sind daher besonders für Anwendungen geeignet, bei denen sowohl die Probe als auch die Messerfassung ortsfest positioniert sind. Grundsätzlich lassen sich Messverfahren für magnetische Werkstoffe in zwei Kategorien einteilen. Integrale Messmethoden erfassen die durchschnittliche Magnetisierung des gesamten Prüfkörpers (Permanentmagnete), lokale Messmethoden liefern orts aufgelöste Informationen über die magnetische Streufeldverteilung des Prüfkörpers (Field Mapping). Tab. 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Messverfahren sowie deren jeweilige Eigenschaften und Anwendungsbereiche.

2.5.1 Induktive Messung mittels Messspule

Beim Anlegen eines Magnetfeldes an eine Spule wird gemäß dem Induktionsgesetz eine elektrische Spannung induziert [98]. Diese Spannungsinduktion durch ein örtlich bewegtes oder zeitlich veränderliches Magnetfeld bildet die Grundlage der Magnetisierungsmessung mit Spulen. Der magnetische Fluss Φ durch eine Fläche A hängt von der magnetischen Flussdichte B und dem Winkel θ zwischen Flächennormale und Magnetfeldrichtung ab. Er lässt sich allgemein als Flächenintegral ausdrücken

$$\Phi = \int B \cdot dA. \quad (18)$$

Bei einer rechteckigen Fläche gilt $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\theta)$. Da die in die Spule induzierte Spannung U_{ind} proportional zur zeitlichen Änderungsrate des Magnetflusses ist, ergibt sich mit der Spulenwindungszahl n :

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (19)$$

Wird die induzierte Spannung gemessen und zeitlich integriert, kann daraus der Magnetfluss bestimmt werden [98]:

$$n \cdot \Phi = \int U \cdot dt \quad (20)$$

2.5.1.1 Spulenmessungen: Zeitintegration mit Fluxmeter

Bewegt sich eine magnetisierte Probe relativ zu einer Spule, wird durch die zeitliche Änderung des Magnetflusses eine Spannung induziert [98]. Da diese Spannungsimpulse nur sehr kurz anliegen und dabei äußerst geringe Signalpegel erzeugen, ist eine geeignete Signalverarbeitung erforderlich. Die Spannung kann entweder mit hoher Abtastrate direkt digitalisiert oder über eine Integratorschaltung (Fluxmeter) zeitlich integriert werden [99]. Da die direkte Digitalisierung hohe Anforderungen an Auflösung und Abtastrate stellt und zudem Umgebungsstreufelder sowie Temperaturänderungen zu unerwünschten Spannungsanteilen führen können, bietet die Integration mit Fluxmetern eine robuste Alternative [45]. In einem Fluxmeter wird ein Kondensator über die induzierte Spannung aufgeladen [100]. Das entstehende Signal zeigt ein Tiefpassverhalten und verändert sich proportional zur Änderung des Magnetflusses. Diese geglättete, zeitstabile Signalform lässt sich zuverlässig digitalisieren und zeigt nur geringe Auswirkungen durch insbesondere hochfrequente Umgebungsstreufelder. Abb. 2.23 zeigt einen klassischen Integrator, bestehend aus einem Operationsverstärker in invertierender Konfiguration mit rückgekoppeltem Kondensator. Ein parallel geschalteter Schalter ermöglicht das Entladen des Kondensators (Reset), wodurch die Integration erneut beginnen kann [101]. Zur Kompensation von Störeinflüssen wie Umgebungssignalen oder Temperaturschwankungen sind viele Fluxmeter, einschließlich des in dieser Arbeit verwendeten Geräts EF-14 der Firma Magnet-Physik [102], mit einem digitalen Regelkreis ausgestattet, der den Drift kompensiert und das Messsignal über längere Zeit stabilisiert.

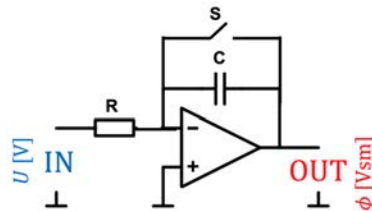


Abb. 2.23: Schematischer Aufbau eines invertierenden Integrators mit Operationsverstärker und Reset-Schalter S , in Anlehnung an [96]. Der Eingangswiderstand R begrenzt den Ladestrom des Kondensators C , während der Operationsverstärker die invertierte Kondensatorspannung als Ausgang liefert und eine präzise, belastbare Integration ermöglicht. Der Integrator wird im Fluxmeter zur zeitlichen Integration der induzierten Spannung der Helmholtz-Messspule verwendet, um den magnetischen Fluss Φ zu bestimmen.

2.5.1.2 Einzelmessspulen und Helmholtz-Messspulen

Einzeln eingesetzte Messspulen erzeugen nur einen begrenzt homogenen Messbereich (vgl. Abb. 2.24a). Sie werden insbesondere zur lokalen Erfassung von Magnetflüssen und Streufeldern eingesetzt. Da ihr Messprinzip auf der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses und der dadurch induzierten Spannung beruht, messen Messspulen relative Feldänderungen und können keine statischen Magnetfelder erfassen. Deshalb ist ein ortsfester Betrieb der Probe und Messspule nicht möglich. Im Gegensatz dazu erlauben Hall-Sensoren die absolute Messung von statischen und zeitlich konstanten Magnetfeldern.

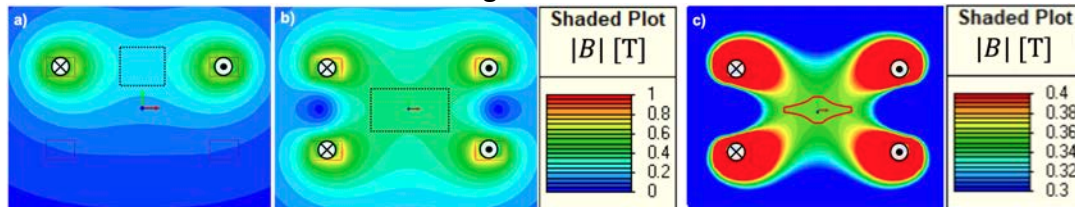


Abb. 2.24: Simulierte Feldverteilung unterschiedlicher Spulenkonfigurationen unter angelegtem Strom im offenen Kreis. a) Einfache Messspule, (b, c) Helmholtz-Spulenordnung. In c) ist der Feldbereich zur Identifizierung des homogenen Bereichs (Abweichung $< 1\%$ vom Mittelwert) markiert und in der Mitte als roter Bereich dargestellt (in Anlehnung an [103]). Die Helmholtz-Anordnung (b, c) bietet einen großen homogenen Messbereich, in dem die Probe nicht exakt mittig positioniert werden muss.

Der Aufbau aus Messspule, Integrator (Fluxmeter) und Anzeigeeinheit mit analog-digitaler Wandlung und integrierter Auswerteeinheit ist in Abb. 2.25a dargestellt. Für integrale Messungen hoher Genauigkeit kommen Helmholtz-Messspulen zum Einsatz. Diese bestehen aus zwei identischen, in Reihe geschalteten Spulen, die parallel zueinander mit einem Abstand in Höhe ihres Radius angeordnet sind. Durch die Überlagerung der Magnetfelder beider Spulen entsteht im Zwischenraum ein nahezu homogenes Magnetfeld, in dem die Position der Probe nur eine untergeordnete Rolle spielt [104]. Abb. 2.24 vergleicht die Ansätze einer Spule a) und einer Helmholtz-Spulenordnung (b, c) unter angelegtem Strom. In c) ist ein homogener Bereich (rot) mit einer Abweichung $< 1\%$ vom Mittelwert markiert, welcher sich aus $y = 0.6 \cdot r$ und $x = 0.93 \cdot r$ ergibt [28], [103]. Die Helmholtz-Spulenkonfiguration eignet sich ideal zur integralen Messung des magnetischen Dipolmoments, das proportional zum erfassten magnetischen Fluss ist. Zudem ermöglicht sie die Bestimmung von möglichen Winkelfehlern in Magnetisierungsrichtung. Der Aufbau einer solchen Messapparatur, bestehend aus Helmholtz-Messspule und Fluxmeter ist in Abb. 2.25b dargestellt.

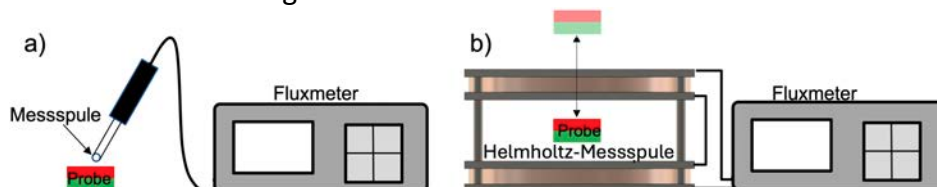


Abb. 2.25: Übersichtsskizze der Messspulen mit a) Punktmessspule, bestehend aus (Punkt-)Messspule und Fluxmeter, und b) Helmholtz-Messspulenmessung, bestehend aus Helmholtz-Messspule mit Fluxmeter. Die Permanentmagnetprobe wird hierbei vertikal in den Spulenmittelpunkt bewegt (Pfeilrichtung).

Neben der hohen Messgenauigkeit im Zentrum der Helmholtz-Messspule lässt sich die Präzision durch die Probenbewegung (zeitliche Spannungsinduktion) verbessern. Die Standardmessung verwendet das Subtraktionsverfahren: Die Probe wird in den Spulenmittelpunkt gelegt, anschließend wird die Integratorspannung des Fluxmeters auf 0 gesetzt (Reset) und die Probe entnommen (Abb. 2.26b).

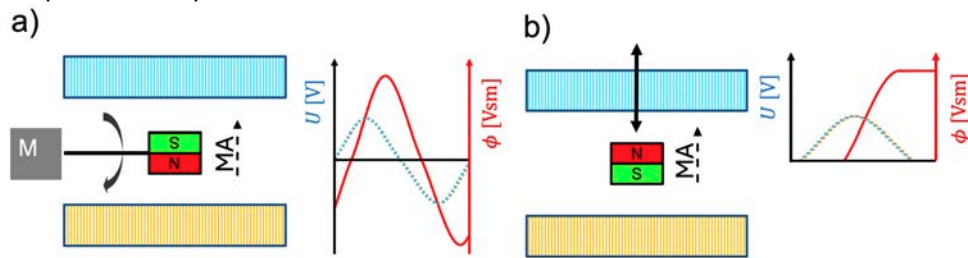


Abb. 2.26: Schematische Darstellung der Spannungsinduktion in einer Helmholtz-Messspule durch Bewegung eines Permanentmagneten. Das Spannungssignal U ist in Gelb und Blau dargestellt, das zugehörige integrierte magnetische Flusssignal Φ in Rot. a) Rotation des Permanentmagneten um seine Magnetisierungsachse (MA) mittels Motors (M), resultierend in einem sinusförmigen Spannungssignal. b) Lineare Bewegung entlang der Magnetisierungsachse (MA), resultierend in einem Spannungspuls.

Dieses Vorgehen erzeugt einen einseitigen, unipolaren Spannungsinduktionsstoß, der durch Fluxmeter-Offset und Drift beeinflusst werden kann. Die Rotation der Probe um ihre Magnetisierungsachse ermöglicht ein präziseres Messverfahren (Abb. 2.26a) [104]. Hoch- und Tiefpunkte werden hier gemittelt, wodurch Offset- und Driftfehler kompensiert werden. Die technischen Daten der beiden Verfahren mit Punktmessspule bzw. Helmholtz-Messspule sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Technische Daten: Punktmessspule und Helmholtz-Messspule. Zusammengefasst nach [102].

Messgerät	Punktmessspulen	Helmholtz-Messspule
Technik	Messspule mit Integrator (Fluxmeter)	Helmholtz-Messspule mit Integrator (Fluxmeter)
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis	Offener Kreis
Messziele	Magnetfluss des Streufelds an verschiedenen Positionen, nicht zeitstabil	Magnetisches Moment
Messgrößen	B, Φ	M, Φ
Aktive Stellgrößen	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Typische Kenndaten		
Auflösung	nicht vorhanden	<0.001 T
Temperatur [°C]	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Probengröße (x,y,z) [mm]	nicht vorhanden	70 x 94

2.5.2 Magnetfeldmessung mittels Hall-Effekt

Wird ein Magnetfeld senkrecht zu einem stromdurchflossenen rechteckigen Leiter angelegt, wirkt auf die bewegten Elektronen die Lorentzkraft [105], [106]. Diese lenkt die Elektronen quer zur Stromrichtung ab, sodass sich an einer Leiterseite ein Ladungsüberschuss und an der gegenüberliegenden ein Mangel ausbildet. In dem abgelenkten Bereich entsteht aufgrund der geänderten Elektronenkonzentration ein elektrisches Feld $\vec{E}$ und damit eine Spannung, die als Hall-Spannung bezeichnet wird [107]. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 2.27 dargestellt. Das elektrische Feld erzeugt eine Feldkraft $\vec{F}_C = -e * \vec{E}$, die der Lorentzkraft $\vec{F}_L = e * \vec{v} \times \vec{B}$ entgegengesetzt ist. Im stationären Zustand stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein, sodass gilt [98]:

$$\vec{F}_C + \vec{F}_L = 0 \Rightarrow \vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Im Fall orthogonaler Felder ($\vec{v} \perp \vec{B}$), gilt:

$$E = v * B \quad (21)$$

Die Driftgeschwindigkeit v ergibt sich über den Strom I , die Elementarladung e , die Ladungsträgerdichte n und den Leiterquerschnitt A zu:

$$v = \frac{I}{n * e * A} \quad (22)$$

Gl. (22) in Gl. (21) einsetzen ergibt:

$$E = \frac{I}{n * e * A} * B$$

Da die Hall-Spannung U_H die Spannung über die Leiterbreite d ist, folgt:

$$U_H = E * d = \left(\frac{I}{n * e * A} * B \right) * d \quad (23)$$

Mit $c_H = d / n * e * A$ als material- und geometrieabhängige Hall-Konstante folgt aus Gl. (23):

$$U_H = c_H * I * B \quad (24)$$

Die Hall-Konstante c_H ist material- und geometrieabhängig. Bei konstantem Strom ist U_H näherungsweise proportional zur magnetischen Flussdichte B . Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage des Hall-Effekts, wie er z. B. in Hall-Sonden zur direkten Messung von Magnetfeldern technisch genutzt wird [107].

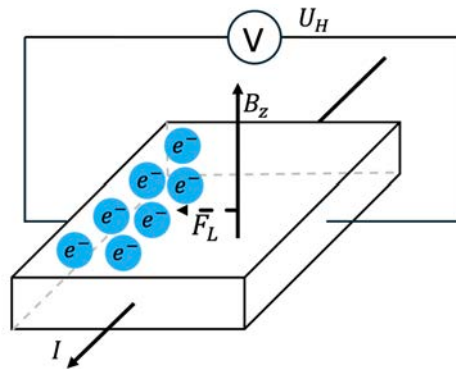


Abb. 2.27: Prinzip des Hall-Effekts an einem elektrischen Leiter in einem statischen Magnetfeld B_z . Die Lorentzkraft lenkt die Elektronen e^- ab, wodurch sich auf der linken Seite ein Elektronenüberschuss (negatives Potential) und auf der rechten Seite ein Elektronenmangel (positives Potential) bildet. Diese Potentialdifferenz ist als Hall-Spannung U_H messbar. In Anlehnung an [107].

2.5.2.1 Gaussmeter / Teslameter

Ähnlich zur Einzelmessspule handelt es sich beim Gauss- bzw. Teslameter um eine lokale Magnetfelderfassung zur Bestimmung des Streufelds. Im Unterschied zur Messspule mit Fluxmeter ermöglicht die Hall-Sonde eine ortsfeste und kontinuierliche Erfassung der magnetischen Flussdichte, ohne dass ein Reset des Integrators erforderlich ist. Dadurch liefert sie direkt den momentanen Flussdichtewert mit hoher zeitlicher Stabilität [108] [109], [110].

Der grundsätzliche Aufbau eines Teslameters besteht aus einer Hall-Sonde mit Konstantstromquelle sowie einer Anzeigeeinheit mit ADC-Wandlung und integrierter Auswerteeinheit (Abb. 2.28). Je nach Bauart sind auch Temperaturkompensation, Offsetkorrektur und Kalibriermöglichkeiten integriert.

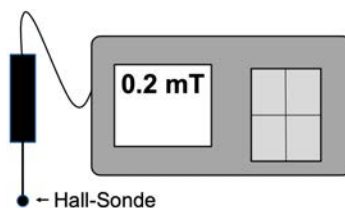


Abb. 2.28 Übersichtsskizze Hall- / Gaussmeter, bestehend aus Hall-Sonde und Anzeigeeinheit. Die Hall-Sonde misst die lokale magnetische Flussdichte B , beispielsweise im Streufeld eines Permanentmagnetes.

Die technischen Daten eines Standard-Gaussmeters (Senis 3D-Hall Magnetometer [108]) sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Technische Daten Hall-/Gaussmeter. Zusammengefasst nach [108].

Messgerät	Hall-/Gaussmeter
Technik	Hall-Sonde mit Anzeige
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis
Messziele	Flussdichte B an mehreren Positionen, zeitstabil
Messgrößen	$B_{x,y,z}$ [mT]
Aktive Stellgrößen	nicht vorhanden
Typische Kenndaten (Senis 3D-Hall)	
Auflösung im ± 2 T Bereich	$< 2 \mu\text{T}$
Temperatur [°C]	Temperaturstabilisiert (-40 bis 155 °C)
Probengröße (x,y,z) [mm]	-

Hall-Arrays / Magnetfeldkameras

Neben Einzel-Hall-Sonden, wie sie in Hall- bzw. Gaussmetern eingesetzt werden, kommen auch Hall-Arrays zum Einsatz. Diese nutzen eine Vielzahl einzelner Hall-Elemente, räumlich verteilt, um zusätzliche Positionsabhängigkeiten zu erfassen, wie schematisch in Abb. 2.29 dargestellt. Gängige Geräte wie die MagCam [111] und die SEN-3D-CAM [112] bestehen aus einem Array von 128×128 Hall-Elementen und ermöglichen damit eine schnelle und einfache qualitative Streufeldvisualisierung, vergleichbar mit dem in Abschnitt 2.5.2.2 vorgestellten Field Mapper.

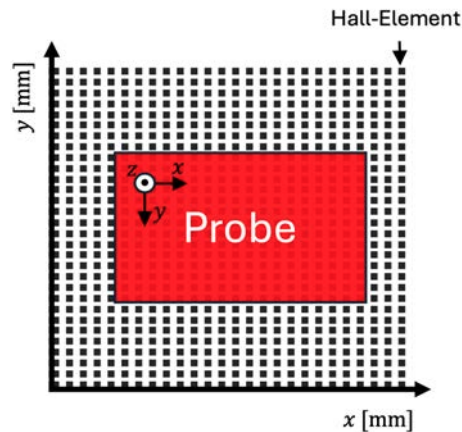


Abb. 2.29: Schematischer Hall-Array-Aufbau bestehend aus räumlich verteilten Hall-Elementen im x, y -Raum. Dargestellt ist eine Probe (rot) mit Magnetisierungsachse in z -Richtung. Basierend auf den einzelnen Messsignalen B_z der jeweiligen Sensoren und ihrer Platzierung im x, y -Raum kann eine lokale Streufeldaufnahme $B_z(x, y)$ erstellt werden.

Allerdings ist, wie in Tab. 5 aufgeführt, der physische Abstand zwischen den Hall-Sonden ausschlaggebend für die horizontale Auflösung. Diese beträgt bei beiden Geräten etwa 0.1 mm, wodurch im Vergleich zum klassischen Field Mapper mit bis zu 0.01 mm (Tab. 6) kein wesentlicher Vorteil vorliegt. Dieser liegt lediglich in der schnellen Erfassungsrate von bis zu 7 Aufnahmen pro Sekunde bei der Sen3DCam bzw. 1 Aufnahme pro Sekunde (1 Hz) bei der MagCam.

Tab. 5: Technische Daten von Hall-Array-basierten Field-Mapping-Systemen. Zusammengefasst nach SEN-3D-CAM [112] und MagCam [111].

Messgerät	Senis Sen3Dcam	MagCam
Technik	Hall-Array (3D)	Hall-Array (2D+Umrechnung)
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis	Offener Kreis
Messziele	Streufeldverteilung	Streufeldverteilung
Messgrößen	$B(x, y, z), M$	$B(x, y, z), M$
Aktive Stellgrößen	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Typische Kenndaten		
Auflösung	0.05 mT (+100 mT) 0.1 mT (+350 mT)	0.1 mT (+1000 mT)
Horizontale Auflösung [mm]	0.1	0.1
Temperatur [°C]	RT (Temperaturkalibriert: 20 – 30 °C)	RT
Probengröße (x,y,z) [mm]	max. 12.8 x 12.8	max. 12.7 x 12.7

2.5.2.2 3D-Hall-Field-Mapper

Ein Hall-Scanner (Field-Mapper) ist ein Verfahren zur Visualisierung der magnetischen Streufeldverteilung oberhalb eines Permanentmagneten [31]. Mit einem in den Achsen x -, y - und z -verfahrbaren 3D-Hall-Sensor lassen sich orts aufgelöste Streufelder in den Flussdichtekomponenten B_x , B_y und B_z erfassen. Die Messwerte können positionsabhängig weiterverarbeitet und visualisiert werden. So lassen sich nicht nur qualitative Streufeldverteilungen darstellen, sondern in Bezug auf die Probenfläche auch eine mittlere Magnetisierung M im jeweiligen Messabstand (Luftspalt), sowie das magnetische Moment berechnen. Mithilfe geeigneter DC-Magnetfelderregung können auch weichmagnetische Bauteile untersucht werden. Der generelle Aufbau ist in Abb. 2.30 dargestellt. Er umfasst den 3D-Achsentisch, mit dem die Hall-Sonde verfahren wird, die Mess- und Regeleinheit zur Steuerung der Schrittmotoren und der Digitalisierung der Hall-Sondesignale sowie den Messrechner zur Steuerung und Visualisierung [31], [113], [114].

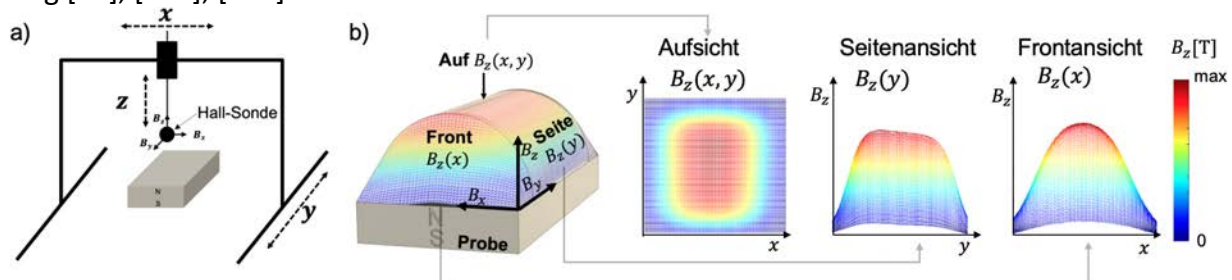


Abb. 2.30: a) Übersicht eines 3D-Hall-Mappers mit x -, y - und z -Achsentisch sowie 3D-Hall-Sonde und b) fiktiver Streufeldverteilung (Field Map) oberhalb der Probe (grau) in Auf-, Front- und Seitenansicht zur Visualisierung. Die Hall-Sonde wird basierend auf den Linearführungen des Achsentischs im x - y -Raster bei konstantem z -Abstand zur Probe verfahren, wobei die Flussdichte positionsaufgelöst erfasst wird. Die resultierende Magnetfeldverteilung $B(x, y)$ wird anschließend mittels Colormaps in Aufsicht dargestellt. Zusätzlich werden die Komponenten $B_y(y)$ (Seitenansicht) und $B_x(x)$ (Frontansicht) visualisiert.

Die technischen Details eines Standard-Field-Mappers (Senis 3D-Hall-Mapper [115]) sind in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Technische Daten: Hall-Fieldmapper. Zusammengefasst nach [115].

Messgerät	3D-Hall-Field-Mapper
Technik	Linear in allen Achsen bewegte Hall Sonde
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis
Messziele	Streufeldverteilung, magnetisches Moment
Messgrößen	$B(x, y, z)$, M
Aktive Stellgrößen	nicht vorhanden
Typische Kenndaten (Senis 3D Hall Mapper)	
Auflösung [T]	0.0001
Positionierwiederholgenauigkeit [mm]	0.05
Temperatur [°C]	RT
Probengröße (x, y, z) [mm]	max. 40 x 40

2.5.3 Komplettsysteme zur Charakterisierung magnetischer Kennwerte

Komplettsysteme ermöglichen eine umfassende Charakterisierung magnetischer Kennwerte. Dazu gehören der Hysteresegraph, das Vibrating Sample Magnetometer sowie das Puls-Magnetometer. Diese Systeme erfassen die integrale Magnetisierung unter variierenden Feld- und Temperaturbedingungen. Sie werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

2.5.3.1 Hysteresegraph

Ein Hysteresegraph ist das Standard Verfahren zur Messung von $J(H)$ -Hysteresekurven von Permanentmagneten [28], [116]. Das System dient der Bestimmung zentraler magnetischer Kenngrößen, insbesondere der remanenten Polarisierung J und der Koerzitivfeldstärke H_{cj} . Es umfasst einen Elektromagneten mit integrierter Messtechnik. Der schematische Aufbau ist in Abb. 2.31 dargestellt. Der Elektromagnet besteht aus einem Joch aus Eisen zur Magnetflussführung, zwei Erregerspulen nahe dem Luftspalt sowie beheizbaren Polschuhen zur Temperierung der Probe [117]. Die Sensoreinheit (Abb. 2.31c) ist zwischen den Polschuhen horizontal um die Probe positioniert und besteht aus einer inneren Messspule, die die Probe umschließt (B -Spule) und den durch die Probe fließenden magnetischen Fluss misst, sowie einer äußeren H -Spule, die das lokale Magnetfeld neben der Probe erfasst. Häufig werden auch J -kompensierte Spulen eingesetzt, in denen das Signal der H -Spule vom B -Signal subtrahiert wird [116]. Die von den Spulen gelieferten Signale werden von Fluxmetern integriert und im Messrechner aufgezeichnet. Da die Polschuhe des Hysteresegraphen in direktem Kontakt mit den Polflächen der Probe stehen, handelt es sich um einen magnetisch geschlossenen Kreis. Das externe Feld entspricht dem internen Feld der Probe und beträgt maximal $\pm 2200 \text{ kA/m}$, womit die meisten Probengüten bis SH sowie teilweise auch UH-Proben (vgl. Tab. 7) bei Raumtemperatur untersucht werden können. Der Hysteresegraph des Herstellers Magnet-Physik eignet sich für Proben Temperaturen bis 200°C . Zu den Messgrößen gehört die Hysteresekurve einschließlich Remanenz J_r , Koerzitivfeldstärke H_{cj} und maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$ [117].

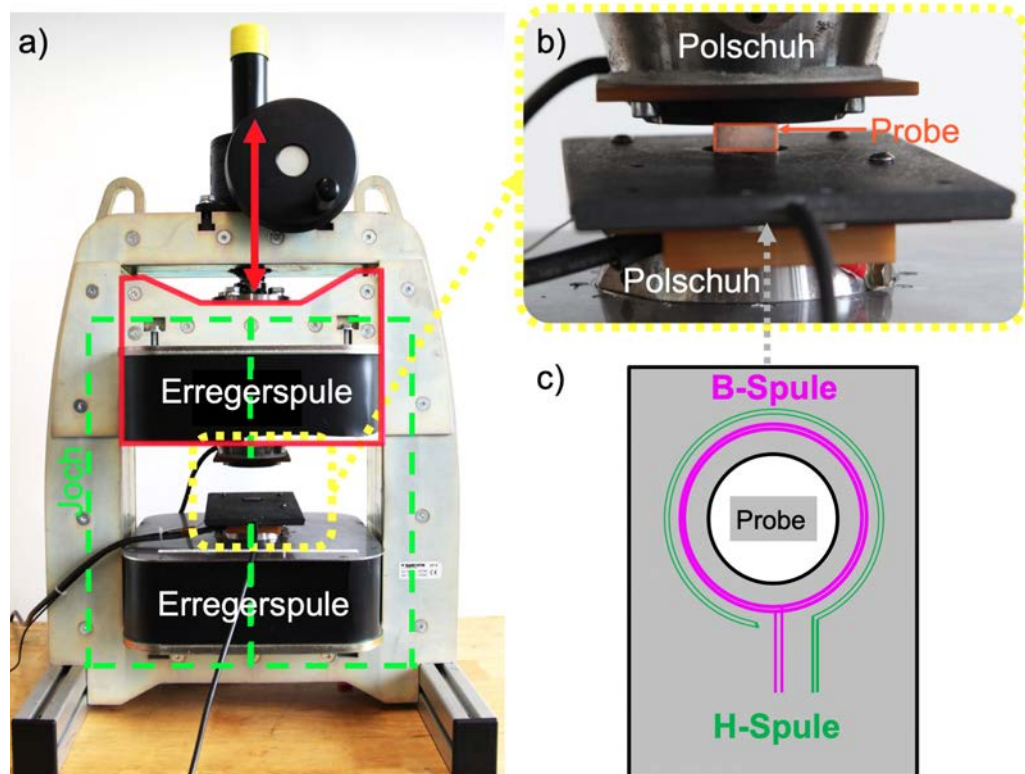


Abb. 2.31: Aufbau des Hysteresegraphen (Permagraph L des Herstellers Magnet-Physik [117]). a) Gesamtübersicht mit eingelegerter Messspule (offener Magnetkreis). b) Messspule im Kontakt zu den Polschuhen (geschlossener Magnetkreis). c) Schematischer Aufbau der Messspule. Über die höhenverstellbare Einheit (rot umrandet) in a) wird der Magnetkreis durch den Polschuhkontakt geschlossen, wie in b) dargestellt. Die Erregerspule erzeugt einen Magnetfluss Φ , der über das Joch und die beheizbaren Polschuhe geleitet wird. Um die Probe befindet sich die Messspule mit der B -Spule zur Erfassung der Magnetisierung sowie der H -Spule zur Erfassung des Feldes c).

Die technischen Details eines Standard-Hysteresegraphen (Permagraph L, Magnet-Physik [117]) sind in Tab. 7 aufgeführt.

Tab. 7: Technische Daten: Hysteresegraph. Zusammengefasst nach [117]

Messgerät	Hysteresegraph
Technik	Fixierte Probe in Elektromagnet mit Messspulen
Magnetische Konfiguration	Geschlossener Kreis
Messziele	Hysteresekurven, Viskositätsmessungen, Temperaturmessungen, Sättigungspolarisation
Messgrößen	$J(H)$, $B(H)$
Aktive Stellgrößen	Magnetfeld, Temperatur
Typische Kenndaten	
Feld [kA/m]	± 2200
Temperatur [°C]	20 bis 200
Probengröße max. Durchmesser [mm]	40
Feldänderungsrate [T/s]	< 0.5
Heizrate [°C/s]	0.67

2.5.3.2 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Das Vibrationsmagnetometer zählt zu den präzise- und häufig eingesetzten Methoden magnetischer Eigenschaften. Es misst statische und dynamische magnetische Eigenschaften wie Magnetisierungskurven [118], magnetische Viskosität und auch die temperaturabhängige Magnetisierung. Der Aufbau ist in Abb. 2.32 dargestellt [29], [119].

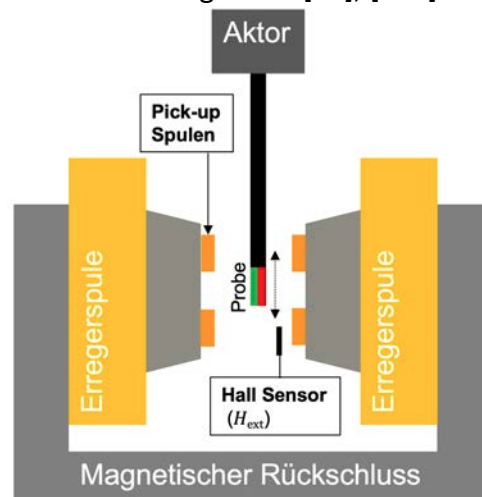


Abb. 2.32: Schematischer Aufbau eines Vibrating Sample Magnetometers (VSM) in Anlehnung an [29]. Bestehend aus dem Elektromagneten (Erregerspulen mit magnetischem Rückschluss), dem Linearantrieb zur Bewegung der Probe in und aus dem Magnetfeld (Aktor), den Pick-up-Spulen zur Erfassung der induzierten Spannung $U(t)$ sowie einem Hall-Sensor zur Messung des externen Feldes H_{ext} .

Die Probe befindet sich in einem externen Magnetfeld eines Elektromagneten (häufig auch mit supraleitenden Spulen) in offener Kreiskonfiguration und wird mit einer definierten Frequenz von typischerweise 40–100 Hz vertikal in Schwingung versetzt, meist über piezoelektrische oder elektromagnetische Aktoren. Die Bewegung der magnetisierten Probe relativ zu den Pick-up-Spulen ändert den magnetischen Fluss und induziert eine Wechselspannung. Ein Lock-in-Verstärker filtert das Signal, indem es mit der Vibrationsfrequenz korreliert wird, was eine hohe Empfindlichkeit ermöglicht. Die Messspannung wird kalibriert, um die Magnetisierung zu bestimmen. Temperaturkammern erlauben Messungen zwischen etwa -273 °C und 730 °C [30], sodass selbst die Curie-Temperatur der meisten Materialien übertroffen werden kann. Mit starken Elektromagneten sind Felder bis 7100 kA/m realisierbar [120], wodurch insbesondere Proben untersucht werden können, die bei Raumtemperatur nicht mehr mit dem Hysteresegraphen vermessen werden können. Aufgrund der Anforderung an ein homogenes Magnetfeld ist die Probengröße stark begrenzt. Beim Quantum Design PPMS 9 [30] gilt Probenhöhe $< 1.5\text{ mm}$ mit Temperaturregelung, wodurch die Gesamtmaße auf maximal $5 \times 3.5 \times 1.5\text{ mm}^3$ beschränkt

sind. Die technischen Details des Vibrationsmagnetometers (PPMS 9 VSM, Quantum Design [30]) sind in Tab. 8 aufgeführt.

Tab. 8: Technische Daten: Vibrationsmagnetometer (VSM). Zusammengefasst nach [30]

Messgerät	Vibrationsmagnetometer (VSM)
Technik	Linear bewegte Probe in Elektromagnet mit Messspulen
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis
Messziele	Hysteresekurven, Viskositätsmessungen, Temperaturmessungen, Sättigungspolarisation
Messgrößen	$J(H)$, $B(H)$, $J(t, H)$
Aktive Stellgrößen	Magnetfeld, Temperatur, Zeit
Typische Kenndaten (Quantum Design PPMS)	
Feld [kA/m]	± 7161.9
Temperatur [°C]	-277 bis 730
Probengröße (x,y,z) [mm]	max. 5 x 3.5 x 1
Feldänderungsrate [T/s]	< 0.019
Heizrate [°C/s]	< 0.167
Abkühlrate [°C/s]	< 0.1

2.5.3.3 Puls-Magnetometer

Ein Pulsmagnetisierer ist ein System zur kurzzeitigen Erzeugung sehr hoher Magnetfelder für die Aufmagnetisierung von Permanentmagneten. Im Gegensatz zu Feldquellen wie Hysteresegraph oder VSM, die ein vergleichsweise zeitlich kontinuierliches Magnetfeld bereitstellen, wird beim Pulsmagnetisierer das Magnetfeld durch kurze, hochdynamische Stromimpulse erzeugt [121]. Die kurze Pulsdauer minimiert die thermische Belastung der Spule und ermöglicht dadurch hohe Feldstärken. Die elektrische Schaltung kann als RLC-Entladekreis beschrieben werden, bestehend aus einem Kondensator C , einer Spule L und dem ohmschen Widerstand R (Abb. 2.33).

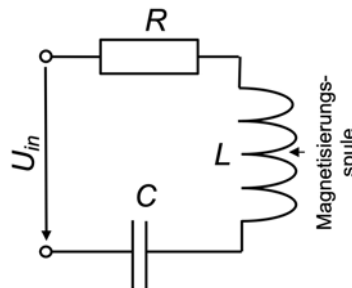


Abb. 2.33: Elektrische Skizze eines Pulsmagnetisierers basierend auf der Entladung des Kondensators C , bei der die gespeicherte elektrische Energie an die Magnetisierungsspule L abgegeben wird. Der Widerstand R begrenzt den Stromfluss. In Anlehnung an [122].

Beim Entladen des Kondensators fließt ein gedämpfter Stromimpuls durch die Spule, der ein zeitlich begrenztes Magnetfeld erzeugt. Die resultierende Feldform ist typischerweise ein gedämpfter Sinus- oder Rechteckpuls [123]. Das Magnetfeld wird in einem offenen Magnetkreis mit einer Luftspule erzeugt. In Kombination mit Messspulen und Fluxmetern oder Hall-Sonden kann ein Pulsmagnetisierer als Puls-Magnetometer gezielt zur Untersuchung der Magnetisierungsdynamik sowie des Remanenzverhaltens eingesetzt werden [121]. Hierbei lassen sich zentrale Materialkennwerte wie Sättigungspolarisation und Koerzitivfeldstärke bestimmen. Eine Temperatureinheit erlaubt Proben temperaturen von -40 bis 220 °C, wie den weiteren technischen Details des Pulsmagnetisierers der Hersteller Metis [121] in Tab. 9 zu entnehmen ist. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass die hohe Feldänderungsrate während eines Pulses die Koerzitivfeldstärke erhöht, da weniger Zeit für thermische Aktivierungen zur Verfügung steht als beim langsam durchfahrenen $J(H)$ -Verlauf eines Hysteresegraphen. Zusätzlich tragen Wirbelströme im Permanentmagneten zu Abweichungen bei.

Tab. 9: Technische Daten: Pulsmagnetisierer. Zusammengefasst nach [121]

Messgerät	Pulsmagnetisierer
Technik	Pulsmagnetisierer mit Messspulen
Magnetische Konfiguration	Offener Kreis
Messziele	Aufmagnetisierung, Hysteresekurven, Sättigungspolarisation, Temperaturmessungen
Messgrößen	$J(H), B(H), J(T, H)$
Aktive Stellgrößen	Magnetfeld, Temperatur
Typische Kenndaten	
Feld [kA/m]	±5500
Temperatur [°C]	-40 bis 220
Probengröße max. Durchmesser [mm]	80

2.5.4 Basistechniken zur digitalen Datenerfassung und Prozesssteuerung

Für präzise Messungen ist eine exakt auf die Anforderungen abgestimmte Messtechnik unerlässlich. Deshalb wird im folgenden Abschnitt ein kurzer Überblick über die wesentlichen Komponenten der Mess- und Regelkreise gegeben, wie sie in den nachfolgenden Prüfstandskonzepten zur Anwendung kommen. Abb. 2.34 zeigt die Standardprozesskette zur Digitalisierung nicht elektrischer Messgrößen nach [124]. Zunächst wird die physikalische Größe, etwa Magnetisierung, Temperatur oder Kraft, mithilfe geeigneter Sensoren in ein elektrisches Signal überführt. Beispiele hierfür sind Hall-Sensoren zur Erfassung des Magnetfeldes, temperaturabhängige Widerstände zur Temperaturmessung oder Dehnmessstreifen zur Erfassung mechanischer Belastungen. Das entstehende analoge Spannungssignal ist in der Regel schwach und muss zuvor verstärkt werden [125]. Anschließend erfolgt die Digitalisierung durch einen Analog-Digital-Wandler. Die erzeugten digitalen Rohdaten können entweder direkt als Messwerte ausgegeben oder zur weiteren Auswertung einem Computersystem zugeführt werden.

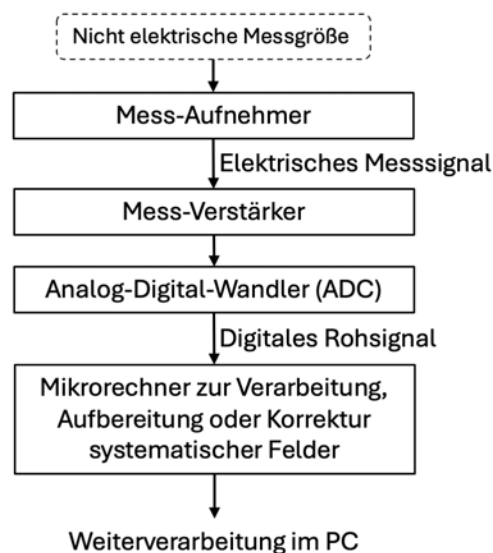


Abb. 2.34: Vorgehensweise zur Digitalisierung analoger Signale (Abb. nach [124]). Die zu erfassende Messgröße wird im ersten Schritt durch einen Mess-Aufnehmer (z. B. Hall-Sonde) in ein elektrisches Messsignal (Spannung) umgewandelt, ggf. verstärkt (Mess-Verstärker) und anschließend über einen Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert, bevor die Weiterverarbeitung erfolgt.

Zur Erfassung und Ausgabe analoger Signale werden in den Prüfständen Analog-Digital-Wandler (ADC) und Digital-Analog-Wandler (DAC) eingesetzt. Der Texas Instruments ADS1256, ein 24-Bit-ADC mit acht Kanälen und integriertem programmierbarem Verstärker [126] ermöglicht hochauflösende Messungen elektrischer Signale von Fluxmetern, Hall-Sonden, Temperatursensoren und Drehmomentsensoren. Mit über 16 Millionen Quantisierungsstufen und einer effektiven Auflösung (ENOB) von etwa 18.2 Bit bei einer Erfassungsrate von 2.5 S/s (samples per

second) bzw. ca. 16.4 Bit bei den verwendeten 70–100 S/s stellt er eine ausreichend hohe Auflösung zur Verfügung. Ergänzt wird er durch das 16-Bit-ADC ADS1115 [127], das bis zu 860 SPS bei vier Kanälen bietet und für weniger auflösungsintensive Signale genutzt wird.

Zur Rückführung digitaler Steuerwerte in analoge Spannungen wird der 15-Bit-DAC GP8211S [128] eingesetzt. Mit bis zu 32 768 Ausgangsstufen und wählbaren Spannungsbereichen (0–5 V bzw. 0–10 V) gibt dieser ein analoges Spannungssignal an den Stromverstärker für die Magnetfelderzeugung. Basierend auf diesen Komponenten lassen sich unterschiedliche Mess- und Regelstrategien realisieren: diskrete Verfahren, bei denen gezielte Stellgrößenänderungen mit verzögerten Einzelmessungen kombiniert werden, sowie kontinuierliche Verfahren mit permanenter Signalabtastung und ohne explizite Synchronisation [34], [129]. Je nach Anforderung ermöglichen beide Ansätze eine umfassende Charakterisierung der zu untersuchenden Magnetproben. Der grundlegende Ablauf der Datenerfassung in den Prüfstandskonzepten ist in Abb. 2.35 dargestellt und umfasst folgende Schritte: Die analogen Spannungssignale von Hall-Sensoren oder Fluxmetern werden zunächst durch den ADC digitalisiert und an den Mikrocontroller übertragen, der sie mit selbst entwickelten Messprogrammen in C++ (Arduino IDE [130]) direkt auf die SD-Karte abspeichert. Abhängig vom Versuchsablauf steuert der Mikrocontroller über Relais und DAC die Stromquelle und oder Motorsteuerung. Gleichzeitig werden die ausgeführten Steuerbefehle synchron auf die SD-Karte geschrieben, was eine aktionsbasierte, diskrete Auswertung ermöglicht. Digitale Prozessgrößen wie die Solltemperatur werden über serielle Schnittstellen (UART oder I²C) an den PID-Temperaturregler übertragen.

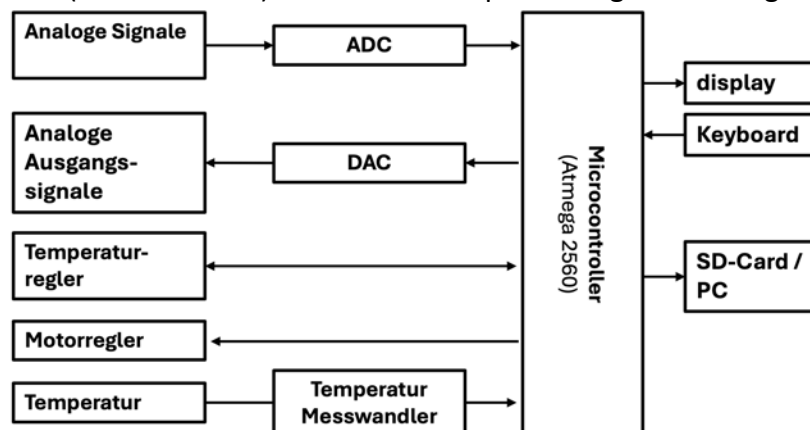


Abb. 2.35: Prinzipieller Mess- und Regelaufbau der Prüfstandskonzepte mit zentralem Mikrocontroller, der sowohl Eingangsdaten u. a. von ADC und Temperaturwandler verarbeitet als auch Prozessgrößen im Rahmen des Messprogramms steuert, z.B. über DAC an den Stromverstärker und zusätzlich die Bedienung über Display und Tastatur ermöglicht.

Die Programmeingabe erfolgt über eine Tastatur, während Menüführung und Statusinformationen auf einem LCD-Display angezeigt werden. Dadurch ist eine Stand-alone-Messung realisierbar. Abb. 2.36 zeigt die allgemeine Menüdarstellung zur Eingabe der Messparameter.

Für die Auswertung werden die Messdaten von der SD-Karte auf den Messrechner übertragen und mit entwickelten MATLAB-Skripten unter Verwendung von MATLAB [131] automatisiert verarbeitet.

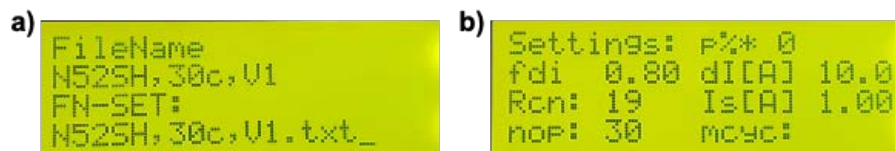


Abb. 2.36: Menüstruktur des Mess- und Regelaufbaus mit a) Darstellung zur Eingabe des Dateinamens und anschließender Bestätigung (FN-Set) durch Drücken der Enter-Taste, b) Einstellungsseite mit den wichtigsten Messparametern.

3 Konzeption und Aufbau eigener Prüfstandskonzepte zur Charakterisierung von Permanentmagneten

Zu diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 3.1 die Motivation und der technische Hintergrund für die Entwicklung der Prüfstandskonzepte erläutert. Abschnitt 3.2 behandelt die technische Planung und Auslegung der Konzepte und die damit ausgeführten Messprogramme. Die Prüfstandskonzepte werden anschließend mit standardisierten Messverfahren (vorgestellt in Kapitel 2.5.3) verglichen und das experimentelle Vorgehen in Abschnitt 3.3 beschrieben. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die Prüfkörper, also die verwendeten Permanentmagnete für die Untersuchungen in Kapitel 5 und 6, vorgestellt.

3.1 Allgemeine Einführung

Magnetische Alterung beschreibt die zeitabhängige Veränderung magnetischer Eigenschaften unter praxisrelevanten Bedingungen [8], [132], insbesondere in Abhängigkeit von Temperatur, Entmagnetisierungsfeldstärke und Wirkdauer. Während ungeschützte NdFeB-Magnete durch Oxidation im Zeitverlauf strukturelle oder chemische Veränderungen zeigen, bleiben moderne NdFeB-Magnetwerkstoffe mit z.B. Lack- oder Nickelbeschichtung im Bulk nahezu unverändert [133]. Veränderungen treten hier praktisch nur als Entmagnetisierung aus dem aufgesättigten Zustand auf. Der Fokus der folgenden Untersuchungen liegt folglich auf diesen nicht-strukturellen Effekten [134]. Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ergibt sich der Magnetisierungszustand eines Permanentmagneten aus einem Zusammenspiel von Temperatur, magnetischem Feld und der Zeit [135]. Daher liegt der Fokus der Untersuchungen in dieser Arbeit auf den Einflussgrößen: (1) Feldabhängigkeit, worunter die Interaktion von externem Feld und Selbstfeld fällt, (2) Proben temperatur sowie (3) der Belastungsdauer, während der Feld- und Temperaturbeanspruchung auf die Probe wirken. Ergänzt werden diese Betrachtungen durch die Anwendung des magnetischen Viskositätsparameters (Abschnitt 2.3.2.2) sowie durch Ansätze, der magnetischen Alterung gezielt entgegenzuwirken (Abschnitt 2.3.3). Während Hysteresegraphen aufgrund ihres Aufbaus mit Spulenmessung und Fluxmetern durch Fluxmeter-Drift [116], [136] nicht für Langzeitmessungen konzipiert sind, ergibt sich der Bedarf für neues Messequipment für Langzeitbetrachtungen. Eine Methode für konstante Langzeit-Feld- und Temperaturbelastungen basiert auf dem VSM, das die Anforderungen an die Langzeitstabilität erfüllt. Einschränkungen bestehen jedoch in den meist stark begrenzten Probenabmessungen (vgl. Tab. 8) sowie in den nur sehr langsamen realisierbaren Feld- und Temperaturänderungen [29], [30]. Desweiteren stellt die technische Komplexität einen weiteren limitierenden Faktor dar. Auf dieser Grundlage wurden die Konzepte 1 (Wechselfeldjoch) und 2 (Rotierende Probe) entwickelt. Konzept 1 entspricht im teiloffenen Magnetkreis mit statischer Probenposition funktional eher einem reinen Messgerät ähnlich dem Hysteresegraphen, der jedoch im geschlossenen Kreis arbeitet. Der Mehrwert von Konzept 1 liegt in Langzeitmessungen bei konstanter Feld- und Temperaturbelastung sowie in der Möglichkeit schneller Feldänderungen. Konzept 2 stellt darüber hinaus eine anwendungsorientierte Erweiterung dar: Durch die dynamisch veränderbare Probenposition können gezielt dynamische Feldbelastungen realisiert werden. Zusätzlich ermöglicht die Erfassung des Drehmoments zwischen Antriebsmotor und Probe im externen Feld eine weitere anwendungsorientierte Messgröße. Neben der integralen Magnetisierungserfassung erlaubt die lokale Streufelderfassung Aussagen über das vom Magneten ausgehende Streufeld (Field Mapping). Hierfür stellen 3D-Hall-Mapper die gängige Methode dar. Allerdings handelt es sich bei klassischen Field-Mappern um reine Messgeräte ohne Prozesssteuerung mit Feld- bzw. Temperaturvariationen [115]. Aus diesem

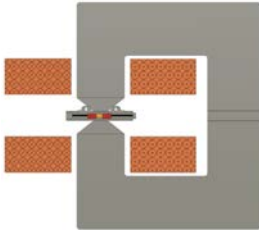
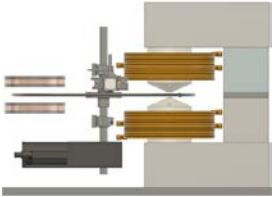
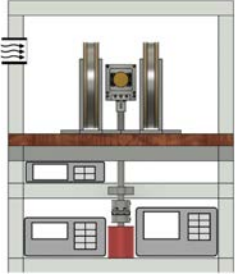
Grund ermöglicht Konzept 2 zusätzlich zur integralen Magnetisierungserfassung auch eine lokale Streufelderfassung bei unterschiedlichen Feld- und Temperaturbedingungen.

Für hochpräzise Langzeitmessungen unter Temperatureinfluss ohne externe Feldbelastungen wurde Konzept 3 entwickelt. Als Basis dient die Helmholtz-Messspule, ein Standardmessgerät für integrale Magnetisierungsmessungen. Da diese, ähnlich wie Field-Mapper, weder Zeit- noch Temperaturvariation erlaubt, ermöglicht Konzept 3 die Erfassung zeitabhängiger Magnetisierungsänderungen unter konstanter oder variierender Temperatur im offenen Kreis, ohne Einfluss externer Felder und ferromagnetischer Materialien. Aufbauend auf Konzept 3 kombiniert Konzept 4 die integrale Polarisationsmessung mit lokaler Streufeldanalyse. Da die horizontale Auflösung des Field Mappings mit Konzept 2 aufgrund der Messzeit verhältnismäßig gering ist und die rein zeitabhängige Veränderung unter Temperatureinfluss einen Untersuchungsschwerpunkt darstellt, vereint Konzept 4 temperaturabhängiges Field Mapping und integrale Langzeitmessungen. Es erfasst den reinen Temperatureffekt auf die Probe sowohl lokal als auch integral, ohne Einfluss externer Felder und ferromagnetischer Materialien. Auf dieser Grundlage wird eine durchgängige Kette anwendungsnaher Prüf- und Messverfahren vorgestellt, die ein Framework zur zerstörungsfreien Erfassung sowohl des Ausgangszustands der Probenmagnetisierung als auch deren feld-, temperatur- und zeitabhängiger Veränderung unter realitätsnahen Belastungsbedingungen bildet. So entsteht ein umfassendes Bild des Magnetisierungsverhaltens, von der Charakterisierung über die Belastung bis hin zum gealterten Zustand.

Daraus ergeben sich vier aufeinander abgestimmte Prüfstandskonzepte mit dem in Tab. 10 aufgeführten Funktionsumfang:

- **Konzept 1** (Wechselfeldjoch): Integrale Messung, schnelle Feldänderungen, Langzeitstabilität bei konstanter Temperatur, Aufnahme von Proben mit realitätsnahen Geometrien.
- **Konzept 2** (Rotierende Probe): Dynamische Probenbewegung für gezielte Feldbelastungen, integrale und lokale Magnetisierungserfassung (Field-Mapping), Drehmomentmessung.
- **Konzept 3** (Momentmessspule mit Probentemperierung): Hochpräzise Langzeitmessung der integralen Magnetisierung unter Temperatureinfluss im offenen Kreis.
- **Konzept 4** (Momentmessspule mit Scanfunktion und Probentemperierung): Kombination aus integraler Magnetisierungserfassung und präzisem lokalem Field-Mapping unter Temperatureinfluss im offenen Kreis

Tab. 10: Funktionsumfang der vier Prüfstandskonzepte mit jeweiligen Übersichtsskizzen.

Konzepte	Verluste				Messmethode		
	Direkte Verluste		Zeitabhängige Verluste		integral	lokal	mechanisch
	feld-abhängig	temperatur-abhängig	feld-abhängig	temperatur-abhängig			
1 (Wechselfeldjoch) 	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗
2 (Rotierende Probe) 	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
3 (Momentmessspule mit Pro- bentemperierung) 	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗
4 (Momentmessspule mit Scan- funktion und Probentemperie- rung) 	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗

3.2 Konzeption und Aufbau der Prüf- und Belastungsverfahren sowie experimentelle Durchführung

3.2.1 Konzept 1: Wechselfeldjoch

Zur Charakterisierung des magnetischen Alterungsverhaltens, insbesondere im Hinblick auf (teilweise) Entmagnetisierung und Viskosität, kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Etablierte Methoden zur integralen Magnetisierungsmessung, wie der Hysteresegraph und das VSM ermöglichen eine feldabhängige Analyse der Entmagnetisierungskurve. Während sich beide Verfahren zur Bestimmung der direkten, feldinduzierten Entmagnetisierung eignen, stößt der Hysteresegraph bei Langzeitmessungen aufgrund des Fluxmeterdrifts an seine technischen Grenzen. Das VSM hingegen ist speziell für Langzeitanalysen ausgelegt und erlaubt eine präzise Detektion zeitabhängiger Magnetisierungsprozesse [29]. Allerdings weist das VSM-Einschränkungen auf, die eine Übertragung auf praxisnahe Anwendungen begrenzen. Insbesondere seine geringe Probengröße, schränkt die Untersuchung realer Bauteilgeometrien ein [132]. Zudem sind schnelle Feldwechsel im VSM systembedingt nur begrenzt möglich. Diese Limitierungen führten zur Entwicklung des Prüfstandskonzepts 1, das speziell auf anwendungsnahe Alterungsszenarien ausgelegt ist. Die Anforderungen an den Prüfstand umfassen dabei:

- schnelle Feldänderungen mit bis zu 30 T/s
- hohe Langzeitstabilität bei konstanten Magnetfeldern über mehrere Minuten
- Aufnahme von Proben mit realitätsnahen Geometrien, insbesondere häufig verwendeter Quaderproben mit einer Größe von 20x10x5 mm³
- praxisnahe Probentemperatur von Raumtemperatur auf bis zu 280 °C

3.2.1.1 Aufbau

Der Aufbau von Konzept 1 ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt. Er besteht aus drei Komponenten: der Felderregung mittels Elektromagnet und Netzteil (Abschnitt 3.2.1.1.1), der Probeneinheit mit Temperierung (Abschnitt 3.2.1.1.2) sowie dem Sensorik- und Messsystem (Abschnitt 3.2.1.1.3).

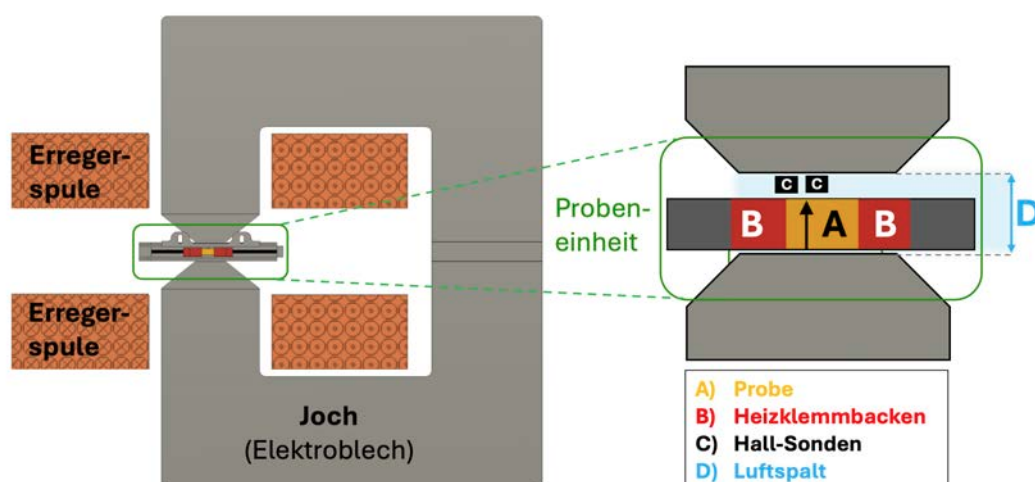


Abb. 3.1: Schematischer Aufbau von Konzept 1. a) Gesamtübersicht mit Elektromagnet bestehend aus Erregerspulen und Elektroblechjoch. b) Detailansicht der Probeneinheit: (A) Probe zwischen Heizklemmbacken, (B) Heizklemmbacken: Messingklötze mit Heizpatronen zur Probentemperaturerhöhung, sowie (C) Hall-Sonden im Luftspalt (D) über der Probe zur Erfassung der magnetischen Flussdichte B .

3.2.1.1.1 Felderregung

Zur Erzeugung externer Felder hoher Intensitäten sowie schneller Feldänderungen bei geringer Restremanenz besteht das Magnetjoch aus Fe-Si-Elektroblech des Typs M270-35A [137]. Zwei Kupferbandspulen mit insgesamt 77 Windungen erzeugen eine maximale Flussdichte von 1.7 T im Luftspalt. Da das Kernmaterial ab 1.7 T in die Sättigung übergeht, wurde die Rückschlussgeometrie entsprechend ausgelegt. Die Kernflächen im Rückschluss sind auf 90 mm vergrößert, um die magnetische Flussdichte dort zu reduzieren und im Bereich der Probe nahe der Polschuhe mit einer Breite von 80 mm zu konzentrieren. Die geometrische Auslegung ist in Abb. 3.2a als technische Skizze dargestellt, während Abb. 3.2b die resultierende simulierte Flussdichteverteilung bei 300 A Bestromung zeigt.

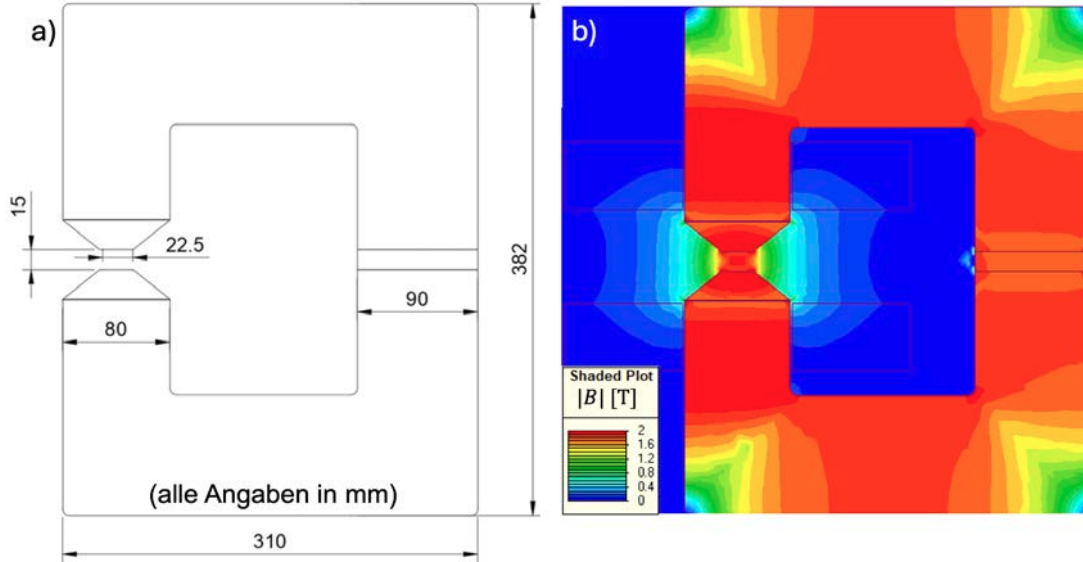


Abb. 3.2: Elektromagnet mit Elektroblechjoch. a) Technische Skizze des Elektroblechjochs mit Bemaßung. b) Simulierte Flussdichteverteilung bei 300 A Bestromung zur Identifikation möglicher Sättigungsbereiche. Durch die ausgewählte Geometrie mit breitem Rückschluss (90 mm) und schmalere Breite von 80 mm nahe des Probenbereichs zeigen sich Sättigungseffekte mit $B > 1.7$ T hauptsächlich in diesem Bereich.

Für den Betrieb bei Frequenzen von bis zu 1 kHz wird eine entsprechend hohe Leistung der Felderregung benötigt. Ein 40 kW-Stromverstärker (Zenone GIS 1K 300A-40KVA-1) wandelt ein analoges Sollsignal in das benötigte Stromsignal zur Erregerspulenbestromung. Die beiden Standardspulen werden in Serie betrieben und ergeben einen elektrischen Widerstand von etwa 0.02Ω . Für einen maximalen Strom von 300 A ist im Konstantstrombetrieb eine Spannung von rund 8 V erforderlich. Für konstante, reproduzierbare Umgebungsbedingungen und zur Kühlung der Erregerspulen befindet sich der Prüfstand in einer Klimakammer mit integrierter Kühleinheit (Rittal SK3185736), die eine konstante Innenraumtemperatur von ca. 20°C gewährleistet. Zur Ableitung der Wärmeentwicklung der Spulen sowie zur schnelleren Probenabkühlung kommen zusätzlich Lüfter zum Einsatz. Die Probeneinheit wird in den 15 mm hohen Luftspalt des Magnetjochs eingeschoben (Abb. 3.2b) und enthält die Probe mit Heizeinheit.

3.2.1.1.2 Probeneinheit

Die Probeneinheit befindet sich im Luftspalt des Magnetjochs zwischen den Polschuhen (schematisch in Abb. 3.3a dargestellt) und dient sowohl der mechanischen Fixierung als auch der Temperierung der Probe. Die Probe wird durch Messing-Klemmbacken in einem Aluminium-Probenrahmen (Abb. 3.3b) gehalten. In jeder Klemmbacke ist eine 50 W / 12 V Heizpatrone integriert, sowie ein PT-100 Temperatursensor, wie in Abb. 3.3c schematisch dargestellt. Zur thermischen Entkopplung ist der Probenrahmen durch Keramikplatten sowohl gegen die dar-

überliegenden Hall-Sensoren als auch gegen das darunterliegende Joch isoliert (Abb. 3.3d). Die maximale erreichbare Probentemperatur beträgt 280 °C.

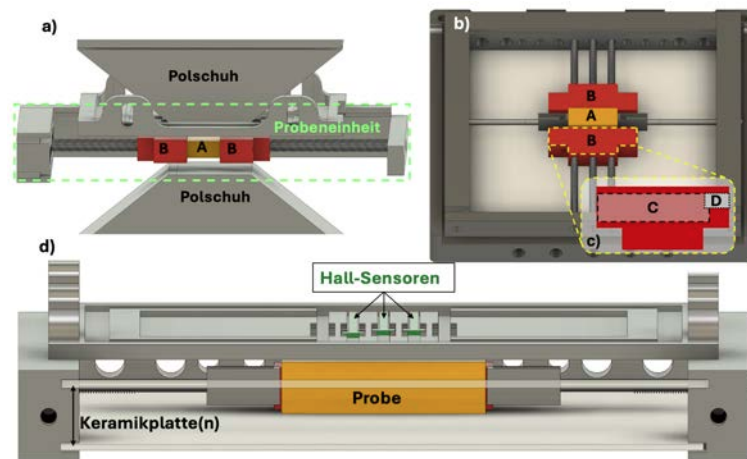


Abb. 3.3: Schematische Übersicht der Mess- und Probeneinheit. a) Aufbau des Magnetkreises mit Probeneinheit bestehend aus Probe (A) und Heizklemmbacken (B) im Luftspalt zwischen den Polschuhen. b) Detailansicht der Probeneinheit mit Probe (A) zwischen den Heizklemmbacken (B). c) Detailansicht eines Heizklemmbackens mit markierter Heizpatrone (C) und markiertem Temperatursensor (D). d) Gesamtübersicht mit markierter Probe, Hall-Sensoren über der Probe und Keramikplatten zur thermischen Isolation zwischen Hall-Sensoren, Polschuhen und Probe (obere Keramikplatte ausgeblendet).

3.2.1.1.3 Sensorik- und Messsystem

Nach Auswahl des gewünschten Messprogramms über die Benutzeroberfläche steuert das Mess- und Regelsystem den Versuchsablauf. Das Prinzip des Mess- und Regelsystems ist in Abb. 3.4 skizziert. Über einen DAC wird das analoge Sollsignal (Spannungssignal) zur Stromregelung ausgegeben. Gleichzeitig wird über einen ADC das Hall-Signal neben dem Stromsignal und weiteren Prozessparametern diskret erfasst und gespeichert. Die effektive magnetische Feldstärke wird nicht direkt gemessen, sondern indirekt über die Stromaufnahme der Erregerspulen bestimmt.

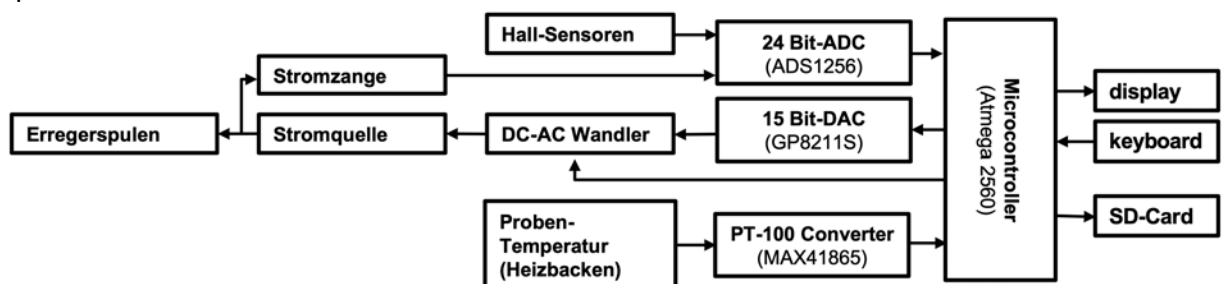


Abb. 3.4: Prinzip des Mess- und Steuerungssystems von Konzept 1 (Wechselfeldjoch), bestehend aus einem ADC zur Digitalisierung der analogen Messsignale der Hall-Sonden (magnetische Flussdichte) sowie der über eine Stromzange erfassten Stromstärke der Erregerspulen und einem DAC, der synchron die Stromquelle ansteuert und damit die Feldsignale und die Feldstärke des jeweiligen Messablaufs zur diskreten Datenerfassung vorgibt.

Sensorik

Die Messung erfolgt über Hall-Sensoren, die eine hohe zeitliche und thermische Stabilität bieten [138] und durch ihre verteilte Anordnung eine zuverlässige Erfassung unterschiedlich großer Proben ermöglichen. Hierfür sind drei temperaturstabilisierte Hall-Sensoren (Projekt-Elektronik Berlin, Modell AS-NCU-Wire) im Luftspalt etwa 5 mm oberhalb der Probe positioniert. Sie sind bis zu 100 °C temperaturstabilisiert. Die Sensoren liefern ein Ausgangssignal von ± 2 V, entsprechend einem Messbereich von ± 2 T. Der Erregerspulenstrom wird mit einem Stromzangenadapter auf Hall-Basis (Hantek CC650) gemessen, der Gleich- und Wechselströme von 20 mA bis 650 A abdeckt und eine Empfindlichkeit von 1 mV/A aufweist. Die Temperaturmessung erfolgt über PT100-Sensoren.

Positionierung Hall-Sonden, Magnetisierungserfassung

Die Magnetisierung der Probe wird durch Hall-Sonden im Luftspalt zwischen dem oberen Polschuh und der Probeneinheit (Abb. 3.3a) erfasst. Im Gegensatz zu Helmholtz-Messspulen messen diese Sensoren nicht die integrale Durchschnittsmagnetisierung, sondern erfassen die Streufeldintensität oberhalb der Probe. Die Anfangspolarisation der Probe im offenen Kreis bei der jeweiligen Temperatur wird extern mittels Helmholtz-Messspulenmessung bestimmt. Der Anfangsflussdichtewert (Hall-Sondensignal) ohne externes Feld wird dabei auf diesen Anfangspolarisationswert skaliert, woraus sich der jeweilige Skalierungsfaktor ergibt. Zur Validierung dieses indirekten Vorgehens werden unterschiedliche Messpositionen im Luftspalt über der Probe (hier N52) in Abb. 3.5a mittels FEA-Simulation dargestellt. Hierbei werden die jeweiligen Hall-Signale mit den integralen Magnetisierungswerten verglichen und deren mittlere Abweichung prozentual in Abb. 3.5b angegeben. Abb. 3.5c zeigt die Grundlage der berechneten Abweichungen als $J(H)$ -Kurve, basierend auf den jeweiligen J -Werten bei entsprechenden H_{ext} -Werten. Die simulierten Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen der skalierten, J -Bestimmungen eine gute Übereinstimmung mit der durchschnittlichen Probenpolarisation J_{avg} aufweisen. Bei den durchschnittlichen Abweichungen von J_{avg} zu den jeweils skalierten B -Werten der entsprechenden Positionen treten maximale Abweichungen von bis zu 10 % auf, insbesondere direkt über der Probe (Abb. 3.5b). Nach außen und nach oben hin zeigt sich eine bessere Übereinstimmung. Parallel wurde die Feldbestimmung H_{ext} betrachtet. Diese stimmt direkt über der Probe im Mittelpunkt am besten mit der durchschnittlichen Feldverteilung im Probenvolumen überein, weshalb die Probenpositionen an den Stellen C, A und hinter C (in Bildebene) ausgewählt wurden.

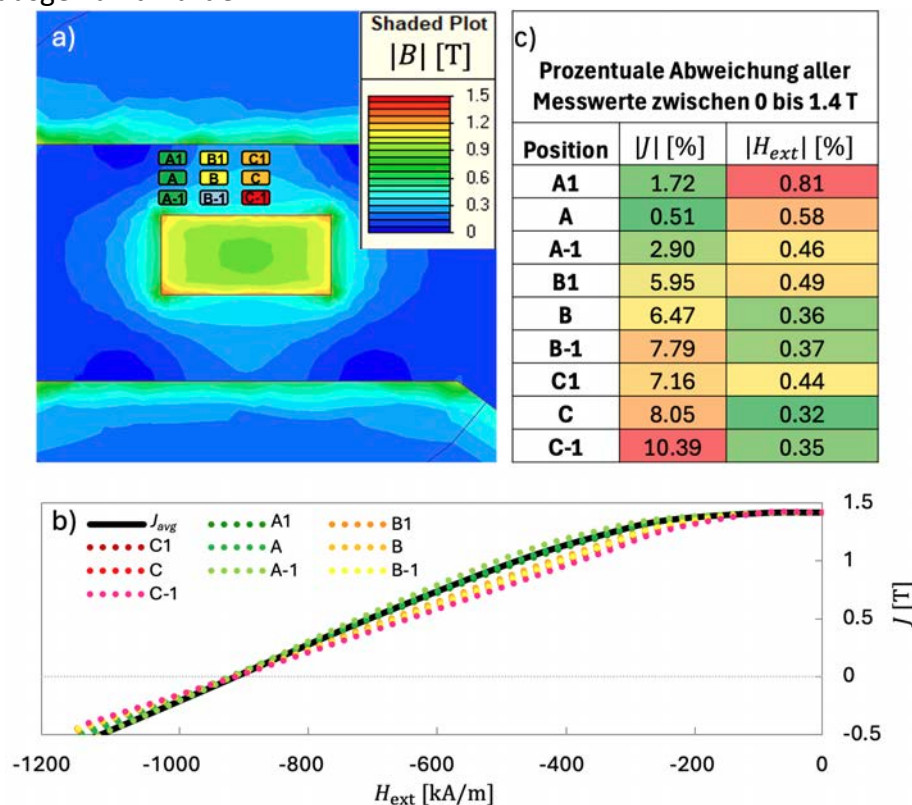


Abb. 3.5: Simulierte Flussdichteverteilung im Luftspalt des Elektromagneten. Die (quasi) integrale Flussdichte wird an bestimmten Positionen oberhalb der Probe, visualisiert in a), als Summe aus externem Feld und Magnetfeld der Probe erfasst. In b) sind die aus Simulation extrahierten J -Werte für die jeweiligen Feldstärken zusammen mit dem Volumenmittelwert J_{avg} der Probe als $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven dargestellt. Die Abweichungen der einzelnen Positionen von J_{avg} sind in c) als prozentuale Abweichungen relativ zur mittleren Magnetisierung J_{avg} dargestellt und als Mittelwert über alle Feldstärken angegeben ($|J|$ [%]). Zusätzlich wird die Abweichung des externen Feldwerts H_{ext} der jeweiligen Positionen zum Referenzwert im Mittelpunkt (ohne Probe) ebenfalls als Mittelwert über alle Feldstärken angegeben ($|H_{\text{ext}}|$ [%]).

Messprozedur

Die Messprozedur beginnt mit dem Aufheizen der zuvor vollständig mittels Pulsmagnetisierers aufmagnetisierten Probe auf die Zieltemperatur. Da die Hall-Sensoren im Luftspalt oberhalb der Probe die Überlagerung aus Probenfeld und externem Feld erfassen, erfolgt die eigentliche Magnetisierungsmessung ausschließlich bei Strom $I = 0$, also bei $H_{\text{ext}} = 0$. Zur Bestimmung des äußeren Magnetfelds bei angelegtem Strom werden zuvor Leermessungen ohne Probe durchgeführt: Dabei erfasst der Stromsensor (Stromzange) den Erregerspulenstrom, während eine zentral im Luftspalt positionierte Hall-Sonde das resultierende externe Magnetfeld misst. So entsteht eine Strom-Feld-Kennlinie $B_{\text{ext}}(I)$, die den Zusammenhang zwischen angelegtem Strom und externem Magnetfeld beschreibt. Diese Kennlinie bildet die Grundlage für alle späteren Messungen mit Proben.

3.2.1.2 Messprogramme

Die folgenden Messprogramme bilden die Grundlage für die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse mit Konzept 1.

3.2.1.2.1 Feldrampen zur Entmagnetisierungskurvenbestimmung

Zur Erfassung einer Entmagnetisierungskurve unter zunehmender Feldbelastung werden zwei Ansätze unterschieden, schematisch in Abb. 3.6 dargestellt:

- **Direkte Entmagnetisierung:** Die Probenpolarisation wird unter zunehmendem externen Magnetfeld (Abb. 3.6a) als $J(H_{\text{ext}})$ gemessen. Die Polarisationsänderungen bestehen aus reversiblen und irreversiblen Anteilen (Abb. 3.6c: $J(H_{\text{ext}})$).
- **Rücklauf-Entmagnetisierungskurve:** Nach einer Vorbelastung wird die verbleibende Magnetisierung ohne anliegendes externes Feld gemessen. Die Entmagnetisierungskurve $J(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$ zeigt die Polarisation bei $J(H_{\text{ext}} = 0)$ in Abhängigkeit vom zuvor erfahrenen maximalen externen Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$. Dieser Ansatz erfasst ausschließlich die irreversiblen Polarisationsänderungen und ermöglicht Rückschlüsse auf die verbleibende Polarisation ohne angelegtes Feld (Abb. 3.6c: $J(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$).

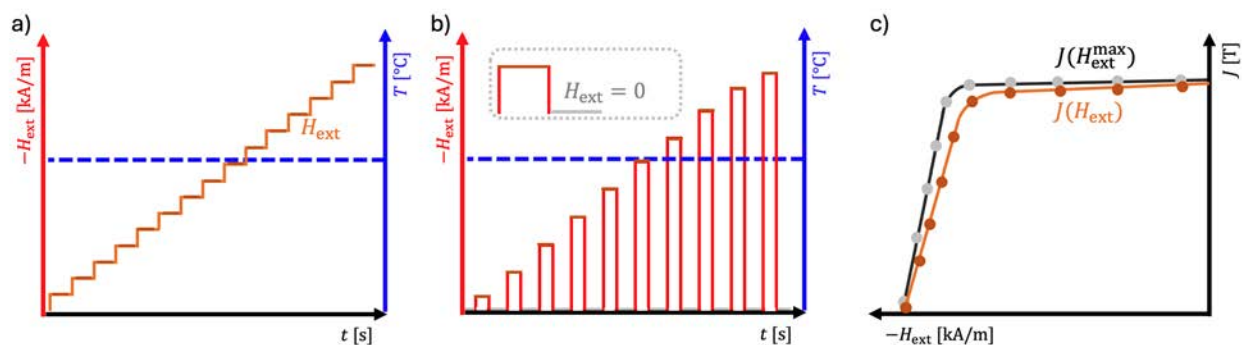


Abb. 3.6: Schematischer Messablauf der Feldrampen zur Bestimmung von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven. a) ansteigende Feldrampe zur Messung der Probenpolarisation unter angelegtem externen Feld H_{ext} . b) Rücklauf-Feldrampe: Vorbelastung mit zunehmendem maximalen Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$, anschließend Messung bei $H_{\text{ext}} = 0$. c) Resultierende $J(H)$ -Kurven aus a) und b): $J(H_{\text{ext}})$ aus a) zeigt die Polarisation unter angelegtem Feld, $J(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$ aus b) die Polarisation bei $H_{\text{ext}} = 0$ in Abhängigkeit vom zuvor erfahrenen maximalen Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$.

3.2.1.2.2 Bipolare Feldrampe zur Aufnahme bipolarer Magnetisierungskurven

Da Permanentmagnete in Anwendungen wie Elektromotoren sowohl in Fluss- als auch in Gegenflussrichtung zyklisch belastet werden, erfolgt die Untersuchung des Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsverhaltens über eine bipolare Pulsrampe (Abb. 3.7a). Wie in Abb. 3.7b schematisch dargestellt, beginnt die Messreihe mit einem Feldpuls in Magnetflussrichtung, gefolgt von einem Feldpuls in Gegenflussrichtung. Die Probenmagnetisierung wird jeweils beim Null-

durchgang des externen Feldes bei $H_{\text{ext}} = 0$ erfasst und in die magnetische Polarisation J umgerechnet. Diese Methodik wird in zwei Varianten angewendet:

- Direkte bipolare Pulsrampe: Anwendung je eines einzelnen Entmagnetisierungs- und Magnetisierungspulses zur Charakterisierung des Basisverhaltens.
- Viskositätsbipolarrampe: Sequenz aus 30 Pulsen in beiden Richtungen (gleicher Intensität), um zeitabhängiges Verhalten (magnetische Viskosität) in Fluss- als auch in Gegenflussrichtung zu analysieren.

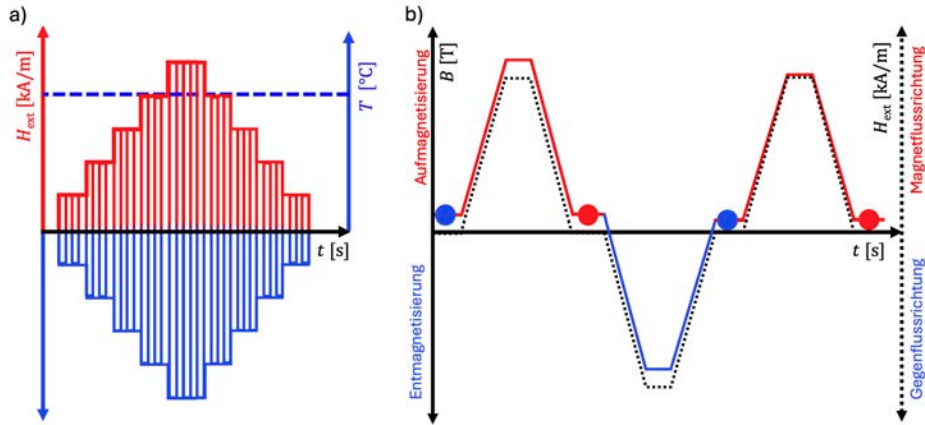


Abb. 3.7: Schematischer Messablauf der Bipolarrampe mit auf- und absteigender Belastung. Abwechselnd erfolgt ein Puls in Magnetisierungsrichtung, gefolgt von einem Puls in Entmagnetisierungsrichtung. a) Gesamtübersicht der bipolaren Feldrampe. b) Detaillierter Ablauf mit externem Feld, schwarz gestrichelt dargestellt, in $+H_{\text{ext}}$ (Magnetflussrichtung) und $-H_{\text{ext}}$ (Gegenflussrichtung) sowie dem Probensignal in rot (aufmagnetisierender Zustand) und blau (entmagnetisierender Zustand).

3.2.1.2.3 Feldrampe zur Viskositätsparameterbestimmung

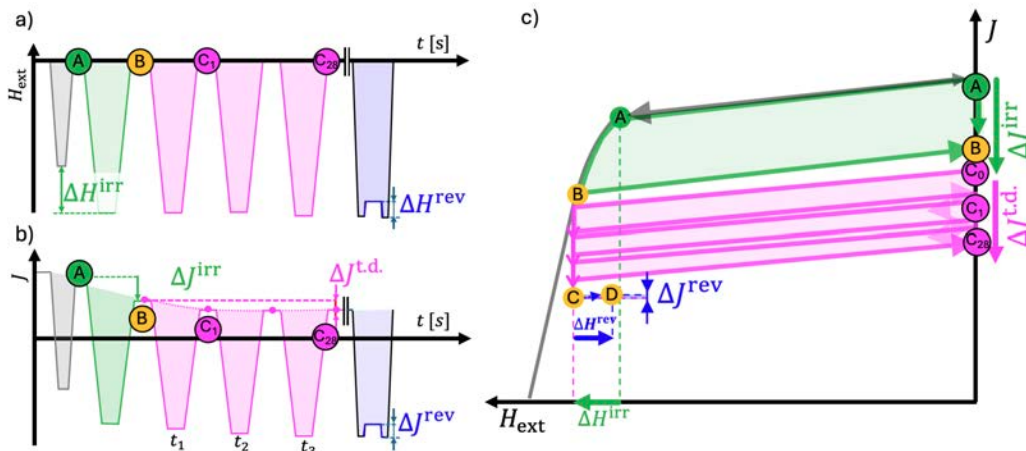


Abb. 3.8: Schematische Darstellung zur Bestimmung des magnetischen Viskositätsparameters. a) Zeitlicher Verlauf des externen Feldes $H_{\text{ext}}(t)$. b) Zeitlicher Verlauf der Probenpolarisation $J(t)$. c) Darstellung der Polarisation in Abhängigkeit vom Feld als $J(H)$. Über das vorgegebene Feldsignal $H_{\text{ext}}(t)$ in a) zeigt b) die resultierende Probenmagnetisierung. Die Bestimmung des Viskositätsparameters erfolgt über eine Sequenz von Teilschleifen, wie in c) dargestellt. Im ersten Schritt führt ein Feldanstieg (ΔH_{irr} in a)) zur irreversiblen Teilentmagnetisierung der Probe (ΔJ_{irr} in b)). Entlang des Pfades A–B werden aus der Feldänderung ΔH_{irr} (zwischen Puls 1 und Puls 2 in a)) und der entsprechenden Polarisationsänderung ΔJ_{irr} die irreversible Suszeptibilität $\chi^{\text{irr}} = \Delta J_{\text{irr}} / \Delta H_{\text{irr}}$ bestimmt. Ausgehend von Punkt B folgt die Bestimmung der Viskosität S . Während der darauffolgenden 28 Pulse bei konstanter Feldamplitude in den Zyklen C1 bis C28 wird die zeitabhängige Entmagnetisierung $\Delta J^{\text{t.d.}}$ bestimmt. Im letzten Puls entlang des Pfades C–D wird durch eine kleine Feldänderung ΔH_{rev} die reversible Suszeptibilität aus ΔJ_{rev} zu $\chi^{\text{rev}} = \Delta J_{\text{rev}} / \Delta H_{\text{rev}}$ bestimmt. Auf Basis der jeweils feldstärkeabhängig bestimmten Viskositäts- und Suszeptibilitätswerte wird der magnetische Viskositätsparameter S_v gemäß Gl. (12) berechnet.

Zur Bestimmung des magnetischen Viskositätsparameters wurde ein speziell ausgelegtes Messprogramm entwickelt, das mithilfe von Feldpulsen die relevanten Kenngrößen Suszeptibilität χ und Viskosität S bestimmt. Ein Messzyklus (Abb. 3.8) besteht aus insgesamt 30 Feldpulsen, wobei der erste Puls (Pfad (A) zu (B)) mit einer um 50 % geringeren Stromstärke als die nachfolgenden durchgeführt wird. Diese Differenz dient zur Bestimmung der totalen externen Sus-

zeptibilität anhand der Änderung der Polarisation ΔJ^{irr} in Bezug auf das angelegte externe Feld ΔH^{irr} nach Gl. (5). Ab dem zweiten Puls beginnt die Erfassung der Zeitabhängigkeit. Hierzu werden 28 Pulse mit einer Dauer von jeweils 1.5 s bei konstanter Feldamplitude ($H_{\text{ext}} = 100\%$) appliziert (Zyklen: C_1 bis C_{28}). Die gesamte effektive Messdauer von 3.5 Minuten dient zur Erfassung der zeitabhängigen Abnahme der Polarisation $\Delta J^{\text{t.d.}}$ und damit der Viskosität nach Gl. (7). Hierfür wird eine Regressionsgerade durch die 28 Messwerte in Bezug auf die logarithmierte x -Achse gelegt (Abb. 2.14). Im letzten Puls wird die reversible Suszeptibilität bestimmt. Dazu wird H_{ext} nach Erreichen von 100 % kurzzeitig um etwa 5 % reduziert (C_{28} bis D). Die reversible Änderung wird mit Gl. (4), bestimmt, wobei auch hier die Steigung einer Regressionsgerade verwendet wird.

Dieser Messzyklus wird bis zum Erreichen des Koerzitivfelds jeweils mit höherer Feldbelastung durchgeführt und ist in Abb. 3.9a als $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ über acht Messzyklen (1 bis 8) dargestellt. In Abb. 3.9a ist das Verhalten der Polarisation in Abhängigkeit vom Feld dargestellt, wobei die hohen Feldpulse zwischen Punkt A (Puls 1) und Punkt B (Puls 2) der Bestimmung der Suszeptibilität dienen und die darauffolgenden 28 Pulse bei konstantem Feld von Punkt B zu Punkt C zur Erfassung der zeitabhängigen Entmagnetisierung (Viskosität) verwendet werden.

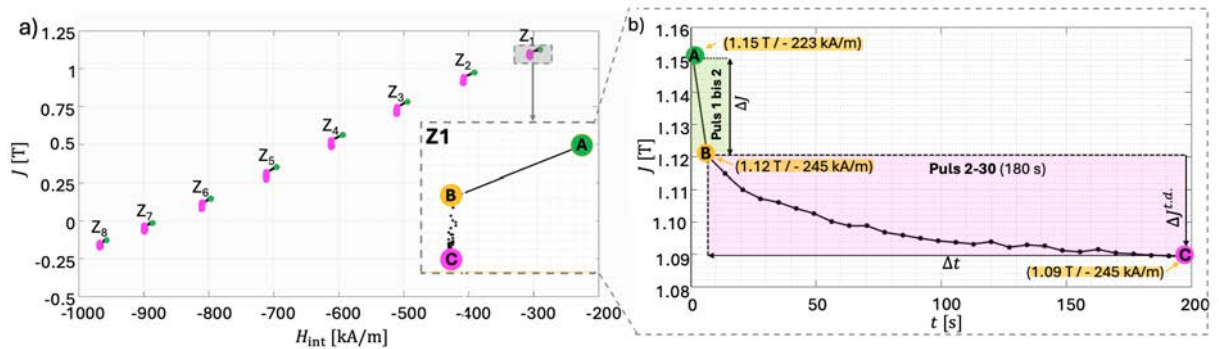


Abb. 3.9: a) Übersicht der S_v -Messungen als $J(H_{\text{ext}})$ für die Zyklen 1 bis 8 einer N52-SH-Probe bei 100 °C. b) Darstellung von Zyklus 1 als $J(t)$. Die magnetische Suszeptibilität χ^{irr} wird zwischen dem ersten und zweiten Puls (Punkte A bis B) aus der Feldänderung $\Delta H = H^A - H^B$ und der zugehörigen Magnetisierungsänderung $\Delta J = J^A - J^B$ bestimmt. Die magnetische Viskosität S wird aus den Pulsen 2 bis 30 (Punkte B bis C) aus der zeitabhängigen Entmagnetisierung $\Delta J^{\text{t.d.}}$ über 180 s ermittelt.

In Abb. 3.9b sind exemplarisch die Messwerte für Zyklus 1 aufgeführt. Auf Basis der Feldänderung zwischen Puls 1 und Puls 2 ergibt sich hier $\Delta H = H^A - H^B = 22 \text{ kA/m}$. Dabei erfolgt eine Entmagnetisierung von J^A zu J^B mit $\Delta J^{\text{irr}} = 0.03 \text{ T}$, wodurch die irreversible Suszeptibilität bestimmt werden kann. Zwischen den darauffolgenden 28 Pulsen von Punkt B zu Punkt C erfolgt die Bestimmung der zeitabhängigen Entmagnetisierung $\Delta J^{\text{t.d.}} = J^B - J^C = 0.03 \text{ T}$ über eine Dauer von 3 min = 180 s, wodurch der Wert der Viskosität bestimmt werden kann. Hieraus ergibt sich für Zyklus 1 als grobe Näherung:

$$S_v(\chi_{\text{ext}}^{\text{irr}}) = \frac{\frac{\Delta J(S)}{\ln(\frac{t}{t_0})}}{\frac{\Delta J(\chi)}{\Delta H_{\text{ext}}}} = \frac{\left(\frac{J_{30} - J_2}{\ln(\frac{t_{30} - t_2}{t_2})}\right)}{\left(\frac{J_1 - J_2}{H_1 - H_2}\right)} = 6.9 \text{ kA/m}$$

3.2.2 Konzept 2: Rotierende Probe

Zur umfassenden Charakterisierung magnetischer Werkstoffe und Komponenten ist der kombinierte Einsatz integraler und lokaler Messmethoden erforderlich. Während herkömmliche Verfahren wie der Field-Mapper ausschließlich lokale Streufelder ohne globalen Zusammenhang erfassen, beschränken sich Systeme wie die Helmholtz-Messspule oder der Hysteresegraph auf integrale Messgrößen und lassen dabei lokale Feldverteilungen unberücksichtigt. Bisher existiert kein etabliertes Verfahren, das eine automatisierte Kombination folgender Aspekte in sich vereint:

- Integrale Magnetisierungsmessung
- Lokale Streufelderfassung
- Belastung unter definierten Feld-, Zeit- und Temperaturbedingungen
- Hohe Langzeitstabilität bei konstanten externen Feldern
- Dynamische Probenrotation für realitätsnahe Feldverteilungen
- Mechanische Drehmomentmessung

Während das Prüfstandskonzept 1 bereits eine Vielzahl dieser Anforderungen in Form eines universell einsetzbaren Messsystems adressiert, erweitert Prüfstandskonzept 2 diese Zielsetzung um eine dynamische Komponente: Durch den Einsatz einer rotierenden Probenscheibe, mit der die Probe durch das externe Feld geführt wird, entsteht eine realitätsnahe Feldverteilung, wie sie im Luftspalt eines Elektromotors auftreten kann. Das Konzept ermöglicht eine in-situ Erfassung lokaler Streufeldverteilungen (Field-Mapping), die den durch das externe Gegenfeld resultierenden Magnetisierungszustand der Probe abbilden. Die daraus resultierenden integralen Änderungen im Magnetisierungszustand der Probe werden synchron durch eine Helmholtz-Messspulenmessung erfasst.

Durch diese Kombination lassen sich sowohl lokale Streufeldeffekte als auch integrale Magnetisierungsänderungen unter anwendungsnahen Bedingungen untersuchen. Darüber hinaus erlaubt die Integration eines Drehmomentsensors die mechanische Erfassung magnetischer Wechselwirkungen, die durch das Zusammenspiel zwischen dem extern erzeugten Entmagnetisierungsfeld und dem magnetischen Moment der Probe entstehen.

3.2.2.1 Aufbau

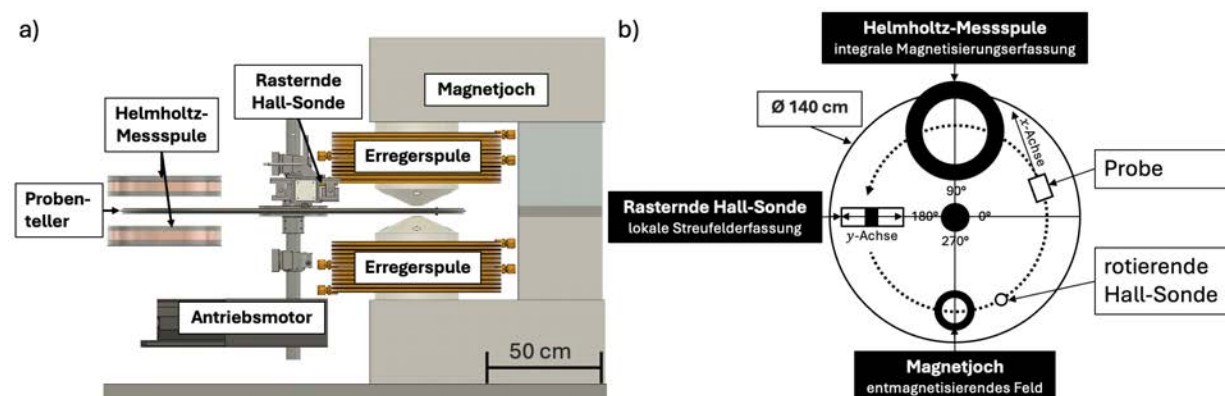


Abb. 3.10: Schematischer Aufbau von Konzept 2 (Rotierende Probe). a) Gesamttaufbau bestehend aus Magnetjoch mit Erregerspulen, Proben-teller mit Antriebsmotor, Helmholtz-Messspule und rasternder Hall-Sonde. b) Probenscheibe bestehend aus der Probe mit integrierter Heizeinheit und einer auf der Scheibe montierten Hall-Sonde (rotierende Hall-Sonde) zur Erfassung des entmagnetisierenden Feldes des Elektromagneten. Während einer Umdrehung durchläuft die Probe die Helmholtz-Messspule zur integralen Magnetisierungserfassung, die rasternde Hall-Sonde zur lokalen Streufelderfassung sowie den Luftspalt des Magnetjochs mit entmagnetisierendem Feld. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3.10 schematisch als Seitenansicht (Abb. 3.1a) und als Aufsicht auf den Probenhalter (Abb. 3.1b) dargestellt. Er gliedert sich in drei funktionale Einheiten: die Magnetfelderregung (Abschnitt 3.2.2.1.1), die Probeneinheit (Abschnitt 3.2.2.1.2) sowie die Mess- und Regelungstechniken (Abschnitt 3.2.2.1.3). Die Mess- und Regelungstechniken bestehen aus der integralen Magnetisierungsmessung, der lokalen Streufelderfassung, der Entmagnetisierungsfeldmessung und der Drehmomenterfassung.

3.2.2.1.1 Magnetfelderregung

Die Magnetfelderregung besteht aus einem Elektromagneten, der sich aus einem Magnetjoch mit zwei Erregerspulen sowie einer Stromquelle zusammensetzt. Das Joch ist aus massivem Stahl (C45) gefertigt, besitzt eine Sättigungspolarisation von ca. 2.3 T, ist 75 cm hoch, 17 cm breit und tief und verfügt über einen Luftspalt von 25 mm, wie in Abb. 3.11a dargestellt. Die konstruktive Auslegung erfolgte simulationsgestützt mit dem Ziel, einen möglichst hohen Magnetfluss im Luftspalt zu erreichen. Daher wurde das Joch besonders massiv dimensioniert, um lokale magnetische Sättigung zu vermeiden und dem Magnetfluss eine ausreichende Querschnittsfläche zu gewähren. Abb. 3.11b zeigt die simulierte Flussdichteverteilung bei einem Spulenstrom von 300 A. Dabei wird im Luftspalt eine Flussdichte von etwa 2.34 T erreicht, während die Flussdichte im Joch selbst unterhalb von 1.6 T bleibt.

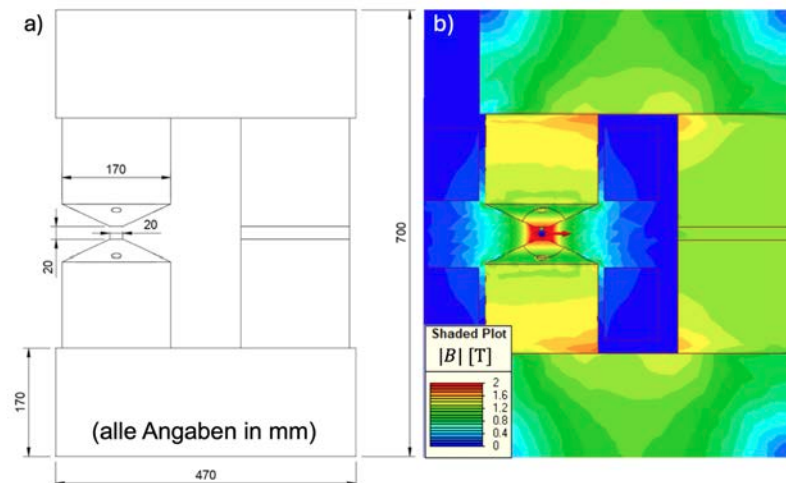


Abb. 3.11: Elektromagnet mit Magnetjoch. a) Technische Skizze des Elektroblechjochs mit Bemaßung. b) Simulierte Flussdichteverteilung bei 300 A Bestromung zur Identifikation möglicher Sättigungsbereiche. Durch die gewählte Geometrie mit breitem Rückschluss von 170 mm zeigen sich kaum Sättigungseffekte mit $B < 1.6$ T im Joch und einer resultierenden Flussdichte von ca. 2.3 T im Luftspalt.

Für die Erzeugung eines konstanten, zeitunabhängigen Magnetfelds dieser Stärke stellt die Realisierung mit herkömmlichen Kupferdrahtwicklungen im begrenzten Bauraum eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund kommen wassergekühlte Hohlleiterspulen zum Einsatz (Abb. 3.12). Diese bestehen aus jeweils zwei Einzelspulen mit je neun Windungen in sechs Lagen. Die Wicklungen bestehen aus kaptonisolierten Kupferhohlleitern ($8.0 \times 8.0 \text{ mm}^2$), mit einer zentralen Kühlbohrung von $\varnothing 4.8 \text{ mm}$. Die Spulen sind mit Glasfaserband bandagiert, elektrisch voneinander isoliert und ermöglichen über das hausinterne Kühlwassersystem eine konstante Wärmeabfuhr. Zur Bestromung der in Reihe geschalteten Erregerspulen ergibt sich ein Spannungsbedarf von 14.05 V bei 200 A beziehungsweise 21 V bei 300 A. Die Stromversorgung erfolgt über eine unipolare Stromquelle vom Typ EA-PSI 15000 (EA-Automatik), die eine maximale Leistung von 15 kW bei einem Spannungsausgang von bis zu 30 V und einem Strom von bis zu 500 A bereitstellt. Über einen analogen Spannungseingang von 0 bis 5 V kann die Signalfrequenz für die Bestromung der Spulen vorgegeben werden.



Abb. 3.12: Wassergekühlte Erregerspulen aus Kupferhohlleitern mit markierten Kühlwasseranschlüssen für Zulauf und Rücklauf über das hausinterne Kühlsystem sowie dem Stromanschluss. Die Wasserkühlung dient der Langzeitkonstanz des erzeugten Magnetfelds.

3.2.2.1.2 Probeneinheit: Probenteller

Die Probeneinheit, schematisch visualisiert in Abb. 3.13a, besteht aus einer Polycarbonatscheibe mit 750 mm Durchmesser und 10 mm Höhe. In die Scheibe sind passgenaue Aussparungen zur Aufnahme der Probe integriert, wie in Abb. 3.13b dargestellt. Als Basis dient eine Heizeinheit aus zwei Messingklötzen, in die jeweils eine 24 V, 50 W-Heizpatrone sowie ein PT100-Temperatursensor eingebettet sind. Die Fixierung der Proben erfolgt über einen variablen Schraubmechanismus, wodurch Proben mit Abmessungen von $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ bis $30 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$ fixiert werden können. Die Spannungsversorgung der Heizpatronen, die Temperaturerfassung über die PT100-Sensoren sowie die Messung des Entmagnetisierungsfeldes im Luftspalt des Jochs (rotierende Hall-Sonde, Abb. 3.13c) erfolgen über einen Schleifring. Die Temperatur der Proben wird über einen PID-Regler gesteuert, sodass sie im Bereich von Raumtemperatur bis ca. 180°C stabil geregelt werden kann. Ergänzend wird die Oberflächentemperatur kontaktlos über einen Infrarot-Temperatursensor (Typ MLX90614) erfasst. Die Rotation der Probeneinheit erfolgt über einen DC-Synchronmotor (Dunkermotoren, BG95) mit integrierter Getriebestufe, der ein Drehmoment von bis zu 22.3 Nm bei einer Drehzahl von bis zu 8 U/s ermöglicht.

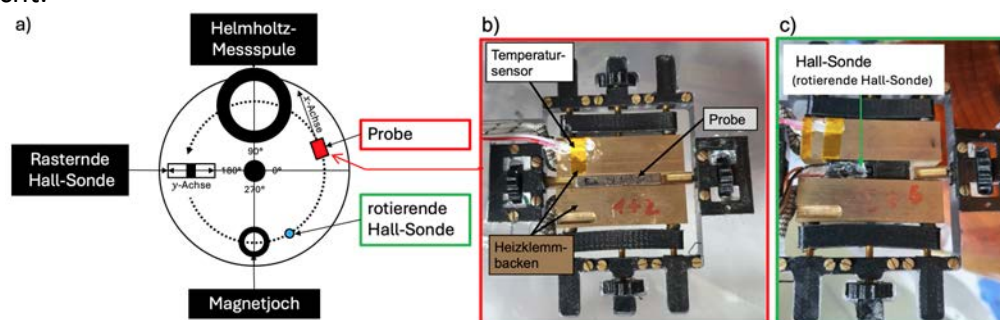


Abb. 3.13: Probenscheibe. a) Schematischer Aufbau mit der Probeneinheit (rot) und der rotierenden Hall-Sonde (grün). b) Heizklemmbacken mit Heizpatronen, in denen die Probe fixiert ist. Die Temperatur wird über PT-100-Temperatursensoren in den Heizklemmbacken erfasst. c) Rotierende Hall-Sonde zur Erfassung des entmagnetisierenden Feldes im Elektromagnet.

3.2.2.1.3 Sensorik und Messsystem

Das Mess- und Steuerungssystem ist in Abb. 3.14 schematisch dargestellt und umfasst alle zentralen Komponenten zur Erfassung magnetischer und mechanischer Größen während des Versuchsablaufs. Das integrale Messsystem besteht aus einer Helmholtz-Messspule, die in Verbindung mit einem Fluxmeter den magnetischen Fluss der Probe erfasst. Zur Bestimmung des externen Magnetfeldes im Luftspalt des Magnetjochs ist auf dem Probenteller eine Hall-Sonde (rotierende Hall-Sonde) positioniert. Das lokale Messsystem (Hall-Scanner mit rasternder Hall-Sonde) basiert auf einer linear bewegten Hall-Sonde, um lokale Streufeldverteilungen über der Probenoberfläche zu erfassen. Die Rotation des Probentellers erfolgt über den Antriebsmotor.

Zur Erfassung des mechanischen Drehmoments ist zwischen Antriebsmotor und Probeneinheit eine Drehmomentmesswelle integriert.

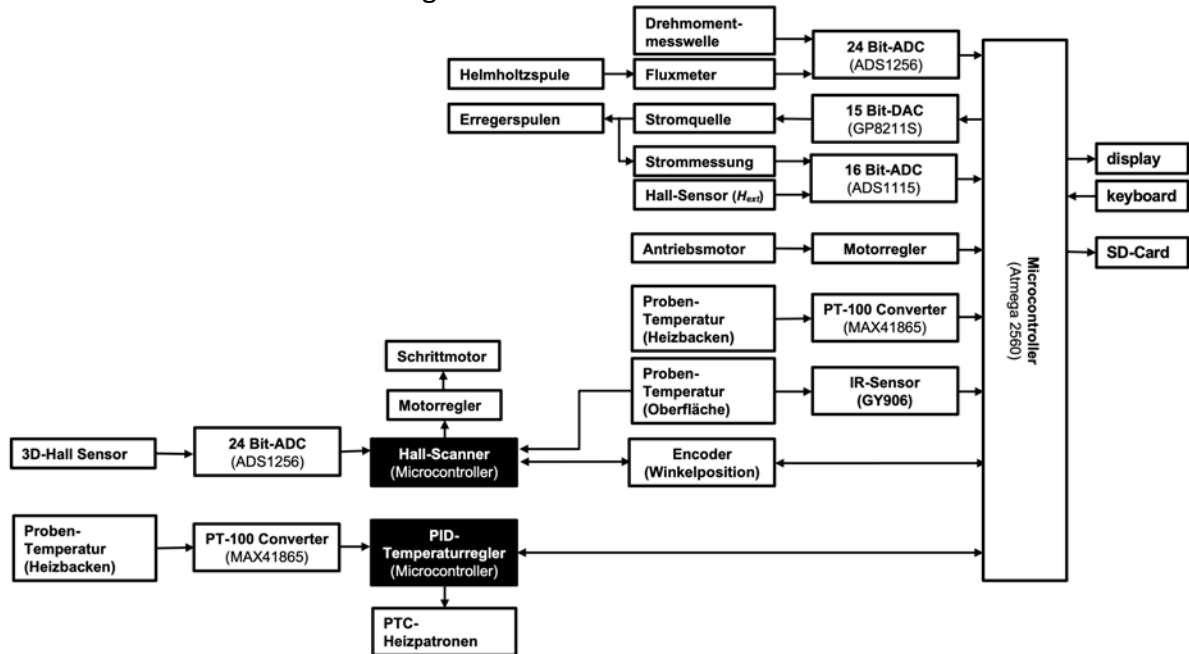


Abb. 3.14: Prinzip des Mess- und Steuerungssystems von Konzept 2 (Rotierende Probe). Neben der Standard-Messkette über ADC zur Erfassung der integralen Probenmagnetisierung mittels Helmholtz-Messspule und Fluxmeter sowie der Messung des entmagnetisierenden Feldes über eine Hall-Sonde wird auch das Drehmoment der Drehmomentmesswelle erfasst. Der Stromverstärker zur Ansteuerung des Elektromagneten wird über das DAC angesteuert, der Motorregler des Antriebsmotors über Relais geschaltet. Selbstständige Regler (PID-Temperaturregler, Hall-Scanner) sind zusätzlich mit dem Hauptmikrocontroller verbunden.

Zur integralen Erfassung der von der Probe ausgehenden Magnetisierung werden zwei Messspulen mit jeweils 1500 Windungen in Helmholtz-Messspulenordnung eingesetzt wie in Abb. 3.15a dargestellt.

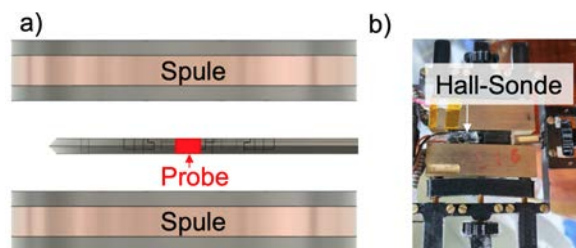


Abb. 3.15: Integrales Messsystem von Konzept 2. a) Helmholtz-Messspule mit markierter Probe (rot) für die integrale Magnetisierungserfassung, b) rotierende Hall-Sonde auf der Probenscheibe zur Erfassung des externen Feldes.

Der mittlere Wicklungsdurchmesser beträgt 170 mm, woraus sich ein vertikaler mittlerer Spulenabstand von 85 mm ergibt. Auf Basis dieser Geometrie resultiert eine Spulenkonstante von $k = 0.0156 \text{ Vs/A}$. Die Probe rotiert horizontal durch das Spulenpaar, wobei die dabei induzierte Spannung vom Fluxmeter erfasst und kontinuierlich zum magnetischen Fluss integriert wird. Dieser wird winkelaufgelöst als Funktion des Rotationswinkels aufgezeichnet (vgl. Abb. 3.16a). Die Kommunikation zwischen Fluxmeter und Mess- und Steuersystem erfolgt über analoge Ein- und Ausgangssignale, mit denen das Fluxmeter zurückgesetzt (Reset), drift-kompensiert und seine Messbereitschaft übertragen wird. Das analoge Ausgangssignal des Fluxmeters, das den magnetischen Fluss repräsentiert, wird anschließend über den ADS1256 digitalisiert.

Zur Erfassung des entmagnetisierenden Feldes im Luftspalt des Elektromagneten wird eine Hall-Sonde (Typ CYSJ362A, Messbereich $\pm 3 \text{ T}$ [140]) auf dem Probensteller installiert wie in Abb. 3.15b dargestellt. Die vom Sensor ausgegebene Spannung ist proportional zur magnetischen Flussdichte und wird über den ADS1115 digitalisiert. Sowohl der integrierte magnetische Fluss

als auch die vom Hall-Sensor erfasste Flussdichte werden winkelabhängig relativ zur jeweiligen Startmesszeit aufgenommen, wie in Abb. 3.16 gezeigt. Für die Auswertung des magnetischen Flusses werden zwei unterschiedliche Winkelpositionen (220° und 240° (Abb. 3.16a)) herangezogen, um systematische Fehler durch Drift oder Nullpunktverschiebung des Fluxmeters zu kompensieren. Zur Bestimmung des entmagnetisierenden Feldes B_{ext} , basierend auf der Flussdichte B im Luftspalt des Elektromagneten, wird bei einem Winkel von 158° ein Mittelwert aus fünf Messwerten gebildet (Abb. 3.16b).

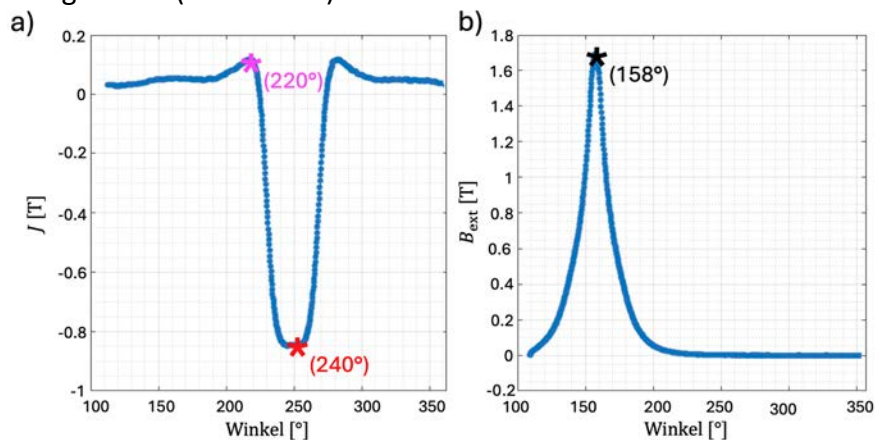


Abb. 3.16: Messgrößenverlauf als Funktion des Rotationswinkels. a) Verlauf der Probenpolarisation aus dem umgewandelten Fluxmetersignal der in der Helmholtz-Messspule induzierten Spannung. Basierend auf der winkelabhängigen Auswertung wird die Differenz von $J(240^\circ)$ und $J(220^\circ)$ bestimmt und als resultierender Polarisationswert J verwendet. b) Darstellung des Messverlaufs der magnetischen Flussdichte B der rotierenden Hall-Sonde im externen Feld. Basierend auf der Mittelwertbildung aus fünf Messwerten bei $B(158^\circ)$ wird die Intensität des externen Feldes bestimmt.

Lokale Messeinheit

Die lokale Messeinheit zur Erfassung von Field Maps basiert auf einer linear bewegten 3D-Hall-Sonde. Hierfür wird die 3D-Hall-Sonde (SENIS Eval-Kit mit analogen B_x -, B_y - und B_z -Ausgängen [141]) mittels eines Schrittmotors und einer Linearführung entlang der y -Achse bewegt (Abb. 3.17). Die x -Achse entspricht dem Rotationswinkel der Probe, welcher über einen Encoder mit 1024 Stufen erfasst wird. Die y -Position ergibt sich aus der linearen Bewegung der Hall-Sonde in y -Richtung nach jeder Umdrehung. Während der Messung bleibt die mechanische z -Achse im Abstand von ca. 5 mm über der Probenoberfläche fixiert. Das Messsignal entlang der z -Achse entspricht der z -Komponente des Streufeldvektors B_z der Hall-Sonde. Abb. 3.18 zeigt den Verlauf der B_z -Komponente über eine vollständige Umdrehung (360°) der Probe. Die Komponenten B_x , B_y und B_z werden über den ADS1256 erfasst. Zusätzlich werden das Encodersignal (Winkelposition) und die Probenoberfläche, erfasst mit einem Infrarot-Tempersensor (MLX90614), simultan aufgezeichnet.

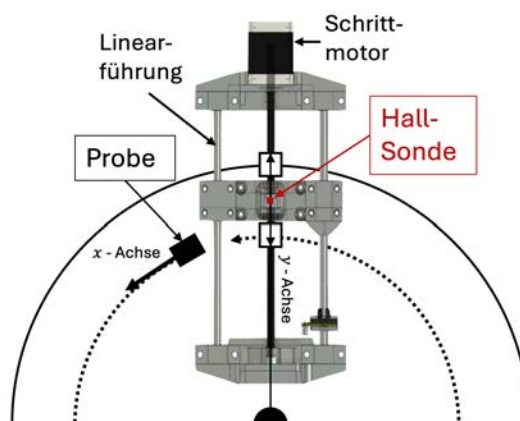


Abb. 3.17: Schematische Darstellung der lokalen Messeinheit (rasternde Hall-Sonde). Die Hall-Sonde wird über eine Linearführung mit Spindelantrieb (Schrittmotor) entlang der y -Achse verschoben, während die Probe um die x -Achse rotiert, wodurch ein $B(x,y)$ -Raster zur positionsabhängigen Streufelderfassung entsteht.

Messprozedur

Abb. 3.18 zeigt den Verlauf einer Umdrehung der Probe, bei der das Maximum des entmagnetisierenden Felds ($-B_{\text{ext}}$) des Jochs bei etwa 160° auftritt, während die Messung lokal durch die rasternde Hall-Sonde bei 200° (Zentrum) und integral durch die Helmholtz-Messspule im Bereich um 240° (Zentrum) erfolgt. Nach jedem Feldkontakt im Joch kehrt das Feld im Probeninneren zum eigenen Selbstentmagnetisierungsfeld zurück, weshalb nur am Arbeitspunkt die irreversiblen Änderungen erfasst werden können.

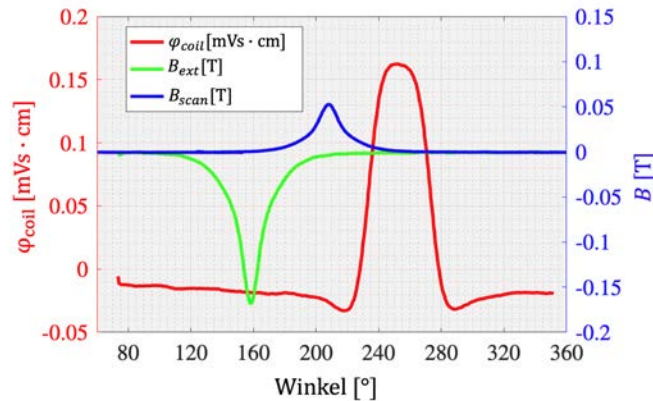


Abb. 3.18: Messsignalverlauf während einer Probenumdrehung. Während der Rotation werden das externe Feld B_{ext} mittels rotierender Hall-Sonde (grün), die lokalen Streufelder B_{scan} über die rasternde Hall-Sonde (blau) sowie die integrale Magnetisierung über den magnetischen Fluss Φ_{coil} aus dem induzierten Spannungssignal der Helmholtz-Messspule (rot) erfasst.

Mechanische Messeinheit

Die mechanische Messeinheit besteht aus einer Drehmomentmesswelle (KTR Dataflex-16/50 [142]), die zwischen dem Antriebsmotor und der Probeneinheit positioniert ist (Abb. 3.19a).

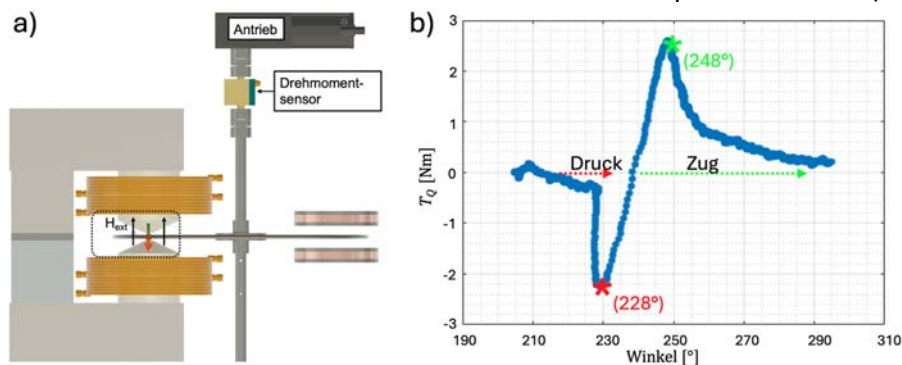


Abb. 3.19: a) Mechanische Messeinheit mit Antrieb (Motor) und Abtrieb (Permanentmagnetprobe im externen Feld des Magnetjochs). Im Zentrum befindet sich der Drehmomentensensor, der das durch magnetische Wechselwirkung zwischen Probenmagnetisierung und externem Feld des Magnetjochs erzeugte Drehmoment erfasst. b) Winkelabhängige Drehmomentmessung eines Permanentmagneten (N52) im externen Feld des Magnetjochs. Das Drehmoment T_Q wird als Funktion des Rotationswinkels dargestellt; der Nulldurchgang liegt bei etwa 240° . Die negative Auslenkung mit Minimum bei 228° entspricht einer Druckbelastung, die positive Auslenkung mit Maximum bei 248° einer Zugbelastung.

Die Wechselwirkung zwischen dem externen Magnetfeld und der Magnetisierung der Probe erzeugt in Verbindung mit der Probenrotation durch den Antriebsmotor ein Drehmoment, das über die Messwelle erfasst wird. Hierfür besteht die Drehmomentmesswelle aus einem Verformungskörper, der mit Dehnmessstreifen (DMS) ausgestattet ist. Dieser Verformungskörper ist so ausgelegt, dass die maximal zu erwartenden Momente (hier von bis zu 50 Nm) im reversiblen Bereich (Hookesche Gerade) liegen, sodass keine irreversible Verformung zu erwarten ist. Über die DMS wird der mit zunehmender Torsionskraft abnehmende Durchmesser des Verformungskörpers in Form eines sich ändernden Widerstands messbar, der induktiv an die Auswerteeinheit übertragen wird [143]. Während der Rotation ändert sich die Orientierung der Probe relativ zum Feld, wodurch das Drehmoment periodisch sein Vorzeichen wechselt. Das analoge Ausgangssignal des Drehmomentsensors mit einem Messbereich von ± 5 V, entspre-

chend ± 50 Nm, wird zusammen mit dem Winkelsignal über ein ADS1256 erfasst und gespeichert. Abb. 3.19b zeigt den Drehmomentverlauf eines Felddurchgangs mit markierten Winkelpositionen der Probe. Die Phase der Abstoßung tritt bei einer Winkelposition von 228° auf, die Phase der Anziehung bei 248° .

3.2.2.2 Messprogramme

Die folgenden Messprogramme bilden die Grundlage für die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse von Konzept 2.

3.2.2.2.1 Feldrampe zur Entmagnetisierungskurvenbestimmung

Da die Probe im Gegensatz zu Konzept 1 nicht im externen Feld des Magnetjochs fixiert ist, sondern zwischen dem entmagnetisierenden Feld des Magnetjochs und der Magnetisierungsmessung in der Helmholtz-Messspule rotiert, kann die Magnetisierung unter angelegter Feldbelastung nicht erfasst werden. Es lassen sich daher ausschließlich irreversible Magnetisierungsänderungen von J bei $H_{\text{ext}} = 0$ bestimmen. Der Messablauf besteht aus einer Feldbelastung $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ im Magnetjoch und einer anschließenden Magnetisierungsmessung mit der Helmholtz-Messspule außerhalb des externen Feldes bei $H_{\text{ext}} = 0$. Hierzu wird pro Umdrehung eine ansteigende externe Feldstärke H_{ext} appliziert, wie in Abb. 3.20a als $H_{\text{ext}}(t)$ dargestellt. Die resultierende $J(H)$ -Kurve (Abb. 3.20b) stellt auf der y -Achse die Polarisation $J(H_{\text{ext}} = 0)$ und auf der x -Achse das zuvor erfahrene maximale externe entmagnetisierende Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ dar und wird als $J(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$ angegeben.

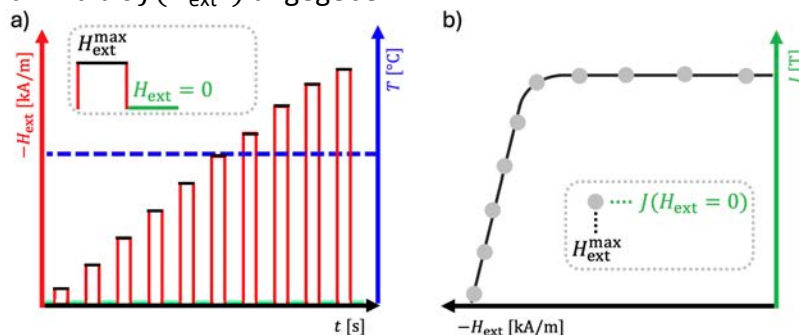


Abb. 3.20: Schematischer Ablauf zur Erfassung von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven. a) $H_{\text{ext}}(t)$ -Verlauf: Aufgrund des Aufbaus rotiert die Probe zunächst durch das externe Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ des Magnetjochs (schwarze Markierung) und anschließend ohne externes Feld durch die Helmholtz-Messspule, in der die integrale Magnetisierung als Polarisation J bei $H_{\text{ext}} = 0$ bestimmt wird (grüne Markierung). Die resultierende $J(H_{\text{ext}})$ -Kurve in b) besteht aus Messpunkten bei $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ auf der Feldachse und $J(H_{\text{ext}} = 0)$ auf der Polarisationsachse.

3.2.2.2.2 Feldrampe für feldabhängiges Field-Mapping

Für die Erstellung von feldabhängigen Field Maps entlang der Entmagnetisierungskurve sind ein entmagnetisierendes Feld, sowie die Erfassung der jeweiligen Streufeldverteilungen erforderlich. Ein vollständiger Messzyklus umfasst 31 Umdrehungen der Probe. In der ersten Umdrehung wird sie einem externen Magnetfeld H_{ext} ausgesetzt, wobei die integrale Probenpolarisation und das Entmagnetisierungsfeld gemessen werden. Anschließend wird das externe Feld abgeschaltet, um Nachwirkungseffekte zu vermeiden. Der eigentliche Scan erfolgt über die folgenden 30 Umdrehungen: Dabei entspricht die Rotation der Probe der x -Achse (Rotationswinkel). Nach jeder Umdrehung wird die Hall-Sonde linear um einen festen Schritt von ca. 0.2 mm entlang der y -Achse verschoben. So entsteht pro Magnetisierungszustand durch 30 Umdrehungen (x -Rotationswinkel) mit jeweils 30 y -Positionen ein rasterförmiges Streufeldbild ($B_z(x, y)$, siehe Abb. 3.21b). Nach Abschluss eines Messzyklus wird ein Reset des Fluxmeters durchgeführt, die Hall-Sonde bei $y = 0$ (Startvorgang) positioniert, bevor der nächste Zyklus mit einem höheren externen Feld beginnt, wie in Abb. 3.21a schematisch dargestellt.

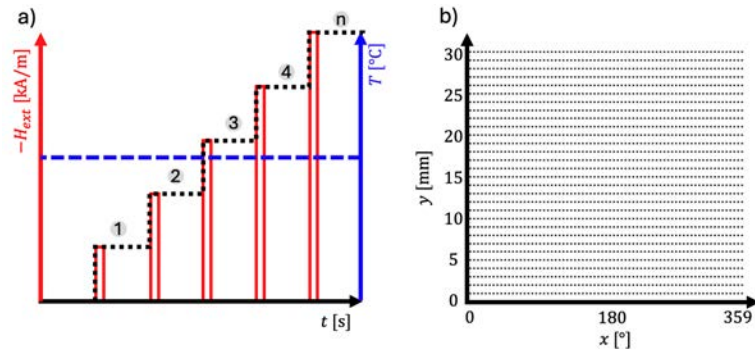


Abb. 3.21: a) Schematischer Ablauf der Streufeldrasterung bestehend aus insgesamt 31 Umdrehungen. In der ersten Umdrehung wird die Probe unter angelegtem externem Feld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ entmagnetisiert. Anschließend wird das Feld abgeschaltet, sodass in der zweiten Umdrehung die integrale Magnetisierung J bei $H_{\text{ext}} = 0$ erfasst und als $J(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$ ausgegeben wird. Die lokale Streufeldverteilung $B_z(x, y)$ wird ab der zweiten bis zur 31. Umdrehung ohne angelegtes Feld erfasst. Dabei entspricht die Rotationsachse der x -Achse, und die Hall-Sonde wird pro Umdrehung linear in y -Richtung verschoben, wodurch ein Streufeldbild $B_z(x, y)$ wie in b) als x, y -Raster visualisiert.

3.2.2.2.3 Drehmomentbestimmung

Das magnetische Moment eines Permanentmagneten erfährt sowohl eine Kraft in Wechselwirkung mit magnetischen Materialien als auch mit dem externen Magnetfeld. Wird die Probe rotiert, muss der Antriebsmotor ein Drehmoment aufbringen. Dieses bildet die Grundlage für das in Konzept 2 beschriebene Messprinzip: Der Elektromotor sorgt für die Rotation der Probe, während der Elektromagnet das externe Magnetfeld erzeugt (vgl. Abb. 3.19). Änderungen der Magnetisierung unter konstantem externem Feld lassen sich aus der Variation des benötigten Drehmoments ableiten. Hierzu wird das Drehmomentsignal positionsaufgelöst über eine vollständige Probenrotation im Feld analysiert. Der Messablauf zur Bestimmung der Magnetisierungsänderung mittels Drehmomentenerfassung ist zyklusabhängig in zwei Umdrehungen unterteilt (Abb. 3.22).

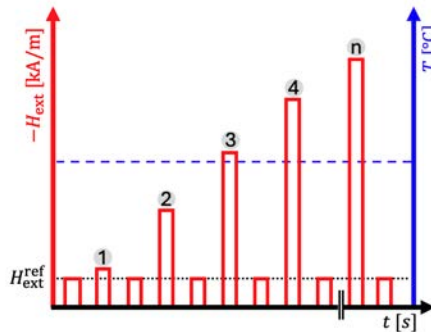


Abb. 3.22: Schematischer Ablauf des Entmagnetisierungsprozesses zur Erfassung des Drehmomentverlaufs mit zyklischem Wechsel zwischen Umdrehungen im entmagnetisierenden Feld und im konstanten Referenzfeld ($H_{\text{ext}}^{\text{ref}} = -200 \text{ kA/m}$). Nach jeder Umdrehung im entmagnetisierenden Feld wird die Feldstärke $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ erhöht, gefolgt von einer Umdrehung im Referenzfeld $H_{\text{ext}}^{\text{ref}}$. Dadurch kann die differentielle Abnahme des Drehmoments $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ infolge der abnehmenden Probenmagnetisierung über mehrere Zyklen, hier 1 bis 4, erfasst werden.

In der ersten Umdrehung nach einem Feldanstieg rotiert die Probe im konstanten externen Magnetfeld H_{ext} . Das aufgezeichnete Drehmomentsignal erfasst die feldabhängige Wechselwirkung zwischen äußerem Magnetfeld und magnetischem Moment der Probe $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{max}})$. In der zweiten Umdrehung wird ein konstantes Referenzfeld von $H_{\text{ext}}^{\text{ref}} = -200 \text{ kA/m}$ angelegt, das Proben oberhalb des Knipunkts im linearen Bereich der Magnetisierungskurve der betrachteten Proben liegt und damit den Magnetisierungszustand der Probe nicht verändert. Das dabei gemessene Signal $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ dient der quantitativen Erfassung des magnetischen Moments unter feldstabilen Bedingungen. Drehmomentänderungen können so differentiell der Probenmagnetisierung zugeordnet werden.

3.2.3 Konzepte 3 und 4: Offene Magnetkreismessungen mit Probentemperierung

Zur Analyse der Langzeitstabilität verschiedener Magnetmaterialien unter dem Einfluss des Selbstentmagnetisierungsfeldes wurden die Prüfstandskonzepte 3 und 4 auf Basis einer automatisierten Helmholtz-Messspulenmessung mit temperierbarer Probeneinheit entwickelt. Ziel ist die hochpräzise Erfassung der integralen Magnetisierung im magnetisch offenen Kreis über längere Zeiträume sowohl bei konstanten als auch unter variierenden Temperaturen. Im Gegensatz zu Prüfstandskonzept 2, bei dem durch die Wechselwirkung des Probenfeldes mit ferromagnetischen Bauteilen wie dem Stahljoch externe Einflussgrößen ($H_{\text{ext}} \neq 0$) nicht vollständig ausgeschlossen werden können, erfolgen die Messungen in den Konzepten 3 und 4 im vollständig offenen Kreis. Durch den Verzicht auf derartige Störeinflüsse wird eine unbeeinflusste Erfassung der Selbstentmagnetisierung ermöglicht. Die Helmholtz-Messspulenordnung erlaubt eine integrale Messung der durchschnittlichen Magnetisierung der gesamten Probe. In Konzept 3 rotiert die Probe um ihre Magnetisierungsachse, wodurch eine sinusförmige Spannungsinduktion erzeugt wird [104]. Dies reduziert Driftabweichungen des Fluxmeters und verbessert Reproduzierbarkeit sowie Langzeitstabilität der Messergebnisse. Das Verfahren eignet sich daher besonders zur präzisen Untersuchung viskoser Relaxationsprozesse über lange Zeiträume. In Konzept 4 hingegen wird die Probe translatorisch durch die Spule bewegt, wobei die Bewegungsrichtung senkrecht zur Magnetisierungsachse liegt. Dies ermöglicht die Kombination integraler Magnetisierungsmessung mit lokaler Streufelderfassung. Da Konzept 3 ausschließlich integrale Messwerte liefert, ist für eine orts aufgelöste Analyse der Selbstentmagnetisierung und ihrer Temperaturabhängigkeit eine ergänzende lokale Messmethode erforderlich. Konventionelle Verfahren wie Field-Mapping [31] bieten jedoch keine definierte Temperaturregelung während der Messung und sind meist auf Raumtemperatur beschränkt. Zur Erweiterung der methodischen Aussagekraft wurde daher Konzept 4 als Hybridansatz entwickelt, der eine temperierte Field-Mapping-Messung mit einer integralen Helmholtz-Messspulenmessung kombiniert.

Die Anforderungen an die Prüfstände umfassen:

- Langzeitstabilität bei konstanten und variierenden Temperaturen
- Aufnahme von Proben mit realitätsnahen Geometrien
- Offener Magnetkreis
- integrale Messung der Magnetisierung
- lokale Messung von Feldverteilungen (Konzept 4)

3.2.3.1 Konzept 3: Momentmessspule mit Probentemperierung

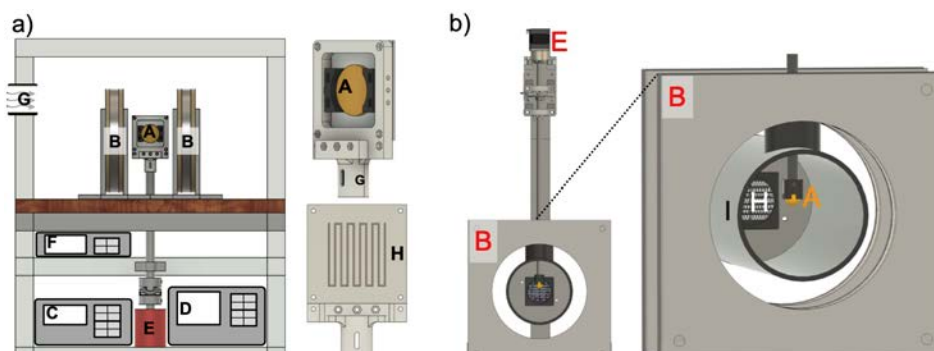


Abb. 3.23: Schematischer Aufbau von Konzept 3 (Momentmessspule mit Probentemperierung). a) Aufbau mit direkter Probentemperierung für Permanentmagnetproben in Quaderform. b) Aufbau mit Hochtemperatur-Bauraumtemperierung für Spezialprobengeometrien wie Kugeln oder Linsen. Beide Aufbauten bestehen aus: (A) Probe, (B) Helmholtz-Messspule, (C) Fluxmeter, (D) Mess- und Kontrolleinheit, (E) Schrittmotor, (F) Temperaturregler, sowie (G) Bauraumtemperierung bzw. (H) Heizeinheit. Adaptiert aus Lanz et al. [144] [145].

Konzept 3 ermöglicht präzise Langzeitmessungen an Proben mit Abmessungen von bis zu $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$ bei Temperaturen von Raumtemperatur bis $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Dabei rotiert die temperierbare Probeneinheit gemeinsam mit der Probe um die Magnetisierungsachse, während die induzierte Spannung der Probe durch ein Fluxmeter erfasst und positionsabhängig aufgezeichnet wird. Die Temperierung erfolgt über eine direkte Heizeinheit, deren Heizfläche im Kontakt zur Probe steht (Abb. 3.23a), während bei Raumtemperaturmessungen eine Bauraumtemperierung zum Einsatz kommt. Für Proben komplexer Geometrie, insbesondere ohne ebene Oberflächen wie Kugeln, steht zudem eine Heizkammer zur Verfügung, die Temperaturen bis etwa $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ermöglicht (Abb. 3.23b).

3.2.3.1.1 Aufbau

Der Aufbau von Konzept 3 umfasst die temperierbare Probeneinheit mit Heizeinheit, die integrale Magnetisierungsmessung sowie den Antriebsmotor. Die Probeneinheit besteht aus einem Kunststoffrahmen mit einer 2 mm dicken Aluminiumplatte, auf der eine Heizfolie (48 W, 12 V) aufgeklebt ist. Die Probe wird gegenüber dem Heizelement über Spannklotze fixiert. Drei PT-100-Sensoren erfassen die Heizplattentemperatur, die im Bereich von Raumtemperatur bis $260 \text{ }^\circ\text{C}$ geregelt werden kann. Zur Minimierung von Umgebungseinflüssen bei Messungen nahe Raumtemperatur ist der Messraum mit 20 mm Styroporplatten isoliert und wird über einen PTC-Heizlüfter temperiert. Das Temperaturregelsystem für die Bauraumtemperierung ist in Abb. 3.24b schematisch dargestellt und steuert die Einlasstemperatur T_1 direkt über PID-Regelung, wobei Änderungen der Messraumtemperatur T_2 über den differentiellen Anteil (D) ausgeglichen werden. Für Spezialproben wie Kugeln oder Linsenmagnete, die keinen direkten Flächenkontakt erlauben, steht eine zusätzliche Thermokammer aus isoliertem Hochtemperaturkunststoff mit 400 W PTC-Heizlüfter zur Verfügung. Diese erreicht Bauraumtemperaturen von bis zu $140 \text{ }^\circ\text{C}$ und ist vollständig in das Heiz- und Regelsystem integriert. Die Rotation der Probeneinheit erfolgt über einen Schrittmotor mit 4096 Schritten pro Umdrehung. Die integrale Magnetisierung wird positionsabhängig durch eine Helmholtz-Messspule (Magnet-Physik, MS210) erfasst, das Fluxmetersignal (Fluxmeter: EF-14) über den ADS1256 digitalisiert. Schrittmotorsteuerung, Flusserfassung und Kommunikation mit dem PID-Regler erfolgen zentral über das Mess- und Regelsystem (vgl. Abb. 3.24a).

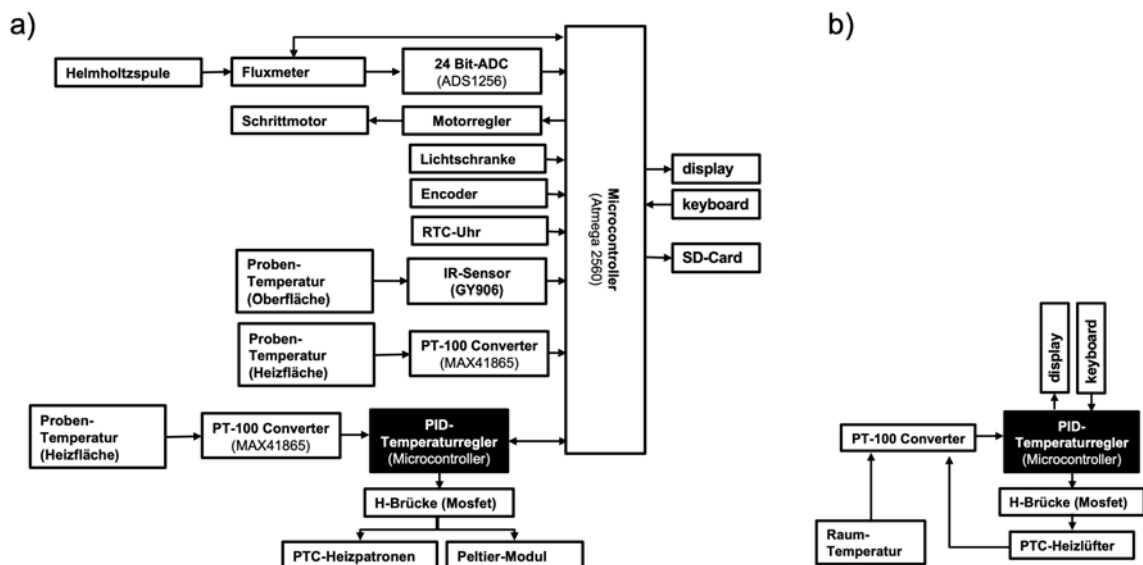


Abb. 3.24: Prinzip des Mess- und Steuerungssystems von Konzept 3 (Momentmessspule mit Probentemperierung). a) Gesamtübersicht. b) Bauraumtemperierung zur Gewährleistung einer konstanten Messraumtemperatur, insbesondere bei Raumtemperatur-Messungen. Der Aufbau in a) umfasst den Mikrocontroller, der die integrale Magnetisierung über das Fluxmeter über den ADC erfasst, die Temperatur erfasst und den Motorregler ansteuert. Alle Mess- und Prozessdaten werden synchron auf die SD-Karte übertragen. Über die Kommunikation mit dem Temperaturregler werden die Messprogramme gestartet, sobald die Zieltemperatur erreicht ist.

Abb. 3.25 zeigt den Verlauf der umgerechneten magnetischen Polarisation mit 1.5 Umdrehungen in Abhängigkeit vom Rotationswinkel, mit markierten Werten zur diskreten, winkelabhängigen Signalauswertung des Probensignals. Durch die Differenzbildung der Peak-to-Peak-Amplitude $J = (|J(55^\circ)| - |J(170^\circ)|)$ lassen sich Fluxmeter-Offsets sowie Drifts, wie sie bei einer direkten Auslesung (z. B. nur bei $J(170^\circ)$) auftreten können, wirksam kompensieren.

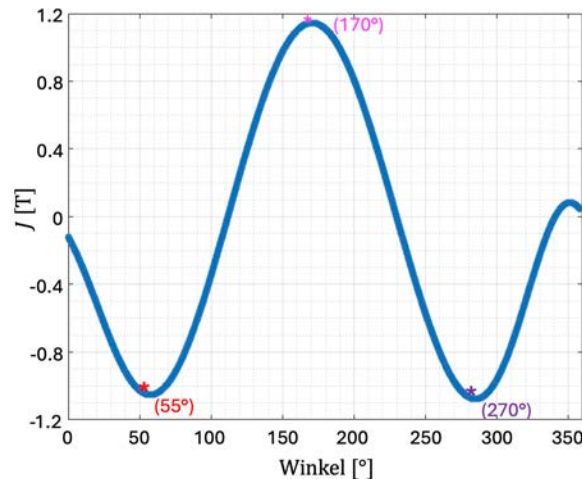


Abb. 3.25: Winkelabhängiger Verlauf des Messsignals während einer vollständigen Umdrehung der Probe in der Helmholtz-Messspule. Die Werte basieren auf der Umrechnung des magnetischen Flusses in die magnetische Polarisation J . Die Polarisation wird als Differenz zwischen Maximum und Minimum bestimmt: $J = J(55^\circ) - J(170^\circ)$, wodurch der Peak-to-Peak-Wert der Probe ermittelt und gleichzeitig Fluxmeter-Offsets sowie Drifts kompensiert werden.

Messprozedur Konzept 3

Die allgemeine Messprozedur umfasst folgende Schritte: Zunächst wird die Probe auf die Zieltemperatur aufgeheizt. Anschließend erfolgt das Drehen und Positionieren der rotierenden Probeneinheit in der definierten Startposition (Winkel 0°). Nach jeder Umdrehung wird das Fluxmeter zurückgesetzt; zusätzlich erfolgt alle 20 Umdrehungen eine Driftkompensation. Danach wird eine Umdrehung unter kontinuierlicher Datenaufzeichnung von magnetischem Fluss, Temperatur und Winkelposition durchgeführt. Anschließend wird die Probeneinheit zurück in die Startposition (Winkel 0°) gedreht, bevor der nächste Messzyklus beginnt.

3.2.3.2 Konzept 4: Momentmessspule mit Scanfunktion und Probentemperaturung

Konzept 4 erweitert Konzept 3 um die Möglichkeit, lokale Streufeldmessungen (Field-Mapping) unter Temperatureinfluss mit einer integralen Magnetisierungsmessung im vollständig offenen Kreis zu kombinieren. Hierfür befindet sich die Probe auf einer Heizeinheit, die zunächst in eine Helmholtz-Messspule verfahren wird (integrale Messung) und anschließend mittels einer beweglichen Hall-Sonde orts aufgelöst vermessen wird (lokale Messung). Der Aufbau gliedert sich in drei zentrale Bereiche: (1) Probeneinheit, (2) Achsenmechanik (x -, y -, z -System) sowie (3) Mess- und Regelungssystem. Die Details dieser Komponenten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.3.2.1 Aufbau

Der Aufbau, dargestellt in Abb. 3.26, besteht aus der Probeneinheit (E) mit der Probe (rote Markierung), die auf der Heizeinheit (F) platziert ist. Die lokale Streufeldverteilung wird mit einer in x -Richtung beweglichen Hall-Sonde (A) erfasst, während die Probeneinheit in y -Richtung verfahren wird. Für die globale Magnetisierungsmessung fährt die Probe automatisch entlang der y -Achse in die Helmholtz-Messspule (H).

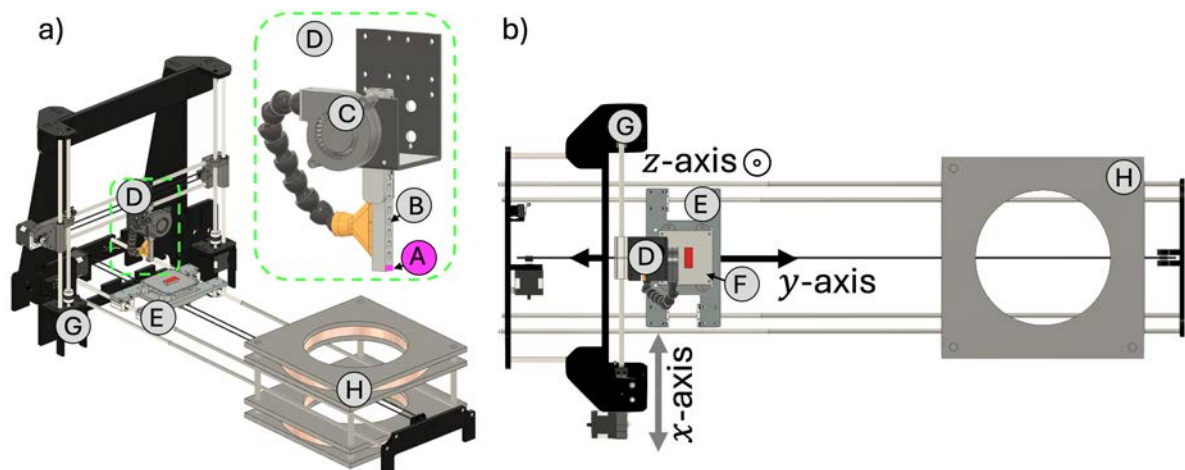


Abb. 3.26: Schematischer Aufbau von Konzept 4 (Momentmessspule mit Scanfunktion und Proben temperierung) mit der Gesamtansicht in a) und Aufsicht in b). Der Aufbau dient zur Erfassung orts aufgelöster magnetischer Streufelder sowie der integralen Probenmagnetisierung und besteht aus: x -, y -, z -Achsentisch (G), der Hallsonden-Einheit (D) und der Proben-Einheit (E) mit der Probe (rote Markierung). Die Aufsicht in b) zeigt die Achsbewegungen: hierfür wird die Probe linear in y -Richtung in die Helmholtz-Messspule (H) für die integrale Magnetisierungsmessung bewegt. Anschließend erfolgt ein Raster-Scan bei konstanter z -Höhe in x - und z -Richtung zur lokalen Felderfassung. Die Hallsonden-Einheit (D) besteht aus einem Aluminiumkörper (B), in dem die Hallsonde (A) installiert und durch einen Lüfter (C) gekühlt wird, sodass die Sondentemperatur beim Überfahren der aufgeheizten Probe durch die Heizeinheit (F) konstant bleibt. Adaptiert aus Lanz et al. [146].

Die Probeneinheit dient sowohl der Fixierung der Probe als auch der Temperierung. Sie besteht wahlweise aus zwei Varianten: Variante A nutzt eine beheizbare Aluminiumplatte mit PTC-Heizelement (48 W, 12 V) und erlaubt eine Temperaturregelung von Raumtemperatur bis 260 °C. Variante B basiert auf einem Peltiermodul, das auf einem Aluminiumkühlkörper mit Radiallüftern montiert ist. Dieses System ermöglicht eine Temperaturregelung zwischen –5 °C und 80 °C. Beide Varianten sind auf einem verfahrbaren Kunststoffträger montiert, der über Gleitlager auf Linearführungen gleitet. Die x -, y -, z -Achsen bestehen aus mehreren Baugruppen. Die x - und z -Achsen sind mit Schrittmotoren und Linearführungen ausgestattet, wobei die z -Achse über Spindelantriebe verfügt. Die y -Achse besteht aus Aluminium-T-Profilen (Länge 1 m), die als Linearführung dienen, und wird vom Probenwagen über einen Schrittmotor entlang der Achse bewegt.

Mess- und Regelungstechnik

Das Messsystem unterscheidet zwischen integraler und lokaler Messung. Für die integrale Magnetisierung wird die Probe entlang der y -Achse in die Helmholtz-Messspule eingefahren. Die induzierte Spannung wird mithilfe des Fluxmeters erfasst und digitalisiert. Da selbst nach einem Reset, Offsets auftreten können, erfolgt die Auswertung durch Mittelwertbildung zweier positionsabhängiger Messpunkte, wie in Abb. 3.27 aufgeführt.

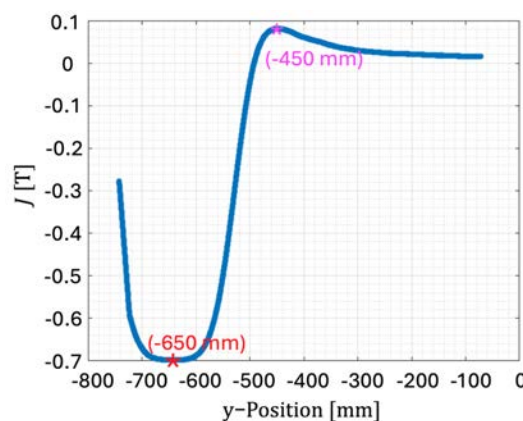


Abb. 3.27: Winkelabhängiger Verlauf des Messsignals während einer linearen Bewegung der Probe in die Helmholtz-Messspule. Die Werte basieren auf der Umrechnung des magnetischen Flusses in die magnetische Polarisation J . Der Polarisationswert wird als Differenz der Peak-to-Peak-Amplitude zwischen $J_{\min} = |J(-650 \text{ mm})|$ und $J_{\max} = |J(-450 \text{ mm})|$ bestimmt.

Für die lokale Streufeldmessung kommt eine Hall-Sonde (CYSJ902, Auflösung: 2 mV/mT [140]) zum Einsatz, die in x - und z -Richtung verfahren wird, während die Probe entlang der y -Achse positioniert ist. Um den Einfluss der von der bis zu 250 °C heißen Probe ausgehenden Wärmestrahlung auf die Hall-Sonde zu minimieren, ist diese wärmeleitend in einen Aluminiumkörper eingebettet, der mit Kühlöchern versehen und aktiv durch einen Lüfter gekühlt ist (Abb. 3.26 (D)). Ein oberhalb der Sonde platzierter Temperatursensor überwacht die Sensortemperatur. Zur zusätzlichen Erfassung der Probenoberflächentemperatur wird ein Infrarot-Temperatursensor (MLX90614 DCI, 5° Optik) verwendet. Sämtliche relevanten Messgrößen, darunter die vom Fluxmeter integrierte Spannung, die lokalen Flussdichtewerte der Hall-Sonde (digitalisiert über ADS1256), sowie die Achspositionen, Zeitstempel und Temperaturen (IR-Sensor und PT100-Temperatursensoren am Heizelement), werden zeitlich korreliert aufgezeichnet, wie schematisch in Abb. 3.28 skizziert. Das resultierende Gesamtsystem ermöglicht eine präzise, orts- und temperaturlaufgelöste Charakterisierung magnetischer Materialien unter kontrollierten thermischen Bedingungen.

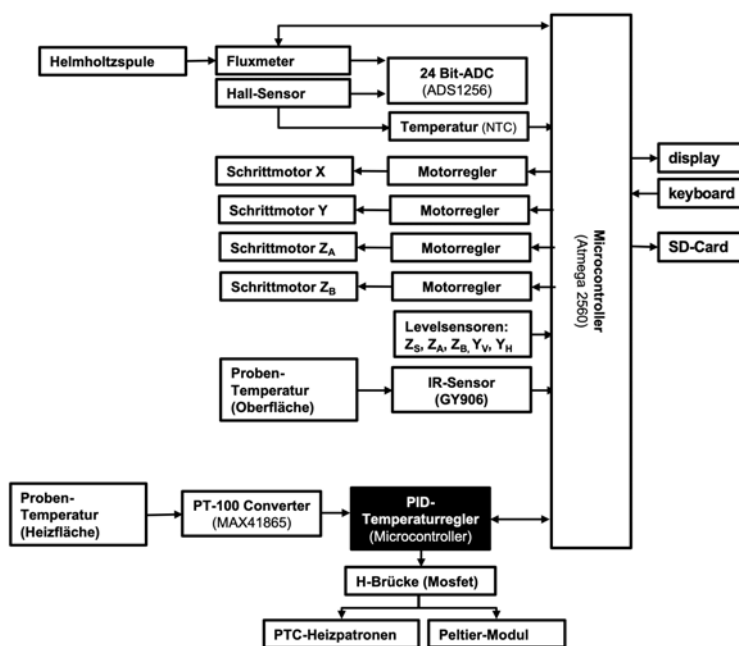


Abb. 3.28: Prinzip des Mess- und Steuerungssystems von Konzept 4 (Momentmessspule mit Scanfunktion und Proben-temperierung). Das System umfasst die Signaldigitalisierung des Helmholtz-Messspulensignals (Fluxmetersignal) und der lokalen Hallsondensignale mittels ADC sowie die Ansteuerung der Schrittmotoren für die x , y , z -Achsen und deren Levelsensoren zur initialen Positionierung. Wie bei Konzept 3 besteht eine direkte Kommunikation mit dem PID-Temperaturregler, der entweder die Heizfläche (für Probenbeheizung) oder das Peltier-Modul (Kühlen und Heizen) ansteuert

Messprozedur Konzept 4

Zu Beginn wird die Probe auf die gewünschte Solltemperatur temperiert. Nach Erreichen der Zieltemperatur wird sie in die Startposition ($y = 0$) verfahren, das Fluxmeter zurückgesetzt und nach jeweils fünf Messvorgängen eine Driftkompensation durchgeführt. Anschließend wird die Probe in die Helmholtz-Messspule verfahren, wobei über das Fluxmeter die integrale Magnetisierung der Probe erfasst wird. Danach wird die Probe in die Ausgangsposition ($y = 0$) zurückgeführt. Zur Offset-Erfassung wird die Hall-Sonde in ihre Referenzposition verfahren, bevor die orts aufgelöste Streufeldmessung über der Probenoberfläche durchgeführt wird. Nach Abschluss der Streufelderfassung kehrt die Probe in die Ausgangsposition zurück und der Ablauf wartet auf die nächste Messsequenz.

3.2.3.3 Messprogramme

Die folgenden Messprogramme bilden die Grundlage für die in Kapitel 5 und 6 dargestellten Ergebnisse der Konzepte 3 und 4.

3.2.3.3.1 Temperatur- und Rücklauffemperaturrampe zur Bestimmung temperaturabhängiger Entmagnetisierungskurven

Die Temperaturrampe (Abb. 3.29) dient der temperaturbasierten Entmagnetisierung der Proben. Die direkte Temperaturrampe (Abb. 3.29a) erfasst die gesamten temperaturbedingten Verluste bei ansteigender Temperatur. Die Recoil-Temperaturrampe (Abb. 3.29b) kühlt die Probe nach jedem Temperaturanstieg wieder auf die Referenztemperatur (Raumtemperatur) ab. Dadurch werden bei der angelegten Temperatur die totalen Verluste, als Summe der reversiblen und irreversiblen Verluste, gemessen, während bei der Referenztemperatur nur die irreversiblen Verluste erfasst werden.

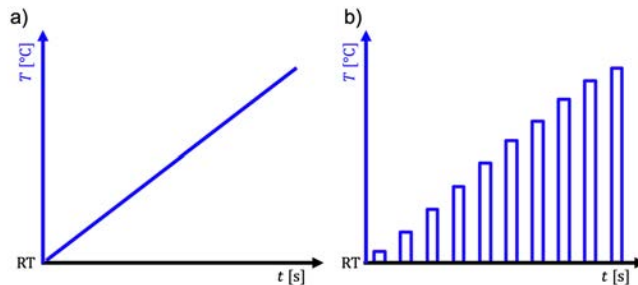


Abb. 3.29: Schematischer Messablauf der Temperaturentmagnetisierungsrampe beginnend bei Raumtemperatur (RT). a) Totale Entmagnetisierungsrampe zur Erfassung reversibler und irreversibler Temperaturänderungen. b) Recoil-Entmagnetisierungsrampe mit abwechselnd ansteigender Proben temperatur und konstanter Referenztemperaturmessung zur Bestimmung irreversibler Polarisationsänderungen.

3.2.3.3.2 Temperaturrampe zur Viskositätsbestimmung

Die Viskositäts-Temperaturrampe dient zur Ermittlung der temperaturabhängigen Nachwirkung (Viskosität). Zur Durchführung wird eine Temperatur-Stufenrampe eingesetzt (Abb. 3.30), bei der die Temperatur über 20 bis 50 Messzyklen konstant bleibt, bevor sie um ΔT erhöht wird.

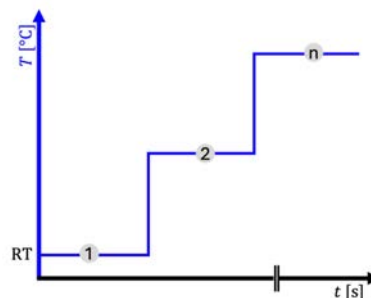


Abb. 3.30: Schematischer Messablauf der Viskositätsrampe. Die Messung erfolgt über eine Stufenfunktion: Die Proben temperatur wird für jeweils 20 Umdrehungen (Messungen) konstant gehalten. Im nächsten Schritt wird die Temperatur erhöht, bevor der folgende Messzyklus (hier 1 bis n dargestellt) beginnt.

3.2.3.3.3 Temperaturrampe zur Erfassung temperaturabhängiger Field Maps (Konzept 4)

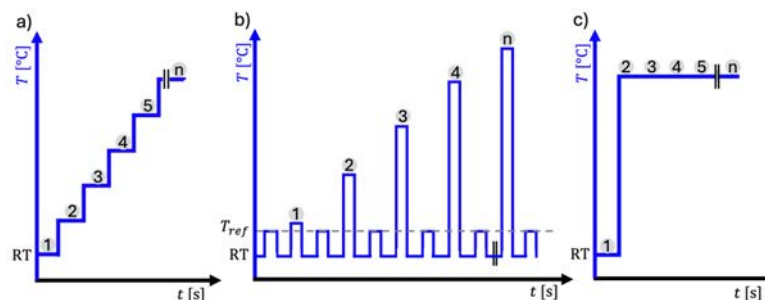


Abb. 3.31: Schematische Darstellung des Messprogramms für temperaturabhängige Field Maps mit markierten Zyklen 1 bis n. a) Stufenrampe zur Erfassung temperaturabhängiger Field Maps. b) Recoil-Temperaturrampe mit abwechselndem Field-Mapping bei T_{ref} und ansteigender Temperatur. c) Konstante Zieltemperatur zur Erfassung zeitabhängiger Streufeldänderungen über mehrere Zyklen.

Für die Erfassung temperaturabhängiger Streufeldvisualisierungen (Field Maps) wird zwischen drei Messzielen unterschieden (Abb. 3.31):

- Zur Erfassung direkter (totaler) temperaturabhängiger Field Maps wird eine Stufenrampe verwendet, bei der die Temperatur pro Zyklus um ein definiertes ΔT erhöht wird.
- Für den Vergleich irreversibler und reversibler temperaturabhängiger Änderungen der Streufeldverteilung wird eine Recoil-Temperaturrampe verwendet, bei der das Field-Mapping abwechselnd zwischen der Referenztemperatur T_{ref} und der um ΔT erhöhten Zyklostemperatur durchgeführt wird.
- Zur Erfassung zeitabhängiger Streufeldänderungen wird nach einer initialen Raumtemperaturmessung auf die Zieltemperatur geheizt, die anschließend über mehrere Zyklen konstant gehalten wird.

3.2.3.3.4 Temperaturrampe zur Bestimmung des temperaturabhängigen Viskositätsparameters (Konzept 3)

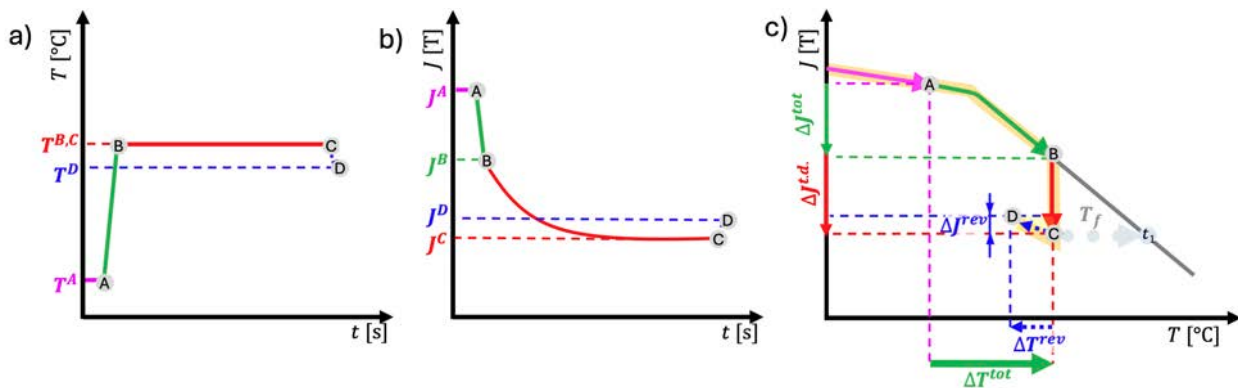


Abb. 3.32: Schematischer Messablauf zur Bestimmung des temperaturbasierten Viskositätsparameters. a) Temperaturvorgabe $T(t)$ als Funktion der Zeit. b) Probenpolarisation $J(t)$ als Resultat auf die Temperaturänderungen. c) Polarisation $J(T)$ in Abhängigkeit von der Temperatur mit markierten Pfaden. Basierend auf dem Temperaturanstieg von T^A (Punkt A) zu T^B (Punkt B) werden die totalen temperaturabhängigen Beiträge $\Delta J^{\text{tot}} / \Delta T^{\text{tot}}$ bestimmt. Bei konstanter Temperatur $T^{B,C}$ werden von J^B (Punkt B) zu J^C (Punkt C) über 20 Minuten die zeitabhängigen Verluste $\Delta J^{\text{t.d.}}$ erfasst, aus denen der Viskositätsparameter S berechnet wird. Im letzten Schritt wird die Temperatur von $T^{B,C}$ um etwa 10 % auf T^D reduziert, um den reversiblen Beitrag $\Delta J^{\text{rev}} / \Delta T^{\text{rev}}$ zu bestimmen.

Das Messprogramm zur Bestimmung des temperaturbasierten magnetischen Viskositätsparameters besteht aus 15 Sequenzen ($n = 1$ bis 15), die jeweils derselben Vier-Schritt-Prozedur folgen (Abb. 3.32):

- Initialphase: Messung von J^A bei der Anfangstemperatur T^A (pink).
- Heizphase: Erwärmung der Probe auf Zieltemperatur $T^{B,C}$, gefolgt von einer Messung bei J^B (grün).
- Konstante Temperaturphase: Bei konstanter Temperatur $T^{B,C}$ erfolgen 50 Einzelmessungen über eine Dauer von ca. 20 min zur Bestimmung der zeitabhängigen Verluste $\Delta J^{\text{t.d.}}$ (rot).
- Reversible Temperaturphase: Die Probe wird auf die reduzierte Temperatur $T^D = 0.9 \cdot T^{B,C}$ abgekühlt für eine abschließende Messung J^D (blau).

Nach jedem Zyklus wird die Zieltemperatur schrittweise um 15 °C erhöht.

Aus der sich ändernden Probenpolarisation, dargestellt in Abb. 3.32 (b, c), lassen sich folgende Größen bestimmen:

- Pfad A-B: die schnelle Temperaturerhöhung von T^A auf $T^{B,C}$ dient zur Bestimmung der totalen temperaturabhängigen magnetischen Verluste:

$$(\Delta J / \Delta T) = \frac{J^A - J^B}{T^A - T^B} [\text{T} / ^\circ\text{C}].$$

- Pfad B-C: Die folgenden 50 Messungen bei konstanter Temperatur von $T^{B,C}$ ermöglichen die Bestimmung der magnetischen Viskosität Gl. (7) durch Erfassung von $\Delta J^{t.d.}$ über die Messzeit von ca. 20 Minuten.
- Pfad C-D: Die letzten beiden Messungen (Ende von Schritt C mit $T^{B,C}$ und Schritt D) mit T^D dienen der Erfassung der reversiblen temperaturabhängigen Verluste

$$(\Delta J^{\text{rev}}/\Delta T) = \left| \frac{J^D - J^C}{T^D - T^C} \right| [\text{T}/^\circ\text{C}].$$

Aus der Differenz der totalen und reversiblen temperaturabhängigen Verluste werden die irreversiblen Verluste nach $\frac{\Delta J^{\text{irr}}}{\Delta T} = \frac{\Delta J^{\text{tot}}}{\Delta T} - \frac{\Delta J^{\text{rev}}}{\Delta T}$ ermittelt.

Aus diesem Vorgehen lässt sich S_v^T durch Gl. (13) für die jeweilige zyklusabhängige Temperatur $T^{B,C}$ bestimmen.

3.2.3.3.5 Temperaturrempe zur magnetischen Stabilisierung (Temperaturstabilisierung, Konzept 3)

Das Messprogramm zur magnetischen Voralterung über Temperatur folgt einer zyklischen Sequenz, wie in Abb. 3.33 dargestellt.

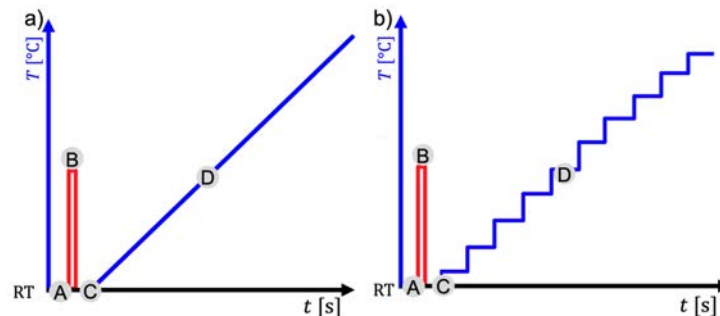


Abb. 3.33: Schematischer Messablauf zur Durchführung der magnetischen Stabilisierung und zur Bestimmung der Übergangstemperatur mittels Temperaturrempe. Nach der initialen Magnetisierungserfassung bei Raumtemperatur (A) erfolgt die Vorentmagnetisierung durch einen Temperaturpuls (B) mit anschließender Abkühlung auf die Starttemperatur (C). Anschließend wird die Übergangstemperatur über eine gestufte Temperaturrempe bestimmt: a) stufenweise Temperaturerhöhung mit anschließender Magnetisierungserfassung zur Bestimmung der direkten Entmagnetisierung, b) stufenweise Temperaturerhöhung mit längeren Zeitintervallen (je 20 Messungen pro Stufe) zur Betrachtung zeitabhängiger Effekte.

Nach der initialen Stabilisierung (Entmagnetisierung) durch einen Temperaturpuls und anschließender Abkühlung auf Referenztemperatur erfolgen Messzyklen zur Bestimmung der maximalen Übergangstemperatur entweder über direkte, stufenweise Temperaturerhöhung a) oder durch zyklische Temperaturerhöhung zur Identifizierung zeitabhängiger (viskoser) Verluste b). Das Vorgehen umfasst vier Schritte (A bis D, siehe: Abb. 3.33):

- Erfassung der Ausgangsmagnetisierung bei Raumtemperatur
- Vorentmagnetisierung der Probe durch einen definierten Temperaturpuls
- Abkühlung der Probe auf die Ausgangstemperatur zur Bestimmung der irreversiblen Verluste
- a) Stufenweise Temperaturerhöhung zur Bestimmung der maximalen Temperatur, bei der der Übergangspunkt der magnetischen Stabilisierung auftritt (Abb. 3.33a). b) Zyklische Temperaturerhöhung zur Identifizierung zeitabhängiger Verluste (Abb. 3.33b).

Zusätzlich wurde zur Feldstabilisierung ein Gegenfeldpuls mittels externem Pulsmagnetisierer durchgeführt. Anschließend wird die Probe in Konzept 3 installiert und die Temperaturrempe ab Zyklus (C) (Abb. 3.33) gestartet, um auch hier die maximale Übergangstemperatur zu bestimmen. Beide Vorgehensweisen sind bezogen auf die durchschnittliche Belastungsdauer schematisch in Abb. 3.34 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Temperatur innerhalb von zwei

Minuten auf 60 °C erhöht und anschließend wieder abgesenkt wird (Abb. 3.34a), während ein Feldpuls innerhalb von 20 ms appliziert wird (Abb. 3.34b).

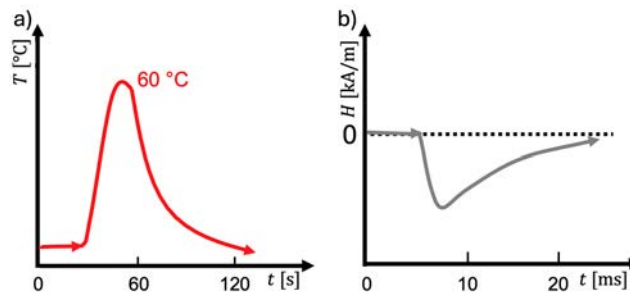


Abb. 3.34: Schematischer Ablauf der magnetischen Stabilisierung anhand der Signalausgangsdauer, dargestellt für a) einen Temperaturpuls (Konzept 3), bei dem die Probe in 120 s von Raumtemperatur auf 60 °C erwärmt und zurück auf Raumtemperatur abgekühlt wird, und b) einen Feldpuls mittels Pulsmagnetisierer (Messung über Hall-Sonde), der durchschnittlich < 10 ms benötigt.

3.3 Methodisches Vorgehen mit standardisierten Messverfahren und Simulationstools

In diesem Abschnitt wird das methodische Vorgehen der in dieser Arbeit verwendeten standardisierten Messverfahren, Hysteresegraph, VSM, EBSD, Field-Mapper und Pulsmagnetisierer, so wie der eingesetzten Simulationstools beschrieben.

3.3.1 Hysteresegraph

Beim verwendeten Hysteresegraphen handelt es sich um einen Permagraph (Modell L) des Herstellers Magnet-Physik [117]. Mit diesem Gerät lassen sich Feldstärken von bis zu ± 2000 kA/m bei einer Proben temperatur von bis zu 200 °C erzeugen. Zur Vorbereitung wird die Probe zunächst mithilfe eines Pulsmagnetisierers (siehe Abschnitt 3.3.4) vollständig gesättigt. Anschließend wird sie zwischen den Polschuhen des Hysteresegraphen positioniert. Je nach geplanter Messtemperatur erfolgt der weitere Ablauf unterschiedlich:

- **Bei Raumtemperaturmessungen:** Zunächst wird ein Fluxmeter-Reset mit der Messspule außerhalb der Probe durchgeführt. Danach wird die Messspule um die Probe gelegt und der magnetische Kreis durch Probenkontakt mit den Polschuhen geschlossen.
- **Bei Messungen unter erhöhter Temperatur:** Zuerst erfolgt die Aufheizung auf die Zieltemperatur, anschließend der Reset des Fluxmeters, gefolgt von der Installation der Messspule um die Probe und dem Schließen des Magnetkreises durch Polschuhkontakt.

Die Messung beginnt anschließend mit einem kurzen Feldanstieg in Magnetisierungsrichtung, um eventuell temperaturbedingt aufgetretene Entmagnetisierungen zu reduzieren. Danach wird das externe entmagnetisierende Feld so weit erhöht, bis die Probe vollständig entmagnetisiert oder ummagnetisiert ist.

3.3.2 VSM-Messungen

Beim verwendeten Vibrating Sample Magnetometer (VSM) handelt es sich um ein Quantum Design PPMS-9 Magnetometer [30]. Dieses Gerät ermöglicht Feldstärken von bis zu ± 7161.9 kA/m (entsprechend ± 9 T) und Messungen in einem Temperaturbereich von etwa -273 °C bis 730 °C, siehe Tab. 8. VSM-Messungen werden zur Bestimmung des Viskositätsparameters sowie für $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven für Spezialproben eingesetzt. Hierfür werden die Proben auf einem Probenträger installiert und vorab mit maximalem externen

Magnetfeld (± 7161.9 kA/m) vollständig aufmagnetisiert. Daraufhin wird für $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven das externe Feld umgepolt, damit im zweiten Quadranten der Hysteresekurve die Entmagnetisierung erfasst werden kann. Die Bestimmung des Viskositätsparameters S_v erfolgt gemäß Gl. (12) und umfasst die Bestimmung der reversiblen und irreversiblen Suszeptibilität sowie der magnetischen Viskosität. Die feldabhängige Gesamtsuszeptibilität $\chi_{\text{ext}}^{\text{tot}}$ wird zunächst aus den $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven bestimmt. Die reversible Suszeptibilität $\chi_{\text{ext}}^{\text{rev}}$ ergibt sich aus Teilschleifen an ausgewählten Feldstärken entlang der Entmagnetisierungskurve. Daraus wird die irreversible Suszeptibilität $\chi_{\text{ext}}^{\text{irr}}$ als Differenz von totaler und reversibler Suszeptibilität berechnet:

$$\chi_{\text{ext}}^{\text{irr}} = \chi_{\text{ext}}^{\text{tot}} - \chi_{\text{ext}}^{\text{rev}},$$

umgeformt aus Gl. (6). Zur Bestimmung der magnetischen Viskosität S wird die Probe nach erneuter vollständiger Aufmagnetisierung an ausgewählten Feldstärken entlang der Entmagnetisierungskurve über ca. 180 s einem konstanten Magnetfeld ausgesetzt. S wird aus der Steigung des zeitlichen Abfalls der Magnetisierung als Funktion des Logarithmus der Zeit gemäß Gl. (7) ermittelt.

3.3.3 Field-Mapper

Beim verwendeten Field-Mapper handelt es sich um einen 3D-Hall-Mapper des Herstellers SENIS, Modell MMS-1A-RS. Das System ermöglicht eine maximale Scangröße von $125 \times 125 \times 150$ mm³ und verfügt über einen Messbereich von bis zu ± 1500 mT. Die Messgenauigkeit beträgt 0.1 % des vollen Messbereichs, was einer Genauigkeit von etwa ± 1.5 mT entspricht. Die Positioniergenauigkeit der x -, y - und z -Achsen liegt bei ± 5 μm , die Auflösung des Schrittmotors beträgt 1 μm pro Schritt. Die mechanische Linearität des Systems wird mit ± 0.02 % angegeben. Der z -Achsen-Offset wird durch den Kontakt der Sonde mit der Probenoberfläche bestimmt. Dabei wurde üblicherweise ein Abstand von 0.5 mm zwischen Sonde und Probe gewählt, um Messungen mit minimalem Einfluss durch den Luftspalt zu gewährleisten. Die magnetische Flussdichte B wird in einem dreidimensionalen Raster erfasst, wobei z bei den durchgeführten Messungen, konstant 0.5 mm über der Probe liegt. Die Flussdichtekomponenten B_x , B_y und B_z werden an jedem (x, y) Punkt gemessen [115].

3.3.4 Pulsmagnetisierer

Beim Pulsmagnetisierer handelt es sich um das Gerät IM-K-010020A des Herstellers Magnet-Physik. Das maximale externe Feld beträgt 7 T. Dieses Feld wird zur vollständigen Aufmagnetisierung (Sättigung) der Proben eingesetzt sowie zur Teilentmagnetisierung durch Gegenfeldpulse, beispielsweise für anschließendes Field Mapping und Stabilisierungsversuche (Voralterung).

3.3.5 EBSD-Aufnahmen zur Bestimmung der mittleren Korngröße

Für die Bestimmung der mittleren Korngröße D_{50} wurden EBSD-Aufnahmen durchgeführt. Die Messungen erfolgten an einem Zeiss Sigma 300 VP Rasterelektronenmikroskop mit EBSD-System. Hierzu wird ein kleines Stück aus der jeweiligen Probe getrennt, eingebettet, präpariert und anschließend untersucht. Aus den erhaltenen Messwerten lassen sich, wie in Abb. 3.35 gezeigt, die einzelnen Kornausrichtungen durch farbliche Markierung entsprechend der IPF-Methode (Inverse Pole Figure) darstellen und die Übergangsbereiche durch schwarz markierte Grenzen den einzelnen Körnern zuordnen. Auf Basis des Bildausschnitts wird aus der Korngrößenverteilung das 50 %-Quantil bestimmt, das als repräsentativer Kennwert D_{50} für die Probe dient.

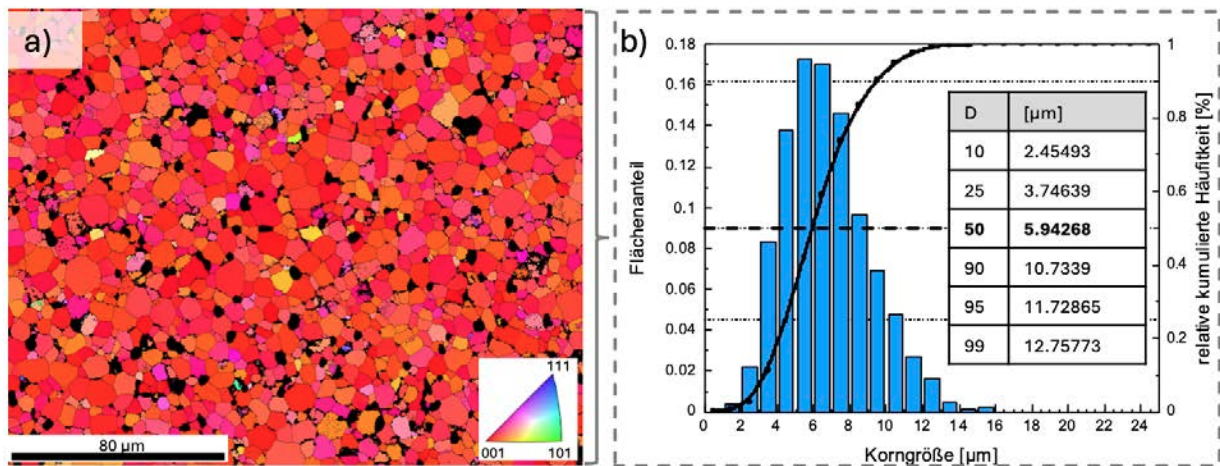


Abb. 3.35: Vorgehen zur Bestimmung der mittleren Korngröße D_{50} . a) EBSD-Aufnahme mit IPF-gefärbten Kornausrichtungen einer N52-SH Referenzprobe, wobei [001] der c -Achse entspricht. Basierend auf den schwarzen Markierungen der Körner in a) wird in b) die kumulative Korngrößenverteilung dargestellt, woraus sich der D_{50} -Wert hier 5.94 µm als 50 %-Quantil ergibt.

3.3.6 Einsatz von Simulationstools

Ergänzend zu den experimentellen Messungen werden numerische Simulationen sowie Konstruktionswerkzeuge eingesetzt. Die magnetische Auslegung der Magnetkreise sowie die Validierung experimenteller Ergebnisse erfolgen mittels Siemens Simcenter Magnet [147], während die mechanische Auslegung und der Entwurf der Prüfstandskonzepte mit Autodesk Inventor und Fusion 360 durchgeführt werden.

3.4 Spezifikation der Prüfkörper

Für eine umfassende Betrachtung unterschiedlicher Eigenschaften wurden Permanentmagnete verschiedener Güten ausgewählt. Berücksichtigt werden sowohl material- und prozessbezogene Parameter wie Koerzitivfeldstärke H_{cj} und Remanenz J_r als auch externe Faktoren wie die Probenform (Entmagnetisierungsfaktor N). Abb. 3.36 zeigt die wichtigsten Proben entsprechend Tab. 11. Zusätzlich sind die Arbeitsgeraden der häufigsten Probengeometrien: $N = 0.45$; 0.56 und 0.82 aufgeführt.

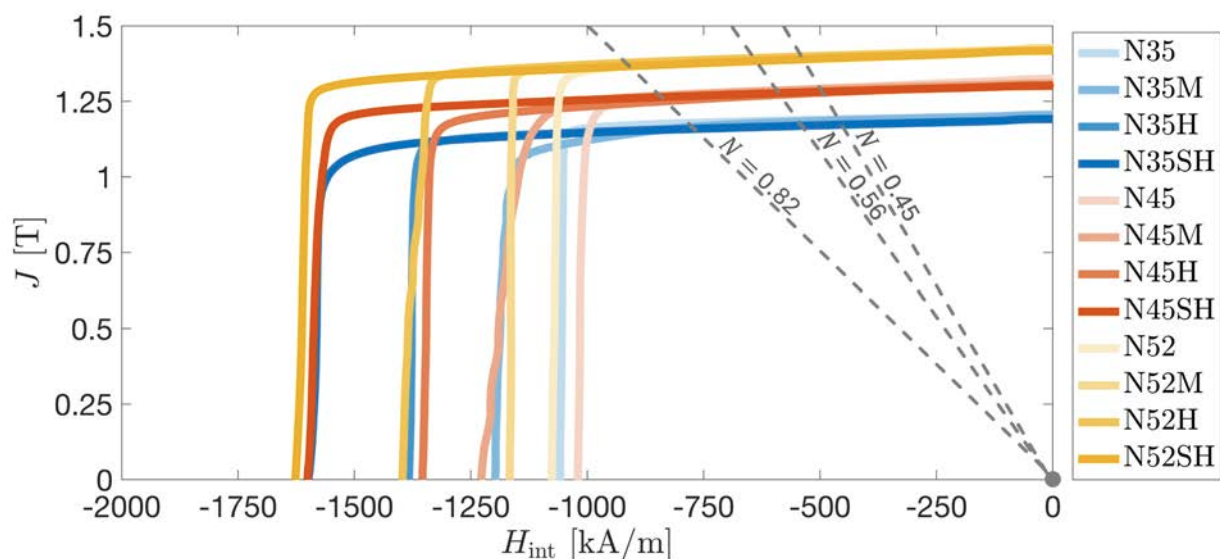


Abb. 3.36: $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven der Proben: N35 ($J_r = 1.2 T$), N45 ($J_r = 1.35 T$) und N52 ($J_r = 1.4 T$) mit unterschiedlichen Koerzitivfeldstärken der Varianten Standard, M, H, SH sowie den jeweiligen Arbeitsgeraden für die Entmagnetisierungsfaktoren $N = 0.45$; 0.56; 0.82. Die Abbildung verdeutlicht die in dieser Arbeit aufgeführte Probendiversität sowohl in Form von Polarisation, Koerzitivfeld als auch Formfaktor.

Die Nomenklatur zur Bezeichnung der Probengüten in dieser Arbeit orientiert sich an der nominellen Koerzitivfeldstärke H_{cj} (Tab. 1). Eine Gesamtübersicht aller Proben befindet sich in Tab. 20 (Anhang).

Tab. 11: Übersicht der wichtigsten Probengüten und Probenformen in Abhängigkeit vom Entmagnetisierungsfaktor.

Güte	J_r [T]	H_{cj} [kA/m]	Entmagnetisierungsfaktor N	Maße: x, y, z [mm]
N35	1.2	980 bis 1050	0.45	10 x 10 x 5
N52	1.4	980 bis 1050	0.56	20 x 10 x 5
-M		1100 bis 1200	0.82	40 x 40 x 4
-H		1400 bis 1550		
-SH		1590 bis 1700		

3.4.1 Untersuchungsparameter für Viskositätsparametermessungen

Für die detaillierte Untersuchung des Viskositätsparameters wurden sowohl material- und prozessbezogene als auch externe Einflussfaktoren systematisch variiert. Eine Übersicht ist nachfolgend zusammengefasst:

Material- und prozessbezogene Einflussfaktoren

- Maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$: N35-N54 bzw. Remanenz J_r : 1.2–1.4 T
- Koerzitivfeldstärke: Standard, M, H, SH, UH, EH
- Besonderheiten ausgewählter Materialien im Vergleich zu konventionellen Güten:
 - GBD-Proben im Vergleich mit nicht GBD Vergleichsgüten
 - Gezielte Materialvariationen im Herstellprozess
 - Wärmebehandlung für gezieltes Kornwachstum
- Segmentierung

Externe Einflussfaktoren

- Probentemperatur: 30–160 °C
- Applizierte externe Feldstärke H_{ext}
- Probenform (Einfluss des Entmagnetisierungsfaktors N)
 - Quader
 - Scheiben
 - Kugeln
- Innere Feldverteilung (Selbstfeld):
 - Quaderformen (inhomogene Feldverteilung)
 - Kugeln (homogene Feldverteilung)

Die in dieser Übersicht zusammengefassten Einflussfaktoren werden in den folgenden Unterabschnitten (3.4.1.1 bis 3.4.1.5) detailliert definiert und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Viskositätsparametermessungen beschrieben.

3.4.1.1 Produktionseinflussfaktoren

Zu den betrachteten Produktionseinflussfaktoren zählen insbesondere die Auswirkungen des GBD-Prozesses im Vergleich zur konventionellen Herstellung. Darüber hinaus werden speziell deklarierte Proben der Hersteller untersucht, die entweder einen reduzierten Anteil an schweren Seltenerdmetallen (*Reduced HRE*) oder vollständig darauf verzichten (*Zero HRE*). Diese werden mit konventionell hergestellten Proben derselben Güten verglichen. Zusätzlich erfolgt eine Analyse von Proben mit Cer-Substitution, um auch deren Einfluss im Vergleich zu konventionellen Proben gleicher Güte zu bewerten.

3.4.1.2 GBD-Prozess

Im Rahmen des GBD-Prozesses werden gezielt Dysprosium (Dy) und oder Terbium (Tb) in die Magnetstruktur eindiffundiert, mit dem Ziel, die Koerzitivfeldstärke zu erhöhen [73]. Hierzu wurden Proben des Herstellers B in der Güte N52-SH mit und ohne GBD-Behandlung (N52-SH vs. N52-SH (GBD)) direkt miteinander verglichen. Darüber hinaus wurden weitere Proben der Qualität N35-EH untersucht, bei denen vom Hersteller B jeweils eine Probe mit Dy und eine weitere mit Tb verstärkt wurden.

3.4.1.3 Korngröße

Zur Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften, insbesondere der mittleren Korngröße, wurden N52-SH-Proben (Hersteller B) einer gezielten Wärmebehandlung unterzogen. Um den Effekt variierender Korngrößen in Bezug auf den magnetischen Viskositätsparameter zu analysieren, wurden die Proben bei einer Temperatur von 1100 °C für unterschiedliche Zeitintervalle nachwärmebehandelt: 15 Minuten und 16 Stunden. Die Wahl dieser Temperatur erfolgte experimentell mit dem Ziel, eine moderate Korngrößenvergrößerung zu erzielen, ohne eine übermäßige Bildung von abnormalem Kornwachstum (einzelne Körner mit drastisch größeren Körnern im Vergleich [148]) zu begünstigen.

3.4.1.4 Entmagnetisierungsfaktor

Zur Untersuchung des Einflusses der inneren Selbstfeldverteilung wurden Quadermagnete mit inhomogener sowie Kugelmagnete mit homogener Feldverteilung analysiert. Abb. 3.37 zeigt die verwendeten Probengeometrien mit den zugehörigen Entmagnetisierungsfaktoren. Als Referenz diente ein Quadermagnet im Standardmaß $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ ($N = 0.56$, Güte N52). Die Auswirkungen unterschiedlicher Formfaktoren wurden untersucht, indem die Referenzprobe in Magnetisierungsrichtung ($N = 0.70$; $N = 0.75$; $N = 0.80$) sowie senkrecht dazu ($N = 0.54$; $N = 0.50$; $N = 0.45$; $N = 0.40$) getrennt wurde wie in Abb. 3.37a schematisch visualisiert. Zusätzlich sind Scheibenmagnete in Abb. 3.37b dargestellt; speziell für die Prüfstandskonzepte 3 und 4 wurden größere Proben mit hohen Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.82$; 0.80 ; 0.78 ; 0.65 ; 0.54 betrachtet. Für die Betrachtung eines möglichst homogenen inneren Selbstfeldes wurden Kugelmagnete mit einem konstanten Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.33$ eingesetzt (Abb. 3.37a). Zur gezielten Variation von $(BH)_{\max}$ wurden Kugelmagnete unterschiedlicher Güten (N35, N38, N42) analysiert. Diese Kugelmagnete wurden in eine Kunststoffform in Quadergeometrie eingeklebt, um eine stabile Fixierung und eine präzise Ausrichtung der Magnetisierungsachse zu gewährleisten.

3.4.1.5 Segmentierung

Zur Untersuchung des Einflusses magnetischer Luftspalte (Klebespalte) zwischen Magnetsegmenten wurden Proben mit unterschiedlicher Segmentanzahl miteinander verglichen. Die Messungen erfolgen an Magneten der Güte N52-UH mit Grundabmessungen von $23.5 \times 12 \times 6 \text{ mm}^3$. Abb. 3.37b zeigt die drei untersuchten Konfigurationen: eine unsegmentierte Einzelprobe, eine zweigeteilte sowie eine vierfach segmentierte Variante. Die segmentierten Proben enthalten einen Klebespalt mit einer durchschnittlichen Breite von etwa 80 μm (CT-Scan).

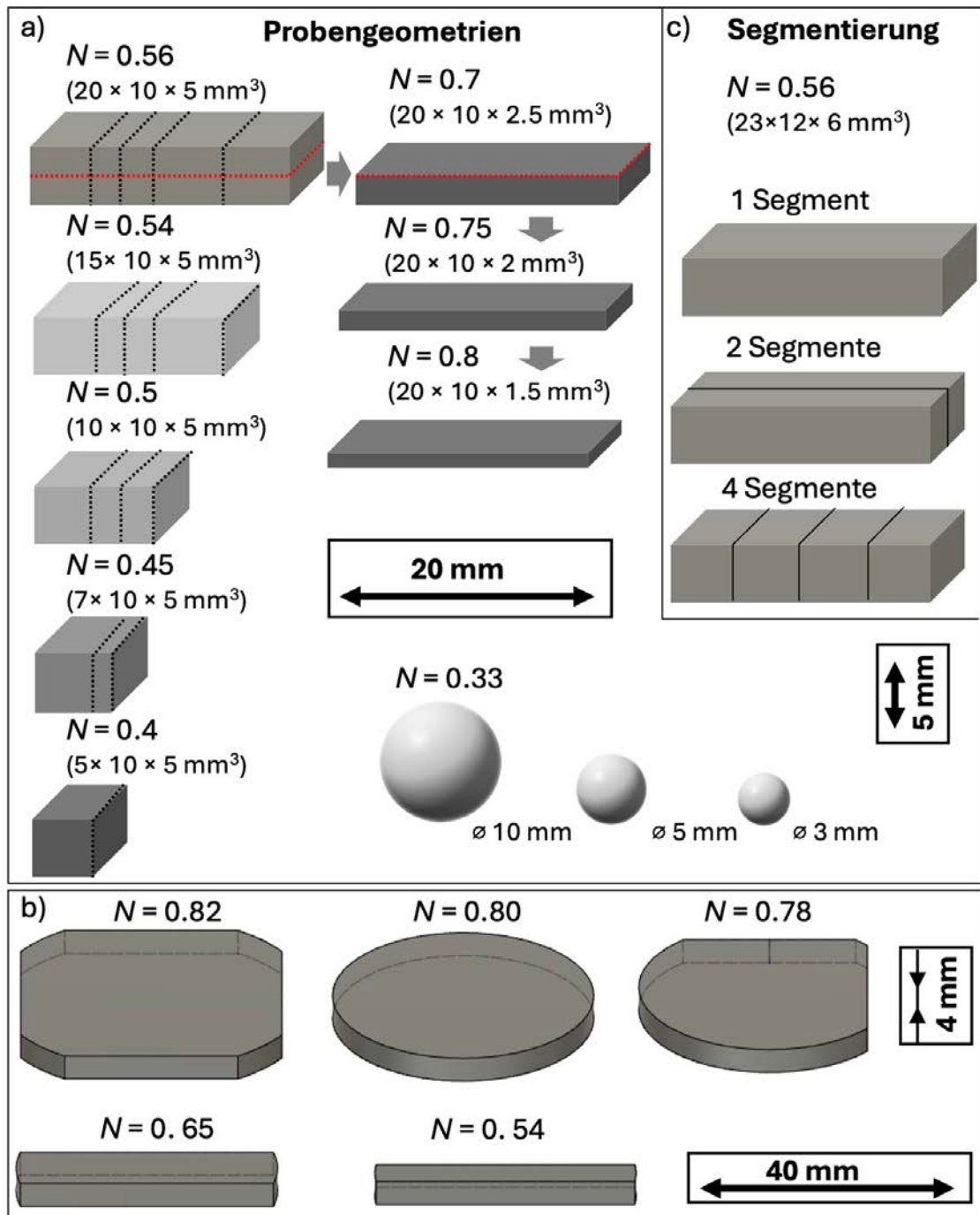


Abb. 3.37: Probengeometrien mit zugehörigen Entmagnetisierungsfaktoren. a) Standardquader N52, getrennt in Magnetisierungs- und Längsrichtung für unterschiedliche Entmagnetisierungsfaktoren, sowie Kugelmagnete unterschiedlicher Durchmesser. b) Scheibenproben und Teilstücke für unterschiedliche Entmagnetisierungsfaktoren für die Konzepte 3 und 4. c) Segmentierung einer N52-UH-Probe mit gleicher Grundfläche, dargestellt als unsegmentierte Variante (1 Segment), zweigeteilte Variante (2 Segmente) und vierfach geteilte Variante (4 Segmente).

4 Technische Kennwerte der Messverfahren

Dieses Kapitel behandelt die Leistungsbewertung der Prüfstandskonzepte. Diese umfasst zwei zentrale Bereiche: die Erfassung der Leistungskennwerte der vier Prüfstände sowie die Untersuchung von Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Im Rahmen der Leistungskennwerte werden experimentell bestimmte, nominale und maximale Prozessgrößen erfasst und ausgewertet. Die Bewertung von Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit erfolgt anhand statistischer Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient. Ziel ist eine praxisnahe Beurteilung der technischen Leistungsfähigkeit der Prüfstände sowie der Zuverlässigkeit und Stabilität der ermittelten Messdaten. Abschnitt 4.1 führt die statistischen Kennwerte zur Fehler- und Reproduzierbarkeitsbetrachtung auf, die in Abschnitt 4.2 für Konzept 1, in Abschnitt 4.3 für Konzept 2 und Abschnitt 4.4 für Konzepte 3 und 4 angewendet werden.

4.1 Statistische Kennwerte zur Fehler- und Reproduzierbarkeitsbetrachtung

Für die Bewertung der Messdatenqualität werden zentrale statistische Größen herangezogen:

- **Mittelwert μ :** Er gibt das arithmetische Mittel aller gemessenen Werte an und dient als Referenzgröße für die zentrale Tendenz der Messwerte [149]:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (25)$$

- **Standardabweichung σ :** Sie beschreibt die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert und liefert somit ein Maß für die Präzision der Messungen [149]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (26)$$

- **Variationskoeffizient CV :** Als dimensionsloses Maß stellt der CV das Verhältnis von Standardabweichung σ zu Mittelwert μ dar. Er erlaubt eine direkte Vergleichbarkeit der Streuung zwischen Messreihen und Größenordnungen [150], wie schematisch in Abb. 4.1a dargestellt:

$$CV_{\%} = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) * 100 \quad (27)$$

In der Literatur werden CV -Werte häufig zur groben Einordnung der Reproduzierbarkeit physikalischer Messsystemen verwendet, z. B. $< 5 \%$ (sehr gute Präzision), $5\text{--}10 \%$ (moderate Präzision) und $> 10 \%$ (hohe Variabilität) [151], [152]. Diese Einteilung dient lediglich der Orientierung und stellt keine verbindliche Norm dar.

Wiederholgenauigkeit

Sie beschreibt die Fähigkeit des Messsystems, unter identischen Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse zu liefern [153]. Hohe Wiederholgenauigkeit ist ein wesentliches Kriterium für die Verlässlichkeit der Messmethode. Sie wird als Mittelwert $\bar{x} \pm$ Standardabweichung σ , also $\bar{x} \pm \sigma$ angegeben [154].

Bestimmung der effektiven Nachweisgrenze

Die effektive Nachweisgrenze beschreibt die kleinste detektierbare Änderung einer physikalischen Größe, z. B. des magnetischen Moments, der magnetischen Flussdichte oder des Stroms,

die zuverlässig über dem Hintergrundrauschen liegt [155]. Ein Signal gilt als nachweisbar, wenn es ein Vielfaches k der Standardabweichung des Hintergrundrauschens übersteigt; typischerweise wird $k = 3$ gewählt [156]. Experimentell werden in dieser Arbeit hierfür $B(I)$ -Kurven aufgenommen, also die Magnetflussdichte als Funktion des Stroms. Die Standardabweichung σ_B wird aus einem konstanten Bereich bestimmt. Die effektive Nachweisgrenze $I_{\min}$ entspricht dem kleinsten Strom, bei dem die Steigung $\Delta B/\Delta I$ signifikant über das Rauschmaß hinausgeht (vgl. Abb. 4.1b):

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta I} \right| > k \cdot \sigma_B \quad (28)$$

Zur Messung wird eine Stromrampe mit pro Rampe ansteigenden Stufen ΔI verwendet, wie in rot markiert in Abb. 4.1b dargestellt. Das applizierte Erregerspulenstromsignal wird über eine Stromzange erfasst, das resultierende Magnetfeld über Hall-Sonden als Magnetflussdichte B gemessen (blauer Messverlauf in Abb. 4.1b). Während ΔB_1 noch zu keiner eindeutigen Abstufung des Flussdichtesignals pro Stromrampenstufe führt, zeigt sich bei ΔB_2 bereits eine eindeutig nachweisbare Unterscheidung zwischen den Stromrampenstufen, wodurch ΔB_2 als kleinste nachweisbare Änderungsrate beschrieben werden kann.

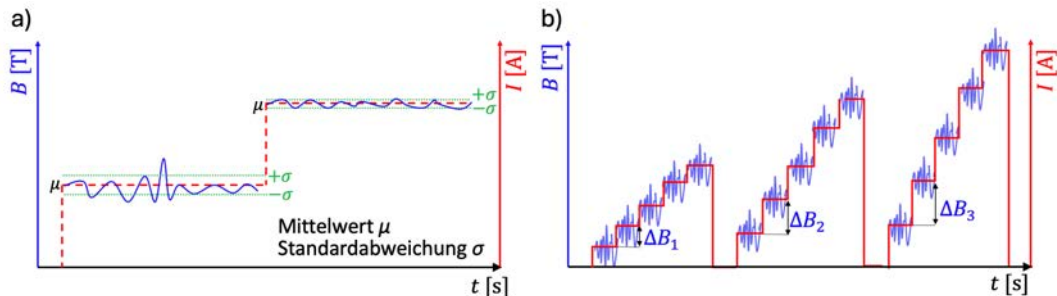


Abb. 4.1: a) Schematische Darstellung zur Bestimmung des Variationskoeffizienten. Basierend auf einem Vorgabefeldsignal zeigt sich die Streuung der Flussdichte B (blau) der Hall-Sonden als $\pm 1\sigma$ um den Mittelwert μ bei konstantem Stromsignal I (rot). b) Praktische Umsetzung der effektiven Nachweisgrenze. Durch stufenweise Erhöhung der Rampenstufen ΔI pro Zyklus wird die minimale Nachweisgrenze oberhalb des Rauschens ermittelt. Dabei wird über die zunehmenden Rampenstufen des Stromsignals I (rot) der erste ausreichende Unterschied im Flussdichteverlauf B (blau) identifiziert. In diesem Beispiel stellt ΔB_1 noch keine ausreichende Unterscheidung zwischen den Stufen dar, während ΔB_2 einen deutlichen Unterschied zum Rauschverhalten des Flussdichtesignals zeigt und daher annähernd als kleinste Nachweisgrenze der Flussdichte betrachtet werden kann.

Methodik zur technischen Bewertung der Messverfahren

Die Erhebung der Messdaten erfolgt über Rampenfunktionen innerhalb anwendungsnaher Feld- und Temperaturbereiche. In den Prüfstandskonzepten 1 und 2 wird das externe Magnetfeld systematisch variiert, um feldinduzierte Magnetisierungsänderungen zu erfassen. Im Prüfstand 3 werden kontrollierte Temperaturänderungen vorgegeben, um die Auswirkungen der Heizeinheit auf die Helmholtz-Messspulenmessung zu untersuchen. Zur Einordnung und Validierung der Messergebnisse werden ergänzend Referenzproben auf Basis temperaturstabiler SmCo-Magnete eingesetzt. Sämtliche Versuchsreihen erfolgen unter anwendungsnahen Bedingungen, die auf die jeweiligen Messziele abgestimmt sind, um eine realitätsnahe Bewertung der Stabilität und Reproduzierbarkeit magnetischer Eigenschaften zu ermöglichen.

Statistische Messergebnisauswertung

Für die statistische Auswertung der Ergebnisse des Viskositätsparameters, wurde eine lineare Regression durchgeführt, um die Steigung der Trendgeraden zu bestimmen. Zur Ermittlung der Regressionsparameter wurde das Standardverfahren der kleinsten Quadrate (Ordinary Least Squares, OLS) verwendet [157]. Die Regressionsanalyse erfolgte mit MATLAB [131] mittels der Funktion $\text{polyfit}(x, y, 1)$, welche die Steigung m und den Achsenabschnitt b des linearen Modells bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 wurde nachfolgend auf Basis der quadrierten Residuen berechnet [157]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (29)$$

Dabei ist $\hat{y}_i$ der durch das Modell berechnete Regressionswert und $\bar{y}_i$ der Mittelwert der Zielgröße. Der Zähler beschreibt die Residuenquadratsumme (nicht erklärte Varianz), der Nenner die Gesamtvarianz. Der R^2 -Wert gibt somit den Anteil der durch das Regressionsmodell erklärten Streuung an und dient als Maß für die Güte des linearen Zusammenhangs [149]. Ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 1 steht für eine perfekte Modellanpassung, bei der 100 % der Varianz der abhängigen Variablen durch das Regressionsmodell erklärt werden. Ein Wert von $R^2 = 0$ bedeutet, dass keinerlei Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable besteht, das Modell erklärt keine Varianz [158], [159], [160]. Für die Interpretation der Messergebnisse in dieser Arbeit wurden die R^2 -Werte eigenständig wie folgt eingestuft: 0–0.25 (sehr gering/kein Zusammenhang), 0.25–0.5 (schwach), 0.5 (mittlerer Zusammenhang), 0.5–0.75 (moderat bis stark), >0.75–1 (stark bis sehr stark). Diese Einteilung dient ausschließlich der Orientierung und ist nicht als normativer Maßstab zu verstehen.

4.2 Konzept 1 (Wechselfeldjoch)

4.2.1 Technische Kennwerte

Tab. 12 zeigt die wichtigsten experimentell bestimmten technischen Kennwerte von Konzept 1. Im Folgenden werden diese anhand der Strom-Feld-Kennlinie dargestellt, ebenso wie der Einfluss der Magnetkreiskonfiguration auf die Probenfeldverteilung. Anschließend werden Messgenauigkeit, technische Stabilität sowie die minimale und wiederholbare Messbarkeit aufgeführt.

Tab. 12: Technische Kennwerte von Konzept 1.

Konzept 1: Wechselfeldjoch	
Probengröße [mm]	5 x 5 x 5 bis 30 x 20 x 10
Probentemperatur [°C]	20-280
Heizrate [°C/s]	1.34
Abkühlrate [°C/s]	0.12
Externe Feldstärke [kA/m]	0-1340
Feldänderungsrate [T/s]	10
Feldbelastung	Bipolar
Feldverteilung	Statisch
Konfiguration	teiloffener Kreis
Magnetisierungsmessung	Hall-Sensoren
Messziele	Recoil-Entmagnetisierungskurven, Viskositätsparameter

Strom-Feld Kennlinie

Die Bestimmung des externen Magnetfeldes H_{ext} im Luftspalt dient der späteren Auswertung anhand des Stromsignals. Die Abhängigkeit der Feldstärke von der Stromstärke wird durch eine Flussdichte-Strom $B(I)$ -Kennkurve beschrieben. Während des Messvorgangs wurde das Flussdichtesignal synchron mit dem angelegten Stromsignal aufgezeichnet, um eine Zuordnung zwischen Stromstärke I und magnetischer Flussdichte B zu erzielen. Die Messung in Abb. 4.2 zeigt, dass bei einer Stromstärke von etwa 240 A ein externes Magnetfeld H_{ext} von circa 1340 kA/m erreicht wird, was einer magnetischen Flussdichte von ungefähr 1.68 T entspricht. Ab etwa 120 A wird die eintretende Sättigung des Jochs ersichtlich, wodurch der zuvor lineare Anstieg des $B(I)$ -Verlaufs abflacht.

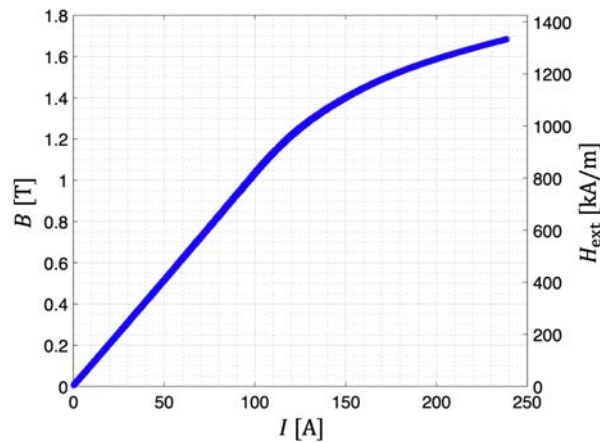


Abb. 4.2: Magnetische Leermesskurve B bzw. H_{ext} in Abhängigkeit vom Strom I zur Bestimmung der maximalen Feldstärke im Luftspalt sowie des Übergangs in die Jochsättigung, erkennbar am abknickenden linearen Verhalten ab etwa 120 A.

Feldverteilung einer Magnetprobe

Zur Analyse des Einflusses des Magnetjochs auf die Feldverteilung wurde eine FEA-Simulation einer N52-Magnetprobe ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) bei 0 kA/m externem Feld durchgeführt. Abb. 4.3 zeigt einen Vergleich zwischen der Probe in Luft (Abb. 4.3a) und der Probe im Luftspalt des Prüfstands (Abb. 4.3c). Die zugehörigen quantitativen Feldverteilungen des inneren Feldes H_{int} sind als Histogramme in (Abb. 4.3b) und (Abb. 4.3d) dargestellt.

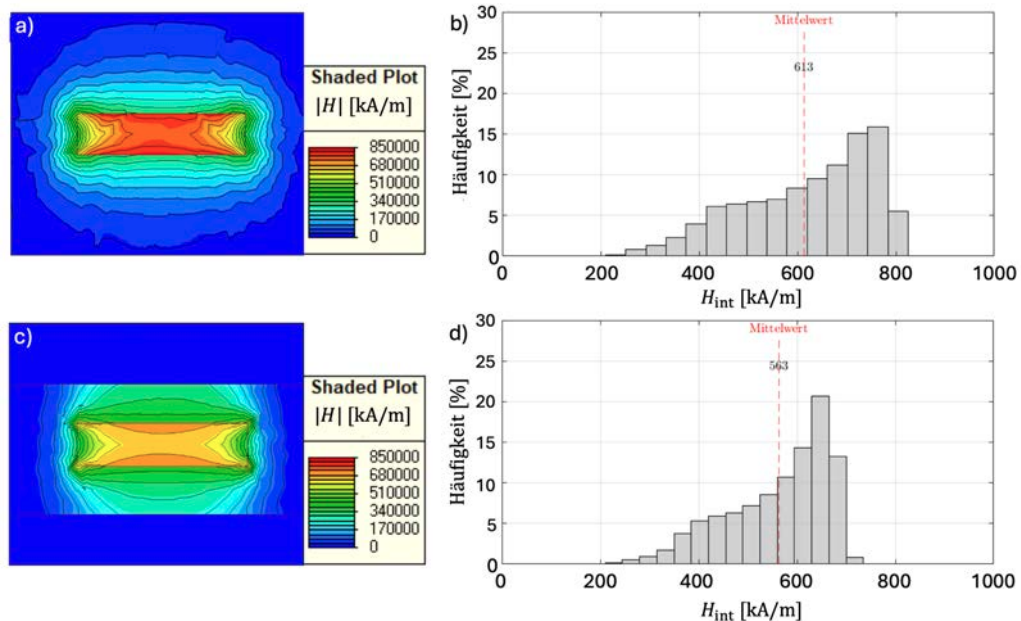


Abb. 4.3: Simulierte Feldverteilungen (H_{int} [kA/m]) einer N52-Probe ($N = 0.56$) in (a, c). Die dazugehörige quantitative Feldstärkenverteilung in Form eines Histogramms ist in (b, d) aufgeführt. (a, b) zeigen die Simulation in Luft, (c, d) im Luftspalt (Probenposition) des Prüfstandskonzepts, jeweils bei $H_{\text{ext}} = 0$. In b) (in Luft) ergibt sich eine mittlere Feldstärke von etwa 613 kA/m, während in d) (im Magnetjoch) ein Mittelwert von 563 kA/m erreicht wird. Dies zeigt sich auch in den Visualisierungen, in denen a) höhere Feldbereiche aufweist als c).

Im offenen Kreis (Abb. 4.3a, b) weist die Probe eine mittlere Feldstärke H_{int} von etwa 613 kA/m auf, während im teilgeschlossenen Kreis im magnetischen Joch (Abb. 4.3c, d) etwa 563 kA/m erreicht werden. Zudem zeigen sich im Joch geringere entmagnetisierende Bereiche mit maximal etwa 700 kA/m (H_{int}), während im offenen Kreis Feldstärken über 800 kA/m (H_{int}) auftreten.

Feldverteilung im Luftspalt

Um die Streuung des externen Feldes im Probenvolumen im Luftspalt zu untersuchen, wurde eine FEA-Simulation bei einer angelegten Stromstärke von 200 A durchgeführt. Die Feldwerte

H_{int} eines Standardquaders ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$, Material: Luft) sind in Abb. 4.4a dargestellt. Der horizontale Feldverlauf in der (x, y -Ebene) zeigt ein maximales Feld von etwa 1127 kA/m im Zentrum und von etwa 1122 kA/m am Rand. In Abb. 4.4b ist die Feldverteilung als Histogramm dargestellt: Die Feldwerte variieren um den Mittelwert von 1124 kA/m zwischen 1115 kA/m und 1128 kA/m, wobei sich der Großteil der Streufeldverteilung im Bereich zwischen 1120 und 1127 kA/m befindet.

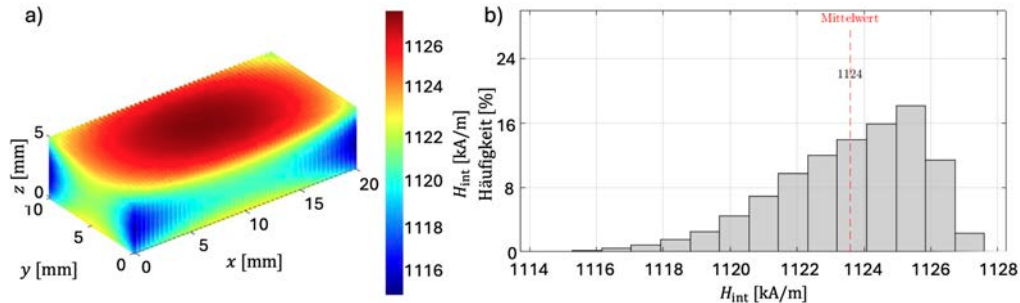


Abb. 4.4: Simulative Untersuchung der Feldstärkenverteilung H_{ext} [kA/m] im Volumen eines Quaders mit Standardprobenmaßen ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) zur Beurteilung der Feldinhomogenität im Luftspalt. a) Visualisierte Feldstärkeverteilung bei einer mittleren Feldstärke von etwa 1124 kA/m. b) Zugehöriges simuliertes Histogramm der Feldstärkeverteilung zur quantitativen Auswertung der Feldinhomogenität. Es zeigen sich nur geringe Variationen der Feldstärke im betrachteten Volumen zwischen ca. 1118 und 1127 kA/m.

Aufgrund dieser veränderten Feldverteilung wird im Folgenden der Einfluss des Magnetjochs auf den Entmagnetisierungsfaktor der Proben näher analysiert.

Entmagnetisierungsfaktor

Zur Untersuchung des Einflusses des Magnetjochs des Elektromagneten auf das Probenmagnetfeld wurden ein N52-, ein N35- sowie ein N35-EH-Magnet mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ sowohl in Luft als magnetisch offene Kreis Konfiguration als auch im Luftspalt des Elektromagneten simulationsbasiert betrachtet. Basierend auf der mittleren inneren Feldstärke und der Polarisation innerhalb des Probenvolumens ergibt sich aus Gl. (1) nach N umgeformt $N = (\mu_0 \cdot H_{\text{self}}) / J$ im magnetisch offenen Kreis ein Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.56$, welcher dem Wert der Annäherung nach Aharoni [57] entspricht, während dieser im Luftspalt des Magnetjochs (Konzept 1) im reversiblen Bereich der $J(H_{\text{int}})$ -Kurven auf etwa $N = 0.52$ sinkt. Zur Analyse des feldabhängigen Verlaufs des Entmagnetisierungsfaktors wurden die Proben mit verschiedenen Feldstärken belastet und der jeweilige Entmagnetisierungsfaktor bestimmt. Abb. 4.5 zeigt die niederkoerzitativen Proben N35 und N52 als $J(H_{\text{int}})$ -Verlauf (gestrichelt) sowie den resultierenden Entmagnetisierungsfaktorverlauf in Abhängigkeit vom internen Feld $N(H_{\text{int}})$ im Luftspalt des Magnetjochs.

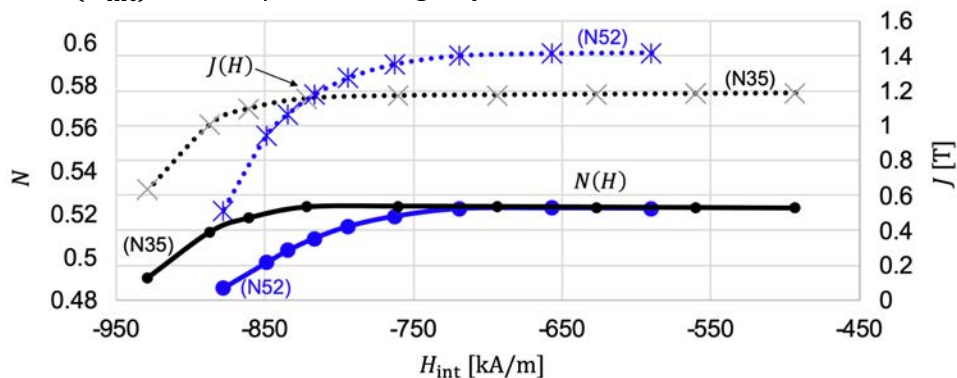


Abb. 4.5: Simulierter Polarisation-zu-Feld-Verlauf $J(H_{\text{int}})$ (gestrichelt, sekundäre y-Achse) einer N35- und N52-Probe im Luftspalt des Magnetjochs des Prüfstandskonzepts. Zusätzlich ist der Verlauf des Entmagnetisierungsfaktors $N(H_{\text{int}})$ (primäre y-Achse) dargestellt. Im linearen Bereich der $J(H_{\text{int}})$ -Kurven bleibt $N(H_{\text{int}})$ nahezu konstant mit $N = 0.52$, während der Wert von N bei abnehmender Polarisation der Probe abnimmt.

In Abb. 4.5 zeigt sich, dass der Entmagnetisierungsfaktor mit abnehmender Probenmagnetisierung abnimmt. Im Arbeitspunkt im Magnetjoch liegt der Entmagnetisierungsfaktor bei etwa $N = 0.52$ und bleibt im reversiblen Bereich weitgehend konstant. Sobald jedoch irreversible Verluste auftreten, insbesondere im Bereich des Kniefunkts der Entmagnetisierungskurve, beginnt der Entmagnetisierungsfaktor weiter zu sinken. Bei der N52-Probe beträgt der Entmagnetisierungsfaktor etwa $N = 0.49$ bei einer Polarisation von $J = 0.5$ T, während er bei der N35-Probe bei etwa $J = 0.6$ T ebenfalls auf $N = 0.49$ abnimmt. Da die niederkoerzitiven Proben N35 und N52 bereits bei niedrigen Feldstärken unterhalb von 1000 kA/m irreversible Abnahmen aufweisen, wurde zusätzlich eine hochkoerzitive Probe N35-EH mit einem nominellen $H_{cj} = 2390$ kA/m untersucht. Diese Probe kann bei Raumtemperatur mit Konzept 1 technisch nicht irreversibel entmagnetisiert werden und dient der Untersuchung des Einflusses der Polschuhe sowie deren Sättigung bei Feldstärken oberhalb von etwa 1300 kA/m beziehungsweise Strömen über 160 A im Magnetjoch. Auch bei höheren Feldstärken treten hierbei keine irreversiblen Entmagnetisierungen der Probe auf.

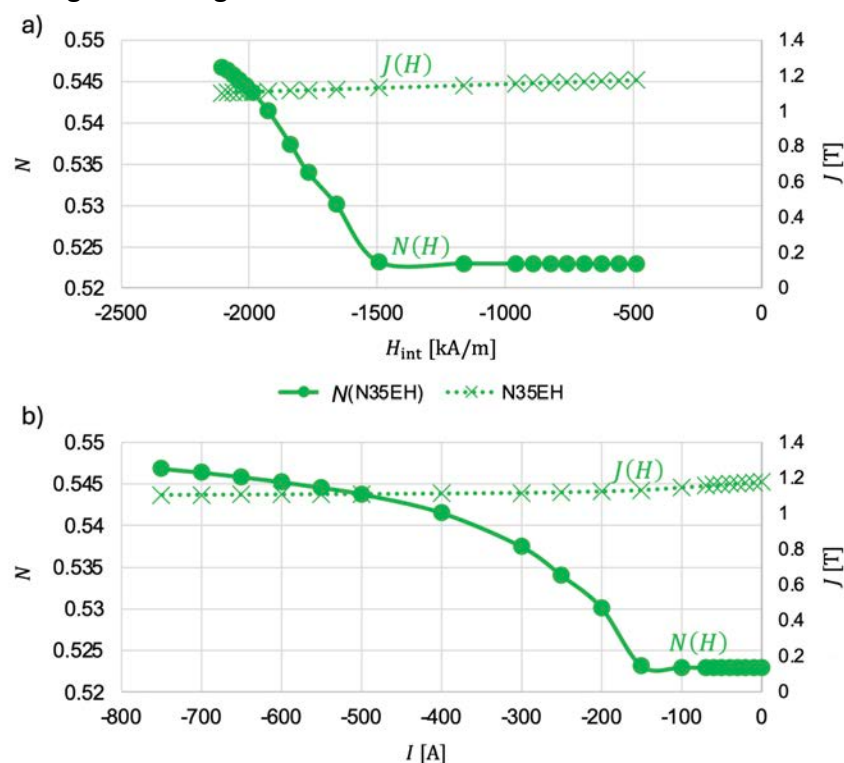


Abb. 4.6: Simulierter Verlauf des Entmagnetisierungsfaktors N einer hochkoerzitiven N35-EH-Probe in Abhängigkeit vom externen Gegenfeld in Konzept 1. a) Verlauf der Polarisation $J(H_{int})$ und Entmagnetisierungsfaktor $N(H_{int})$ als Funktion des internen Feldes H_{int} . b) Polarisation $J(I)$ und Entmagnetisierungsfaktor $N(I)$ in Abhängigkeit vom Erregerspulenstrom I . Die Probe N35-EH wurde aufgrund ihres hohen Koerzitivfelds (>2387 kA/m) gewählt, um den Einfluss der Jochsättigung zu visualisieren, der ab etwa 150 A in b) bzw. 1500 kA/m in a) sichtbar wird. Vorher zeigt N nur geringe Abweichungen, steigt dann jedoch mit zunehmender Jochsättigung (vgl. Abb. 4.2) deutlich an und nähert sich dem Wert des Entmagnetisierungsfaktors in Luft mit $N = 0.56$ an.

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 4.6 dargestellt. Der Entmagnetisierungsfaktor bleibt zunächst stabil bei $N = 0.52$, vergleichbar mit dem Verlauf in Abb. 4.5, und steigt ab etwa 1500 kA/m beziehungsweise 150 A an, sobald das Elektroblechjoch in Sättigung übergeht (vgl. Abb. 4.2). Infolgedessen nähert sich der simulierte Entmagnetisierungsfaktor dem Wert der Probe im magnetisch offenen Kreis mit $N = 0.56$ an.

4.2.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit

Die Temperaturregelmessgenauigkeit liegt im Bereich von 25-160 °C bei etwa ± 0.1 °C.

Für die Betrachtung des Variationskoeffizienten der Feldstabilität wurde eine Rampenfunktion ohne Probe genutzt. Aus jeweils 50 Messungen bei konstantem Feld wurde die Streuung ermit-

telt und in Abb. 4.7b als Funktion der Flussdichte (Hall-Signal) sowie in Abb. 4.7a als Funktion des Stroms dargestellt. Das Hall-Signal variiert zwischen $CV = 0.018\%$ und $CV = 0.1\%$, das Stromsignal zwischen $CV = 0.045\%$ und $CV = 0.17\%$.

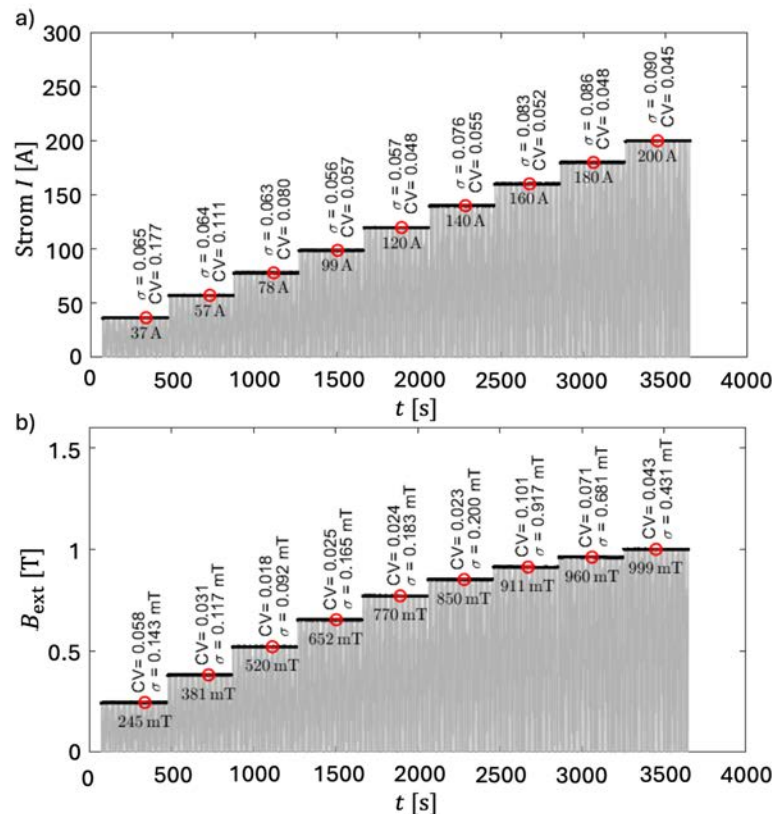


Abb. 4.7: Darstellung der Rampenfunktionen mit den jeweils ermittelten Standardabweichungen σ und Variationskoeffizienten CV [%] der Signalamplituden. a) $I(t)$ -Rampe zur Bewertung der Genauigkeit der Strommessung mit CV -Werten $< 0.18\%$, was auf eine hohe Messstabilität deutet. b) $B(t(I))$ -Rampe zur Analyse der Feldstabilität im Luftspalt mit CV -Werten $< 0.17\%$, was auf eine hohe Feldstabilität deutet.

Zur Bestimmung der effektiven Mindestnachweisgrenze wurden die kleinsten Quantisierungsschritte erfasst. Dazu kam, wie in Abschnitt 4 beschrieben, eine programmierte Rampenfunktion auf Basis einer ansteigenden Stromstärke zum Einsatz. Aus der resultierenden Stufenfunktion in Abb. 4.8 wurde die erste eindeutig differenzierbare Schwelle bestimmt. Für die Hall-Sonden ergibt sich aus dem Flussdichtesignal B (rot) eine Feldauflösung von < 0.001 T. Für das Stromsignal I (blau) liegt die Mindestnachweisgrenze zwischen 0.12 A und 0.2 A. Die Schwankungen der Hall-Sondenmessung liegen im Leerzustand bei etwa 0.0008 T und bei einer temperaturstabilisierten SmCo-Probe bei etwa 0.00004 T.

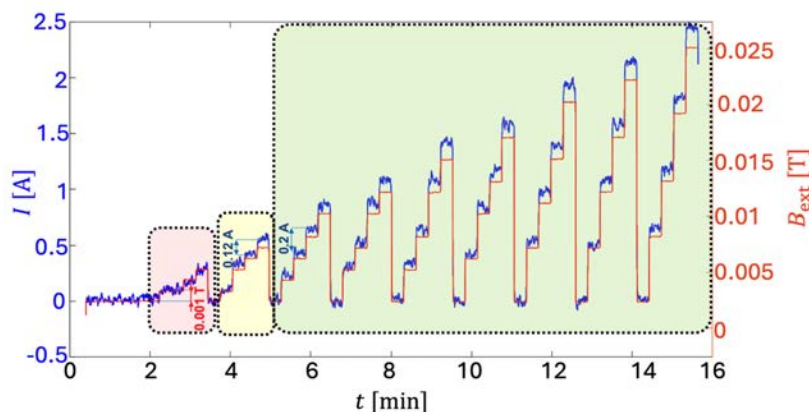


Abb. 4.8: Stufenfunktion zur Bestimmung der kleinsten Quantifizierungsschritte. Dargestellt sind die Flussdichtemessung (rot) und die Strommessung (blau). Bei der Flussdichtebestimmung zeigt sich schon bei der kleinsten Quantifizierungsstufe eine eindeutig erfassbare Änderung von etwa 0.001 T bei geringem Rauschanteil. Dagegen sind bei der Strommessung Werte größer 0.12 A erforderlich, um eine eindeutig erfassbare Änderung zu erzielen.

4.3 Konzept 2 (Rotierende Probe)

4.3.1 Technische Kennwerte

In Tab. 13 sind die wichtigsten experimentell bestimmten Kennwerte von Konzept 2 zusammengefasst. Analog zu Konzept 1 werden die technischen Kennwerte anhand der Strom-Feld-Kennlinie dargestellt, ebenso wie der Einfluss der Magnetkreisconfiguration auf die Probenfeldverteilung. Anschließend werden Messgenauigkeit, technische Stabilität sowie die minimale und wiederholbare Messbarkeit aufgeführt.

Tab. 13: Technische Kennwerte Konzept 2.

Konzept 2: Rotierende Probe	
Probengröße [mm]	5 x 5 x 5 bis 30 x 20 x 10
Probentemperatur [°C]	20-180
Heizrate [°C/s]	0.67
Abkühlrate [°C/s]	0.1
Externe Feldstärke [kA/m]	0-2000
Feldänderungsrate [T/s]	< 80
Feldbelastung	Unipolar
Feldverteilung	Dynamisch
Konfiguration	teiloffener Kreis
Magnetisierungsmessung	Helmholtz-Messspule
Messziele	Recoil-Entmagnetisierungskurven, Entmagnetisierungsscans

Strom-Feld-Kennlinie

Zur Bewertung der maximalen Feldstärke im Luftspalt wurde der Verlauf der Flussdichte in Abhängigkeit vom Strom als $B(I)$ -Kennkurve (analog zum Vorgehen in Konzept 1) aufgenommen. Die auf der Probenscheibe installierte Hall-Sonde wurde zentral im Luftspalt unter den Polschuhen positioniert und eine Stromrampe durchgeführt. Während des Versuchs wurden das Feldsignal und das angelegte Stromsignal synchron aufgezeichnet. Die Messungen zeigen, dass bei einer Stromstärke von etwa 400 A eine externe Flussdichte B von ca. 2.4 T bzw. ein Feld H_{ext} von ca. 1910 kA/m im Luftspalt erreicht wird, wie in Abb. 4.9 dargestellt. Der $B(I)$ -Verlauf steigt bis etwa 150 A (1.7 T) annähernd linear an und flacht anschließend ab, was der beginnenden magnetischen Sättigung des Jochs entspricht.

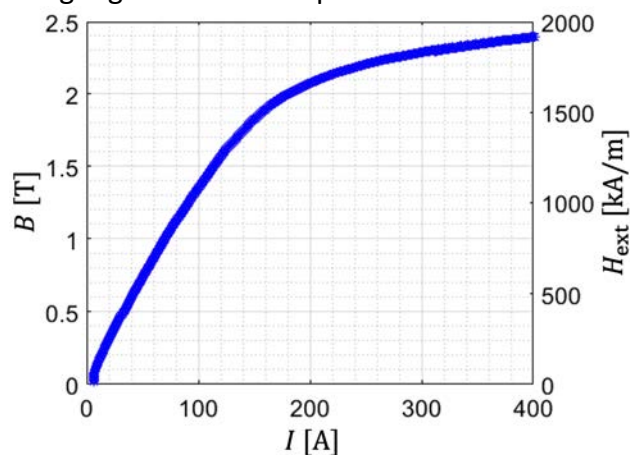


Abb. 4.9: Magnetische Leermesskurve B bzw. H_{ext} in Abhängigkeit vom Strom I zur Bestimmung der maximalen Feldstärke im Luftspalt ($B = 2.4 \text{ T}$, $\approx 1910 \text{ kA/m}$ bei 400 A) sowie des Übergangs in die Jochsättigung, erkennbar am Abknicken der Kurve ab etwa 150 A.

Feldverteilung einer Magnetprobe

Zur Analyse des Einflusses des Magnetjochs auf die Feldverteilung wurde analog zu Konzept 1 eine FEM-Simulation einer N52-Magnetprobe ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) bei 0 kA/m externem Feld

durchgeführt. Abb. 4.10 zeigt den Vergleich zwischen a) der Probe in Luft, c) dem Zustand im Luftspalt des Prüfstands. Die zugehörigen quantitativen Feldverteilungen sind als Histogramme in b) und d) dargestellt.

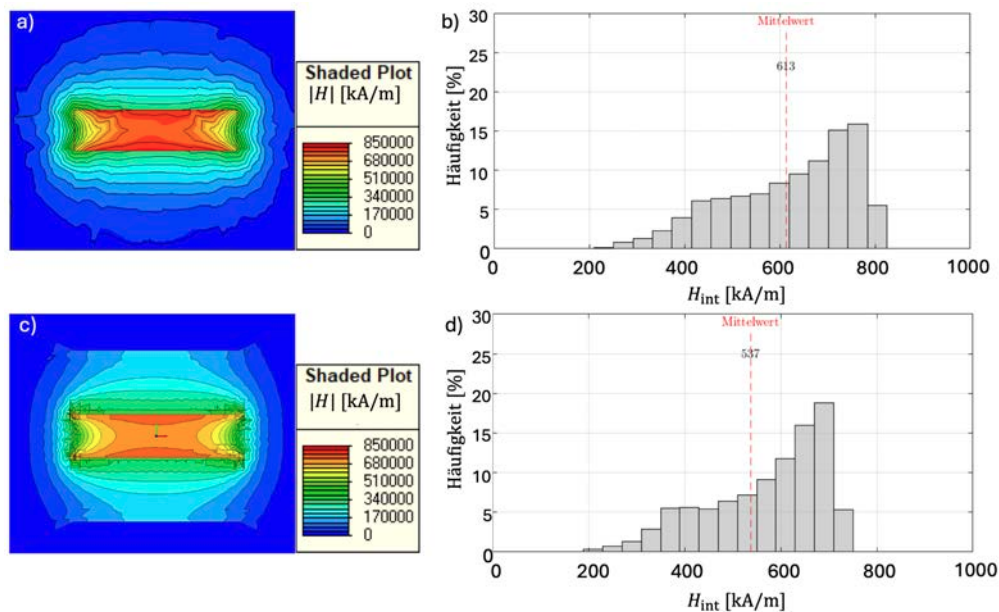


Abb. 4.10: Simulierte Feldvisualisierungen einer N52-Probe ($N = 0.56$) in (a, c) mit zugehöriger Feldstärkenverteilung (Histogramm) in (b, d). (a, b) zeigen die Simulation in Luft und (c, d) im Luftspalt (Probenposition) des Prüfstands konzepts bei 0 A. In a) ergibt sich eine mittlere Feldstärke von etwa 613 kA/m, während in c) ein Mittelwert von 537 kA/m erreicht wird. Dies spiegelt sich auch in den Visualisierungen wider, in denen a) höhere Feldbereiche aufweist als d).

Im offenen Kreis (a, b) weist die Probe eine mittlere Feldstärke von etwa 613 kA/m auf, während im teilgeschlossenen Kreis mit magnetischem Joch (c, d) etwa 537 kA/m erreicht werden. Zudem zeigen sich im Joch geringere entmagnetisierende Bereiche mit maximal etwa 750 kA/m, während im offenen Kreis Feldstärken über 800 kA/m auftreten.

Magnetfeldverteilung im Luftspalt

Da die Probe im Konzept 2 im Gegensatz zu Konzept 1 nicht statisch fixiert ist, sondern durch das Entmagnetisierungsfeld rotiert, variiert die Feldbelastung örtlich und zeitabhängig. Abb. 4.11a zeigt die simulierte Feldverteilung im Probenvolumen (Luft) eines $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ Quaders unter den Polschuhen (Position 0°) mit radial nach außen abnehmender Feldstärke von etwa 1.4 T ($>1160 \text{ kA/m}$) im Zentrum bis 1.38 T (1040 kA/m) am Probenrand bei 125 A Strom.

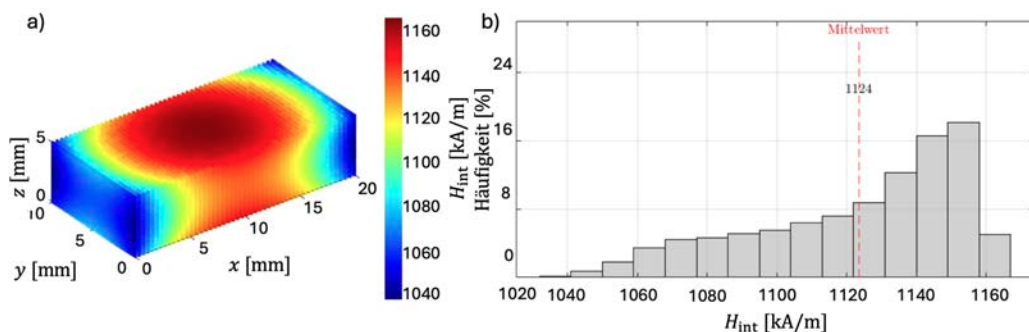


Abb. 4.11: Simulative Untersuchung der Feldstärkenverteilung H_{ext} [kA/m] im Volumen eines Quaders mit Standardprobenmaßen ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) bei einer mittleren Flussdichte von etwa 1.4 T ($\approx 1114 \text{ kA/m}$) zur Beurteilung der Feldinhomogenität im Luftspalt. a) visualisierte Feldstärkeverteilung. b) zugehöriges simuliertes Histogramm der Feldstärkeverteilung zur quantitativen Auswertung der Feldinhomogenität. Im Vergleich zu Konzept 1 (Abb. 4.4) zeigt sich eine höhere Streuung der Feldstärke im betrachteten Volumen.

Das zugehörige Histogramm in Abb. 4.11b zeigt eine Feldstärkenverteilung um einen Mittelwert von 1124 kA/m mit Hauptanteilen zwischen 1060 und 1160 kA/m.

Entmagnetisierungsfaktor

Um den Einfluss des Magnetjochs auf das innere Selbstfeld zu untersuchen, wurde analog zum Vorgehen mit Konzept 1 (Abschnitt 4.2.1) ein N52-Magnet mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ in zwei Konfigurationen simulationsbasiert betrachtet: a) magnetisch offener Kreis in Luft und b) Positionierung im Luftspalt des Prüfstands. Es ergeben sich Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.56$ im offenen Kreis und $N = 0.51$ im Luftspalt. Abb. 4.12 zeigt den Verlauf der Probenpolarisation sowie des Entmagnetisierungsfaktors einer niederkoerzitiven N52-Probe. Mit zunehmendem entmagnetisierendem Feld sinkt N von etwa 0.51 im Arbeitspunkt auf etwa 0.46 bei einer Polarisation von rund 0.5 T.

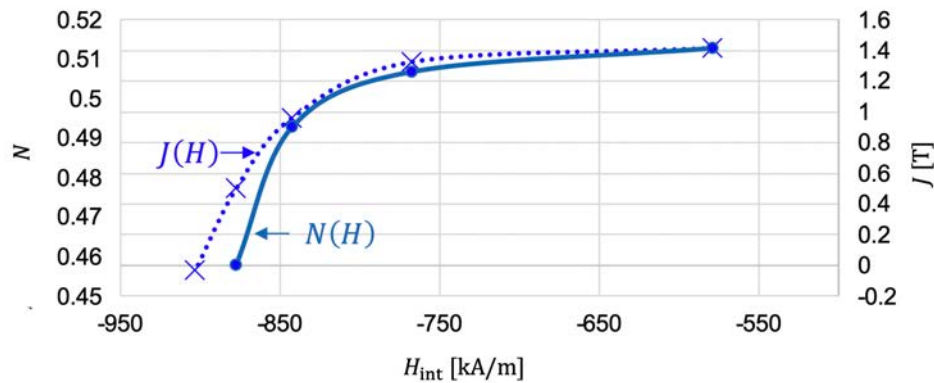


Abb. 4.12: Simulierter Entmagnetisierungsfaktor $N(H_{\text{int}})$ eines N52-Magneten ($N = 0.56$) in Abhängigkeit vom externen Gegenfeld mit zugehörigen Entmagnetisierungskurven $J(H_{\text{int}})$. Im linearen Bereich der $J(H_{\text{int}})$ -Kurve bis ca. 780 kA/m bleibt $N(H_{\text{int}})$ nahezu konstant mit nur geringer negativer Steigung, während mit abnehmender Probenpolarisation auch der Wert von N sinkt.

4.3.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit

Die Temperaturregelgenauigkeit liegt im Bereich zwischen 25 °C und 160 °C bei etwa ± 0.5 °C. Durch Luftverwirbelungen infolge der Probenbewegung auf dem Drehteller können leichte Abweichungen auftreten. Zur Bestimmung des Variationskoeffizienten wurde analog zu Konzept 1 bei einer Rampenfunktion mit und ohne Probe die Streuung über 50 Messungen unter konstantem Feld ausgewertet. Abb. 4.13 zeigt a) $B(t)$ -Messungen der Hall-Sonde infolge der Stromrampe $I(t)$ und b) die magnetische Polarisation einer SmCo-Probe. Die Erfassung des externen Feldes in a) variiert zwischen $CV = 0.03$ % und $CV = 2$ %.

Die Erfassung der magnetischen Polarisation über die Helmholtz-Messspule an einer temperaturstabilisierten SmCo-Probe in b) zeigt Variationen zwischen $CV = 0.2$ % und $CV = 0.4$ %. Die effektive Mindestnachweisgrenze, ermittelt durch eine Stromrampe im leeren Prüfstand, liegt bei der Feldmessung des externen Feldes bei etwa 0.00238 T. Für das Messsignal der Helmholtz-Messspule, das auf Magnetisierungsmessungen ohne direkten Einfluss des externen Feldes basiert, ist dieses Vorgehen nicht anwendbar. Es erfasst ausschließlich irreversible Änderungen des Probensignals, die materialabhängig sind und sich daher nicht zur Bestimmung der technischen Nachweisgrenze eignen.

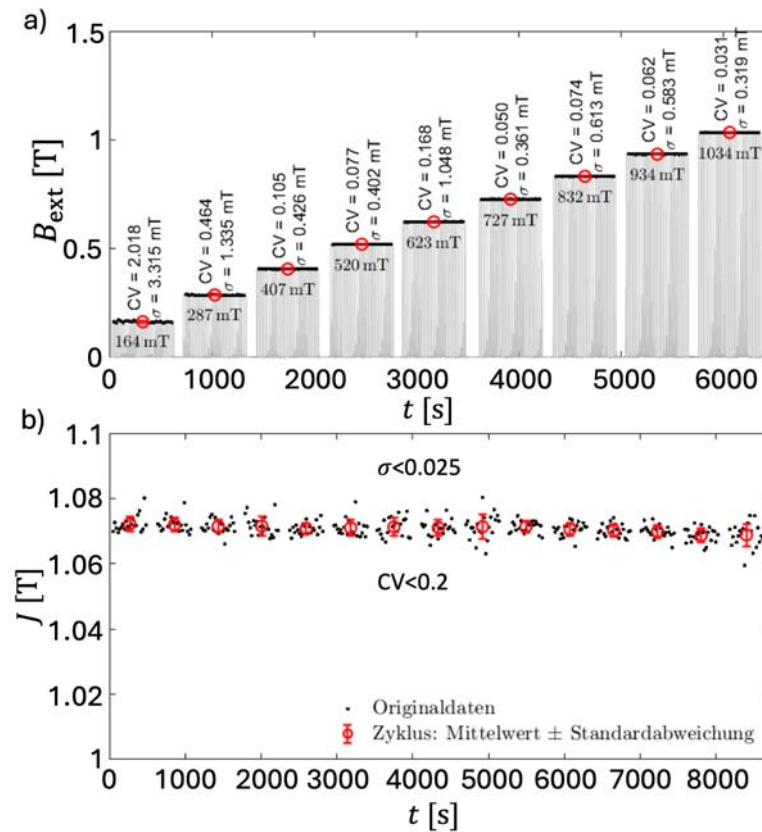


Abb. 4.13: Darstellung der Rampenfunktionen mit den jeweils ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten CV [%] der Signalamplituden zur Bewertung der Feld- und Messstabilität. a) Verlauf der Flussdichterampe $B(t(I))$ zur Analyse der Feldstabilität im Luftspalt mit einem mittleren Variationskoeffizienten von etwa 0.33 %, was auf eine hohe Feldstabilität hinweist. b) Verlauf der Polarisation $J(t)$ zur Bewertung der Genauigkeit der Helmholtz-Messspulenmessung an einer temperaturstabilisierten SmCo-Probe mit einem mittleren Variationskoeffizienten von < 0.2 %, was auf eine hohe Messstabilität hinweist.

4.4 Konzepte 3 und 4: Offene Magnetkreismessungen mit Proben-temperierung

4.4.1 Technische Kennwerte

Tab. 14 zeigt die wichtigsten, experimentell bestimmten Kennwerte der Konzepte 3 und 4. Im Folgenden werden Messgenauigkeit, Temperaturstabilität und Reproduzierbarkeit betrachtet.

Tab. 14: Technische Kennwerte Konzepte 3 und 4.

Konzept 3: Momentmessspule mit Proben-temperierung		Konzept 4: Momentmessspule mit Scanfunktion und Proben-temperierung	
Probengröße [mm]	5 x 5 x 5 bis 40 x 40 x 10	Probengröße [mm]	5 x 5 x 5 bis 40 x 40 x 10
Proben-temperierung [°C]	20-260	Proben-temperierung [°C]	20-260 (Heizfolie) -5-80 (Peltier)
Heizrate [°C / s]	0.7	Heizrate [°C / s]	0.66 (Heizfolie)
Abkühlrate [°C / s]	0.15	Abkühlrate [°C / s]	0.12 (Heizfolie)
Feldverteilung	Selbstentmagnetisierungsfeld	Feldverteilung	Selbstentmagnetisierungsfeld
Feldbelastung	-	Feldbelastung	-
Konfiguration	Offener Kreis	Konfiguration	Offener Kreis
Magnetisierungsmessung	Helmholtz-Messspule	Magnetisierungsmessung	Helmholtz-Messspule, Hall-Sensor
Messziele	Temperatur Entmagnetisierungskurven, Temperaturabhängige Viskosität, Temperaturbasierter Viskositätsparameter	Messziele	Field Maps: Temperaturabhängig, Viskosität

4.4.2 Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit

Konzept 3

Zunächst wurde ein Vergleich zwischen den Messwerten der rotierenden Probe und einer manuellen Helmholtz-Messspulenmessung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung mit einer Abweichung von weniger als 1 %, was auf die genauere Positionierung der Probe in der automatisierten Variante des Testaufbaus zurückgeführt werden kann. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Untersuchung des Einflusses der Heizeinheit auf die Messgenauigkeit. Die Signalrauschwerte variierten dabei zwischen 0.00015 T ohne Temperaturregelung und 0.0002 T bei einer Temperaturregelung auf 100 °C mittels einer temperaturstabilen SmCo-Probe.

Konzept 4

Die Messgenauigkeit bei Konzept 4 umfasst die Positions- und Wiederholgenauigkeit der Probeneinheit in der Helmholtz-Messspule sowie die Streuung der Hall-Sonde für lokale Messungen. Die Schwankungen der integralen Magnetisierung liegen im Leerzustand bei etwa 0.01 T und für eine temperaturstabilisierte SmCo-Probe bei etwa 0.008 T. Für die lokale Hall-Sonde wurde ein Rauschen von ca. 0.0002 T gemessen, wie in Abb. 4.14a als $B_z(y)$ -Verlauf ohne Probe dargestellt. Die Hall-Sondentemperatur konnte durch die in Abb. 2.32 (D) beschriebene aktive Sondenkühlung auf eine Streuung von 1–2 °C selbst bei Proben mit Temperaturen von mehr als 260 °C gehalten werden. In Abb. 4.14b ist der $B_z(y)$ -Verlauf über 26 Zyklen im Übergang von Luft zu einer temperaturstabilen SmCo-Probe gezeigt; der mechanische Positionierungsfehler, beträgt dabei etwa 0.4 mm.

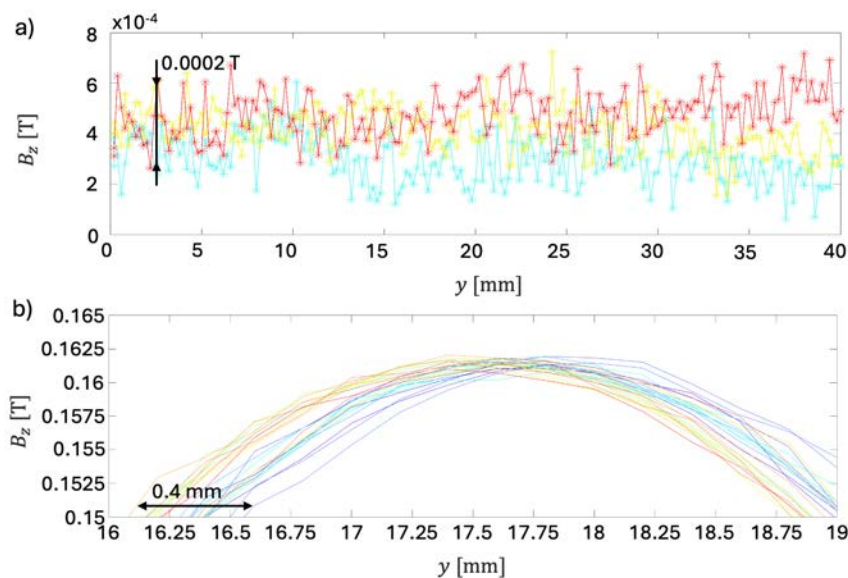


Abb. 4.14: Messgenauigkeit und Stabilität der Hall-Sonde. a) Streufeldverlauf entlang der y -Achsenbewegung (x, y -Raster) in Luft zur Bestimmung des Grundrauschens der Hall-Sonde. Die Flussdichte schwankt über drei Messzyklen (rot, gelb, blau) um etwa 0.0002 T. b) Flussdichteverlauf im Übergang von Luft zu einer temperaturstabilisierten SmCo-Probe zur Bestimmung des mechanischen Positionierungsfehlers bei einem Abstand von etwa 3 mm über 26 Messzyklen. Der mechanische Positionierungsfehler beträgt rund 0.4 mm.

Temperaturstabilität bei Raumtemperatur

Um externe Temperaturschwankungen zu minimieren, wurde neben der thermischen Isolierung ein PTC-Heizelement mit Lüfter integriert (siehe 3.2.3.1.1). Abb. 4.15 zeigt den Temperaturverlauf der Proben temperatur über 9 Stunden. Es zeigt sich eine maximale Schwankung von etwa ± 0.05 °C.

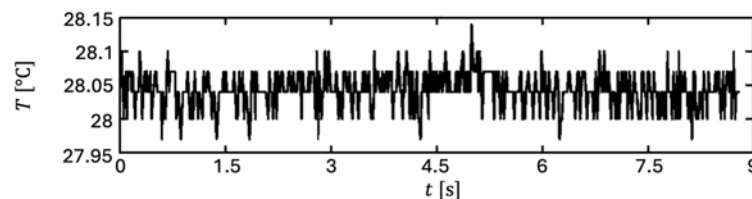


Abb. 4.15: Temperaturstabilität der Raumtemperaturregelung (PTC-Heizelement mit Lüfter, siehe 3.2.3.1.1) über 9 h. Die Schwankungen liegen unter 0.1 °C um den Mittelwert von 28.05 °C.

Da ausschließlich Zeit und Temperatur als Prozessvariablen vorliegen, ist der Startzyklus mit dem Erreichen der Zieltemperatur zu synchronisieren. Dafür wurden neben der temperatursensorbasierten Erfassung der Heizeinheit ein IR-Temperatursensor zur Messung der Probenoberflächentemperatur eingesetzt; die Überlagerung der Temperatursignale ist in Abb. 4.16 dargestellt. Sobald die Heizeinheit die Zieltemperatur erreicht, dauert es etwa 90 s, bis sich auch die Probe vollständig (konstant) auf Temperatur befindet.

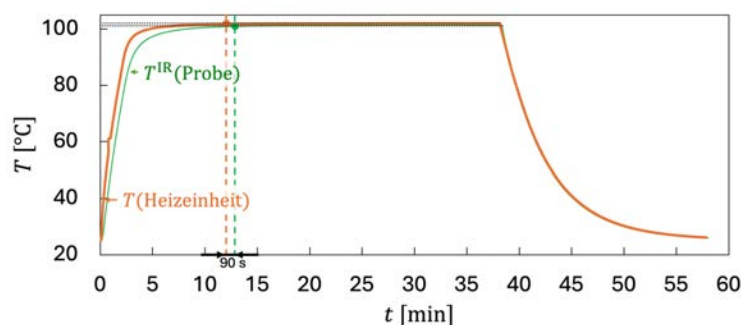


Abb. 4.16: Proben temperaturverlauf (Konzept 3) basierend auf zwei unterschiedlichen Temperaturmessungen: PT-100-Sensor an der Heizeinheit (orange) sowie die Probenoberflächentemperatur mittels IR-Sensor (grün). Der Zeitbedarf bis zur stabilen Temperatur an der Probenoberfläche beträgt nach Erreichen der Zieltemperatur etwa 90 s.

5 Ergebnisse aus Anwendung der Prüfstandskonzepte

Im Kapitel 5, werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an den in Abschnitt 3.4.1 vorgestellten Prüfkörpern, den Permanentmagneten, dargestellt. Diese Ergebnisse stammen sowohl aus der Anwendung der entwickelten Prüfstandskonzepte als auch aus vergleichbaren, standardisierten Verfahren nach Abschnitt 3.3. Zunächst werden vergleichende Validierungen durchgeführt, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Konzepte mit den state-of-the-art-Verfahren überprüfen und einen einführenden Hinweis auf die Bedeutung der vorgestellten Resultate geben, bevor diese in Kapitel 7 detailliert diskutiert werden. Das Ergebniskapitel gliedert sich in mehrere Unterkapitel, deren Struktur in Abb. 5.1 dargestellt ist.

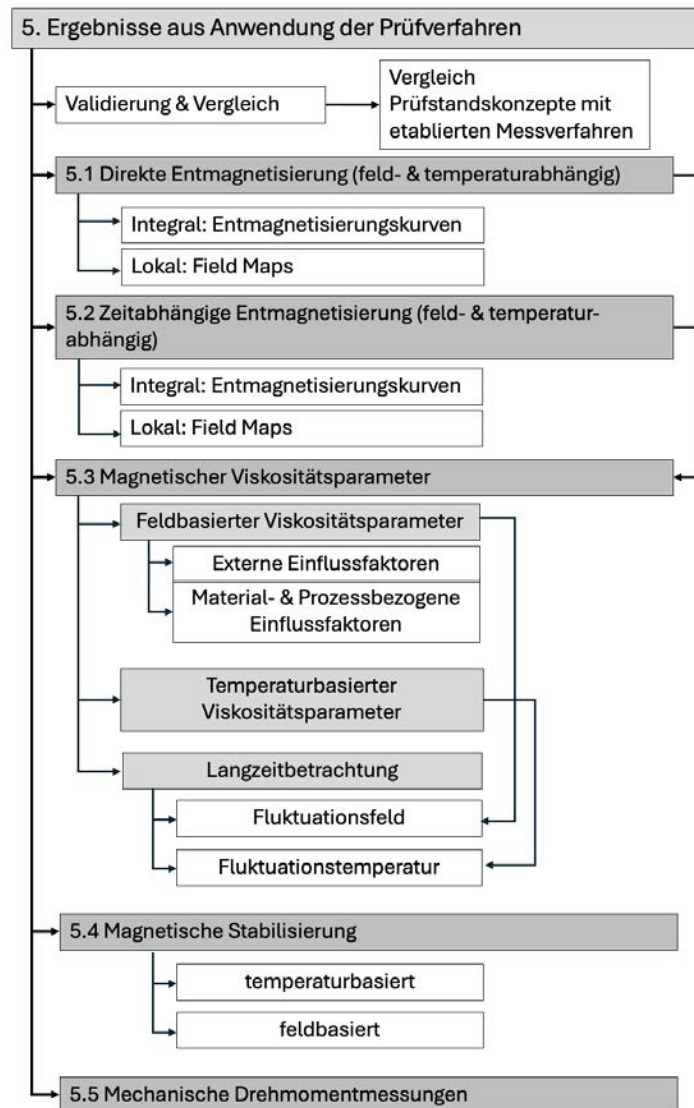


Abb. 5.1: Übersicht über den Aufbau des Ergebnisteils. Das Ergebniskapitel gliedert sich in die Darstellung direkter sowie zeitabhängiger feld- und temperaturbasierter Entmagnetisierungsprozesse, jeweils in lokaler Form über Field Maps und in integraler Form über $J(H)$ - und $J(T)$ -Verläufe. Darauf aufbauend werden feld- und temperaturbasierte magnetische Viskositätsparameter sowie zugehörige Fluktuationsgrößen zur Langzeitbetrachtung abgeleitet. Ergänzend werden Stabilisierungsverfahren zur Reduktion zeitabhängiger Verluste sowie der Zusammenhang zwischen magnetischen Messgrößen und mechanischen Drehmomentmessungen dargestellt.

Die direkte Entmagnetisierung wird in Abschnitt 5.1 behandelt und umfasst die feld- und temperaturabhängige Entmagnetisierung, analysiert in integraler Form über Entmagnetisierungskurven in Abschnitt 5.1.2 sowie in lokaler Form über Field Maps in Abschnitt 5.1.3. In Abschnitt 5.2 folgt die zeitabhängige Entmagnetisierung, dargestellt in integraler Form in Abschnitt 5.2.1 und in lokaler Form in Abschnitt 5.2.2. Darauf aufbauend behandelt Abschnitt 5.3 das Verhält-

nis zeitabhängiger und direkter Entmagnetisierung über den feldbasierten magnetischen Viskositätsparameter, wobei externe Einflussfaktoren in Abschnitt 5.3.3 sowie material- und prozessbezogene Einflussfaktoren in Abschnitt 5.3.4 betrachtet werden. Die Ergebnisse des feldbasierten Viskositätsparameters werden in Abschnitt 5.3.5 um Ergebnisse des neuen temperaturbasierten Viskositätsparameter erweitert. Auf Grundlage der ermittelten Viskositätsparameter werden in Abschnitt 5.3.6 Möglichkeiten aufgezeigt, wie Fluktuationsfeld und Fluktuations-temperatur zur Prognose zukünftiger Magnetisierungswerte genutzt werden können. Neben der Abschätzung der Prognose können die Permanentmagneten auch vorstabilisiert werden, wodurch zeitabhängige Verluste reduziert werden, was in Abschnitt 5.4 vorgestellt wird. Den Abschluss bildet die praxisorientierte Anwendung der Konzepte in Abschnitt 5.5. Dabei werden magnetische Zustände mechanisch über die Wechselwirkung des magnetischen Moments mit dem entmagnetisierenden externen Feld mittels Drehmomentmessungen erfasst.

5.1 Direkte Entmagnetisierung

Zur direkten Entmagnetisierung zählen feld- und temperaturabhängige Veränderungen der Probenmagnetisierung. Diese Veränderungen können sowohl reversibel als auch irreversibel sein. Während in Abschnitt 5.1.2 Ergebnisse in Form integraler Magnetisierungsänderungen dargestellt werden, erfolgt in Abschnitt 5.1.3, die Betrachtung lokaler Streufeldverteilungen (Field Maps) bei unterschiedlichen Magnetisierungszuständen.

5.1.1 Vergleichende Validierung: Entmagnetisierungskurven

Zum Vergleich von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven wurde ein N52-Magnet mit allen drei Verfahren untersucht, dargestellt in Abb. 5.2: a) Konzept 1, b) Konzept 2 und c) Hysteresegraph. Die unterschiedlichen Messtechniken führen zu Abweichungen im Verlauf der $J(H)$ -Kurven, während die zentralen Werte wie Polarisierung und Koerzitivfeld sehr gut übereinstimmen. Zu den systembedingten Unterschieden zählt insbesondere, dass die Konzepte im quasi magnetisch offenen Kreis arbeiten, wodurch das externe Feld H_{ext} auf das interne Feld H_{int} , wie beim Hysteresegraphen, korrigiert werden muss. Außerdem misst ein Hysteresegraph die totalen Verluste bei angelegtem Feld, die sowohl reversible als auch irreversible Prozesse umfassen, während die beiden Konzepte in diesem Beispiel die irreversiblen Änderungen ohne angelegtes Feld erfassen.

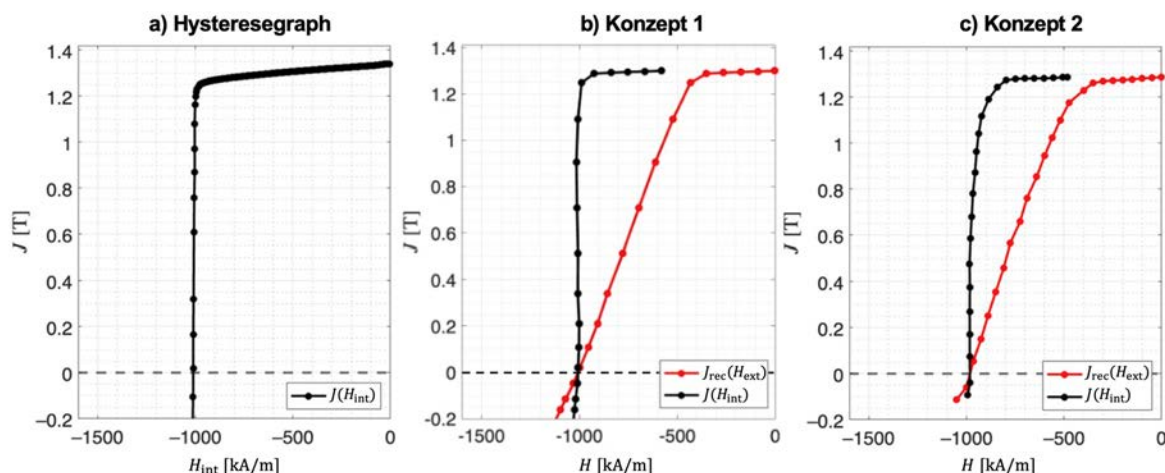


Abb. 5.2: Vergleich von Entmagnetisierungskurven einer N52-SH Probe bei 80 °C: a) $J(H_{\text{int}})$ -Hysteresekurve des Hysteresegraphs, b) $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}}, H_{\text{int}})$ Konzept 1, c) $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}}, H_{\text{int}})$ Konzept 2. In b) und c) ist $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ rot und $J_{\text{rec}}(H_{\text{int}})$ schwarz dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Verfahren, den Herstellerangaben sowie den gemessenen H_{ci} - und J_{r} -Werten. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Vergleich der temperaturbasierten Entmagnetisierung von Konzept 3 und 4 mittels Hysteresegraph

Zur Validierung der temperaturbasierten Entmagnetisierungskurven wurden temperaturabhängige Hysteresegraph Messungen verwendet. Dabei werden die von Konzept 3 gemessenen Polarisations-Temperatur-Kurven $J(T)$ mit den feldabhängigen $J(H_{\text{int}})$ -Kurven aus dem Hysteresegraph bei denselben Probentemperaturen verglichen. Die Messungen erfolgten an einer N52-Probe ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) bei Temperaturen von 20, 50, 75, 100, 125, 150, 175 und 200 °C (Abb. 5.3a). In den $J(H_{\text{int}})$ -Kurven der verschiedenen Probentemperaturen sind die Arbeitsgeraden der N52-Proben für $N = 0.4$, $N = 0.56$ und $N = 0.8$ eingezeichnet.

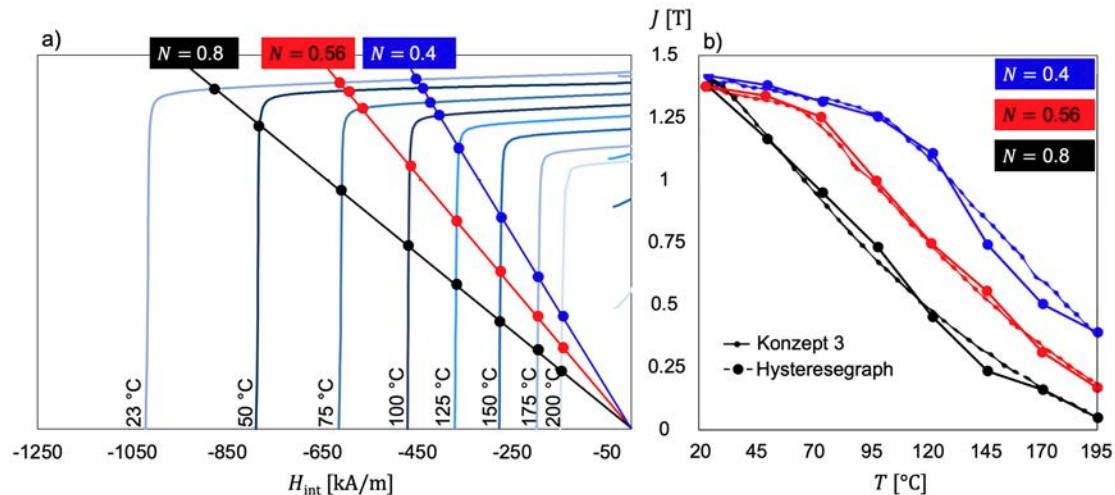


Abb. 5.3: Validierung der offenen Kreis Polarisations-Temperatur-Kurven $J(T)$ von Konzept 3. a) Hysteresegraph- $J(H_{\text{int}})$ -Kurven einer N52-Probe bei verschiedenen Temperaturen mit eingezeichneten Arbeitsgeraden ($N = 0.8$, $N = 0.56$, $N = 0.4$). Die Schnittpunkte dieser Geraden mit den Kurven sind durch Kreise markiert und in b) als $J(T)$ -Kurven (Hysteresegraph) dargestellt, zusammen mit den experimentell bestimmten Polarisations-Temperatur-Kurven $J(T)$ aus Konzept 3 für dieselben Entmagnetisierungsfaktoren. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Polarisationswerte über den gesamten Temperaturverlauf.

Die Schnittpunkte der Arbeitsgeraden mit den $J(H_{\text{int}})$ -Kurven entsprechen den offenen Kreis Werten $J(H_{\text{ext}} = 0)$ der jeweiligen Temperatur. Die resultierenden Schnittpunkte sind in Abb. 5.3b dargestellt, zusammen mit den direkt gemessenen $J(T)$ -Kurven aus Konzept 3. Der Vergleich beider Messmethoden zeigt einen konsistenten Trend über alle Entmagnetisierungsfaktoren und bestätigt sowohl die Magnetisierungserfassung als auch die Temperaturbestimmung.

5.1.2 Feld- und temperaturabhängige Entmagnetisierungskurven

Nach vergleichender Validierung werden fortfolgend feldabhängige Entmagnetisierungskurven von Konzept 1 und 2 für mehrere Materialgüten und Formfaktoren verglichen sowie temperaturabhängige Entmagnetisierungseffekte untersucht. Anschließend wird der Einfluss der Signalform auf das Messergebnis analysiert, gefolgt von einem Vergleich unipolarer (einseitige Gegenfeldrichtung) und bipolarer Feldbelastung (wechselnde Feld- und Gegenfeldrichtung).

5.1.2.1 Feldabhängige Entmagnetisierung

Abb. 5.4 zeigt Entmagnetisierungskurven aus Prüfstandskonzept 1, der Standardproben aus Tab. 11 ($20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$), bezogen auf das äußere Feld H_{ext} in a). Mittels eines Entmagnetisierungsfaktors von $N = 0.52$ wurden diese Kurven auf das jeweils interne Feld H_{int} entschert, wie in b) dargestellt. Abb. 5.4c zeigt die magnetische Polarisierung, jeweils bezogen auf das externe Feld als auch das interne Feld im Vergleich. Es zeigt sich eine Koerzitivfeldstärke von etwa 1100 kA/m für die N35 und N52-Probe, die N52-M Probe etwas höher von etwa 1150 kA/m. Die nicht direkt zu bestimmenden Proben N52-H und N52-SH weisen bei

Raumtemperatur ein geschätztes Koerzitivfeld von etwa 1400 kA/m bzw. 1550 kA/m auf, basierend auf einer Abschätzung über die Trendlinie im steilen Bereich der Entmagnetisierungskurve.

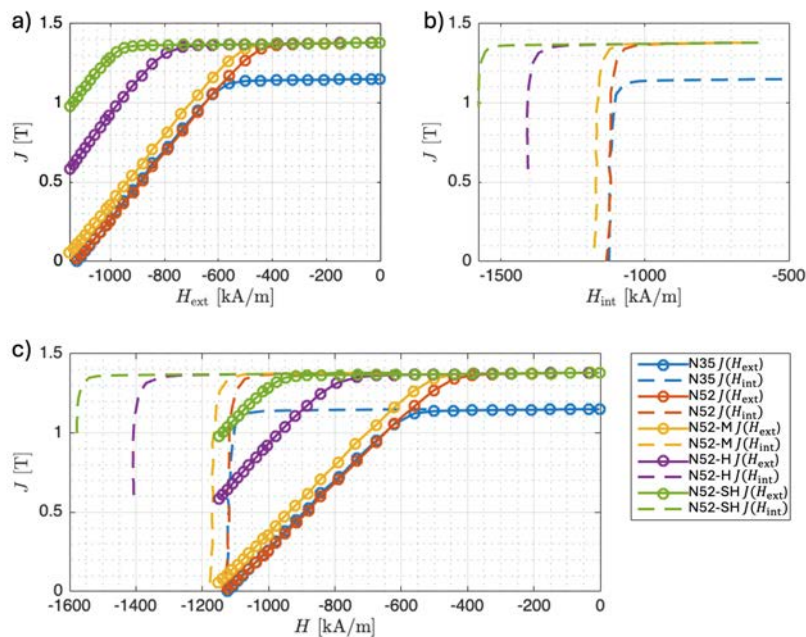


Abb. 5.4: Übersicht von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven aus Konzept 1 für unterschiedliche Probengüten N35, N52, N52-M, N52-H und N52-SH, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.1.2.1. Dargestellt sind a) der Verlauf der Polarisation in Abhängigkeit vom externen Feld $J(H_{\text{ext}})$, b) die Entsicherung des externen Feldes auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ sowie c) die Überlagerung von $J(H_{\text{ext}})$ und $J(H_{\text{int}})$. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Herstellerangaben und den gemessenen Werten von H_{cj} und J_r . Die fehlenden Messwerte der Proben N52-H und N52-SH resultieren aus der begrenzten maximal erreichbaren externen Feldstärke von Konzept 1.

Dieselben Proben wurden mit Konzept 2 vermessen, wie in Abb. 5.5 dargestellt. Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten, mit dem Unterschied, dass alle Proben vollständig entmagnetisiert werden konnten. Auch hierbei ergeben sich vergleichbare Werte für die Koerzitivfeldstärke: etwa 1100 kA/m für die N35- und N52-Probe, etwa 1180 kA/m für die N52-M, rund 1350 kA/m für die N52-H und etwa 1500 kA/m für die N52-SH bei Raumtemperatur.

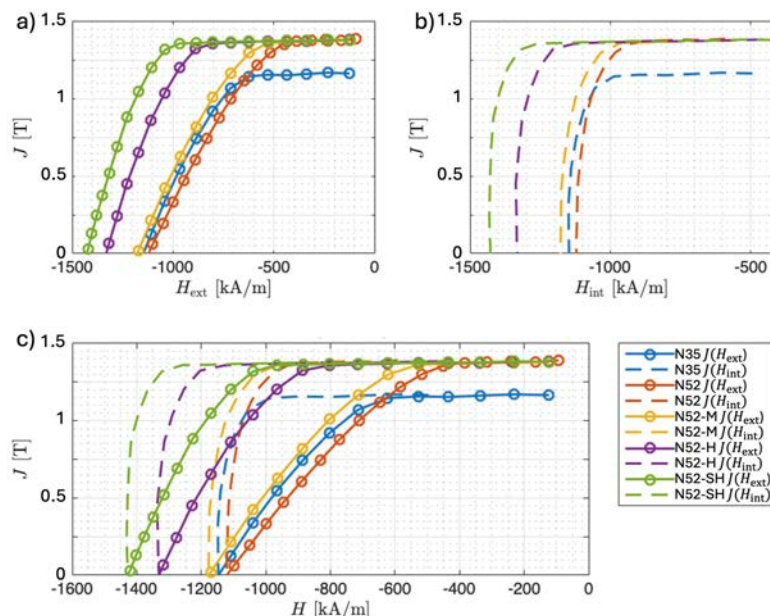


Abb. 5.5: Übersicht von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven aus Konzept 2 für unterschiedliche Probengüten N35, N52, N52-M, N52-H und N52-SH, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.2.2.1. Dargestellt sind a) der Verlauf der Polarisation in Abhängigkeit vom externen Feld $J(H_{\text{ext}})$, b) die Entsicherung des externen Feldes auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ sowie c) die Überlagerung von $J(H_{\text{ext}})$ und $J(H_{\text{int}})$. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Herstellerangaben und den gemessenen Werten von H_{cj} und J_r .

Zur Untersuchung unterschiedlicher Geometrien wurden N52-Proben mit den Entmagnetisierungsfaktoren $N = 0.40$, $N = 0.45$, $N = 0.50$, $N = 0.56$ und $N = 0.80$ (Proben-details siehe Abb. 3.37) mit Konzept 1 vermessen. Abb. 5.6 zeigt die jeweiligen $J(H_{\text{ext}})$ -Kurven in a), entschert mit dem jeweiligen Entmagnetisierungsfaktor zu $J(H_{\text{int}})$ in b) und beide Kurven: $J(H_{\text{int}}, H_{\text{ext}})$ in c) dargestellt. Im Vergleich der $J(H_{\text{ext}})$ -Kurven zeigt sich, dass mit zunehmendem Entmagnetisierungsfaktor der Abfall nach dem Kniepunkt flacher verläuft.

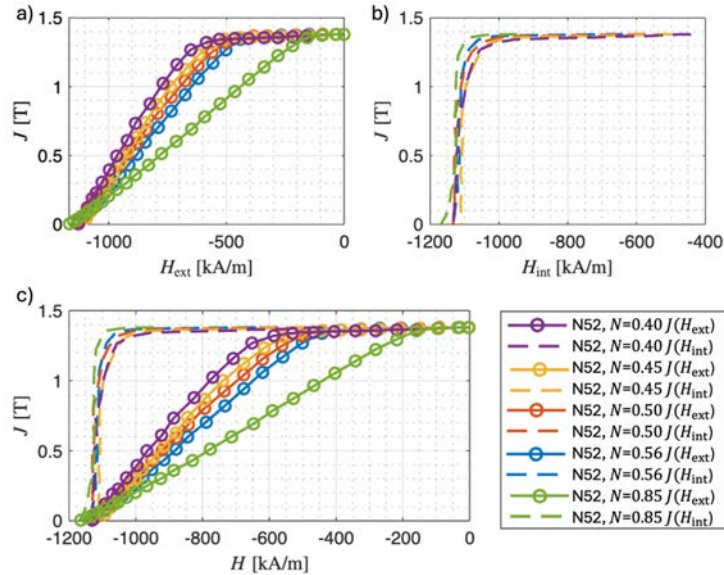


Abb. 5.6: Übersicht von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven aus Konzept 1 für unterschiedliche Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.4$, $N = 0.45$, $N = 0.5$, $N = 0.56$ und $N = 0.8$ bei gleicher Probengüte N52, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.1.2.1. Dargestellt sind a) der Verlauf der Polarisation in Abhängigkeit vom externen Feld $J(H_{\text{ext}})$, b) die Entschertung des externen Feldes auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ sowie c) die Überlagerung von $J(H_{\text{ext}})$ und $J(H_{\text{int}})$. Mit zunehmendem Entmagnetisierungsfaktor verschieben sich die Kniepunkte der $J(H_{\text{ext}})$ -Kurven zu höheren Feldstärken, und die Verläufe werden flacher, während die $J(H_{\text{int}})$ -Kurven weitgehend übereinander liegen.

Neben der inhomogenen inneren Selbstfeldverteilung der N52-Proben mit unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren wurden auch Kugelmagnete mit homogenem innerem Selbstfeld ($N = 1/3$) und unterschiedlichem maximalen Energieprodukt $(BH)_{\text{max}}$ untersucht. Dafür wurden N35-, N38- und N42-Magnete mit einem Durchmesser von 5 mm bzw. 10 mm vermessen. Die Messergebnisse sind in Abb. 5.7 dargestellt.

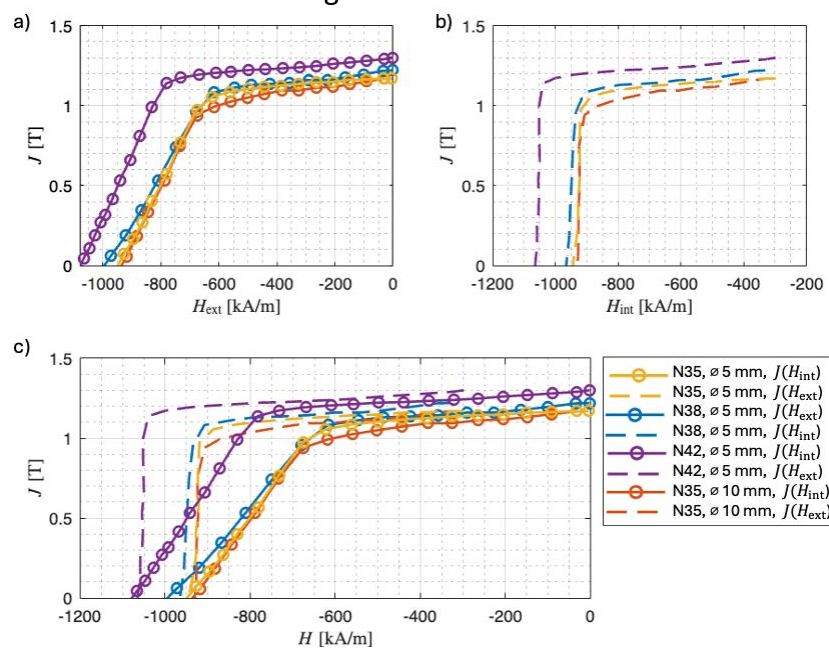


Abb. 5.7: Übersicht von $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven aus Konzept 1 für Kugelmagnete der Güten N35, N38 und N42, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.1.2.1. Dargestellt sind a) der Verlauf der Polarisation in Abhängigkeit vom externen Feld $J(H_{\text{ext}})$, b) die Entschertung des externen Feldes auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ sowie c) die Überlagerung von $J(H_{\text{ext}})$ und $J(H_{\text{int}})$.

Die $J(H_{\text{int}})$ -Kurven der Kugelmagnete zeigen im Kniebereich einen weniger runden Verlauf als die der Quadermagneten. Zur weiteren Validierung von Konzept 1 wurde eine 3 mm große N42-Kugel mittels VSM vermessen und unter Annahme eines Entmagnetisierungsfaktors von $N = 0.3$ entschert. Abb. 5.8 zeigt die $J(H)$ -Kurven beider Verfahren sowohl als $J(H_{\text{ext}})$ als auch $J(H_{\text{int}})$, wobei sich gute Übereinstimmungen zeigen. Die fehlenden Messwerte der $J(H)$ -Kurven von Konzept 1 bei $H < 400$ kA/m resultieren aus der Messmethodik, die ausschließlich entmagnetisierende Felder appliziert.

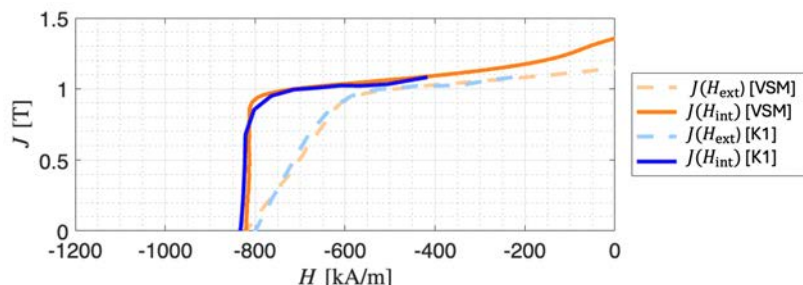


Abb. 5.8: Vergleich eines Kugelmagneten der Güte N35 zwischen $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven aus VSM und Konzept 1. Dargestellt sind $J(H_{\text{int}})$ (durchgezogene Linien) und $J(H_{\text{ext}})$ (gestrichelte Linien). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung bei der Ansätze.

5.1.2.2 Temperaturabhängige Entmagnetisierung

Im Rahmen von Konzept 3 wurden temperaturabhängige Entmagnetisierungsverläufe im offenen Magnetkreis gemessen. Folgend werden die Ergebnisse der Temperaturrampe für die Proben N35, N35-UH, N52, N52-M, N52-H und N52-SH in Abb. 5.9a als $J(T)$ -Kurven mit zusätzlich markierten Übergangstemperaturen. Die Probengrundmaße betragen: $40 \times 40 \times 4$ mm³ mit einem Entmagnetisierungsfaktor von ca. $N = 0.82$ (Details siehe Abb. 3.37b). Während die Probe N52 bereits bei Raumtemperatur irreversible Magnetisierungsverluste zeigt, liegt die Übergangstemperatur bei Probe N52-M bei ca. 40 °C, bei der Probe N35 bei 55 °C und bei der Probe N52-H bei 65 °C. Die Probe N52-SH weist eine Übergangstemperatur von ca. 85 °C auf, während die Probe N35-UH mit 170 °C die höchste Übergangstemperatur aufweist. Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Entmagnetisierungsfaktoren wurden N52-Proben mit verschiedenen Abmessungen eingesetzt (Abb. 5.9b). Die Übergangstemperaturen betragen für $N = 0.82$ etwa 25 °C, für $N = 0.80$ etwa 30 °C, für $N = 0.74$ etwa 40 °C und für $N = 0.65$ etwa 50 °C. Es zeigt sich eine mit abnehmendem Entmagnetisierungsfaktor zunehmende Übergangstemperatur.

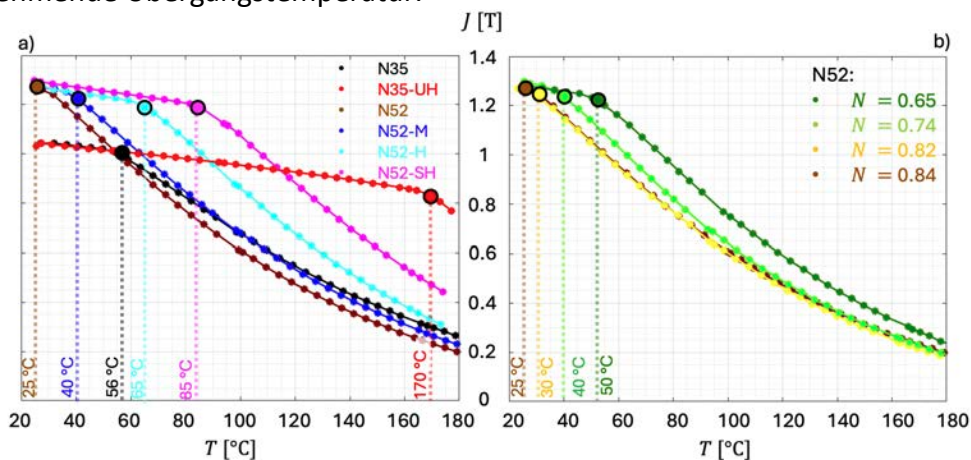


Abb. 5.9: Temperaturabhängige Entmagnetisierungskurven $J(T)$ (Konzept 3, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.1) mit angegebenen Übergangstemperaturen. In a) sind Messungen bei konstantem Entmagnetisierungsfaktor ($N = 0.8$, gleiche Probengeometrie) mit den jeweiligen Übergangstemperaturen für N35 (40 °C), N35-UH (170 °C), N52 (25 °C), N52-M (56 °C), N52-H (65 °C) und N52-SH (85 °C) dargestellt. b) zeigt N52-Messungen bei variierendem Entmagnetisierungsfaktor mit den jeweiligen Übergangstemperaturen: $N = 0.82$ (25 °C), $N = 0.80$ (30 °C), $N = 0.74$ (40 °C) und $N = 0.65$ (50 °C). Es zeigt sich eine mit zunehmendem Koerzitivfeld ansteigende Übergangstemperatur sowie eine mit sinkendem Entmagnetisierungsfaktor steigende Übergangstemperatur.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Koerzitivfeldstärke die Übergangstemperaturen steigen, wobei die Probe N35 bei ähnlicher Koerzitivfeldstärke eine höhere Übergangstemperatur als N52 aufweist, was den Einfluss der Polarisierung auf das Selbstentmagnetisierungsfeld verdeutlicht. Zudem führt ein abnehmender Entmagnetisierungsfaktor der Probenform in b) zu steigenden Übergangstemperaturen.

Rücklauf-Temperaturrampe (alternierende Temperatur-Rampe)

Neben den bisher dargestellten direkten Temperaturrampen zur Betrachtung der Polarisationsänderungen auf Messtemperatur ($T_{\max}$), bestehend aus reversiblen und irreversiblen Anteilen, können durch darauffolgende Abkühlung auf Raumtemperatur ($T_{\text{RT}}^{\max}$) die reversiblen temperaturbedingten Anteile ausgeschlossen werden, sodass die beobachteten Polarisationsabnahmen auf die irreversiblen Verlustanteile zurückgeführt werden können.

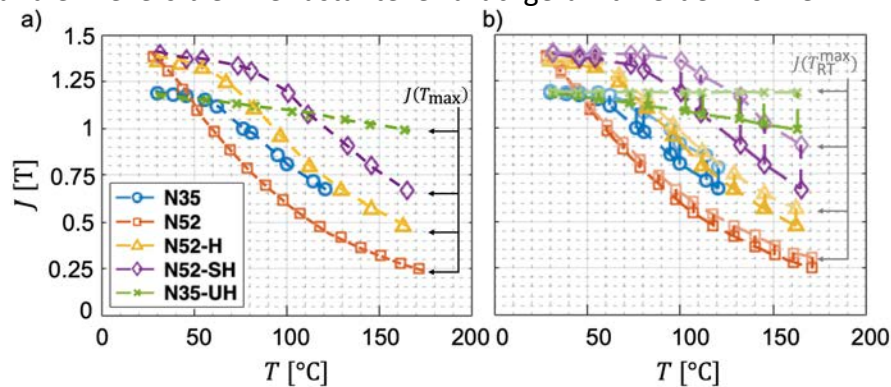


Abb. 5.10: Temperaturabhängige Entmagnetisierungskurven $J(T)$ (Konzept 3, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.1)) der Güten N35, N52, N52-H, N52-SH, N35-UH mit $N = 0.82$. a) zeigt den resultierenden Polarisationsverlauf unter Temperatur $J(T_{\max})$. b) zeigt neben $J(T_{\max})$ unter Temperatur auch die Rücklaufkurve mit den Polarisationswerten nach der maximalen Temperatur auf die Referenztemperatur T_{RT} abgekühlt als $J(T_{\text{RT}}^{\max})$. Während bei der N52-Probe in b) kaum Unterschiede zwischen $J(T_{\max})$ und $J(T_{\text{RT}}^{\max})$ auftreten (hauptsächlich reversible Änderungen), nimmt der Abstand mit steigender Koerzitivfeldstärke aufgrund zunehmender irreversibler Verluste deutlich zu. Bei der N35-UH-Probe treten im betrachteten Temperaturbereich keine irreversiblen Verluste auf.

In Abb. 5.10 sind Rücklauf- $J(H)$ -Temperaturmessungen für die Standardproben (nach Tab. 11) mit $N = 0.82$ dargestellt. Die Übergangstemperaturen von $J(T_{\max})$, inklusive reversibler Anteile, liegen für N52 bei etwa 25 °C, für N35 bei etwa 56 °C und für N52-SH bei etwa 82 °C. Die Übergangstemperaturen von $J(T_{\text{RT}}^{\max})$, ohne reversible Anteile, liegen bei rund 25 °C, 60 °C und 100 °C. Bei der N52-Probe treten bereits bei Raumtemperatur irreversible Verluste auf, wodurch die Verläufe von $J(T_{\max})$ und $J(T_{\text{RT}}^{\max})$ nahezu deckungsgleich sind. Mit zunehmender Koerzitivfeldstärke werden insbesondere oberhalb der Übergangstemperatur deutliche Unterschiede zwischen $J(T_{\max})$ und $J(T_{\text{RT}}^{\max})$ sichtbar. Die N35-UH-Probe zeigt in der betrachteten Temperaturspanne dagegen nur sehr geringe irreversible Verluste.

5.1.2.3 Belastungsarten

In den bisherigen Untersuchungen spielte die Dauer der angelegten Feld- und Temperaturbelastung eine untergeordnete Rolle. Im Folgenden wird daher die Wirkung kurzzeitiger Feldbelastungen im Vergleich zu kontinuierlicher Belastung untersucht. Darüberhinaus wird der Einfluss der Feldrichtung betrachtet, sowohl in Feld- als auch in Gegenfeldrichtung.

Unipolare Belastungsarten bei Puls- und Konstantfeldbelastung

Mit Konzept 1 wurden unipolare Rechteckpulse konstanter Feldstärke sowie eine unipolare Dauerbelastung gleicher Feldstärke untersucht. In Abb. 5.11 ist eine N52-Probe bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von etwa 7 min einem externen (entmagnetisierenden) Feld von $H_{\text{ext}} = 700 \text{ kA/m}$ ausgesetzt. In Abb. 5.11a ist der zeitliche Verlauf des externen Feldes $H_{\text{ext}}(t)$

als Vorgabesignal dargestellt. Abb. 5.11b zeigt den zeitlichen Verlauf der resultierenden Flussdichte $B(H_{\text{ext}})$, die sich aus der Probenmagnetisierung und dem der Magnetisierung entgegenwirkenden externen Feld zusammensetzt.

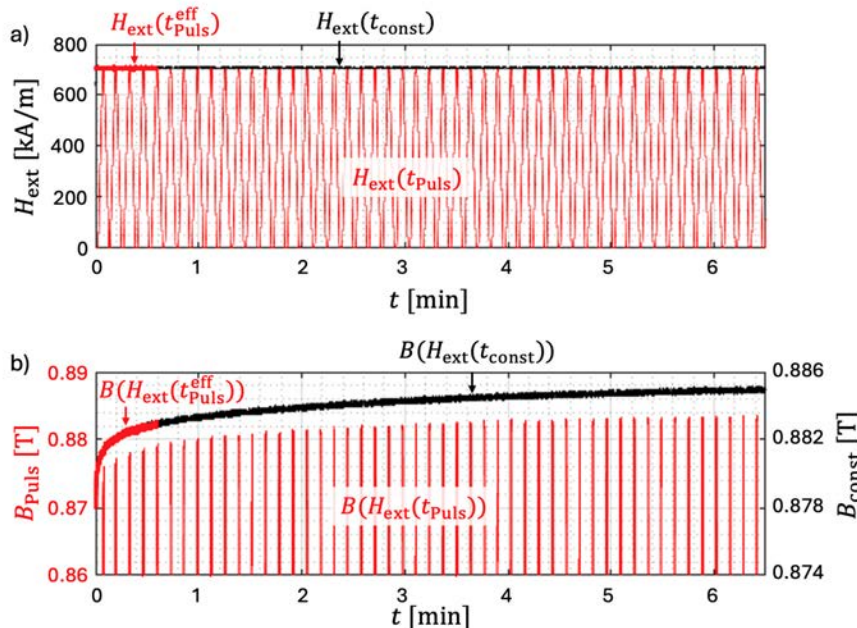


Abb. 5.11: Vergleich von Pulsbelastung (rot) und Konstantfeldbelastung (schwarz) an einer N52-Probe ($N = 0.56$) mit Konzept 1. a) Zeitlicher Feldverlauf $H_{\text{ext}}(t)$ als Vorgabesignal. b) Zeitlicher Verlauf der resultierenden Flussdichte $B(H_{\text{ext}})$. Sowohl bei konstantem Feld $H_{\text{ext}}(t_{\text{const}})$ als auch bei gepulster Belastung $H_{\text{ext}}(t_{\text{Puls}})$ zeigt sich ein exponentieller Anstieg von $B(H_{\text{ext}})$. Für den Zeitvergleich wird die Summe der maximalen Pulsamplituden zur effektiven Wirkzeit $t_{\text{Puls}}^{\text{eff}}$ aufsummiert ($t_{\text{Puls}}^{\text{eff}} \approx 0.7$ min). Die gute Übereinstimmung von $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{Puls}}^{\text{eff}}))$ und $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{const}}))$ zeigt, dass die effektive Wirkzeit der Feldstärke maßgeblich für die zeitabhängige Abnahme ist.

Bei Applikation eines konstanten externen Feldes $H_{\text{ext}}(t_{\text{const}})$ zeigt sich in Abb. 5.11b ein exponentiell zunehmender Verlauf der Flussdichte $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{const}}))$ über den betrachteten Zeitraum. Ein vergleichbares Verhalten ergibt sich bei gepulster Feldbelastung $H_{\text{ext}}(t_{\text{Puls}})$, bei der mit zunehmender Anzahl an Pulsen ebenfalls ein exponentiell zunehmender Verlauf der Flussdichte $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{Puls}}))$ beobachtet wird. Für einen direkten zeitlichen Vergleich wird die Summe der einzelnen Pulsdauern zur effektiven Wirkzeit $t_{\text{Puls}}^{\text{eff}}$ aufsummiert. Die effektive Belastungsdauer der gepulsten Feldbelastung beträgt dabei etwa 0.7 min, während die Dauerbelastung über 7 min erfolgt. Der Vergleich von $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{Puls}}^{\text{eff}}))$ mit $B(H_{\text{ext}}(t_{\text{const}}))$ zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Daraus folgt, dass die effektive Wirkzeit der angelegten Feldstärke maßgeblich für die zeitabhängige Entmagnetisierung ist.

Bipolare Pulsbelastung bei zyklischer Feldanwendung

Zur Betrachtung bipolarer Feldsignale, wurde eine bipolare Pulsrampe durchgeführt. Abb. 5.12a zeigt das Messergebnis einer Pulsrampe eines N52-Magneten bei Raumtemperatur. Bezogen auf die sekundäre y-Achse (Strom I [A]) wird der an- und absteigenden Stromverlauf von -250 A bis 0 A in blau und 0 bis 250 A in rot, dargestellt. Hierbei folgt jeweils ein Feldpuls in Magnetisierungsrichtung und der darauffolgende Feldpuls in Entmagnetisierungsrichtung, wie in 3.2.1.2.2 beschrieben. Abb. 5.12b zeigt den $J(H)$ -Verlauf sowohl in Abhängigkeit von H_{ext} als auch exemplarisch auf H_{int} entschert.

Der Probenmagnetisierungsverlauf in angepasster magnetischer Polarisierung zeigt jeweils den Messpuls bei externer Feldstärke $H_{\text{ext}} = 0$ nach positiver Feldbelastung in rot und nach negativer Feldbelastung in blau. Es zeigt sich anfangs eine leichte Zunahme der rot markierten Magnetisierungspulse, die dann nahezu parallel mit den Entmagnetisierungspulsen abnehmen, bevor diese die Probe vollständig entmagnetisieren (Koerzitivfeld der Probe, $J = 0$). Ab diesem

Feldwert, also bei Feldstärken unmittelbar größer oder kleiner als das Koerzitivfeld, magnetisiert sich die Probe durch die Gegenfeldpulse in die entgegengesetzte Richtung, während die Magnetisierungspulse eine Zunahme der Magnetisierung in der ursprünglichen Richtung bewirken.

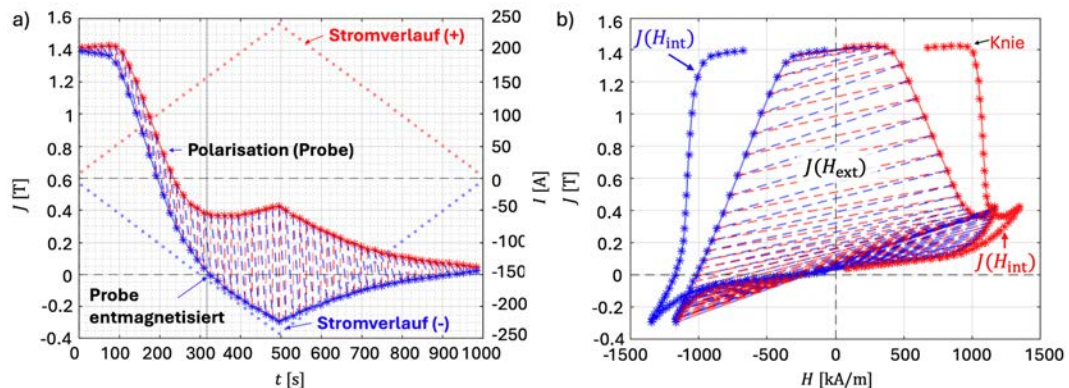


Abb. 5.12: Bipolare Feldrampe am Beispiel einer N52-Probe, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.1.2.2. a) Zeitlicher Verlauf der Probenpolarisation $J(t)$ (primäre y-Achse) und des Stroms $I(t)$ (sekundäre y-Achse). b) Verlauf $J(H_{ext})$ mit Entschärfung auf das interne Feld $J(H_{int})$. Der rot markierte Polarisationsverlauf stellt die Polarisationswerte nach positivem Feldpuls (in Magnetisierungsrichtung) dar, während der blau markierte Polarisationsverlauf die Werte nach negativem Feldpuls (entgegen der Magnetisierungsrichtung) darstellt. Kleine Feldamplituden zu Beginn verschieben die Probenmagnetisierung im linearen Bereich. In der Nähe des Kniepunkts führen Feldpulse in Magnetisierungsrichtung zu einer leicht erhöhten Polarisation, entsprechend reversiblen Änderungen. Anschließend dominieren negative Ausschläge infolge des Selbstfeldes der Probe, sodass gleichhohe positive Feldpulse nur noch eine begrenzte Aufmagnetisierung bewirken. Ab $J = 0$ T können die externen Feldpulse die Probe erneut aufmagnetisieren, bis zu einem maximalen Strom von etwa 250 A entsprechend ± 1400 kA/m. Mit abnehmender Feldamplitude lässt sich die Probe erneut auf $J = 0$ T entmagnetisieren.

Das Vorgehen wurde von einem Messpunkt pro Feldstärke auf 30 Messpunkte mit wechselnder Feldrichtung gleicher Amplitude erweitert, um das zeitabhängige Verhalten zu untersuchen (Abb. 5.13). Über alle Zyklen hinweg zeigt sich eine zusätzliche Zeitabhängigkeit: Die Steigungen der Zyklen nehmen ab und nähern sich null, eine Zunahme der Aufmagnetisierung tritt nicht auf. Die konstanten Aufmagnetisierungspulse führen zu keiner weiteren Aufmagnetisierung (vgl. Abb. 5.13b).

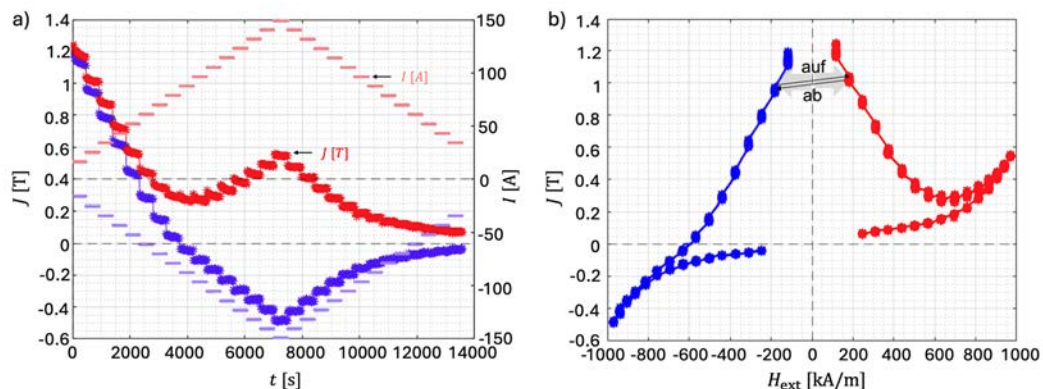


Abb. 5.13: Bipolare Feldrampe mit zusätzlichem Konstantfeldanteil zur Identifikation zeitabhängiger Entmagnetisierungseffekte. a) Zeitlicher Verlauf der Probenpolarisation $J(t)$ (primäre y-Achse) und des Stroms $I(t)$ (sekundäre y-Achse). b) $J(H_{ext})$ -Verlauf. Der rot markierte Polarisationsverlauf stellt die Werte nach positivem Feldpuls (in Magnetisierungsrichtung) dar, während der blau markierte Polarisationsverlauf die Werte nach negativem Feldpuls (entgegen der Magnetisierungsrichtung) zeigt. Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie in Abb. 5.12, erweitert um den Konstantfeldanteil, der sich durch eine kontinuierlich abnehmende Steigung (Nachwirkung, Viskosität) äußert.

5.1.3 Feld- und temperaturabhängige Field Maps

Field Maps erlauben die Betrachtung lokaler Streufeldverteilungen ausgehend vom integralen Magnetisierungszustand der Probe. Hierfür werden unterschiedliche Magnetisierungszustände verwendet, die auf feldabhängiger Entmagnetisierung (Abschnitt 5.1.3.3) bzw. temperaturab-

hängiger Entmagnetisierung (Abschnitt 5.1.3.2) basieren, wie bereits im vorherigen Kapitel in integraler Form aufgeführt.

5.1.3.1 Vergleichende Validierung: Field Maps

Zur Validierung werden die Field Maps aus Konzept 2 und Konzept 3 mit den Referenz-Field Maps eines 3D Hall-Mappers verglichen. Als Vergleichsobjekt dient ein teilentmagnetisierter Hybridmagnet, bestehend aus gefügten Segmentstücken der Güten N52 und N35-SH (Skizze in Abb. 5.14), mit einer Gesamtremanenz von etwa -0.1 T. Die Messungen wurden mit Konzept 2 (Abb. 5.14a), Konzept 4 b) und dem Senis Field-Mapper c) durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Sondenabstände (Konzept 2: 3.5 mm, Konzept 4: 3 mm, Field-Mapper: 3 mm) zwischen den Verfahren nicht direkt vergleichbar sind, da sie die jeweils anwendungsbezogenen Abstände der Methoden widerspiegeln. Die Messergebnisse zeigen die Streufeldverteilung der Polflächenansicht des Hybridmagneten. In der Darstellung repräsentiert der blaue Bereich den Streufeldanteil des N52-Grundmaterials, das bei einem externen Feld von ca. -1350 kA/m (offener Kreis) entmagnetisiert wurde. Im Gegensatz dazu bleibt die Streufeldintensität des kleineren N35-SH-Segments (orange) in seiner ursprünglichen Magnetisierungsrichtung.

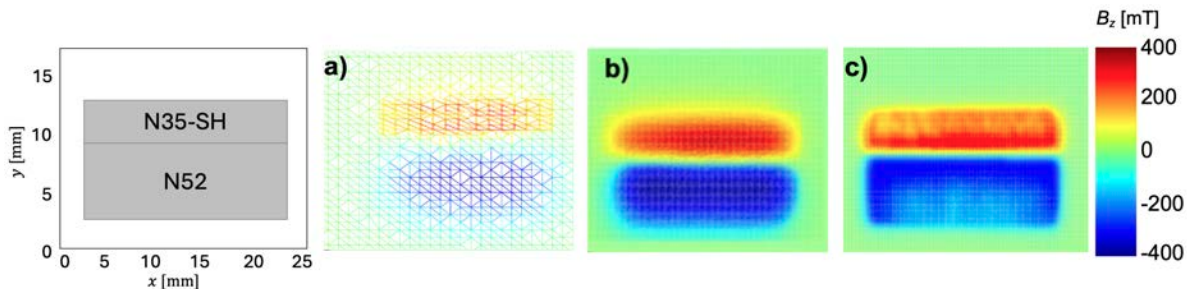


Abb. 5.14: Vergleich der Streufelderfassungen eines Multikomponentenmagnets (N35-SH + N52, siehe Skizze auf der linken Seite, entmagnetisiert auf etwa $J = -0.1$ T). Dargestellt sind die jeweiligen Field Maps im Bereich ± 400 mT mit Färbung entsprechend der Colorbar (rechte Seite) in a) Field Map von Konzept 2, b) Field Map von Konzept 1 und c) Field Map vom Senis Field-Mapper. Der Abstand der Hall-Sonde zur Probenoberfläche ist anwendungsorientiert gewählt (vgl. Text). Trotz der geringeren horizontalen Auflösung in a) gegenüber b) und insbesondere c) lassen sich wichtige Details wie die Intensität der Flussdichten und deren Position über die Streufeldverteilung erfassen.

Zur detaillierteren Validierung von Konzept 2 wurde ein N52-Magnet in einem Abstand von 5 mm untersucht. Abb. 5.15 zeigt sowohl die Frontansicht als auch die Draufsicht der Polflächen als Ergebnis von Konzept 2 (a, b) im Vergleich zum Field-Mapper (c, d). Der Vergleich zeigt, dass Konzept 2 eine geringere Systemauflösung aufweist; dennoch werden wichtige Probendetails ausreichend erfasst.

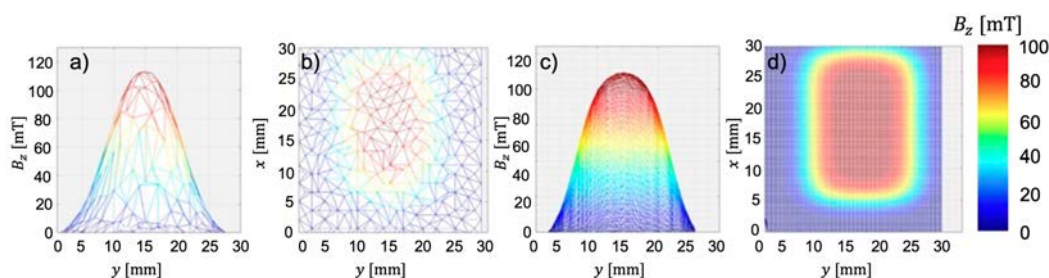


Abb. 5.15: Vergleich der Streufelderfassungen zwischen Konzept 2 (a, b) und Hall Field-Mapper (c, d) einer N52-Serie. (a, c) Seitenansicht $B_z(y)$ und (b, d) die Aufsicht $B_z(x, y)$. Trotz der geringeren horizontalen Auflösung von Konzept 2 im Vergleich zum Field-Mapper werden die wichtigsten Details erfasst, einschließlich der maximalen Streufeldintensität im Zentrum bei ca. 110 mT. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Zusätzlich wurde mit Konzept 4, das temperaturabhängiges Field-Mapping umfasst, eine N52-Scheibenprobe mittels FEA simulativ verglichen. Hierzu wurden drei Temperaturen (20°C , 40°C und 60°C) ausgewählt. Bei einem vergleichbaren Luftspalt von etwa 3 mm wurde jeweils die Streufeldkomponente $B_z(x, y)$ extrahiert, wie in Abb. 5.16 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der experimentell bestimmten und der simulierten Feldverteilung.

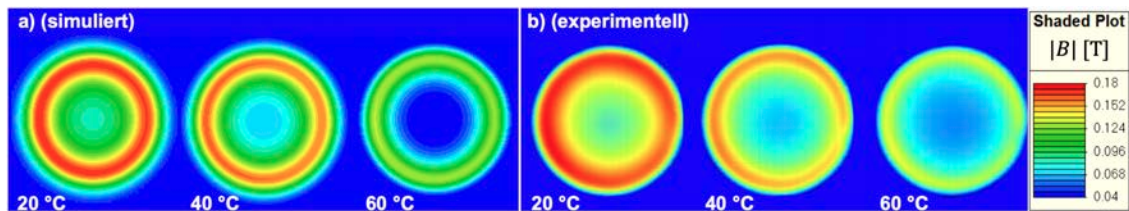


Abb. 5.16: Vergleich experimenteller und simulierter temperaturabhängiger Field Maps einer N52-Probe (Scheibe, $N = 0.82$) bei 20 °C, 40 °C und 60 °C. Die mit Konzept 4 b) experimentell bestimmten und mittels FEA simulierten Streufeldverteilungen zeigen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der temperaturabhängigen Abnahme der Streufeldverteilung und Streufeldintensität.

5.1.3.2 Temperaturabhängige Field Maps

Neben den feldbasierten Entmagnetisierungs-Field-Maps dienen temperaturabhängige Field Maps der Identifizierung des lokalen Entmagnetisierungsverhaltens der Proben bei steigender Temperatur. Hierfür werden Field Maps $B_z^T(x, y)$ der Standardproben (nach Tab. 11) mit $N = 0.82$ jeweils bei Raumtemperatur, 60 °C, 80 °C, 120 °C und 160 °C aufgenommen und in Abb. 5.17 dargestellt. Der Hall-Sondenabstand beträgt 3 mm. Zusätzlich dient die gemessene Magnetisierung $J(T)$ zum integralen Vergleich.

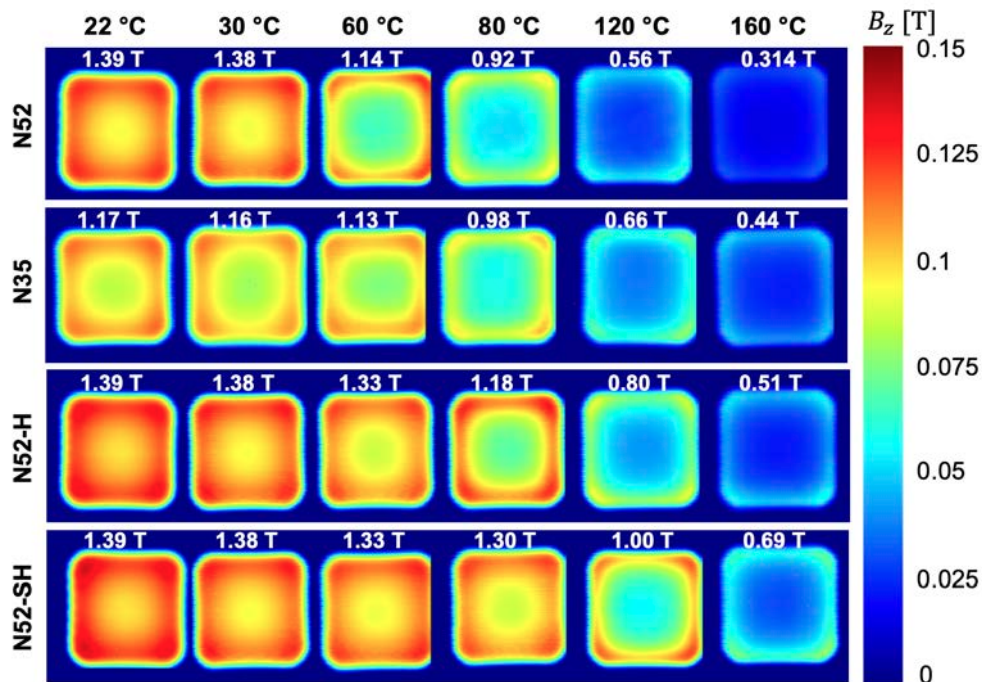


Abb. 5.17: Temperaturabhängige Field Maps der Proben N52, N35, N52-H und N52-SH ($N = 0.82$), gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.3a. Ausgehend von gleichen $(BH)_{\max}$ -Werten zeigt die N52-Probe eine erste signifikante Entmagnetisierung bei 60 °C auf etwa 1.14 T. Ein vergleichbarer Polarisationswert und eine ähnliche Streufeldverteilung treten bei der N52-H-Probe bei etwa 80 °C sowie bei der N52-SH-Probe bei etwa 120 °C auf. Aufgrund der geringeren Polarisation der N35-Probe tritt eine vergleichbare Entmagnetisierung im Vergleich zur N52-Serie erst bei höheren Temperaturen auf. Allgemein zeigt sich, dass mit abnehmender Probenpolarisation die Streufeldintensität im Probenzentrum abnimmt, während sie im Randbereich bis zu höheren Temperaturen weitgehend stabil bleibt.

Während die Proben N52, N52-H und N52-SH zwischen 20 und 30 °C eine nahezu identische Feldverteilung und Polarisation aufweisen, zeigt die N52-Probe bei 60 °C bereits eine um etwa 20 % reduzierte integrale Polarisation. Dies äußert sich in einer starken Abnahme der Feldverteilung im Probenzentrum. Im Vergleich dazu verlieren die Proben N35, N52-H und N52-SH bei 60 °C nur etwa 5 % ihrer Polarisation, wobei die Feldverteilung im Zentrum leicht abnimmt, während der Randbereich nahezu unverändert bleibt. Bei 80 °C sinkt die Polarisation der N52-Probe um 35 %, wobei sowohl das Zentrum als auch der Randbereich eine stark verringerte magnetische Feldverteilung aufweisen. Die Proben N35 und N52-H verlieren jeweils etwa 15 % ihrer Polarisation, insbesondere im Zentrum, während die N52-SH-Probe mit weniger als 8 %

den geringsten Rückgang zeigt. Bei 120 °C reduziert sich die Polarisation der N52-Probe um 60 %, wobei die magnetische Flussdichte im Zentrum auf nahezu 0 mT abnimmt. Die N35-Probe verliert etwa 20 %, ebenfalls mit einer stark reduzierten Flussdichte im Zentrum, während bei N52-H die Verluste bei etwa 40 % liegen, auch hier mit deutlicher Feldabnahme im Zentrum. Die N52-SH-Probe zeigt mit etwa 30 % geringere Verluste. Bei 160 °C sind die Verluste noch ausgeprägter. Die N52-Probe verliert etwa 80 % ihrer Polarisation, die N35-Probe etwa 77 %, während die Werte für N52-H und N52-SH bei 65 % bzw. 50 % liegen. Bei allen Proben zeigt sich die stärkste Abnahme im Probenzentrum, während der Randbereich, insbesondere bei den Proben N35, N52-H und N52-SH, noch vergleichsweise hohe Feldverteilungen von ≥ 0.05 mT aufweist. Im Zentrum nimmt die magnetische Flussdichte hingegen auf nahezu 0 mT ab.

Temperaturabhängige Rücklauf-Field-Maps (alternierende Temperatur-Rampe)

Parallel zum Vorgehen der integralen Rücklauf- $J(T)$ -Kurven (vgl. Abb. 5.10) wird zusätzlich zur integralen Helmholtz-Messspulenmessung auch die lokale Streufeldverteilung bei zunehmender Temperatur $T_{\max}$ und nachfolgendem Abkühlen bei $T_{\text{RT}}^{\max}$ erfasst.

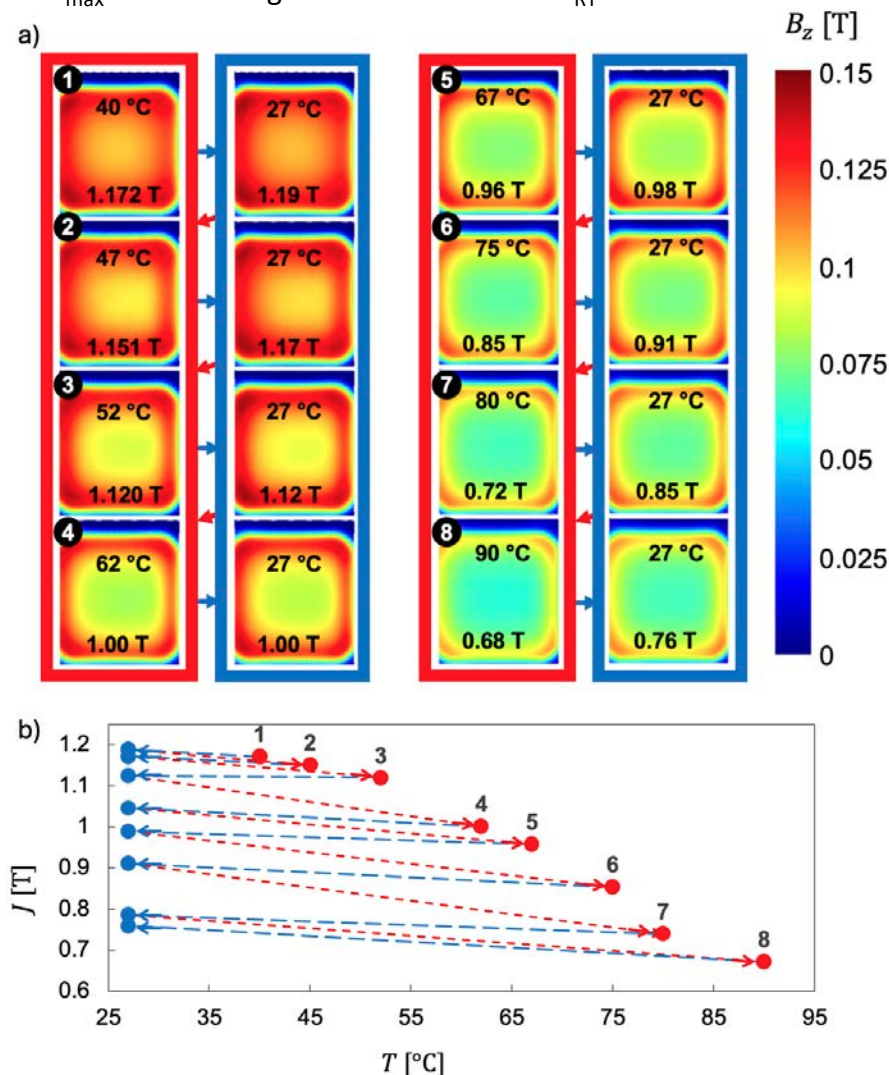


Abb. 5.18: Field Maps bei rücklaufenden Proben Temperaturen einer N35-Probe ($N = 0.82$) gemäß Messprogramm 3.2.3.3.3b. a) Field Maps mit angegebenen Proben Temperaturen und Polarisationswerten. Die rot markierten Maps zeigen die Messungen unter Messtemperatur bei $T_{\max}$, während die blau markierten Maps die Scans bei einer Referenztemperatur von etwa 27 °C als $T_{\text{RT}}^{\max}$ nach $T_{\max}$ darstellen. In b) sind die zugehörigen integralen $J(T)$ -Messwerte dargestellt. Während der Temperaturbelastung (rot) zeigt sich die gesamte Streufeldverteilung bestehend aus reversiblen und irreversiblen Änderungen, während nach Abkühlung auf die Referenztemperatur (27 °C, blau) ausschließlich die irreversiblen Änderungen ohne reversiblen Anteil erfasst werden. Die Abnahme der Streufeldverteilung beginnt im Probenzentrum und setzt im Randbereich zeitlich verzögert ein, zunächst reversibel und anschließend irreversibel, analog zu Abb. 5.17.

Exemplarisch wird dies für die N35-Probe ($40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$) in Abb. 5.18a als $B_z(x, y)$ -Field Maps sowie in Abb. 5.18b als $J(T)$ -Verlauf mit $T_{\max}$ (rot) und $T_{\text{RT}}^{\max}$ (blau) dargestellt. Bis 47°C treten weder in den Field Maps noch in der integralen Polarisation signifikante irreversible Änderungen auf, da die Polarisation nach Abkühlung auf den Ausgangswert von etwa 1.17 T zurückkehrt. Die beobachteten Änderungen sind vollständig reversibel. Ab etwa 50°C setzen irreversible Veränderungen ein, die sich insbesondere durch eine verringerte Streufeldintensität im Probenzentrum zeigen. In der Polarisation-zu-Temperatur-Kurve $J(T)$ in Abb. 5.18b zeigt sich ab dieser Temperatur ein Anstieg der irreversiblen Verluste, sodass der Ausgangszustand von 1.17 T nicht mehr erreicht wird, sondern lediglich 1.12 T. Bis etwa 70°C bleibt der Randbereich in den Field Maps im Vergleich zum Probenzentrum stärker magnetisiert, bevor auch dort mit weiterer Temperaturerhöhung Abnahmen der Streufeldintensität auftreten.

Temperaturabhängige Field Maps von Multikomponentenproben

Nach den vorangegangenen Untersuchungen an Proben mit nahezu homogener Koerzitivfeldstärkenverteilung wird die praktische Relevanz des Ansatzes nun an einer segmentierten, multikomponenten Modellprobe demonstriert. Die Probe mit Skizze in Abb. 5.19a besteht aus verstärkten Randbereichen der Güten N52-H und N52-SH (zur Untersuchung des Einflusses der Koerzitivfeldstärke), während der Kern aus N35 und N52 aufgebaut ist (zur Untersuchung des Einflusses der Polarisation). Die kombinierte integrale Polarisation beträgt 1.35 T. Die integrale $J(T)$ -Kurve der Probe in Abb. 5.19b zeigt eine abnehmende Polarisation von ca. 1.3 T bei 20°C auf 0.5 T bei 170°C . Die dazugehörigen Field Maps als Funktion der Temperatur $B_z^T(x, y)$ für die jeweiligen Magnetisierungszustände sind in Abb. 5.19a dargestellt.

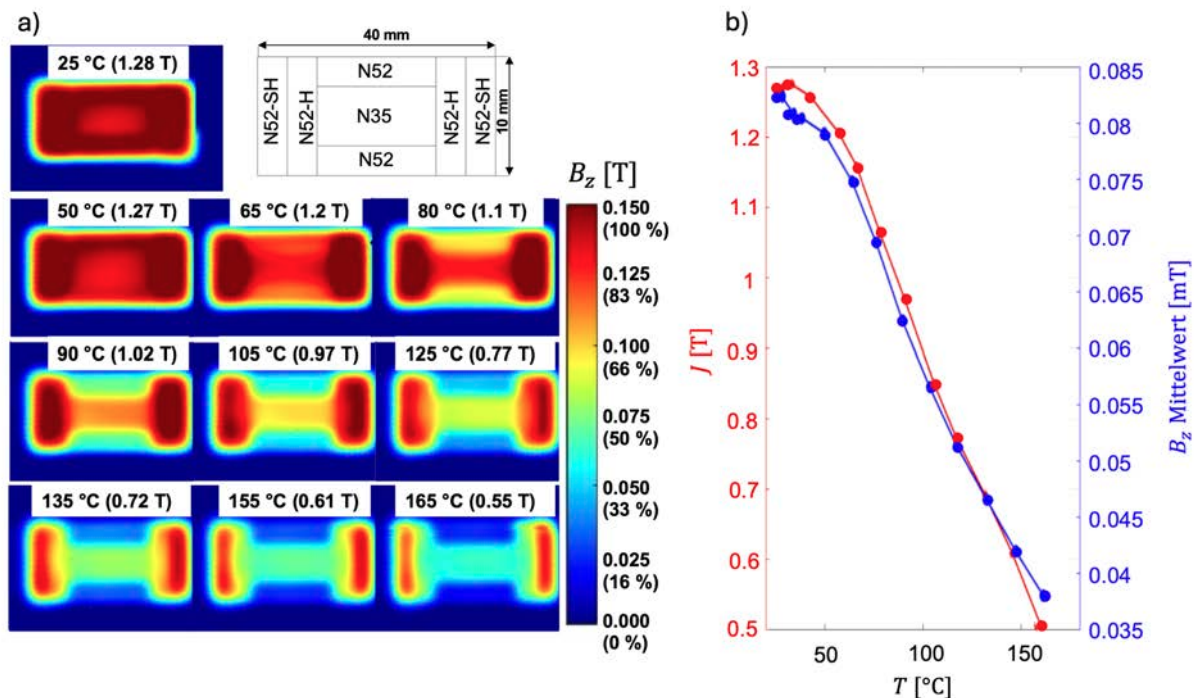


Abb. 5.19: Temperaturabhängige Field Maps (gemäß Messprogramm 3.2.3.3.3a) einer Multikomponentenprobe mit Magnetsegmenten unterschiedlicher Güte (N35, N52, N52-H, N52-SH). a) Streufeldverteilungen: Bei 25°C zeigt sich über dem N35-Kern eine geringere Intensität im Probenzentrum. Mit steigender Temperatur nimmt die Intensität über den N52-Segmenten schneller ab als über dem N35-Kern, sodass bis auf 80°C der N35-Kern nahezu seine Ausgangsintensität beibehält, während die N52-Segmente bereits um mehr als 40 % reduziert sind. Bei weiterer Temperaturerhöhung sinkt die Intensität auch über den N52-H-Bereichen deutlich ab, während die N52-SH-Segmente bei 165°C noch mehr als 80 % ihrer Ausgangsintensität aufweisen. b) Integrale Auswertung mit $J(T)$ -Messung (rot) im Vergleich zur mittleren Streufeldsumme (blau, siehe Text). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen integraler Magnetisierung und lokaler Streufeldsumme. Adaptiert aus Lanz et al. [146].

Im Ausgangszustand bei Raumtemperatur zeigt sich im Bereich des Probenmittelpunkts, bedingt durch den zentralen N35-Magneten, eine um etwa 10–15 % geringere Streufeldintensität. Gleichzeitig führt die höhere Remanenz der äußeren N52-Segmente zu einer erhöhten Streufeldintensität in den Randbereichen. Ab etwa 50 °C treten erste Veränderungen über diesen Randbereichen auf, mit einer Abnahme der Intensität um mehr als 10 %. Bei Temperaturen über 65 °C verringert sich die Streufeldintensität dort beidseitig um über 15 %, während der N35-Kernbereich noch eine etwas höhere Intensität zeigt. Die hochkoerzitiv ausgelegten N52-H- und N52-SH-Segmente bleiben in diesem Temperaturbereich zunächst unverändert. Mit steigender Temperatur verstärkt sich die Differenz: Ab etwa 80 °C liegt die Streufeldintensität im Kern noch über 0.11 T, in den N52-Segmenten bereits unter 0.10 T. Dieser Effekt nimmt bei 90 °C weiter zu. Ab etwa 105 °C zeigen nun auch die N52-H- und N52-SH-Bereiche erste Veränderungen (> 10 %). Bei 125 °C ist der Unterschied deutlich erkennbar: Die N52-SH-Randbereiche weisen eine höhere Intensität auf als die benachbarten N52-H-Segmente. Bei 165 °C beträgt die Streufeldintensität über dem N35-Kern und den beiden N52-H-Bereichen etwa 0.06 T (Reduktion > 60 %). Über den ursprünglichen N52-Segmenten nähert sie sich 0.01 T, während die N52-SH-Segmente weiterhin Werte über 0.11 T aufweisen.

Für den quantitativen Vergleich lokaler Field Maps $B_z(x, y)$ zu integralen $J(T)$ -Messwerten wird die Summe aller B_z -Werte im dargestellten x, y Bereich der Probe gebildet und über die Anzahl der Elemente n von B_z geteilt, um hieraus einen Mittelwert über die Streufeldverteilung zu erhalten:

$$\bar{B}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_z(x_i, y_i) \quad (30)$$

Abb. 5.19b zeigt den Vergleich der integralen $J(T)$ -Messung (rot) mit dem Mittelwert der lokalen Streufeldkomponente $\bar{B}_z$ (blau). Während $J(T)$ den absoluten Polarisationsverlauf darstellt, ist $\bar{B}_z$ eine relative Größe, die aus der Streufeldverteilung abgeleitet wird. Die gute Übereinstimmung im differenziellen Verlauf bestätigt, dass bei homogener Feldverteilung in Magnetisierungsrichtung der Verlauf von $\bar{B}_z(T)$ Rückschlüsse auf den Magnetisierungszustand ermöglicht.

5.1.3.3 Feldabhängige Field Maps

Zur Visualisierung des feldabhängigen Entmagnetisierungsvorgangs, wurde auf Basis von Konzept 2, eine Feldrampe mit zunehmender Intensität pro Field Map, entsprechend dem Messprogramm in Abschnitt 3.2.2.2.2, durchgeführt. Als Basis zur Betrachtung des Entmagnetisierungsvorgangs dient die $J(H)$ -Entmagnetisierungskurve des N52-SH Magneten (20 x 10 x 5 mm³) in Abb. 5.20.

Hierfür wurde die Probe bei 80 °C, beginnend bei $H_{\text{ext}} = -900$ kA/m, schrittweise entmagnetisiert und nach jedem Entmagnetisierungsvorgang, gescannt. Abb. 5.20 zeigt die integrale $J(H)$ -Kurve und Abb. 5.21 die dazugehörigen Field Maps in Seitenansicht $B_z(y)$ und Topansicht $B_z(x, y)$.

Im Anfangszustand (Abb. 5.21, Map 1) zeigt sich eine symmetrische Feldverteilung mit einem ausgeprägten Maximum bei etwa $y = 15$ mm. Mit zunehmender externer Gegenfeldstärke verringert sich dieser Maximalwert sukzessive, während seine Position konstant bei $y = 15$ mm bleibt. Zwischen (Maps 5 und 6) befindet sich das Koerzitivfeld, bei dem die integrale Probenmagnetisierung $J = 0$ wird. Nach erfolgter Ummagnetisierung kehrt das Feldprofil um, wie beginnend bei (Map 6) zu erkennen, wobei der frühere Hochpunkt nun als Minimum im selben Bereich um $y = 15$ mm erscheint.

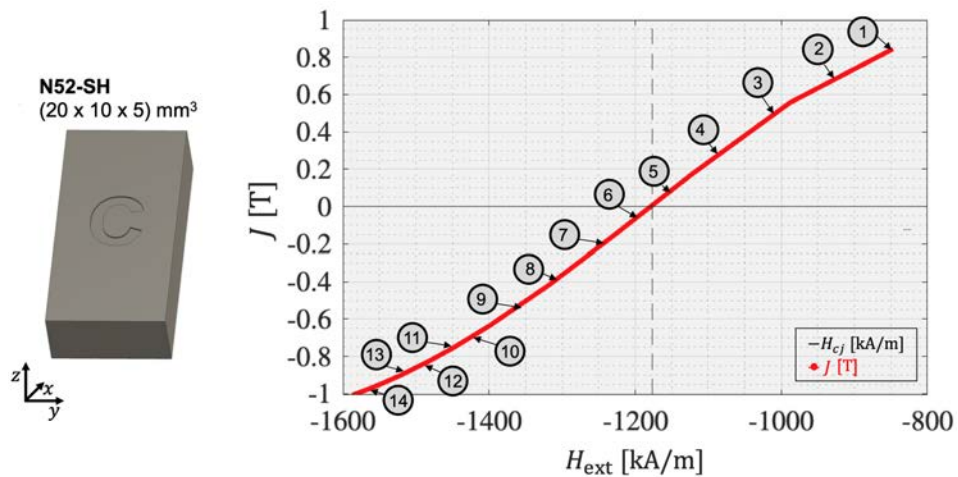


Abb. 5.20: $J(H)$ -Entmagnetisierungskurve der Standardprobe (C, N52-SH, $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$, siehe Skizze) bei 80°C mit markierten Polarisationszuständen (gemäß Messprogramm 3.2.2.2.2). Maps 1–5 zeigen positive Polarisationswerte, Maps 6–14 negative Polarisationswerte. Zwischen Map 5 und 6 wird die Koerzitivfeldstärke erreicht ($H_{cj} = 1170 \text{ kA/m}$). Die nummerierten Polarisationszustände entsprechen den in Abb. 5.21 dargestellten Field Maps. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

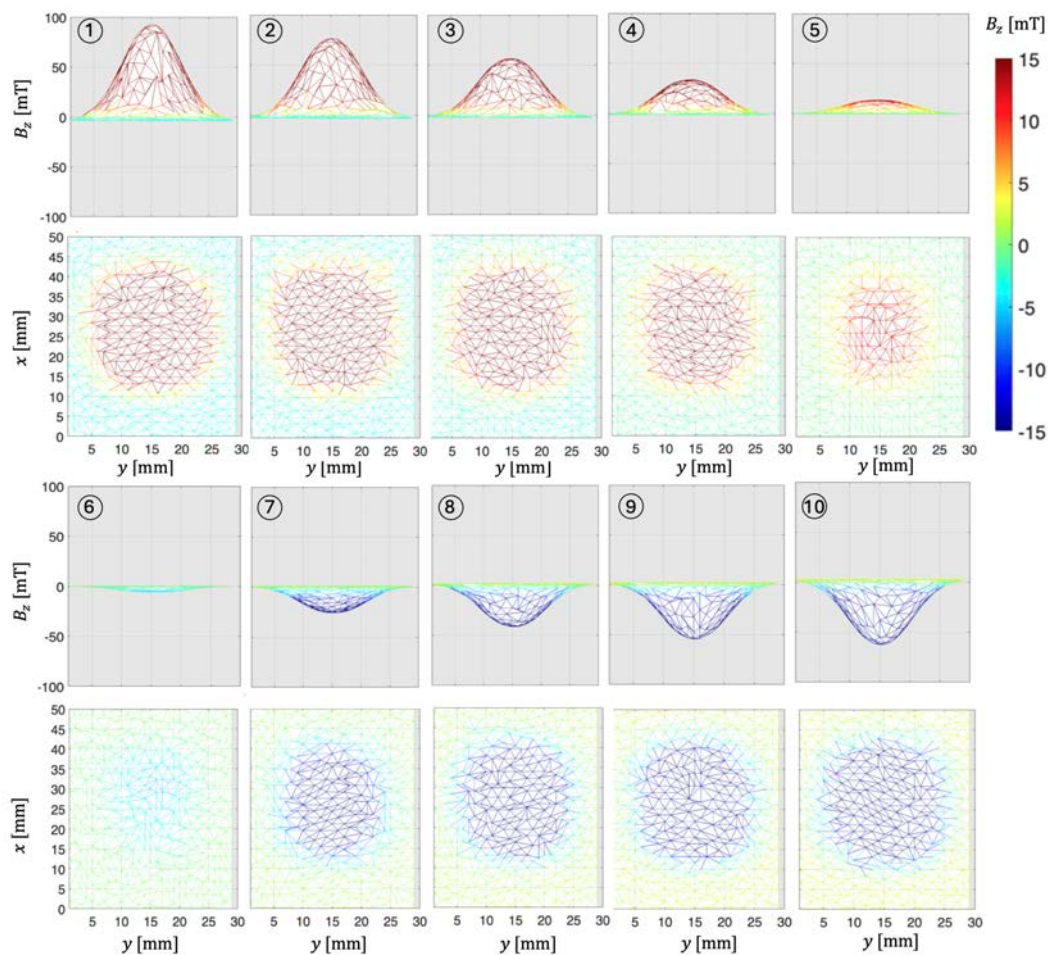


Abb. 5.21: Feldabhängige Field Maps der homogenen N52-SH-Probe bei 80°C (Übersicht). Die zugehörigen integralen Messungen sind in Abb. 5.20 dargestellt. Mit zunehmender Entmagnetisierung nimmt die Streufeldintensität kontinuierlich ab, wobei die Verteilung von außen nach innen schwächer wird und im Bereich des Koerzitivfelds (zwischen Map 5 und 6) nahezu 0 T erreicht. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Im nächsten Schritt wurde die segmentierte Probe, N52-UH ($23 \times 12 \times 6 \text{ mm}^3$, vgl. Abb. 5.22 links) bei einer Probentemperatur von 80°C näher betrachtet. Die $J(H_{\text{ext}})$ -Kurve ist in Abb. 5.22 dargestellt, die Field Maps im Überblick in Abb. 5.23 und in Detailbetrachtung in Abb. 5.24.

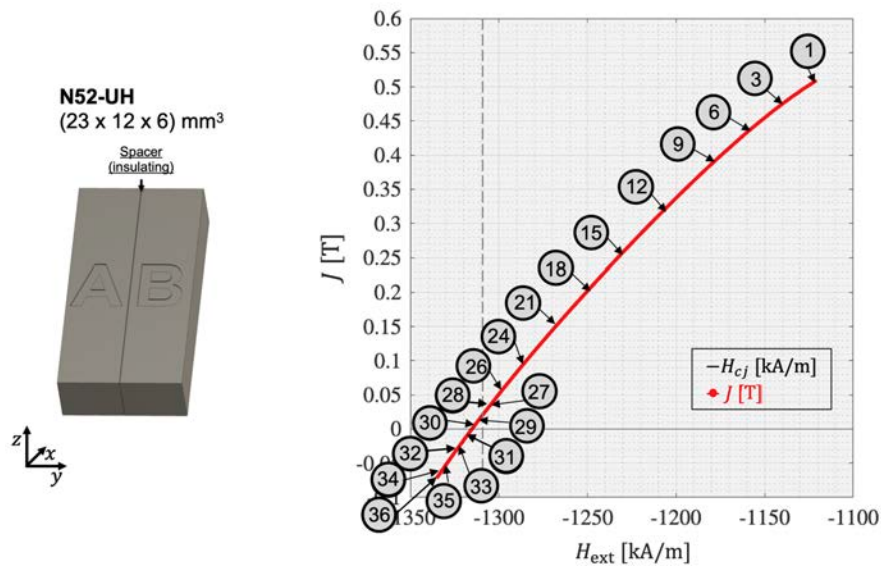


Abb. 5.22: $J(H)$ -Entmagnetisierungskurve der segmentierten Probe (A+B, N52-UH, $23 \times 12 \times 6 \text{ mm}^3$, siehe Skizze) bei 80°C mit markierten Polarisationszuständen (gemäß Messprogramm 3.2.2.2.2). Maps 1–30 zeigen positive Polarisation, Maps 32–36 negative Polarisation. Bei Map 31 wird die Koerzitivfeldstärke erreicht ($H_{cj} = 1300 \text{ kA/m}$). Die nummerierten Polarisationszustände entsprechen den in Abb. 5.23 dargestellten Field Maps. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

In Abb. 5.23 (Map 1) zeigt sich zu Beginn, ähnlich wie bei der N52-Probe, eine verhältnismäßig symmetrische Feldverteilung um den Hochpunkt im Bereich der Mittellinie bei etwa $y = 15 \text{ mm}$. Mit zunehmendem Feld verschiebt sich dieser Hochpunkt, signifikant beginnend ab (Map 18), in welchem Zustand ein weiterer Hochpunkt mit geringerer Intensität entsteht. Dieser zweite Hochpunkt (Map 21–26) wandert zunehmend aus dem Zentrum nach rechts in Richtung $y \geq 15 \text{ mm}$, während sich der ursprüngliche Hochpunkt noch mittig hält. Etwa 30–40 kA/m vor dem Erreichen des Koerzitivfelds (Maps 30–31) wechselt der linke Feldbereich sein Vorzeichen, während der Hauptfeldbereich rechts der Mittellinie weiterhin in der ursprünglichen Richtung verbleibt (Maps 32–33). Nach diesem initialen Übersichtsmapping in Abb. 5.23 wurde nahe dem Koerzitivfeld eine Verschiebung des Maximums bzw. Minimums in y -Richtung im Vergleich zur Standardprobe festgestellt, deren Extrempunkt in der Probenmitte liegt (vgl. Abb. 5.21). Daher wurde die Feldschrittweite im Bereich des Koerzitivfelds zwischen etwa 0.5 T und -0.1 T verringert, um eine höhere Anzahl an Field Maps zu ermöglichen. Gleichzeitig wurde die B_z -Achsen-Skalierung in Abb. 5.24 dynamisch an die jeweiligen Werte von $B_z^{\min}$ bis $B_z^{\max}$ angepasst, um die Streufeldverteilung detailliert darzustellen.

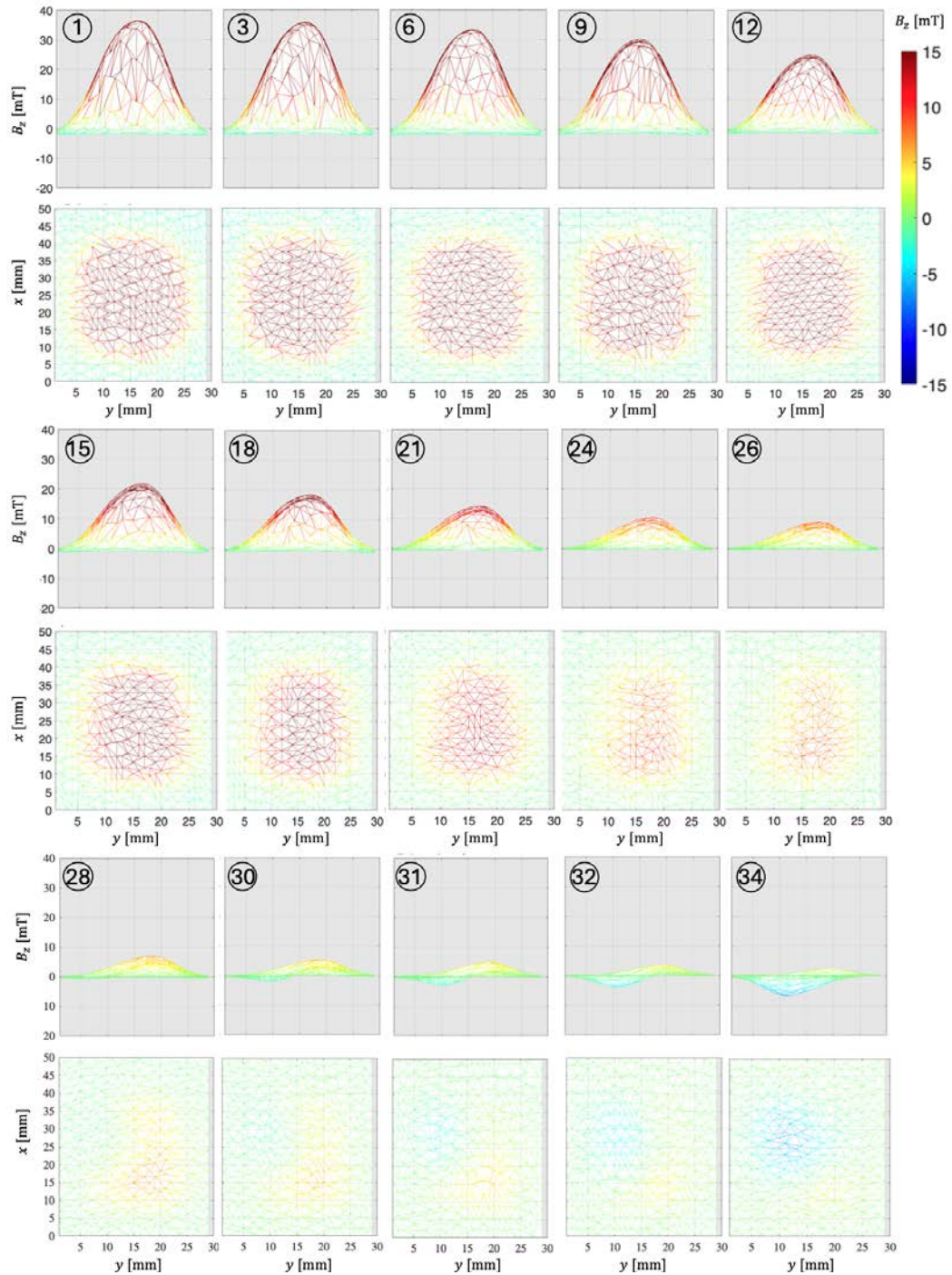


Abb. 5.23: Feldabhängige Field Maps der N52-UH-Probe bei 80 °C (Übersicht). Die zugehörigen integralen Messungen sind in Abb. 5.22 dargestellt. Im Gegensatz zur Standardprobe (Abb. 5.21) zeigt sich insbesondere im Bereich der Koerzitivfeldstärke eine inhomogene Streufeldverteilung (Maps 30-32). Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Im Bereich des Koerzitivfelds (Abb. 5.24, Map 32) bei etwa 1300 kA/m und einer Probentemperatur von 80 °C zeigt sich eine nahezu symmetrische Streufeldverteilung entlang der Probenmittellinie, deren integrale Flussdichtevertelung in Summe gegen null tendiert. Ab etwa 1340 kA/m kehrt auch die zuvor noch positive Feldverteilung im Bereich zwischen $y = 15$ mm und 30 mm in den negativen Bereich um. Bei etwa 1350 kA/m befinden sich schließlich beide Feldbereiche vollständig in negativer Feldrichtung, sodass sich erneut eine symmetrische Streufeldverteilung um die Mittellinie ergibt, jedoch nun mit entgegengesetzter Feldrichtung.

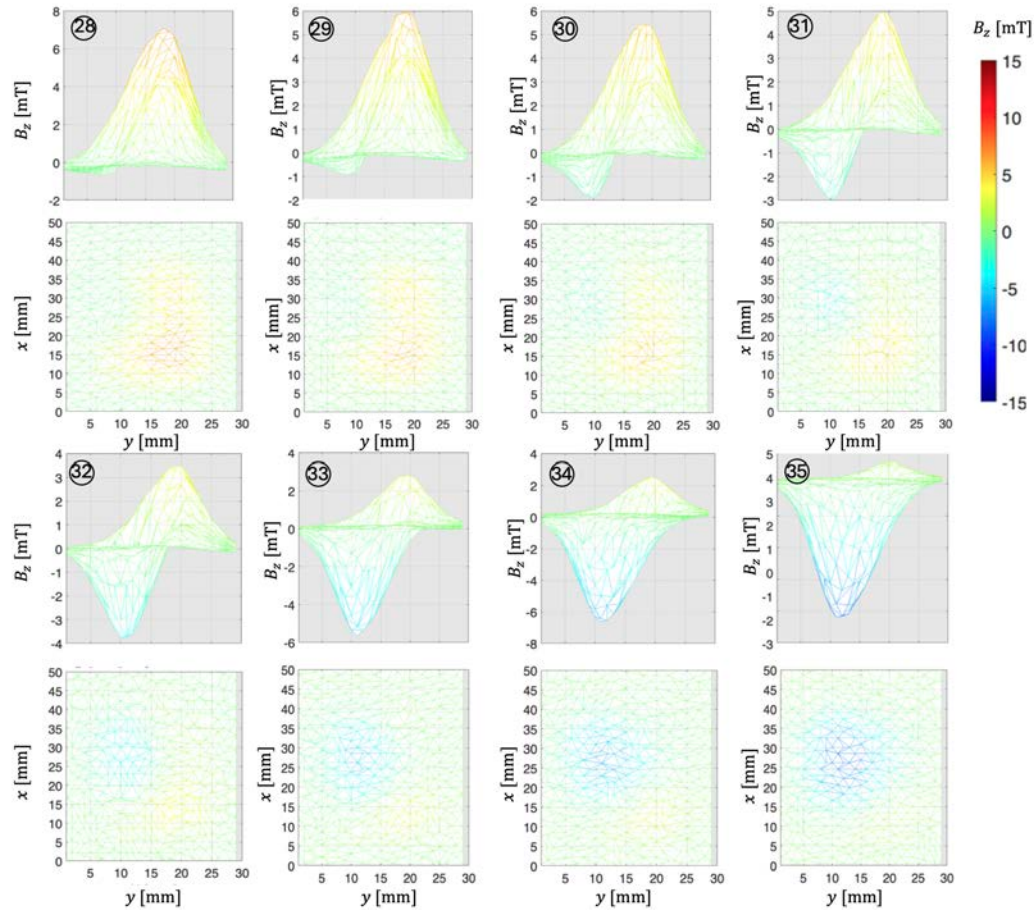


Abb. 5.24: Feldabhängige Field Maps der segmentierten N52-UH-Probe bei 80 °C (Detailansichten des Ummagnetisierungsvorgangs). Die zugehörigen integralen Messungen sind in Abb. 5.22 dargestellt. Die Detailansicht zeigt, dass ab Map 29 auf der linken Seite Streufelder mit negativem Vorzeichen auftreten, während die rechte Seite weiterhin positiv bleibt. Dieser Zustand hält bis etwa Map 32 an, wo sich linke und rechte Hälfte ausgleichen. Anschließend reduziert sich das positive Streufeld auf der rechten Seite, während das negative Streufeld auf der linken Seite weiter zunimmt. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

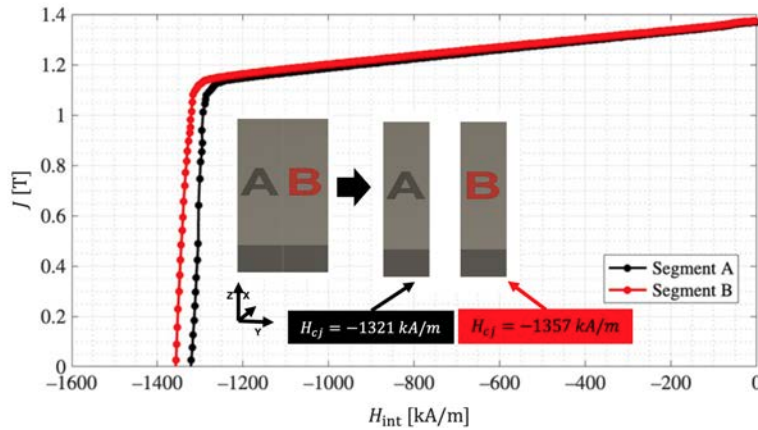


Abb. 5.25: $J(H)$ -Kurven der N52-UH-Probe bei 80 °C, segmentweise getrennt vermessen mittels Hysteresegraph. Segment A (schwarz) weist ein Koerzitivfeld $H_{cj} = 1321$ kA/m auf, Segment B (rot) ein $H_{cj} = 1375$ kA/m. Die Unterschiede in H_{cj} deuten auf die in den Field Maps (Abb. 5.23, Abb. 5.24) festgestellte Inhomogenität hin. Adaptiert aus Lanz et al. [139].

Zur weiteren Betrachtung der festgestellten inhomogenen Streufeldverteilung wurde die Probe sequenziell analysiert. Hierfür wurde sie entlang ihres Klebspalts unter Wärmeeinfluss mechanisch getrennt und die beiden Einzelsegmente A und B (siehe Abb. 5.25) anschließend mittels Hysteresegraph vermessen. Dabei ergab sich für Segment A eine Koerzitivfeldstärke von -1321 kA/m, für Segment B ein Wert von -1357 kA/m.

5.2 Zeitabhängige Entmagnetisierung

Zur Betrachtung zeitabhängiger Entmagnetisierung zählen feld- und temperaturabhängige Veränderungen der Probenmagnetisierung. Da die feldbasierte, zeitabhängige Entmagnetisierung vor allem zur Bestimmung des Viskositätsparameters dient, liegt der Fokus in diesem Kapitel auf der Selbstentmagnetisierung, also der Wirkung des Probenarbeitspunkts in Abhängigkeit von der Probentemperatur. Diese wird in Abschnitt 5.2.1 in integraler Form als $J(T, t)$ -Kurven betrachtet und in Abschnitt 5.2.2 in lokaler Form anhand von Field Maps $B_z(x, y)$.

5.2.1 Zeitabhängige Entmagnetisierungsmessungen

Ausgehend von einer Raumtemperatur von ca. 25 °C werden Viskositätsmessungen im offenen Kreis durchgeführt. Die ausgewählten Proben wurden zuvor per Temperaturrampe als $J(T)$ -Kurven in Absatz 5.1.2.2, vermessen. Die untersuchten Proben mit $N = 0.82$ sind in Tab. 11 aufgeführt. Zusätzlich werden unterschiedliche Probengrößen und Entmagnetisierungsfaktoren der N52-Probe untersucht, darunter $N = 0.82$; $N = 0.74$; $N = 0.65$ (Details siehe Abb. 3.37b). Abb. 5.26 zeigt die zeitliche Abnahme über 4 Stunden der Polarisation aller Proben. Dabei sind die Ausgangspolarisationen der N52-Serie bei über 1.35 T und der N35-Serie bei ca. 1.14 T zu erkennen.

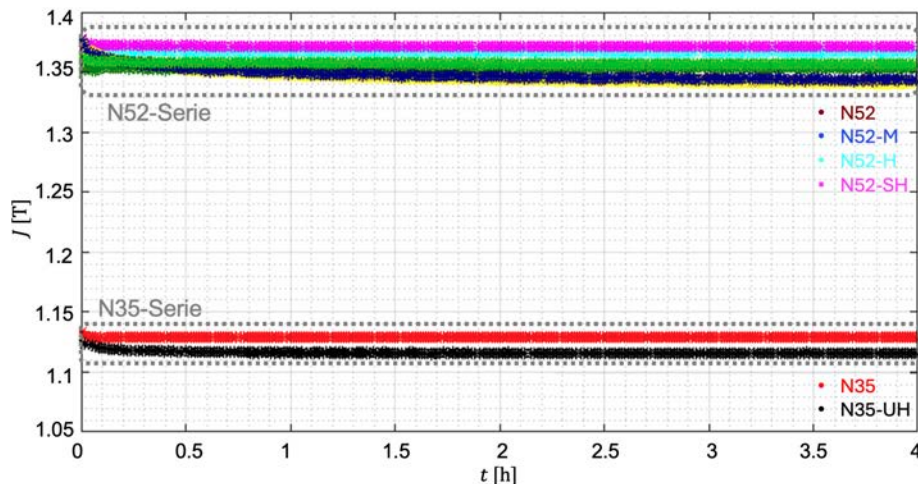


Abb. 5.26: Zeitabhängige Entmagnetisierung bei Raumtemperatur $J(t)$, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.2 für die Proben N35, N35-UH, N52, N52-M, N52-H und N52-SH. Die markierten Bereiche werden in Abb. 5.27 detailliert dargestellt: a) N52-Serie, b) N35-Serie.

Zur detaillierteren Betrachtung werden die einzelnen Proben in Abb. 5.27a für die N52-Serie und in Abb. 5.27b für die N35-Serie dargestellt. Basierend auf der Steigung der logarithmierten Zeitachse wird der Wert der magnetischen Viskosität S als Ergebnis bestimmt. Für die N52-Serie zeigt sich folgender Trend: Die stärkste Abnahme der Polarisation J über Zeit weist die N52-Probe mit $S = -0.0059$ auf, gefolgt von N52-M mit $S = -0.0053$. Die Probe N52-H zeigt eine wesentlich geringere Abnahme von J mit $S = -0.002$, während die Probe N52-SH mit $S = -0.0014$ eine noch geringere Abnahme von J aufweist. Bei den N35-Proben zeigt die Standard N35-Probe eine Abnahme über die Zeit mit $S = -0.0038$, während die N35-UH-Probe eine sehr geringe bis nahezu keine Abnahme von J aufweist.

Eine erneute Langzeitmessung der N35-UH-Probe in Abb. 5.28 ergab eine minimale Steigung von etwa $S = -7,5 \times 10^{-10}$. Während dieser Messung wurde die Temperatur mittels Temperatorkammer auf ± 0.05 °C konstant gehalten (mit Temperaturverlauf in b)), um temperaturbedingte reversible Magnetisierungsänderungen zu minimieren.

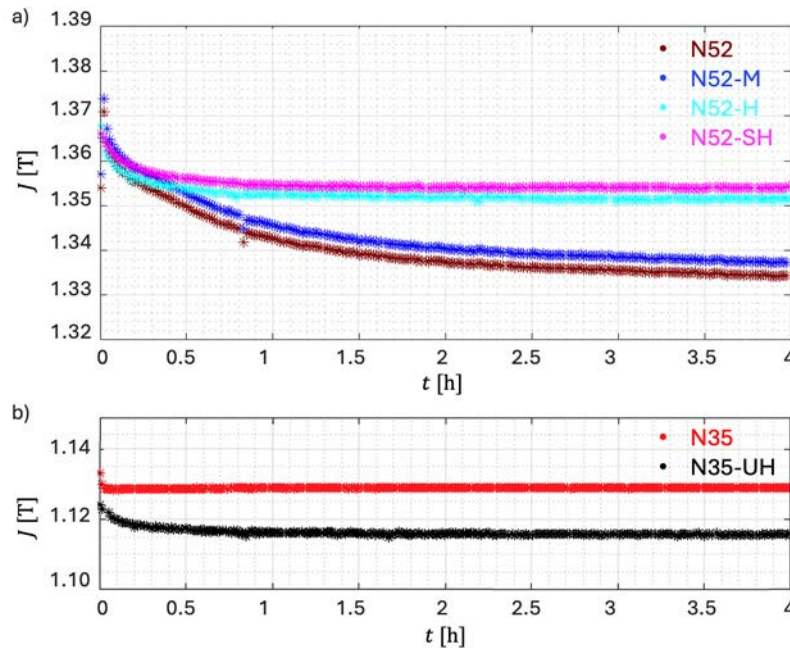


Abb. 5.27: Zeitabhängige Entmagnetisierung bei Raumtemperatur als $J(t)$ -Verlauf, Detailansicht bei konstantem $(BH)_{\max}$ und variierender Koerzitivfeldstärke (J , H, M, H, SH, UH). a) N52-Serie, b) N35-Serie (vgl. Abb. 5.26). In a) zeigen die N52- und N52-M-Proben die stärkste zeitliche Abnahme von J , während die höherkoerzitativen Proben N52-H und N52-SH nach anfänglicher Abnahme (bedingt durch Temperaturunterschiede) nur noch eine sehr geringe Abnahme von J zeigen. In b) ist eine kontinuierliche Abnahme der Polarisation der N35-Probe zu sehen, während die N35-UH nahezu konstant bleibt.

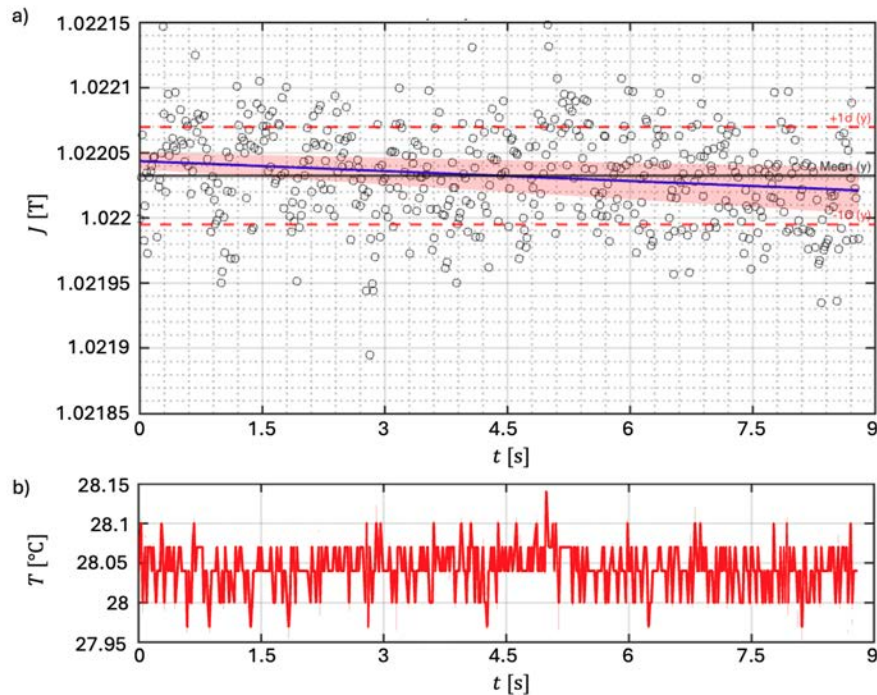


Abb. 5.28: Zeitabhängige Entmagnetisierung bei nahezu konstanter Temperatur von etwa 28 °C $J(t)$ für N35-UH ($N = 0.82$) mit a) $J(t)$ Verlauf und b) Proben temperatur. Trotz der starken Schwankungen der Polarisationswerte zeigt der Mittelwert (blaue Linie) eine geringe Abnahme der Polarisation über die Zeit.

Abb. 5.29 zeigt den Polarisationsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit für N52-Proben mit unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren. Die in braun dargestellte Probe mit $N = 0.82$ weist mit $S = -0.0059$ die stärkste Abnahme auf. Die in gelb dargestellte Probe mit $N = 0.80$ zeigt mit $S = -0.0057$ eine etwas geringere Abnahme. Die Probe mit $N = 0.74$ zeigt eine deutlich geringere Abnahme von $S = -0.0016$, während die Probe mit $N = 0.65$ mit $S = -8 \cdot 10^{-10}$ nahezu stabil bleibt.

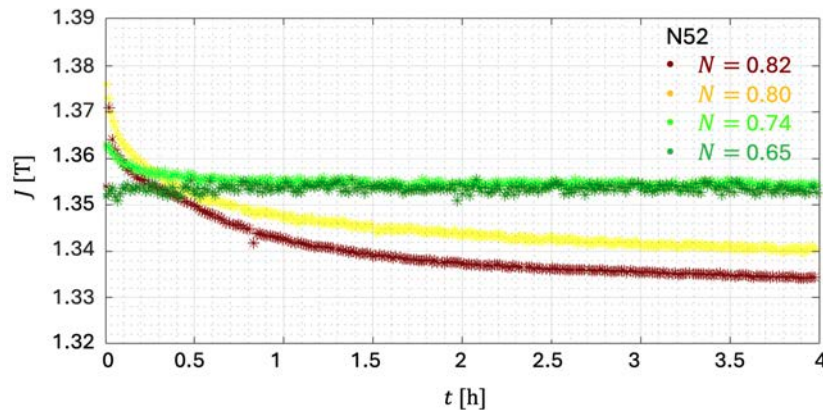


Abb. 5.29: Zeitabhängige Entmagnetisierung bei Raumtemperatur als $J(t)$ -Verlauf, Detailansicht bei konstantem $(BH)_{\max}$ und konstanter Koerzitivfeldstärke für variierende Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.82, 0.80, 0.74$ und 0.65 . Die Proben mit hohem Entmagnetisierungsfaktor ($N = 0.82$ und 0.80) zeigen eine ausgeprägte zeitliche Abnahme von J , während die Probe mit $N = 0.74$ nur noch eine geringe Abnahme aufweist. Die Probe mit $N = 0.65$ bleibt nahezu stabil.

5.2.2 Zeitabhängige Field Maps

Für die Untersuchung der zeitabhängigen Entmagnetisierung (Viskosität) im lokalen Rahmen wurden Field Maps über längere Zeiträume aufgenommen. Hierfür wurden Versuche mit dem konventionellen Field-Mapper (Senis) durchgeführt, bei denen eine N52-Probe ($N = 0.82$) bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 11 Stunden in insgesamt 6 Maps erfasst wurde. Zur Sicherstellung einer konstanten Umgebungstemperatur wurde die Scaneinheit mit einer Thermobox versehen, und die Probentemperatur mittels 3 Infrarot-Temperatursensoren erfasst. Hierbei zeigen sich durchschnittliche Streuungen von 23 bis 23.5 °C. Abb. 5.30a zeigt die Field Maps, für die N52-Probe als Aufsicht der Polfläche $B_z(x, y)$. Um die geringe Abnahme der Streufeldverteilung sichtbar zu machen, wurden auf Basis des ersten Field Maps zum Zeitpunkt t_1 , differentielle Field Maps für t_n entsprechend

$$B_z^{t_n}(x, y) = B_z^{t_n}(x, y) - B_z^{t_1}(x, y)$$

dargestellt. Dadurch lassen sich auch kleinste Änderungen von $B_z < 10$ mT darstellen.

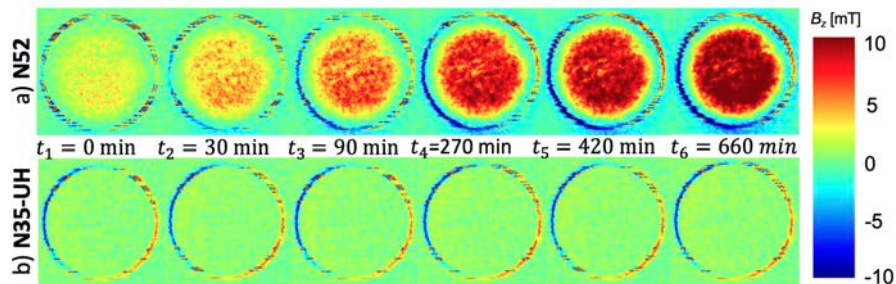


Abb. 5.30: Zeitabhängige Field Maps einer N52- und einer N35-UH-Scheibenprobe ($N = 0.82$) als Differenzmaps der jeweiligen Zeitpunkte t_n relativ zum Anfangszeitpunkt t_0 , dargestellt als $B_z(t_n - t_0)$, gemessen gemäß Abschnitt 3.3.3 bei Raumtemperatur zu ausgewählten Zeiten mittels Field-Mapper. a) N52-Probe, b) N35-UH-Probe. Bei der N52-Probe in a) zeigt sich bereits nach 30 min (t_2) eine Zunahme der Differenzstreufeldintensität im Probenzentrum, entsprechend einer Abnahme der Streufeldintensität. Diese Abnahme verstärkt sich mit zunehmender Zeit und erreicht nach etwa 11 Stunden (t_6) teilweise Werte von über 1 mT relativ zum Zustand t_0 . Die N35-UH-Probe in b) zeigt über den gesamten Messzeitraum keine messbare Abweichung.

Hierbei lassen sich im Probenzentrum über die Zeit deutlich stärkere Streufeldabnahmen feststellen als im Randbereich. Während die Abweichungen im Zentrum der Probe bei Startzeit t_1 noch unter 2 mT liegen, betragen sie bei t_6 bereits über 10 mT. Der Randbereich zeigt im gesamten Zeitintervall von t_1 bis t_6 keine signifikanten Veränderungen. Der außenliegende Ring in den Darstellungen ist auf Positionierungsfehler des Mappers zurückzuführen. Zum Vergleich wurde eine Probe der Güte N35-UH mit denselben Maßen und unter denselben Bedingungen vermessen, wie in Abb. 5.30b für t_1 und t_6 dargestellt. Hierbei zeigen sich kaum messbare Unterschiede über die Zeit.

Zur genaueren Analyse der zeitabhängigen Streufeldabnahme im Probenzentrum im Vergleich zum Randbereich der N52-Probe wurden die Maps zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 als Mittelschnitt (Linienverlauf durch die Probenmitte) in Seitenansicht $B_z(x)$ in Abb. 5.31 dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme des Streufelds im Probenzentrum, die zu den Rändern hin ($x < 5$ mm und $x > 35$ mm) abnimmt.

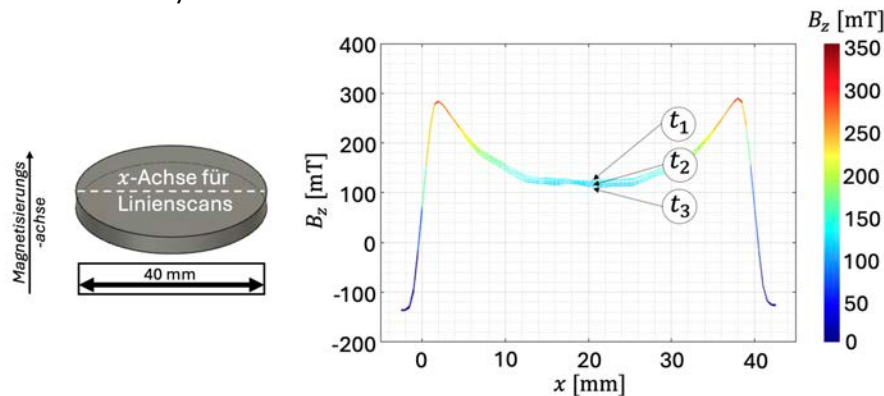


Abb. 5.31: Seitenansicht in Form von Linienscans überlagerter Field Maps der N52-Probe bei Raumtemperatur entlang des Mittelschnitts der x -Achse zu den Zeiten t_1 , t_2 und t_3 , entsprechend Abb. 5.30. Im Probenzentrum zeigt sich mit zunehmender Zeit eine leichte Abnahme der Streufeldintensität, während der Randbereich stabil bleibt.

Mittels Konzept 3 wurden temperaturabhängige Field Maps zeitaufgelöst aufgenommen. Abb. 5.32 zeigt die Proben N35 bei 80 °C und N52 bei 55 °C ($N = 0.80$).

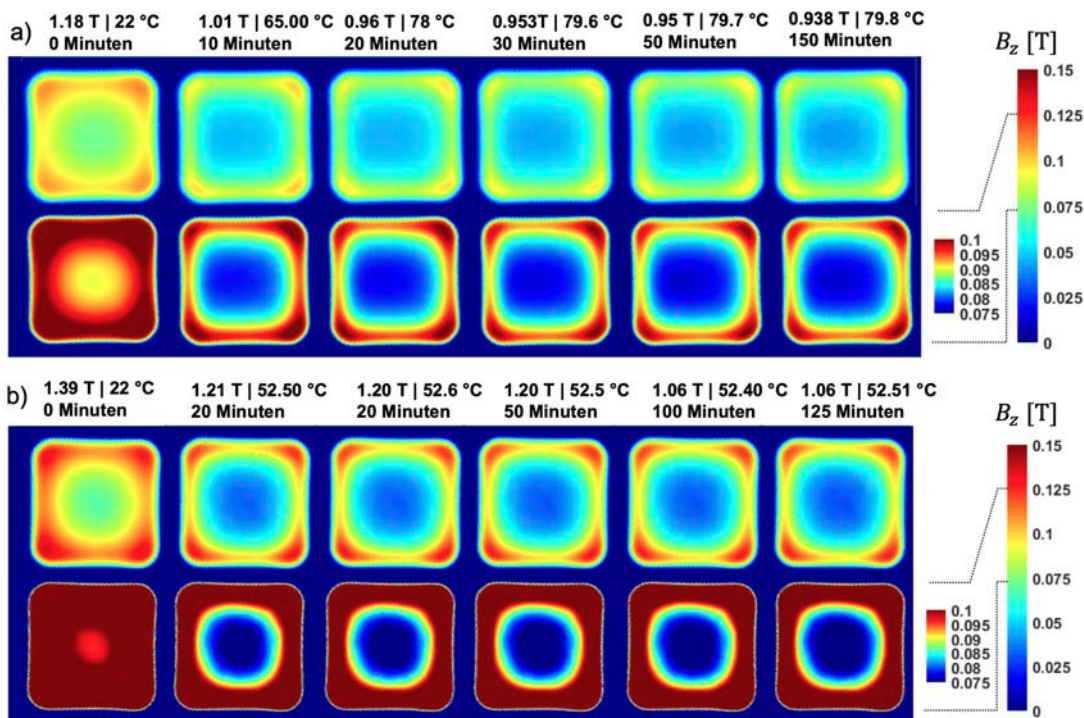


Abb. 5.32: Zeitabhängige Field Maps der Proben a) N35 bei 80 °C und b) N52 bei 55 °C ($40 \times 40 \times 4$ mm³, $N = 0.82$), gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.3c. Dargestellt sind $B_z(x, y)$ in der ersten Zeile mit voller Skalierung von 0-0.15 T und in der zweiten Zeile mit angepasster Skala auf 0.075-0.1 T. Beide Proben zeigen bereits im Ausgangszustand bei 22 °C eine im Zentrum reduzierte Streufeldintensität, die mit Erhöhung auf die Zieltemperatur und im Verlauf der Zeit weiter abnimmt.

Bereits im Ausgangszustand bei ca. 22 °C weisen beide Proben im Zentrum eine verringerte Streufeldintensität auf. Nach Erwärmung auf die Zieltemperatur und mit zunehmender Zeit verstärkt sich dieser Effekt: Bei der N35-Probe (Abb. 5.32a) nimmt die Streufeldintensität kontinuierlich vom Zentrum nach außen hin ab, während der Randbereich stabil bleibt. Bei der N52-Probe (Abb. 5.32b) treten unmittelbar nach Temperaturerhöhung deutliche Abnahmen der Streufeldintensität auf, die ebenfalls im Zentrum am stärksten sind und sich über die Zeit

Richtung Rand ausbreiten. Zur besseren Darstellung kleiner Betragsänderungen wurde die B_z -Skalierung auf 0.075–0.1 T angepasst. Insgesamt zeigen die Messungen eine zeitabhängige Abnahme des Streufelds, beginnend im Zentrum der Probe.

5.3 Magnetischer Viskositätsparameter

Nachdem die direkte und zeitabhängige Entmagnetisierung sowie die Wechselwirkungen zwischen Temperatur, externem Feld und dem durch die Probengeometrie erzeugten Selbstfeld analysiert wurden, zeigt die Auftragung der direkten Verluste (z.B. durch magnetische Suszeptibilität χ) und zeitabhängigen Verluste (durch magnetische Viskosität S) ein nahezu proportionales Verhältnis. Dieses Verhältnis lässt sich sowohl im feld- als auch im temperaturbasierten Ansatz beobachten, wie in Abb. 5.33 für das Feld in a) und der Temperatur in b) dargestellt. Das Verhältnis von zeitabhängigen und direkten Entmagnetisierungsverlusten definiert den magnetischen Viskositätsparameter S_v [59], [62]. Während Suszeptibilität und Viskosität jeweils stark von Feldstärke, Feldverteilung und Proben temperatur abhängen, weist S_v eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber diesen Einflussgrößen auf und stellt damit eine robustere Kenngröße dar. Dies zeigt sich in Abb. 5.33: a) $S_v(H_{\text{ext}})$ (blau) als Funktion von S (rot) und χ (grün) als standardmäßig feldbasierter Viskositätsparameter sowie b) $S_v^T(T)$ (blau) als Funktion von S (rot) und $\Delta J/\Delta T$ (grün) als neu eingeführter temperaturbasierter Viskositätsparameter.

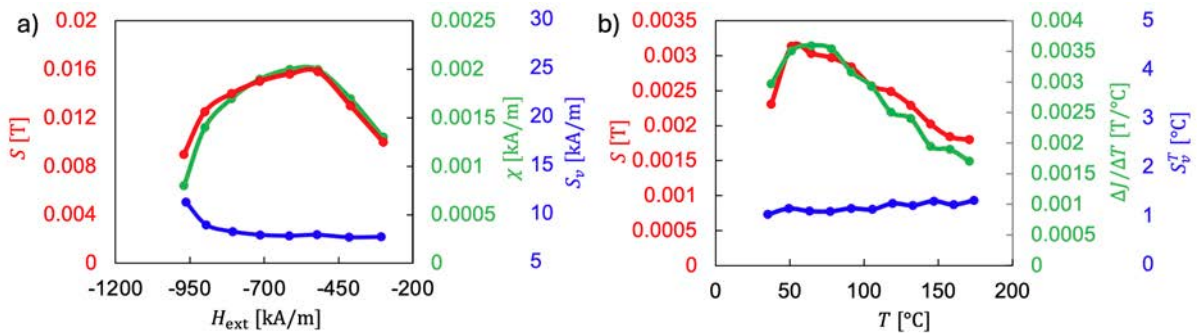


Abb. 5.33: Vergleich direkter Verluste (grün) und zeitabhängiger Verluste (rot) sowie deren Verhältnis (blau) einer N52-Probe. a) Feldbasierter Viskositätsparameter als Verhältnis der Viskosität S (rot) zur differentiellen Suszeptibilität χ (grün) bei 100 °C, Probenentmagnetisierungsfaktor $N = 0.56$. b) Temperaturbasierter Viskositätsparameter als Verhältnis der Viskosität S (rot) zu den direkten Verlusten $\Delta J/\Delta T$ (grün), Probenentmagnetisierungsfaktor $N = 0.8$. Bei beiden Ansätzen zeigt sich eine Proportionalität zwischen direkten Verlusten (grün) und zeitabhängigen Verlusten (rot), die die Bestimmung ihres Verhältnisses als Viskositätsparameter (blau) ermöglicht: a) klassischer feldbasierter Viskositätsparameter S_v , b) temperaturbasierter Viskositätsparameter S_v^T . Dieses Verhältnis erlaubt eine stabilere Anwendung der Parameter, weitgehend unabhängig von der Probengeometrie und mit reduziertem Einfluss von Feld und Temperatur.

Für eine anwendungsnahe Auswertung des feldabhängigen Viskositätsparameters wurde die Feldstärke H_{D5} gewählt, da sie eine praxisrelevante Feldstärke im Übergang von reversiblen zu irreversiblen Verlusten darstellt, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben. Definitionsgemäß entspricht H_{D5} der negativen externen Feldstärke, bei der die Remanenz um 5 % irreversibel abnimmt [44]. Sie wird bestimmt, indem der lineare Bereich der $J(H)$ -Kurve parallel verschoben wird, bis er bei 95 % der Polarisierung die J -Achse schneidet. Der Schnittpunkt mit der gemessenen Kurve definiert H_{D5} . Im vorliegenden Fall stellt das Messergebnis, z. B. einer $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ -Kurve aus Konzept 1, bereits den irreversibel veränderten Polarisationszustand bei $H_{\text{ext}} = 0$ dar, also ohne reversiblen Anteil. Basierend auf der Ausgangsremanenz lässt sich aus dem Wert $J_{95\%}^{\text{rec}}$, bei dem die Remanenz um 5 % reduziert ist ($J_{95\%}^{\text{rec}} = 0.95 \cdot J_{\text{max}}^{\text{rec}}$), H_{D5}^{rec} aus der $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ -Kurve bestimmen, wie in Abb. 5.34 dargestellt. Dieses Vorgehen reduziert mögliche Fehler, die insbesondere beim Umrechnen der externen Feldwerte im Prüfstandsjoch auf das interne Feld durch

Anpassung der $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ -Kurve mittels statischem Entmagnetisierungsfaktor N auf $J(H_{\text{int}})$ auftreten können (siehe Abschnitt 2.2).

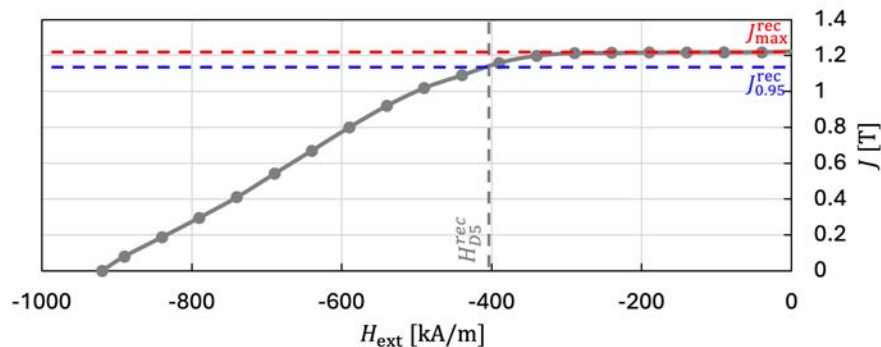


Abb. 5.34: $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ -Entmagnetisierungskurve einer N52-Probe bei 100 °C zur Bestimmung des Feldwertes H_{D5}^{rec} . Für eine praxisrelevante Aussagefähigkeit der S_v -Werte werden diese bei der anwendungsorientierten Feldstärke H_{D5} bzw. H_{D5}^{rec} betrachtet. Die Kurve $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ zeigt die irreversiblen Polarisationsänderungen ohne reversiblen Anteil. Der Punkt $J_{0.95}^{\text{rec}} = 0.95 \cdot J_{\text{max}}^{\text{rec}}$ auf der Kurve definiert den H_{D5}^{rec} Feldwert. Dieses Vorgehen vermeidet zusätzliche Fehler, die bei der Umrechnung vom externen auf das interne Feld mittels statischem Entmagnetisierungsfaktor auftreten würden, welche für die definitionsgemäße Bestimmung von H_{D5} erforderlich wäre.

Im Folgenden werden in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.4 Validierungen und Ergebnisse des feldbasierten Viskositätsparameters dargestellt. Das Vorgehen zur Bestimmung des feldbasierten Viskositätsparameters erfolgt gemäß Abschnitt 3.2.1.2.2. Zunächst erfolgt in 5.3.1 eine Validierung zur Aussagefähigkeit des neuen Verfahrens im Abgleich mit VSM, gefolgt von der Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren (Untersuchungsparameter nach 3.4.1). In Abschnitt 5.3.5 wird das neue temperaturbasierte Verfahren mit dem temperaturbasierten Viskositätsparameter vorgestellt, bevor in 5.3.6 mögliche Prognosemethoden über das Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur dargestellt und verglichen werden.

5.3.1 Vergleichende Validierung: Viskositätsparameterbestimmung

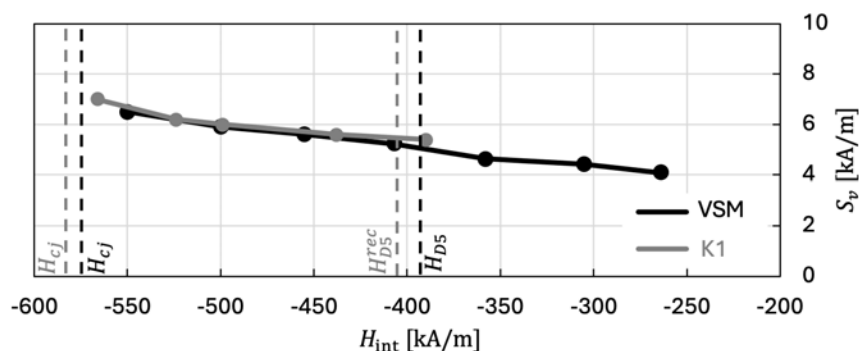


Abb. 5.35: Vergleich des Verlaufs von $S_v(H_{\text{int}})$ zwischen VSM (schwarz) und Konzept 1 (grau) mit markierten Feldbezugsgrößen H_{D5} , H_{D5}^{rec} und H_{Cj} . Neben den ähnlichen Feldwerten der Bezugsgrößen H_{D5} und H_{Cj} zeigt sich im Feldverlauf von S_v im Bereich um H_{D5} , dass die Werte der beiden Methoden gut übereinstimmen.

Zur Validierung der Viskositätsparameterbestimmung durch Konzept 1 wurden Vergleichsmessungen mittels VSM durchgeführt, in Anlehnung an [132]. Abb. 5.35 zeigt den $S_v(H_{\text{int}})$ -Verlauf als Vergleich beider Verfahren. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung, insbesondere für H_{D5}^{rec} von Konzept 1 und H_{D5} des VSM bei einem S_v -Wert von 5.3 kA/m. Neben den ähnlichen Feldwerten der Bezugsgrößen H_{D5} und H_{Cj} stimmen die S_v -Verläufe im Bereich um H_{D5} gut überein. Zur weiterführenden Betrachtung wurden zusätzliche Proben bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Die S_v -Werte bei H_{D5} aus beiden Methoden sind in Abb. 5.36 für Proben unterschiedlicher Koerzitivfeldstärken: N52, N52-SH und N52-SH (GBD) bei Temperaturen von 70, 100, 130 und 160 °C dargestellt. Es zeigt sich eine allgemein gute Übereinstimmung der Messergebnisse beider Verfahren.

Größere Abweichungen treten insbesondere bei der N52-SH-Probe bei 70 °C auf, welche mit ca. 16 % (VSM: 8.5 kA/m, Konzept 1: 7.2 kA/m) die größte Abweichung darstellt.

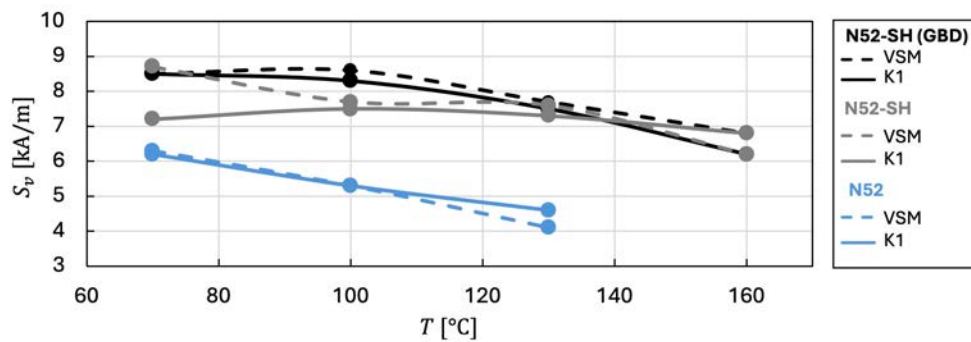


Abb. 5.36: Vergleich der Viskositätsparameterergebnisse S_v beim Referenzfeldwert H_{D5} bzw. H_{D5}^{rec} als $S_v(H_{D5})$ mittels Konzept 1 und VSM für Proben der Güten N52, N52-SH und N52-SH (GBD). Es zeigen sich über die betrachtete Temperaturspanne gute Übereinstimmungen mit Abweichungen von unter 16 %.

Zur Beurteilung der praktischen Wiederholbarkeit der S_v -Messung wurde das Standardmessprogramm mit einem N52-Magneten bei 30 °C sechsmal durchgeführt. Abb. 5.37 zeigt die Überlagerung aller sechs Messreihen mit einer Streuung von etwa ± 0.361 kA/m im Bereich der H_{D5} -Feldstärke. Der berechnete Variationskoeffizient beträgt rund 6 %. Damit ist insbesondere im relevanten Bereich um H_{D5} eine zuverlässige Bestimmung des Viskositätsparameters mit einer Genauigkeit von besser als ± 0.5 kA/m innerhalb der Standardabweichung ($\pm 1\sigma$) möglich.

Neben der Wiederholbarkeit spielt auch der Einfluss unterschiedlicher Regelparameter im Messprogramm eine Rolle, wie in Abb. 5.38 für zwei Programme dargestellt. Der Abstand zwischen den angelegten Feldpulsen von Programm P_A (braun, Standardprogramm mit statischer Felddifferenz) und Programm P_B (blau, mit dynamisch zunehmendem Feldabstand) zeigt, dass eine zu geringe Felddifferenz zwischen den Pulsen zu kleineren Abweichungen (< 0.5 kA/m) in Bezug auf die statische Felddifferenz von P_A führt. Aufgrund der insgesamt höheren Stabilität infolge der größeren Feldpulsdistanz wurde P_A als Standard gewählt.

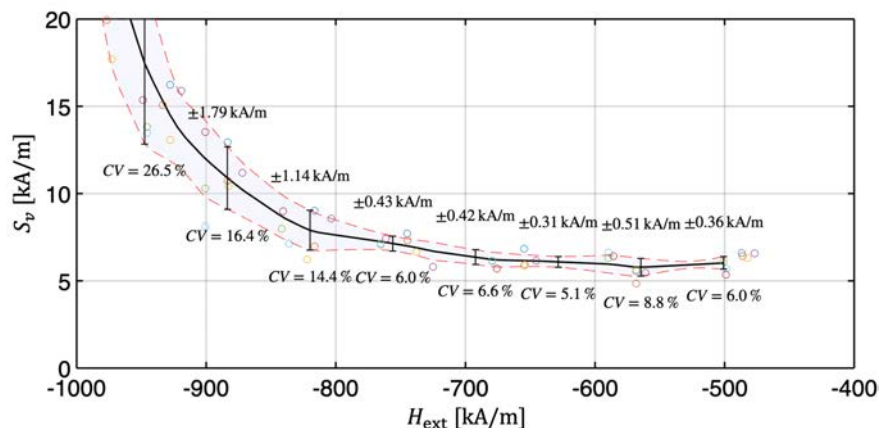


Abb. 5.37: S_v zu Feld als $S_v(H_{ext})$ -Verlauf einer N52-Probe aus sechs Messungen unter annähernd identischen Messbedingungen zur Bestimmung der Wiederholbarkeit. Im Bereich vor dem Koerzitivfeld bis etwa 800 kA/m (vgl. $J(H)$ -Kurve in Abb. 5.38) zeigt sich eine gute Wiederholbarkeit mit Abweichungen von unter ± 0.5 kA/m innerhalb der Standardabweichung von $\pm 1\sigma$ im Feldbereich um die H_{D5} -Feldstärke.

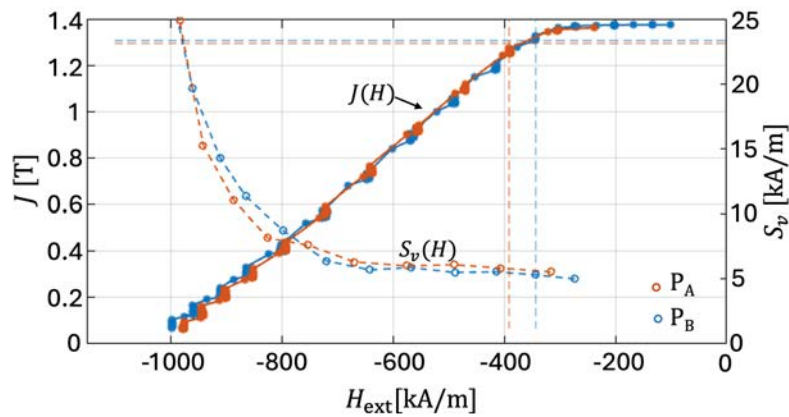


Abb. 5.38: Verlauf des Viskositätsparameters S_v und der Polarisation J in Abhängigkeit vom externen Feld H_{ext} zum Vergleich zweier Messprogramme. Programm P_A ist braun dargestellt und verwendet einen konstanten Feldabstand, Programm P_B ist blau dargestellt und verwendet einen dynamisch ansteigenden Feldabstand. Es zeigt sich ein sehr ähnlicher Verlauf von S_v für beide Messprogramme mit nur geringen Unterschieden. Insbesondere kurz vor dem Koerzitivfeld führen geringe Feldunterschiede infolge von Jochsättigung zu Abweichungen in der Bestimmung von S_v . Programm P_A zeigt einen stabileren Verlauf mit geringerer Streuung als Programm P_B und wird daher für weitere Untersuchungen verwendet.

5.3.2 Gesamtübersicht aller Proben

Um eine große Bandbreite an Fragestellungen hinsichtlich der Einflussfaktoren von Proben auf den Viskositätsparameterwert zu analysieren, werden diese in zwei Kategorien unterteilt: material- und prozessbezogene Einflussfaktoren sowie externe Einflussfaktoren (Übersicht aller Untersuchungsparameter: Abschnitt 3.4.1.1). Abb. 5.39 zeigt eine Übersicht der wichtigsten untersuchten Proben bei Raumtemperatur als $J_r(H)$ -Darstellung. Für eine bessere Darstellung werden die Proben entsprechend ihres maximalen Energieprodukts $(BH)_{\text{max}}$ farblich dargestellt und über ihre Probenbezeichnungsnummer identifiziert, welche in der Probenübersicht (Tab. 20 (Anhang)) aufgeführt ist.

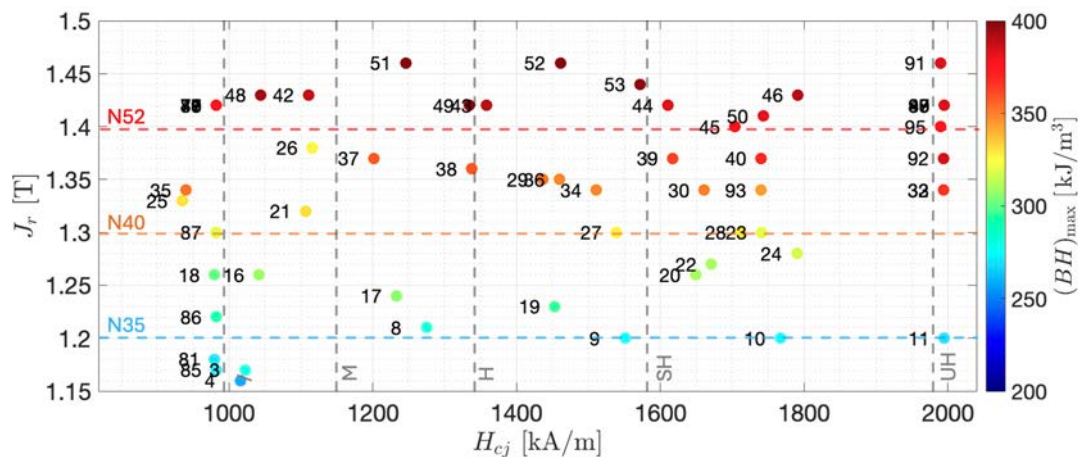


Abb. 5.39: Gesamtübersicht ausgewählter konventioneller Proben als $J_r(H_{cj})$ -Darstellung mit markierten, näherungsweise bestimmten Schwellen für $(BH)_{\text{max}}$ sowie der Nomenklatur zur Einsatztemperatur (J, M, H, SH, UH). Über die Probennummerierung lässt sich in Tab. 20 (Anhang) die jeweilige Spezifikation entnehmen. Die dargestellte Probenauswahl deckt ein breites Spektrum unterschiedlicher Koerzitivfeldstärken H_{cj} von 900 bis 2000 kA/m sowie Remanenzwerte J_r von 1.15 bis 1.45 T beziehungsweise Energieprodukte $(BH)_{\text{max}}$ von N35 bis N54 ab.

Abb. 5.40 zeigt die Gesamtübersicht aller ausgewählter Proben des Viskositätsparameters S_v bei H_{D5}^{rec} als Funktion der jeweiligen Parameter: Koerzitivfeld H_{cj} in a), Remanenz J_r in b), mittlere Korngröße D_{50} in c) und maximales Energieprodukt $(BH)_{\text{max}}$ in d). In a) ist ein leichter Trend von S_v mit zunehmendem Koerzitivfeld ersichtlich. Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt etwa 0.003 bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.67$, was auf einen moderaten linearen Zusammenhang hinweist. Für die Remanenz J_r in b) und das maximale Energieprodukt

$(BH)_{\max}$ in d) wurden keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt. Bei der mittleren Korngröße D_{50} , aufgetragen in c) zeigt sich ein schwacher Trend von 0.371 mit einem R^2 von 0.11.

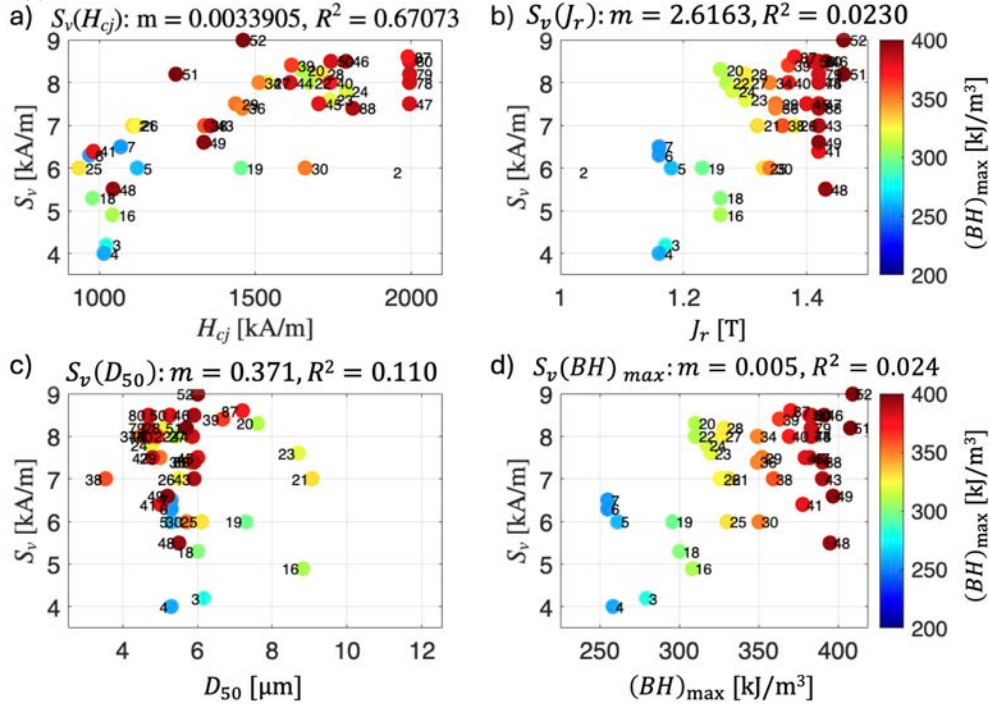


Abb. 5.40: Gesamtübersicht ausgewählter Proben als Viskositätsparameterwert S_v beim Referenzfeld H_{D5}^{rec} , dargestellt als $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit ausgewählter Materialparameter. In allen Diagrammen sind die linearen Regressionssteigungen mit den zugehörigen R^2 -Werten angegeben. a) $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion des Koerzitivfelds H_{cj} . Es zeigt sich ein mit steigender Koerzitivfeldstärke zunehmender Wert von S_v . b) $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion der Remanenz J_r . Es zeigt sich ein leichter Trend zu ansteigenden S_v -Werten mit zunehmender Polarisation. c) $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion der mittleren Korngröße D_{50} . Es zeigt sich ein schwacher Zusammenhang zwischen S_v und der mittleren Korngröße. d) $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion von $(BH)_{\max}$. Es zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang von S_v mit $(BH)_{\max}$.

Die in Abschnitt 3.4.1 definierten Untersuchungsparameter bilden die Grundlage der folgenden Analysen. Die externen Einflussfaktoren in Abschnitt 5.3.3 sowie die material- und prozessbezogenen Einflussfaktoren in Abschnitt 5.3.4 werden systematisch auf die untersuchten Proben angewandt.

5.3.3 Externe Einflussfaktoren

Zu den externen Einflussfaktoren zählen sowohl prozessbezogene Eigenschaften der Messung, wie externe Feldstärke und Temperatur, als auch die Probenform, die damit verbundenen Entmagnetisierungsfaktoren und die daraus resultierende innere Selbstfeldverteilung. Besonders relevant sind dabei Quader-Magnete mit inhomogener Selbstfeldverteilung sowie Kugelmagnete mit homogener Selbstfeldverteilung.

5.3.3.1 Feldverlauf

Abb. 5.41 zeigt den Polarisationsverlauf J auf der primären y -Achse ($J(H)$) sowie den Viskositätsparameter S_v auf der sekundären y -Achse ($S_v(H)$), jeweils in Abhängigkeit von der Feldstärke H_{ext} auf der x -Achse. Der Verlauf $J(H)$ dient als Grundlage für die Bestimmung von $S_v(H)$. Beginnend im Kniefunkt der Kurve $J(H_{ext})$ verläuft $S_v(H)$ zunächst annähernd konstant mit leichter Zunahme im steilen Abschnitt der Entmagnetisierungskurve, bevor der Wert kurz vor dem Koerzitivfeld H_{cj} stark ansteigt. Zusätzlich ist die Feldstärke H_{D5}^{rec} für die weitere Analyse der $S_v(H)$ -Werte markiert.

Abb. 5.42a zeigt den S_v -Verlauf bei konstantem Koerzitivfeld aber variierendem $(BH)_{\max}$ der Proben: N35, N42 und N52. Beginnend bei -600 kA/m zeigen sich leicht ansteigende Werte von

S_v mit steigendem $(BH)_{\max}$ im Bereich von 4.5 bis 5.5 kA/m. Bezogen auf das Feld steigen diese zunächst leicht an und nehmen dann kurz vor dem Koerzitivfeld deutlich zu.

Abb. 5.42b zeigt den S_v -Verlauf bei konstantem $(BH)_{\max}$ aber variierendem H_{cj} für die Proben N52, N52-M und N52-H bei 30 °C. Die Probe mit höherer Koerzitivfeldstärke (N52-H) erreicht ein höheres Ausgangsniveau ($S_v = 7.5$ kA/m) als N52 (5.5 kA/m) bzw. N52-M (6 kA/m).

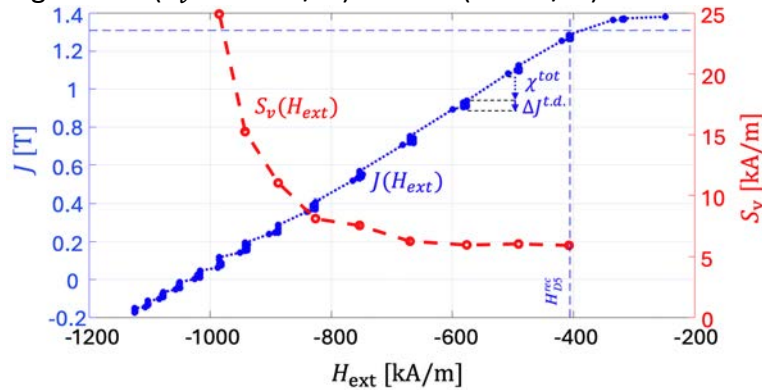


Abb. 5.41: Verlauf des Viskositätsparameters S_v und Polarisation J einer N52-Probe in Abhängigkeit vom externen Feld. Das Messsignal (blau) enthält direkte Verluste (χ^{tot}) und zeitabhängige Verluste ($\Delta J^{\text{t.d.}}$). Aus diesem Signal wird das Verhältnis (rot) abgeleitet, das den jeweiligen Viskositätsparameter pro Feldstufe darstellt. Der Verlauf von S_v mit ansteigender Feldstärke bleibt zunächst, beginnend bei H_{DS}^{rec} , relativ konstant unter leichtem Anstieg, bevor mit zunehmender Entmagnetisierung ein steiler Anstieg erfolgt.

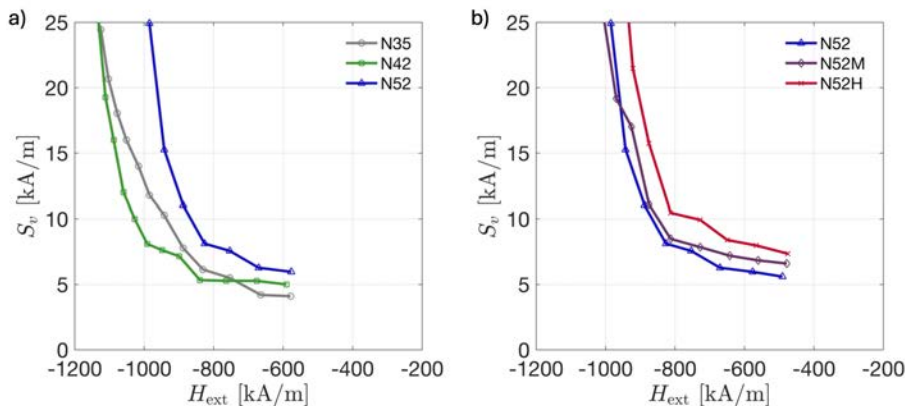


Abb. 5.42: $S_v(H_{\text{ext}})$ -Verläufe unterschiedlicher Probeneigenschaften. a) Proben mit variierendem $(BH)_{\max}$ bei konstantem Koerzitivfeld: N35, N42, N52. b) Proben mit variierender Koerzitivfeldstärke und konstantem $(BH)_{\max}$: N52, N52M, N52H. In a) zeigt sich ein leichter Anstieg des S_v -Verlaufs mit zunehmendem $(BH)_{\max}$ der Proben. In b) zeigt sich ein eindeutiger Unterschied der S_v -Werte in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke. Eine höhere Koerzitivfeldstärke äußert sich in einem höheren S_v -Wert über den gesamten Feldbereich.

5.3.3.2 Temperaturverlauf

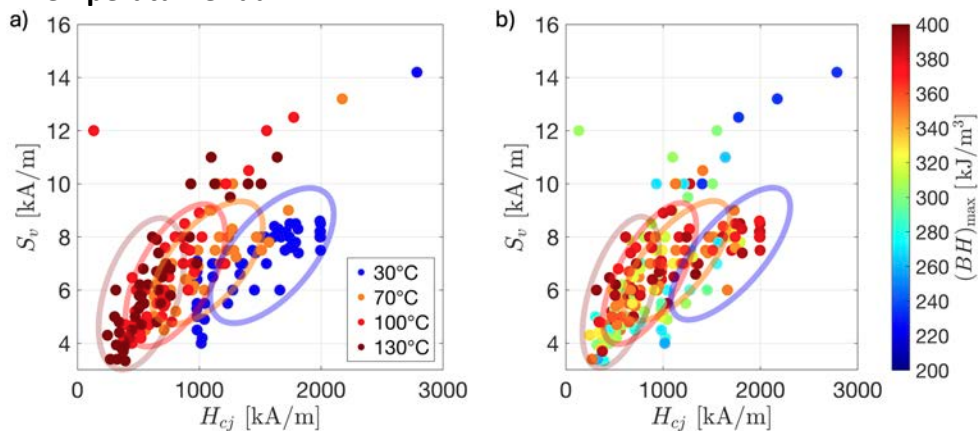


Abb. 5.43: Darstellung von $S_v(H_{DS}^{\text{rec}})$ -Messwerten ausgewählter Proben in Abhängigkeit der Koerzitivfeldstärke H_{cj} bei unterschiedlichen Temperaturen. In a) sind die S_v -Messwerte nach Probentemperatur farblich markiert: 30 °C blau, 70 °C orange, 100 °C rot und 130 °C lila. In b) ist die Probenfärbung dem jeweiligen Wert von $(BH)_{\max}$ zugeordnet. Es zeigt sich in a) sowohl eine mit zunehmender Temperatur abnehmende Koerzitivfeldstärke der Proben als auch eine Abnahme der S_v -Werte. In b) ist kein direkter Einfluss von S_v oder der Probentemperatur auf $(BH)_{\max}$ erkennbar.

Zur Betrachtung des Einflusses der Temperatur von $S_v(H_{D5}^{rec})$, wird in Abb. 5.43 die Gesamtübersicht aller Proben für 30, 70, 100 und 130 °C dargestellt. Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Probentemperatur, der Koerzitivfeldstärke H_{cj} und dem Wert von S_v : Während bei 30 °C (blau) der Mittelwert von S_v bei etwa 7.8 kA/m liegt, verschiebt sich dieser bei 70 °C auf etwa 6.5 kA/m, bei 100 °C auf etwa 6 kA/m und bei 130 °C auf etwa 5 kA/m. Zur genaueren Betrachtung werden die Proben: N35, N45 und N52 jeweils mit Koerzitivfeldstärken von $H_{cj} \geq 1050$ kA/m; $H_{cj} \geq 1300$ kA/m (H) und $H_{cj} \geq 1600$ kA/m (SH) in Abb. 5.44 dargestellt.

Variierende Koerzitivfeldstärken bei konstantem maximalen Energieprodukt

Zur Betrachtung der Feldabhängigkeit von $S_v(H_{D5}^{rec})$ bei zunehmender Temperatur dient ein Vergleich von Proben mit nahezu konstantem $(BH)_{max}$, wie in Abb. 5.44 bezogen auf die jeweilige Koerzitivfeldstärke H_{cj} der Proben Standard, H und SH dargestellt. In a) zeigen sich für die N35-Serie bei Raumtemperatur $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte von etwa N35: 4.2 kA/m, N35H: 7 kA/m und N35SH: 7.7 kA/m. Für die N45-Serie in b) ergeben sich Werte von N45: 6 kA/m, N45H: 7.1 kA/m und N45SH: 8 kA/m. In der N52-Serie zeigen sich für N52: 6.3 kA/m, N52H: 7 kA/m und N52SH: 8 kA/m.

Über alle Proben hinweg ergibt sich ein klarer Trend: $S_v(H_{D5}^{rec})$ nimmt mit steigender Temperatur ab. Dabei weisen die Proben mit der geringsten Koerzitivfeldstärke (N35, N45, N52) die stärksten temperaturbedingten Abnahmen von $S_v(H_{D5}^{rec})$ auf.

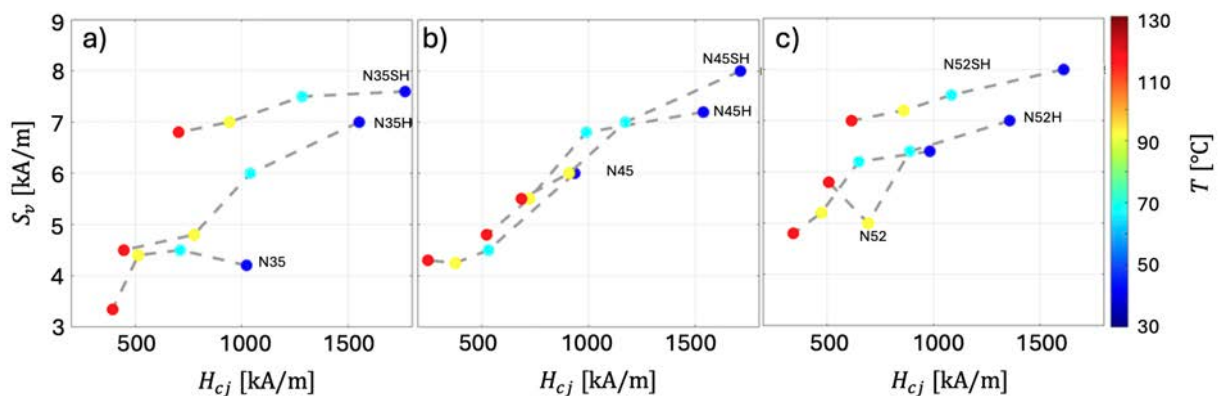


Abb. 5.44: Verlauf von $S_v(H_{D5}^{rec})$ bei variierenden Koerzitivfeldstärken (/, H, SH) und konstantem $(BH)_{max}$ bei Temperaturen von 30 °C, 70 °C, 100 °C und 130 °C. In a) ist die N35-Serie ($J_r = 1.2$ T) dargestellt, in b) die N45-Serie ($J_r = 1.3$ T) und in c) die N52-Serie ($J_r = 1.4$ T). Es zeigt sich in allen betrachteten Serien ein Anstieg von $S_v(H_{D5}^{rec})$ mit zunehmender Koerzitivfeldstärke.

Dieser Trend lässt sich auch in der Darstellung bei konstantem Koerzitivfeld und variierendem $(BH)_{max}$ feststellen, wie in Abb. 5.45 gezeigt. Bezogen auf die jeweilige Koerzitivfeldstärke variiert der Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ bei den SH-Proben zwischen 7.5 und 8 kA/m, während er bei den H-Proben um etwa 7 kA/m schwankt. Bei den Proben mit Standardkoerzitivfeldstärke von ca. 1000 kA/m bei 30 °C liegt der Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ zwischen 4.2 und 6.5 kA/m.

Variierendes maximales Energieprodukt bei konstanter Koerzitivfeldstärke

Bei Betrachtung des $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Temperaturverlaufs bei Proben mit variierendem Energieprodukt $(BH)_{max}$ und konstantem Koerzitivfeld im jeweiligen Temperaturverlauf in Abb. 5.45, b, c zeigt sich bei nahezu konstanter Koerzitivfeldstärke in der Standardserie a) noch ein leichter Trend von $(BH)_{max}$ auf S_v , erkennbar durch Unterschiede bei z. B. RT zwischen N35: 4.2 kA/m, N45: 6 kA/m und N52: 6.4 kA/m. Allerdings ist dieser in b) kaum noch vorhanden: Hier liegt der $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Temperaturverlauf eng beieinander, bei höheren Temperaturen mit Abweichungen insbesondere der N35H-Probe. In c) verlaufen N35SH und N52SH beinahe parallel, während nur die N45SH-Probe Abweichungen zeigt.

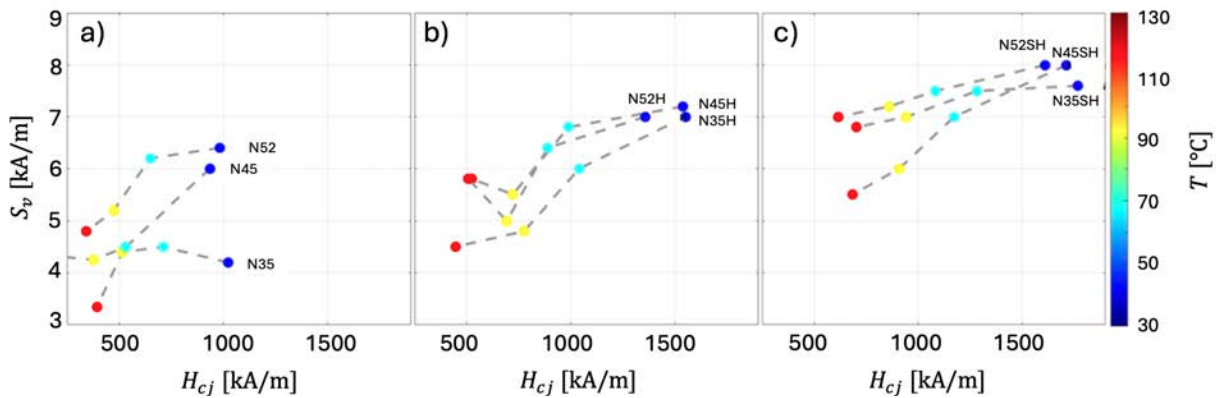


Abb. 5.45: Verlauf von $S_v(H_{D5}^{rec})$ für unterschiedliche Proben mit jeweils variierendem $(BH)_{max}$ und konstanter Koerzitivfeldstärke H_{cj} bei Probertemperaturen von ca. 30, 70, 100, 120 °C. a) zeigt die Standardserie mit N35, N45 und N52, mit einem H_{cj} von etwa 950 kA/m bei RT. b) zeigt die H-Serie mit N35H, N45H und N52H, mit einem H_{cj} von etwa 1355 kA/m bei RT. c) zeigt die SH-Serie mit N35SH, N45SH und N52SH, mit einem H_{cj} von etwa 1590 kA/m bei RT. Während in der Standardserie a) noch ein leichter Trend von $(BH)_{max}$ auf S_v , erkennbar durch Unterschiede bei RT zwischen N35: 4.2 kA/m, N45: 6 kA/m und N52: 6.4 kA/m, zu erkennen ist, ist dieser in b) kaum noch vorhanden. Hier liegen alle Proben nah beieinander, bei höheren Temperaturen mit Abweichungen insbesondere der N35H-Probe. In c) verlaufen N35SH und N52SH beinahe parallel, während nur die N45SH-Probe Abweichungen zeigt.

5.3.3.3 Probenform und Entmagnetisierungsfaktor

Für die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Probenformen, die zu verschiedenen Entmagnetisierungsfaktoren führen, sind in Abb. 5.46 die $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte in Abhängigkeit der Probenform (Entmagnetisierungsfaktor N) dargestellt. Hierbei zeigen die Kugelmagnete mit homogener innerer Feldverteilung $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte für N35: 4.5 kA/m, N38: 5.5 kA/m und für N42: 5.0 kA/m. Standardquaderproben mit inhomogener innerer Feldverteilung vergleichbarer Probengüten und einem Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.56$ weisen $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte von N35: 4.2 kA/m, N40: 4.9 kA/m und N52: 7.0 kA/m auf. Zum Vergleich von $S_v(H_{D5}^{rec})$ unterschiedlicher Geometrien von Quaderproben dienen N52-Quaderproben mit $N = 0.45$: 6.7 kA/m bei $N = 0.5$: 6.9 kA/m bei $N = 0.56$: 6.4 und 6.9 kA/m sowie bei $N = 0.75$: 7.1 kA/m.

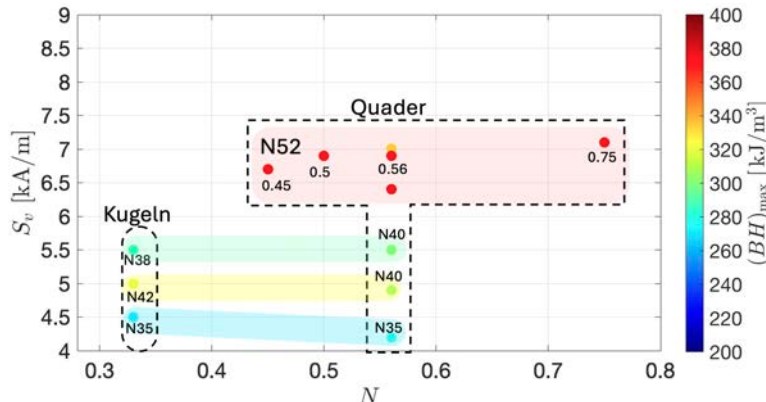


Abb. 5.46: $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Ergebnisse für unterschiedliche Probenformen (Quader- und Kugelmagnete) und deren Entmagnetisierungsfaktoren. Bei Quadermagneten (inhomogene innere Feldverteilung) der N52-Serie mit durchschnittlichen Entmagnetisierungsfaktoren $N = 0.45$; 0.5; 0.56 und 0.75 zeigen sich mit $S_v = 6.7$ bis 7.1 kA/m nur sehr geringe Auswirkungen variierender Entmagnetisierungsfaktoren. Auch im Vergleich von Quader- zu Kugelmagneten (homogene innere Feldverteilung bei konstantem $N = 1/3$) mit N35, N38 und N52 zeigen sich mit $S_v = 4.2$ bis 4.9 kA/m keine signifikanten Unterschiede.

5.3.4 Material- und prozessbezogene Einflussfaktoren

Zu den material- und prozessbezogenen Einflussfaktoren gehören die in Abschnitt 3.4.1.1 aufgeführten Variationen, wie maximales Energieprodukt $(BH)_{max}$ und Koerzitivfeldstärke H_{cj} , Besonderheiten einzelner Werkstoffe sowie gezielte Modifikationen im Herstellprozess (z. B. Korngröße, Segmentierung und Einsatz schwerer Seltenerdmetalle).

5.3.4.1 Einfluss von $(BH)_{\max}$ bei konstantem Koerzitivfeld

Um die Einflüsse von $(BH)_{\max}$ auf $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ zu untersuchen, werden ausgewählte konventionelle Proben nach ihren Koerzitivfeldstärken H_{cj} : Standard (Abb. 5.47), H (Abb. 5.48), SH (Abb. 5.49) jeweils in a), sowie bezüglich ihrer mittleren Korngröße D_{50} in b) dargestellt.

Probenreihe „Standard“, Koerzitivfeldstärken von 950 bis 1100 kA/m:

Die Probenreihe „Standard“ in Abb. 5.47 umfasst die Magnetgüten N35, N40, N42, N45, N48, N52 und N54.

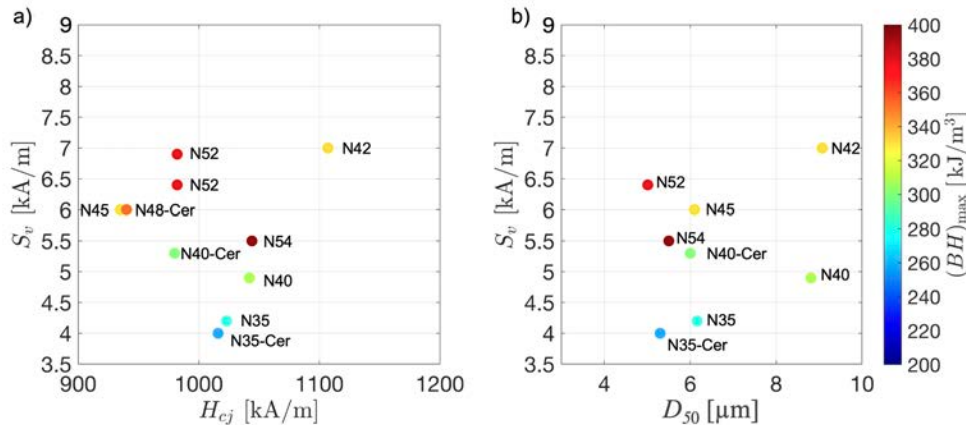


Abb. 5.47: Probenreihe „Standard“ (H_{cj} von etwa 960 kA/m bis 1100 kA/m) dargestellt als $S_v(H_{D5})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . Es zeigt sich in a) ein leichter Trend, dass mit steigendem $(BH)_{\max}$ auch der Wert von S_v zunimmt, während in b) kein eindeutiger Zusammenhang erkennbar ist.

Es zeigt sich trotz einzelner Schwankungen, insbesondere zwischen den Proben N42 und N54, ein Trend eines leicht ansteigenden Wertes von $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ in a) mit ansteigendem $(BH)_{\max}$: N35: 4.2 kA/m, N40: 4.9 kA/m, N45: 6 kA/m und N52: 6.5 kA/m. Bei Betrachtung der Korngröße in b) ist kein eindeutiger Trend zu erkennen.

Probenreihe „High-Heat (H)“, Koerzitivfeldstärken von 1350 bis 1550 kA/m

Die Probenreihe „H“ in Abb. 5.48 umfasst die Magnetgüten N35-H, N45-H, N40-H, N46-H, N47-H, N48-H und N52-H.

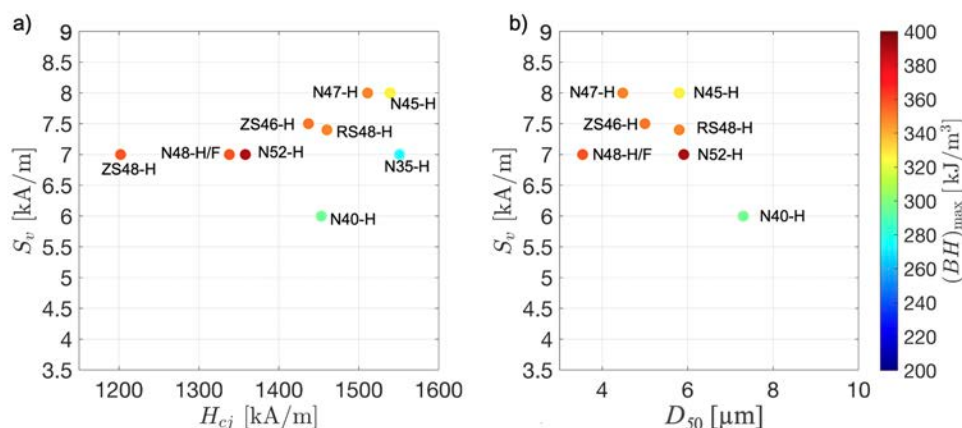


Abb. 5.48: Probenreihe „H“ (H_{cj} von etwa 1200 kA/m bis 1550 kA/m) dargestellt als $S_v(H_{D5})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . Es zeigt sich weder in a) ein eindeutiger Zusammenhang zwischen S_v und $(BH)_{\max}$ noch in b) mit der mittleren Korngröße.

Bei der Probenreihe (H) mit Koerzitivfeldstärken H_{cj} von 1350 bis 1550 kA/m zeigt sich in a) kein eindeutiger Trend eines zunehmenden Wertes von $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ mit steigendem $(BH)_{\max}$. Allerdings wird hier insbesondere neben variierendem $(BH)_{\max}$, auch die Variationen der Koerzitivfeldstärke ersichtlich, wodurch mit Ausnahme der N35-H und N40-H Probe, ein leicht-

ter Trend mit zunehmendem $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ bei zunehmendem H_{cj} zu erkennen ist. Bei Betrachtung der $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ -Werte bezogen auf die mittlere Korngröße in b), wird kein Zusammenhang bzw. Trend ersichtlich.

Probenreihe, „Super-High-Heat (SH)“

Die Probenreihe „SH“ in Abb. 5.49 umfasst die Magnetgüten N35-SH, N40-SH, N42-SH, N45-SH, N48-SH, N52-SH und N54-SH mit Koerzitivfeldstärken zwischen 1600 und 1800 kA/m.

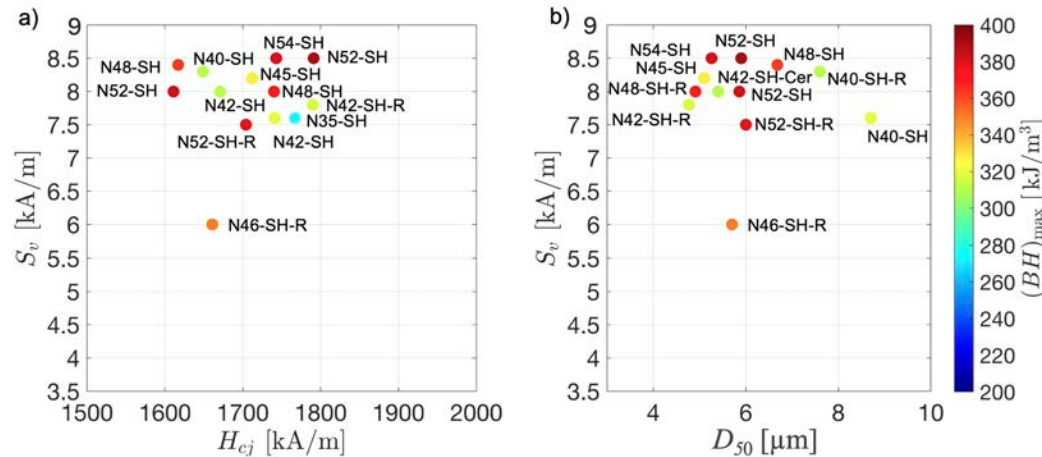


Abb. 5.49: Probenreihe, „SH“ (H_{cj} von etwa 1600 kA/m bis 1800 kA/m) dargestellt als $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . Es zeigt sich weder in a) ein eindeutiger Zusammenhang zwischen S_v und $(BH)_{\text{max}}$ noch in b) mit der mittleren Korngröße.

Bei den hochkoerzitiven Proben der Reihe SH lässt sich kein Zusammenhang zwischen $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ und $(BH)_{\text{max}}$ in a) feststellen. Auch die Schwankungen der Koerzitivfeldstärken führen zu keinem erkennbaren Trend. Desweiteren lässt sich in b) kein Trend von $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ und der mittleren Korngröße feststellen.

5.3.4.2 Einfluss der Koerzitivfeldstärke bei konstantem Energieprodukt

Um die Einflüsse von unterschiedlichen Koerzitivfeldstärken bei konstantem $(BH)_{\text{max}}$ zu untersuchen, werden die Proben nach ihrem Wert von $(BH)_{\text{max}}$ in: N35, N40/42, N45/46/47/48, N52, jeweils in ihre Kategorien: Standard, M, H, SH gegliedert.

Probenreihe „N35“

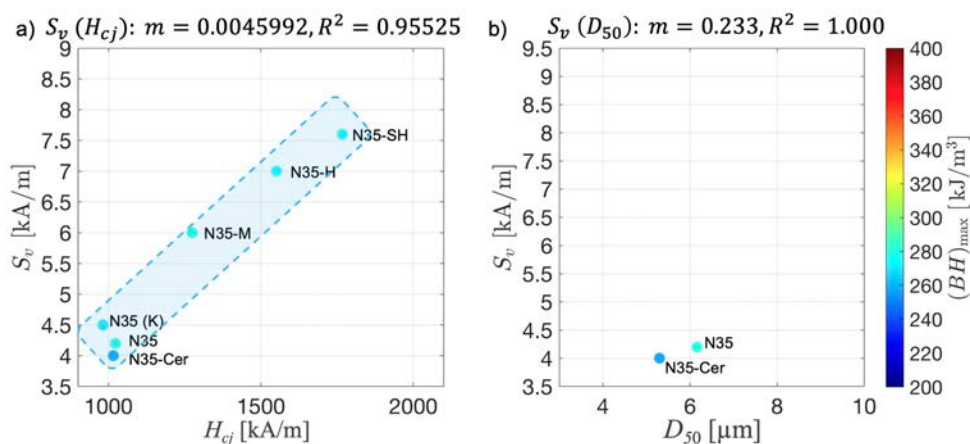


Abb. 5.50: Probenreihe „N35“ (konstantes $(BH)_{\text{max}}$, variierende Koerzitivfeldstärke H_{cj}), dargestellt als $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$. a) S_v als Funktion von H_{cj} , b) S_v als Funktion der mittleren Korngröße D_{50} . In a) zeigt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen S_v und zunehmender Koerzitivfeldstärke mit einer Steigung von $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ zu H_{cj} von etwa 0.0046. Aufgrund der geringen Anzahl an Proben lässt sich in b) kein Zusammenhang mit der Korngröße ableiten.

Die Probenreihe „N35“ in Abb. 5.50 umfasst die Magnetgüten N35, N35-M, N35-H und N35-SH mit einer Remanenz J_r von etwa 1.2 T. Abb. 5.50 zeigt die Ergebnisse der N35-Serie in a) als $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion der Koerzitivfeldstärke H_{cj} und in b) als Funktion der mittleren Korngröße D_{50} . In a) zeigt sich ein eindeutiger linearer Trend über sechs Proben mit einer Steigung von $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit von H_{cj} von etwa 0.005 und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.95$. Bei Betrachtung der mittleren Korngröße in b) kann aufgrund unterschiedlicher Materialzusammensetzungen und fehlender Messwerte keine Aussage getroffen werden.

Probenreihe „N40/42“

Die Probenreihe „N40/42“ in Abb. 5.51 umfasst die Magnetgüten N40/42, N40-H und N40/42-SH mit einer Remanenz J_r von etwa 1.3 T.

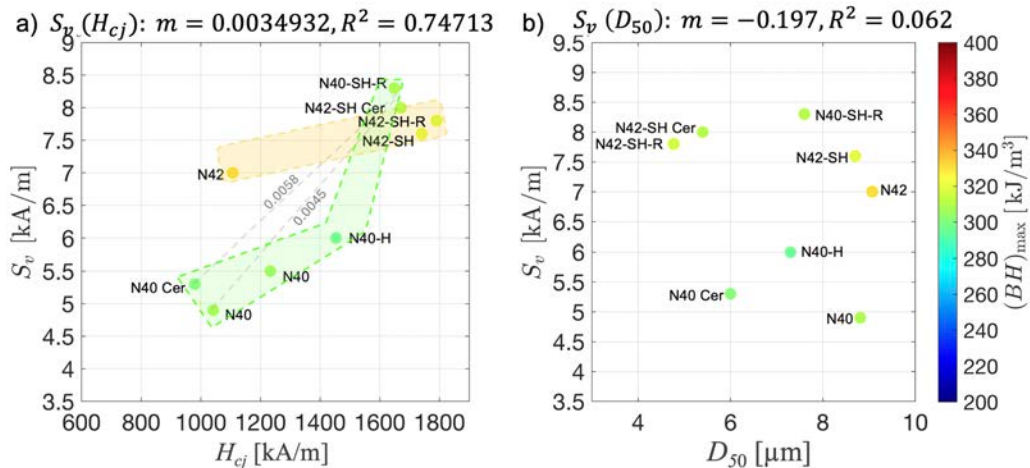


Abb. 5.51: Probenreihe „N40, N42“ (konstantes $(BH)_{max}$, variierende Koerzitivfeldstärke H_{cj}), dargestellt als $S_v(H_{D5}^{rec})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . In a) zeigt sich ein Zusammenhang zwischen S_v und zunehmender Koerzitivfeldstärke. In b) ist kein Zusammenhang mit der Korngröße erkennbar.

Bei der Probenreihe N40/42 in Abb. 5.51a zeigt sich ein ähnlicher Trend wie bei der N35-Serie, mit einer Steigung von $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit von H_{cj} von etwa 0.0045 bis 0.0058. Bei Betrachtung der mittleren Korngröße D_{50} in b) konnte kein Zusammenhang mit $S_v(H_{D5}^{rec})$ festgestellt werden. Die mittlere Korngröße der Proben variiert hier zwischen ca. 5 bis 9 μm mit $S_v(H_{D5}^{rec})$ Werte von ca. 5 bis 8.4 kA/m.

Um einen weiteren Vergleich über mehrere Proben zu erzielen, wurden die eng beieinander liegenden Proben der Serien: N45 bis N48, in Abb. 5.52, aufgeführt.

Probenreihe „N45/N46/N47/48“

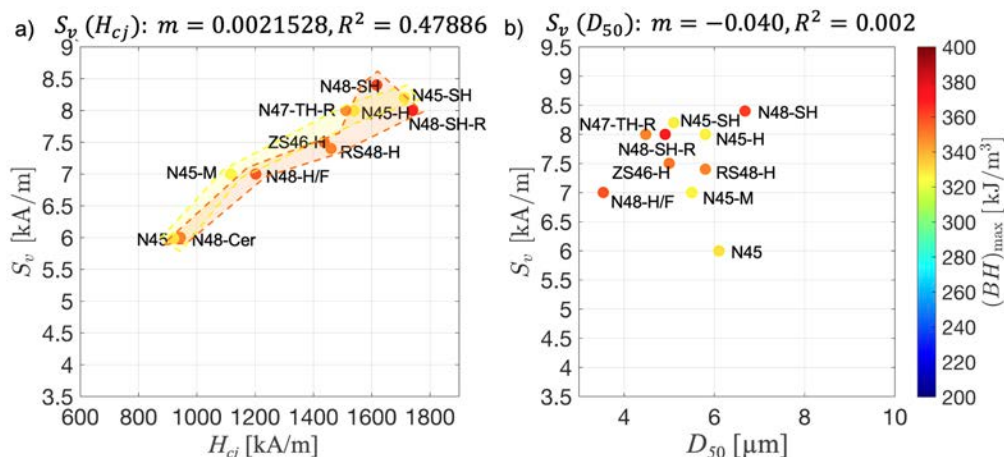


Abb. 5.52: Probenreihe „N45, N48“ (konstantes $(BH)_{max}$, variierende Koerzitivfeldstärke H_{cj}), dargestellt als $S_v(H_{D5}^{rec})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . Es zeigt sich ein Zusammenhang des Werts von S_v mit der zunehmenden Koerzitivfeldstärke; ein Zusammenhang mit der Koerzitivfeldstärke ist nicht ersichtlich.

Die Probenreihe „N45/N46/N47/48“ in Abb. 5.52 umfasst die Magnetgüten N45, N45-M, N45-SH, N46-H, N46-SH, N47-H, N48-H und N48-SH mit einer Remanenz J_r von etwa 1.3–1.33 T. In Abb. 5.52a zeigt sich, dass bei verhältnismäßig konstantem $(BH)_{\max}$ für die N45- und N48-Serie $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ mit zunehmendem H_{cj} ansteigt, mit einer Steigung von etwa 0.0025 bis 0.0035. Bei Betrachtung der mittleren Korngröße D_{50} in b) zeigt sich hingegen kein eindeutiger Trend zu $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$. Die mittlere Korngröße D_{50} der Proben variiert hier zwischen ca. 3.8 bis 7 μm mit $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ Werte von ca. 6 bis 8.4 kA/m.

Probenreihe „N52“

Die Probenreihe „N52“ in Abb. 5.53 umfasst die Magnetgüten N52, N52-M, N52-H und N52-SH mit einer Remanenz J_r von etwa 1.4 T.

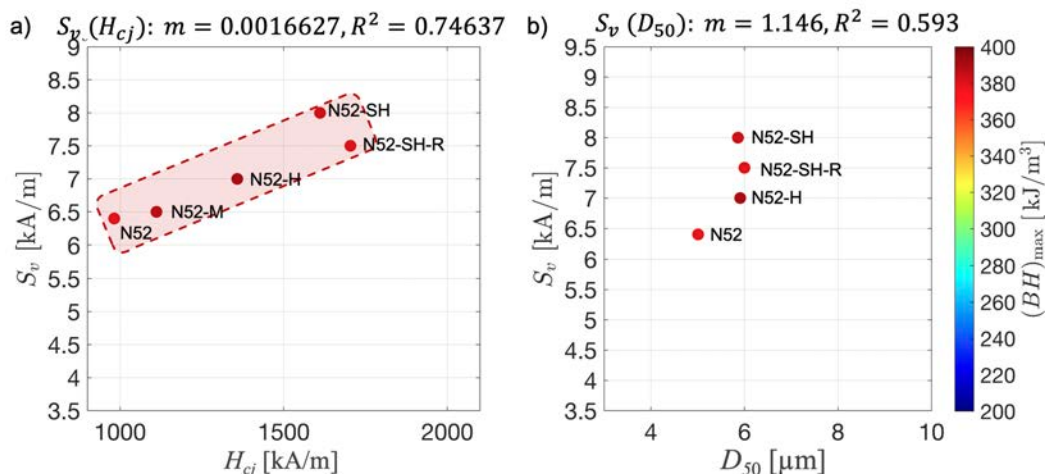


Abb. 5.53: Probenreihe „N52“ (konstantes $(BH)_{\max}$, variierende Koerzitivfeldstärke H_{cj}), dargestellt als $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$. a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . In a) zeigt sich ein Zusammenhang zwischen S_v und zunehmender Koerzitivfeldstärke. In b) ist kein Zusammenhang mit der Korngröße erkennbar.

Die Probenreihe „N52“ zeigt in Abb. 5.53 bei konstantem $(BH)_{\max}$ ebenfalls eine erkennbare Abhängigkeit vom Koerzitivfeld. In a) zeigt sich eine mittlere Steigung von $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ in Abhängigkeit von H_{cj} von 0.0017 mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.74$. Bei Betrachtung der mittleren Korngröße D_{50} in b) ist kein Zusammenhang zwischen Korngröße und $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ ersichtlich. Die mittlere Korngröße der Proben variiert hier zwischen ca. 5 und 6 μm mit $S_v(H_{D5}^{\text{rec}})$ -Werten von ca. 6.4 bis 8 kA/m.

5.3.4.3 Besonderheiten ausgewählter Materialien im Vergleich zu konventionellen Vergleichsgütern

Zu den Besonderheiten ausgewählter Materialien (definiert in Abschnitt 3.4.1.1) gehören insbesondere der Vergleich von GBD- und konventionellen Proben (5.3.4.3.1), spezielle Proben mit Dy- oder Tb-Verstärkung sowie gezielte Materialvariationen im Herstellungsprozess (5.3.4.3.2), Variationen der Korngröße durch gezielte Wärmebehandlungen (5.3.4.3.3) sowie segmentierte Proben (5.3.4.3.4).

5.3.4.3.1 Vergleich von GBD- und konventionellen Proben

Für den Vergleich von Proben mit herstellerseitiger GBD-Verstärkung und Vergleichsgütern ohne GBD-Prozess zeigt Abb. 5.54 die spezifischen S_v -Wert bei verhältnismäßig vergleichbarem $(BH)_{\max} \geq 350 \text{ kJ/m}^3$ (30 °C). Hierbei sind die GBD-Proben mit einer grau gefärbten Fläche markiert, während die (nicht GBD) Vergleichsgütern in blau dargestellt sind.

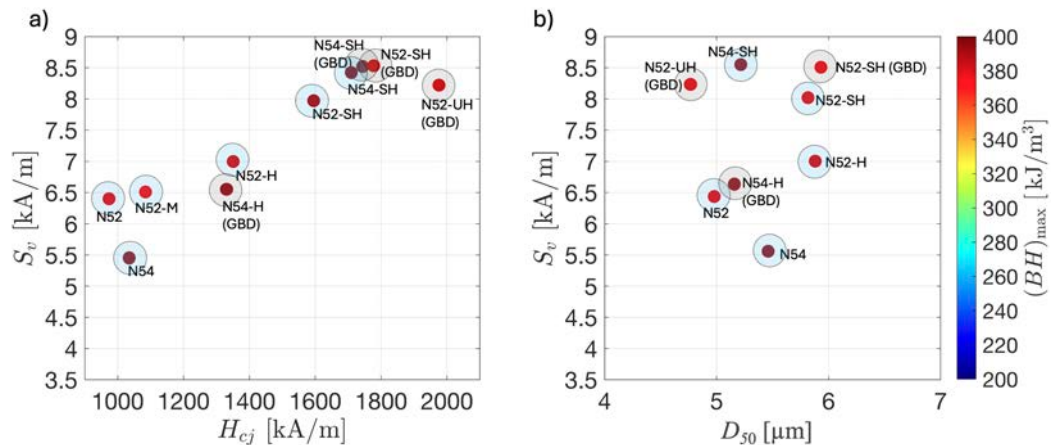


Abb. 5.54: Vergleich von $S_v(H_{D5}^{rec})$ verschiedener Proben mit GBD-Proben (grau) und Proben ohne GBD (blau). a) S_v in Abhängigkeit von H_{cj} , b) S_v in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . Im direkten Vergleich zeigen sich in a) zwischen GBD- und Proben ohne GBD keine signifikanten Unterschiede. Auch bei der Betrachtung der mittleren Korngröße D_{50} in b) zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

In Abb. 5.54a zeigt die N54-H (GBD)-Probe im Vergleich zum N52-H Magnet einen etwas geringeren Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ mit 6.5 zu 7 kA/m. Die Probe N52-SH (GBD) zeigt mit 8.5 kA/m einen etwas höheren Wert im Vergleich zur direkten Vergleichsgüte N52-SH mit 8.0 kA/m. Sie erreicht damit ein vergleichbares Niveau wie die N54-SH-Probe mit 8.4 kA/m. Diese befindet sich im Bereich der N52-UH-Proben, deren Werte zwischen 7.5 und 8.5 kA/m liegen.

Bei Betrachtung der mittleren Korngröße D_{50} in b) zeigen die N52-SH (GBD)-Probe und N52-SH eine ähnliche Korngröße von etwa 5.8 μm mit S_v -Werten von 8 bzw. 8.5 kA/m. Zwischen der N54-H (GBD) und N52-H mit 5.2 bzw. 5.8 μm und $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werten von 6.5 und 7 kA/m zeigt sich eine kleinere Differenz auf. Die N54-SH Probe ohne GBD weist bei 5.3 μm hingegen einen S_v -Wert von 8.5 kA/m auf.

Als weiterer Vergleich dienen Proben der Güten N38EH (Hersteller: B), welche im Herstellungsprozess mittels GBD durch Dysprosium (N38EH+Dy) oder Terbium (N38EH+Tb) verstärkt wurden. Abb. 5.55 zeigt die $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte in Abhängigkeit ihrer Koerzitivfeldstärke H_{cj} bei 130 °C.

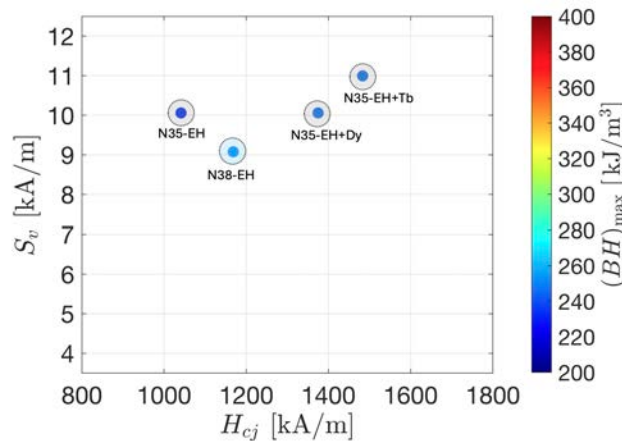


Abb. 5.55: Vergleich von $S_v(H_{D5}^{rec})$ zu H_{cj} konventioneller GBD-Proben mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen (N38-EH+Dy, N38-EH+Tb) im Vergleich zu Güten ohne GBD (N35-EH, N38-EH) bei 130 °C Probentemperatur. Im Vergleich zur Nicht-GBD-Probe N38-EH zeigen die GBD-Proben mit Dy- bzw. Tb-Zusatz sowohl höhere Koerzitivfeldstärken H_{cj} als auch erhöhte S_v -Werte. Im Vergleich zur Probe N35-EH relativieren sich diese Unterschiede der S_v -Werte jedoch.

Hierbei zeigt die Probe N38-EH einen $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Wert von ca. 9 kA/m, während die mit Dysprosium verstärkte Probe N38EH+Dy einen Wert von 10 kA/m und die mit Terbium verstärkte Probe N38EH+Tb ca. 11 kA/m aufweist. Im Vergleich zeigt die Probe, N35-EH einen Wert von 10 kA/m bei geringerem $(BH)_{max}$ und geringerer Koerzitivfeldstärke.

5.3.4.3.2 Gezielte Materialvariationen im Herstellprozess

Ein weiterer relevanter Einflussfaktor liegt in den verwendeten Materialzusammensetzungen im Herstellungsprozess. Im Fokus stehen hierbei insbesondere Verfahren, die auf eine Verringerung bzw. den Ausschluss schwerer Seltenerdmetalle abzielen. Zu den betrachteten Varianten zählen:

- Reduced heavy rare earths (RS bzw. R): Reduzierter Dysprosium- bzw. Terbiumanteil
- Zero heavy rare earths (ZS): Vollständiger Ausschluss von Dysprosium und Terbium
- Neodym-Substitution durch Cer

Abb. 5.56 zeigt die ausgewählten Proben für den Vergleich der Cer-Substitution (N35 blau schattiert, N40 grün schattiert, N42 gelb schattiert) sowie variierender Anteile schwerer Seltenerdanteile (N48SH: reduziert, rot schattiert; N48H: reduzierter und vollständiger Ausschluss, orange schattiert) mit ihren jeweiligen Vergleichsgütern. Dargestellt sind a) $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke H_{cj} und b) $S_v(H_{D5}^{rec})$ der mittleren Korngröße D_{50} in Abhängigkeit von H_{cj} .

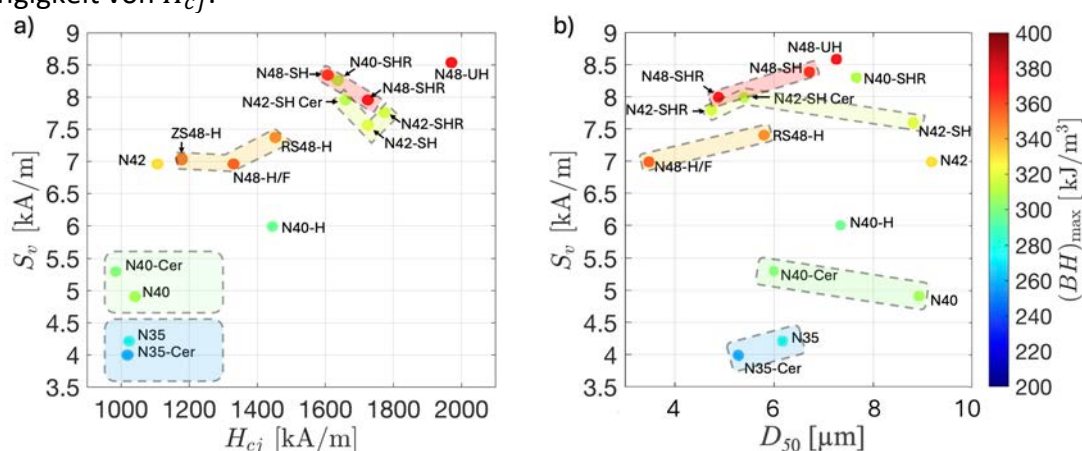


Abb. 5.56: Einfluss ausgewählter Materialzusammensetzungen auf den Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ dargestellt als a) $S_v(H_{cj})$ und b) S_v als Funktion der mittleren Korngröße. Beim Vergleich der Cer-Magnete mit Standard-Magneten der Serien N35 (hellblau schattiert), N40 (grün schattiert) und N42 (gelb schattiert) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Ebenso zeigen Proben mit reduziertem (RS, R) bzw. vollständigem Ausschluss schwerer Seltenerden (ZS, /F) der Serien N42-SH (gelb schattiert), N48-H (orange schattiert) und N48-SH (rot schattiert) im Vergleich zu konventionellen Referenzgütern nur geringe Unterschiede. In b) lässt sich kein Zusammenhang zwischen S_v und der mittleren Korngröße D_{50} feststellen.

Es zeigen sich im Verhältnis zu den direkten Vergleichsgütern nur geringe Unterschiede im Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$. So weisen die Proben N35 und N35-Cer sehr geringe Unterschiede von unter 0.25 kA/m auf, ähnlich bei N40 zu N40-Cer sowie N42-SH-Cer zu N42-SH mit maximalen Unterschieden von 0.5 kA/m. Bei den Vergleichen der Herstellverfahren, mit reduziertem schwerem Seltenerdanteil zeigt sich für $S_v(H_{D5}^{rec})$:

- N48-SH RS mit etwa 8 kA/m und die konventionelle Probe (N48-SH) bei etwa 8.4 kA/m.
- N42-SH mit etwa 7.8 kA/m und die konventionelle Probe (N42-SH RS) bei etwa 7.6 kA/m.
- N48-H RS mit etwa 7 kA/m und die Vergleichsprobe N48-H ZS mit einem Wert von etwa 7.4 kA/m.

5.3.4.3.3 Wärmebehandlung für gezieltes Kornwachstum

Für die detaillierte Untersuchung des Einflusses der mittleren Korngröße D_{50} auf $S_v(H_{D5}^{rec})$ wurden Modellproben auf Basis kommerzieller N52-SH-Magnete des Herstellers B nahe der Sinter-temperatur mit dem Ziel eines erweiterten Kornwachstums nachträglich gesintert (vgl. Abschnitt 3.4.1.3). Nach dieser Temperaturlagerung wurden die Proben einer Nachwärmebehandlung bei 800 °C für 2 Stunden und anschließend bei 500 °C für 2 Stunden unterzogen. Die N52-SH-Referenz zeigt den ursprünglichen Ausgangszustand der Probe ohne Temperaturbehandlung mit einer mittleren Korngröße D_{50} von etwa 5.86 µm und einer Koerzitivfeldstärke

H_{cj} von etwa 1611 kA/m. Die Proben A und B wurden für 16 Stunden bei 1100 °C nachgesintert; zusätzlich dient eine Referenzprobe (A, B)_{ref}, die derselben Temperaturbehandlung, jedoch nur für 15 Minuten, ausgesetzt war, zum Vergleich der Temperaturwirkung. Abb. 5.7 zeigt die Messergebnisse von $S_v(H_{D5}^{rec})$ bezogen auf das jeweilige Koerzitivfeld in a) sowie auf die jeweilige mittlere Korngröße in b). Die nachwärmebehandelten Proben sind mit der Abkürzung WBH (grau schattiert) gekennzeichnet, während vergleichbare Referenzgüten mit grauem Rand markiert sind. Es zeigen sich in a) insbesondere Unterschiede zwischen den Proben im nachwärmebehandelten und nicht nachwärmebehandelten Zustand hinsichtlich der Koerzitivfeldstärke. Im nicht nachwärmebehandelten Zustand liegen die Koerzitivfeldstärken der Proben A, B und (A,B)_{ref} im Bereich von H_{cj} von 1080 bis 1160 kA/m bei $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werten zwischen 8.4 und 9 kA/m. Mit dieser Koerzitivfeldstärke entsprechen die Proben in etwa der Vergleichsgüte N52-M, welche jedoch nur einen Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ von 6.5 kA/m aufweist. Das ursprüngliche Ausgangsmaterial N52-SH zeigt mit $H_{cj} = 1611$ kA/m eine deutlich höhere Koerzitivfeldstärke bei einem S_v von 8 kA/m. Im nachwärmebehandelten Zustand steigt die Koerzitivfeldstärke wieder an, sodass die Proben A, B und (A,B)_{ref} H_{cj} -Werte zwischen 1500 und 1550 kA/m erreichen und damit leicht unterhalb der N52-SH-Referenz liegen. Die Werte von $S_v(H_{D5}^{rec})$ betragen für Probe A 7.6 kA/m, für Probe B 9.0 kA/m und für die Referenzprobe (A,B)_{ref} ebenfalls 9.0 kA/m. Dadurch liegen die $S_v(H_{D5}^{rec})$ -Werte von B und (A,B)_{ref} leicht über der Ausgangsgüte N52-SH, während A leicht darunter liegt, jedoch alle innerhalb der Messstreuung.

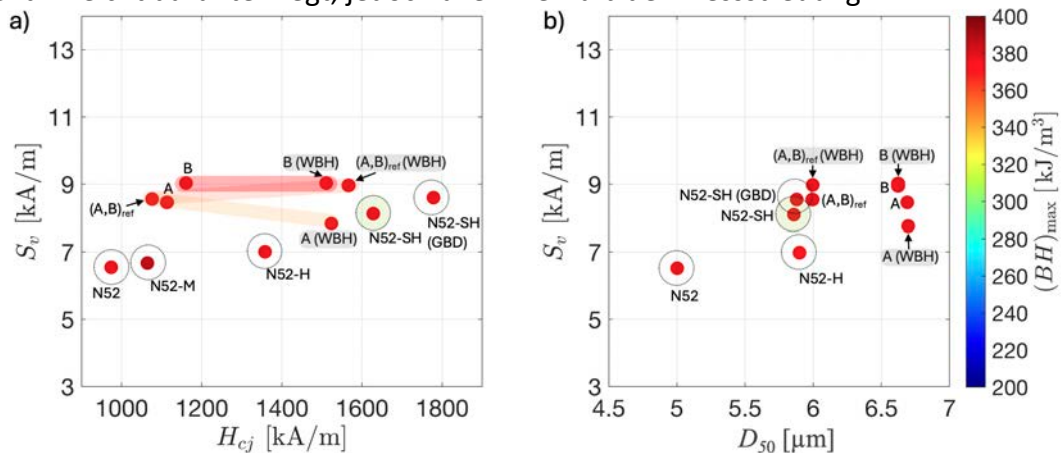


Abb. 5.57: Einfluss gezielter Korngrößenvariationen auf $S_v(H_{D5}^{rec})$ zu H_{cj} durch Temperaturlagerung bei 1100 °C von N52-SH-Proben mit ursprünglicher mittlerer Korngröße von etwa 5.86 µm (siehe Text). a) Darstellung von $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit von H_{cj} , b) $S_v(H_{D5}^{rec})$ als Funktion der mittleren Korngröße D_{50} . Die mittlere Korngröße erhöht sich nach der Auslagerung auf etwa 6.0 µm bei den Referenzproben bzw. bis 6.7 µm bei den Proben A und B. Zusätzlich sind zum Vergleich Standardproben (schwarz umrandet) der Güten N52, N52M, N52H, N52SH sowie N52SH (GBD) aufgeführt. In a) sind S_v -Werte im nachwärmebehandelten Zustand (WBH) und im nicht nachwärmebehandelten Zustand dargestellt. Bei den nicht nachwärmebehandelten Proben A und B zeigt sich eine geringere Koerzitivfeldstärke als im Ursprungszustand (N52-SH, grün schattiert), während S_v im Bereich des ursprünglichen Werts von etwa 8.5 kA/m liegt. Im nachwärmebehandelten Zustand (WBH, grau schattiert) erreichen die Proben wieder annähernd vergleichbare Koerzitivfeldstärken wie im Ursprungszustand. Ein signifikanter Einfluss auf die S_v -Werte lässt sich auch im nachwärmebehandelten Zustand nicht feststellen.

5.3.4.3.4 Segmentierung

Zur Untersuchung des Einflusses der Segmentierung wurden aus konventionellen N52-UH-Magneten drei Probenvarianten gefertigt (siehe Abb. 3.37): unsegmentierte Variante (1 Segment), zweigeteilte Variante (2 Segmente) und vierfach geteilte Variante (4 Segmente), jeweils bei vergleichbarer Grundfläche von $22 \times 12 \times 6$ mm³. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 5.58 zusammen mit nicht segmentierten Vergleichsgüten als $S_v(H_{D5}^{rec})$ von H_{cj} in a) sowie als $S_v(H_{D5}^{rec})$ der mittleren Korngröße D_{50} in b) dargestellt. Für die unsegmentierte Referenzprobe (N52-UH) ergibt sich ein Wert von $S_v(H_{D5}^{rec})$ von ca. 8 kA/m. Die zweifach segmentierte Variante zeigt einen Wert von $S_v(H_{D5}^{rec}) = 8.2$ kA/m, die vierfach segmentierte $S_v(H_{D5}^{rec}) = 8.5$

kA/m. Nicht segmentierte Vergleichsgüten wie die N52-UH-Probe eines anderen Herstellers liegen bei $S_v(H_{D5}^{rec}) = 8.0$ kA/m, N54-UH bei 8.2 kA/m und N48-UH bei 8.6 kA/m.

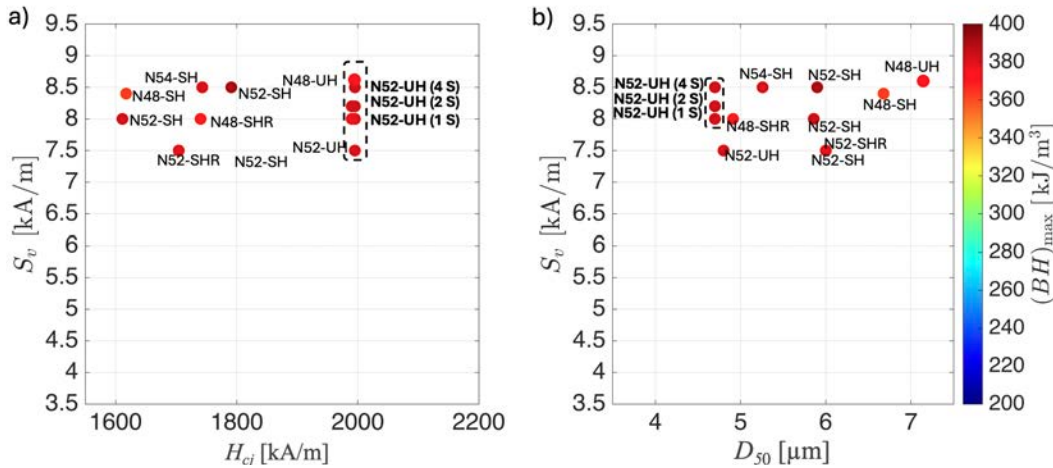


Abb. 5.58: Einfluss der Probensegmentierung auf $S_v(H_{D5}^{rec})$ im Vergleich unterschiedlicher Probengüten im nicht segmentierten Zustand. a) $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit vom Koerzitivfeld H_{cj} , b) $S_v(H_{D5}^{rec})$ in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße D_{50} . In a) zeigen sich mit zunehmender Segmentanzahl leicht steigende S_v -Werte der N52-UH-Probe zwischen 7.5 und 8.5 kA/m. Diese liegen jedoch im Bereich der Messstreuung. Beim Vergleich mit Referenzgüten, wie der N48-UH-Probe mit 8.6 kA/m, lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang feststellen. Auch in b) ist kein Zusammenhang erkennbar.

5.3.5 Temperaturbasierter Viskositätsparameter

Neben den klassischen feldbasierten Viskositätsmessungen bietet das Vorgehen über eine ansteigende Temperatur anstelle eines zunehmenden Magnetfeldes eine einfache Alternative zur Berücksichtigung zeitabhängiger Effekte (vgl. Abschnitt 2.3.2.2.2). Basierend auf dem Messprogramm aus Kapitel 3.2.3.3.4 sind in Abb. 5.59 die Messwerte des temperaturbasierten Viskositätsparameters S_v^T im Temperaturbereich von 50 bis 200 °C über 15 Messzyklen dargestellt. In den Abb. 5.59 a) und b) werden verschiedene Magnetgüten (N35, N52, N52-M, N52-H, N52-SH) mit konstantem Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.8$ gezeigt. Die Unterabbildungen a) und c) zeigen die Roh-Messwerte des temperaturbasierten Viskositätsparameters S_v^T in [°C], während b) und d) die in Feldstärke umgerechneten Werte S_v^* in [kA/m] darstellen. In den Unterabbildungen c) und d) werden Messergebnisse verschiedener Probenformen mit Entmagnetisierungsfaktoren $N = 0.81, 0.8, 0.78, 0.65$ und 0.54 gezeigt.

Die für Abb. 5.59 b) und d) erforderliche Umrechnung der S_v^T -Werte von [°C] in [kA/m] basiert auf dem Temperaturverhalten der Koerzitivfeldstärke und dem entsprechenden absoluten Temperaturgradienten von H_{cj} , $(\alpha_{H_{cj}}^{abs})$. Die S_v^T -Werte in [°C] werden hierfür in feldabhängige S_v^* -Werte in [kA/m] auf Basis von Hysteresegraphmessungen umgerechnet. Grundlage ist die temperaturabhängige Änderung der Koerzitivfeldstärke, berechnet nach:

$$\alpha_{H_{cj}}^{abs} = \frac{\Delta H_{cj}}{\Delta T} = \frac{H_{cj}(T_{n+1} - T_n)}{(T_{n+1} - T_n)} \quad (31)$$

Die entsprechenden $\alpha_{H_{cj}}^{abs}$ -Werte sind in Tab. 18 (Anhang) aufgeführt und werden gemäß

$$S_v^* \left[\frac{kA}{m} \right] = S_v^T * \alpha_{H_{cj}}^{abs} \quad (32)$$

umgerechnet.

Die N35-Probe zeigt S_v^T -Werte im Bereich von 0.25 bis 0.9 °C bzw. S_v^* von 2 bis 4 kA/m im Temperaturbereich von 50 bis 160 °C. Die N52-Probe liegt bei 0.5 bis 1.2 °C ($S_v^* = 3.8$ bis 4.8 kA/m), die N52-M-Probe zwischen 0.8 bis 1.5 °C ($S_v^* = 4.5$ bis 7 kA/m), die N52-H-Probe zwischen 0.9 bis 1.6 °C ($S_v^* = 6$ bis 7.9 kA/m) und die N52-SH-Probe zwischen 1.1 bis 1.8 °C ($S_v^* = 7$ bis 10.5 kA/m). In den Abbildungen a) und b) ist ein leicht ansteigender Trend der S_v^T -Werte innerhalb der N52-Serie mit zunehmender Koerzitivfeldstärke (N52, N52-M, N52-H, N52-SH) erkennbar. Zudem zeigt sich ein Unterschied zwischen der N35- und der N52-Probe.

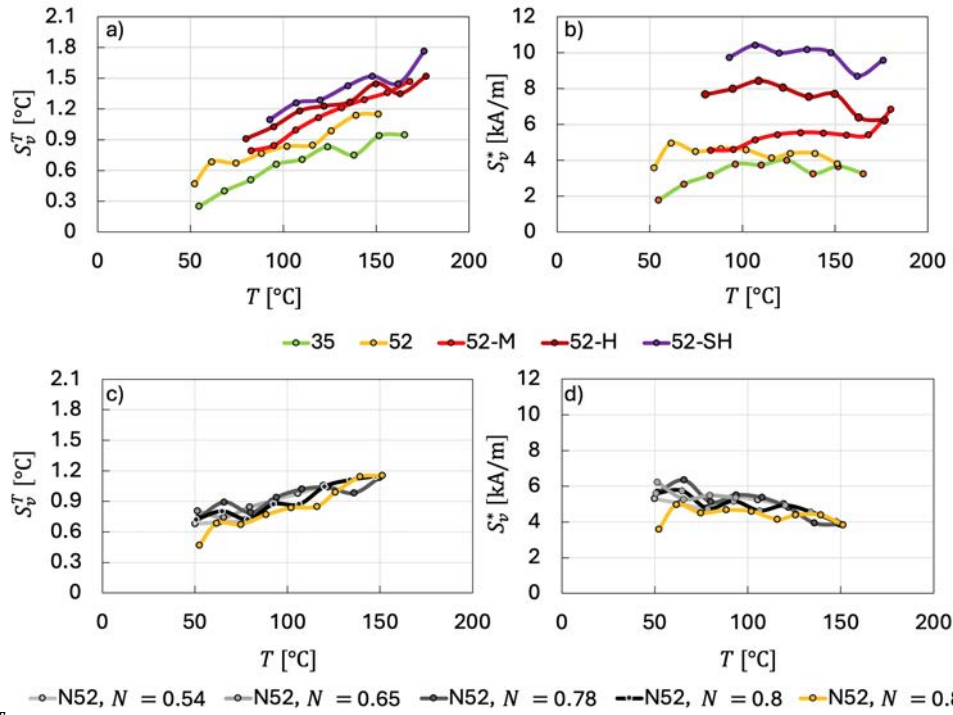


Abb. 5.59: S_v^T -Messergebnisse unterschiedlicher Proben und Geometrien. (a, c) zeigen den temperaturbasierten Viskositätsparameter S_v^T in $^{\circ}\text{C}$, (b, d) die in Feldwerte S_v^* [kA/m] umgerechneten Werte, bestimmt über Hysteresegraphmessungen (gemessen gemäß 3.2.3.3.4). (a, b) stellen Proben unterschiedlicher Güten mit gleichem Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.81$ dar, (c, d) Proben mit unterschiedlichen Maßen (Entmagnetisierungsfaktoren N). Es zeigt sich, dass S_v^T mit der Temperatur zunimmt, während S_v^* mit steigender Temperatur abnimmt. Bei den unterschiedlichen Probengüten weist die N35-Probe einen leicht niedrigeren S_v^T -Verlauf auf als die N52-Probe. Mit zunehmender Koerzitivfeldstärke der Probe steigt auch S_v^T , sowohl in $^{\circ}\text{C}$ als auch in [kA/m]. Adaptiert aus Lanz et al. [161].

Bei den N52-Proben mit unterschiedlichen Probenformen und entsprechenden Entmagnetisierungsfaktoren ergeben sich S_v^T -Werte von etwa 0.5 bis 1.2 $^{\circ}\text{C}$ ($S_v^* = 4$ bis 6 kA/m) bei $N = 0.81$ sowie 0.8 bis 1.2 $^{\circ}\text{C}$ ($S_v^* = 4$ bis 6 kA/m) bei $N = 0.54$. Die übrigen Kurven zeigen bei 50 $^{\circ}\text{C}$ S_v^T -Werte im Bereich von 0.7 bis 0.8 $^{\circ}\text{C}$ ($S_v^* = 5$ bis 6 kA/m). Zur Validierung der S_v^T -Messwerte und des Verfahrens werden die S_v^* -Werte mit S_v -Ergebnissen aus VSM-Messungen bei vergleichbarer interner Feldstärke H_{int} und Temperatur verglichen. Zur Bestimmung der Feldstärke wird der Polarisationszustand des jeweiligen Anfangswerts bei Messtemperatur verwendet, also J zum Zeitpunkt t_0 , entsprechend J^B in Abb. 3.32. Das interne Feld wird dabei berechnet durch $H_{\text{int}} = H_{\text{self}}$ (Gl. (1)). Abb. 5.60 zeigt die Ergebnisse: In Unterabbildung a) sind die $J(T)$ -Kurven dargestellt, in Unterabbildungen b) die um das interne Feld H_{int} korrigierten $J(H_{\text{int}}, T)$ -Kurven.

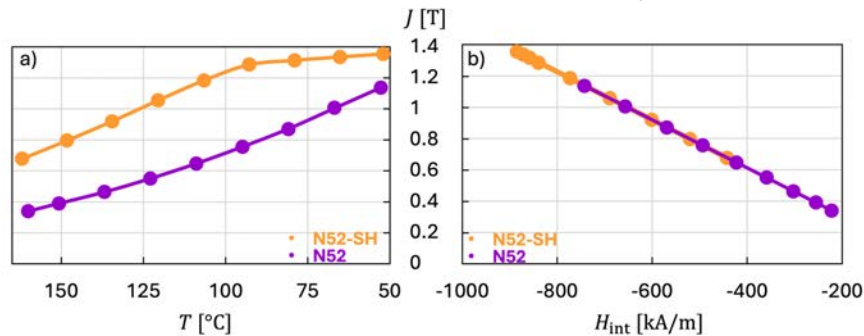


Abb. 5.60: Umrechnung der $J(T)$ -Werte von der Temperatur T auf interne Feldwerte $J(H_{\text{int}})$ für die N52- und N52-SH-Proben. In a) sind die initialen Polarisationszustände der jeweiligen Zieltemperatur in Form eines $J(T)$ -Verlaufs dargestellt. Die jeweiligen J -Werte der entsprechenden Temperatur wurden mittels Gl. (1) auf den Wert des Selbstfeldes $H_{\text{self}} = H_{\text{int}}$ umgerechnet, sodass jeder Temperatur ein Feldwert zugeordnet ist, dargestellt in b) als $J(H_{\text{int}}, T)$ -Verlauf.

Aus den $J(H_{\text{int}}, T)$ -Werten werden für die Temperaturen 70, 100, 130 und 160 $^{\circ}\text{C}$ jeweils vergleichbare $S_v(H_{\text{int}})$ -Werte aus VSM-Messungen ermittelt. Diese werden zusammen mit den entsprechenden $S_v^*(T)$ -Werten in Tab. 19 (Anhang) aufgeführt und in Abb. 5.61 dargestellt.

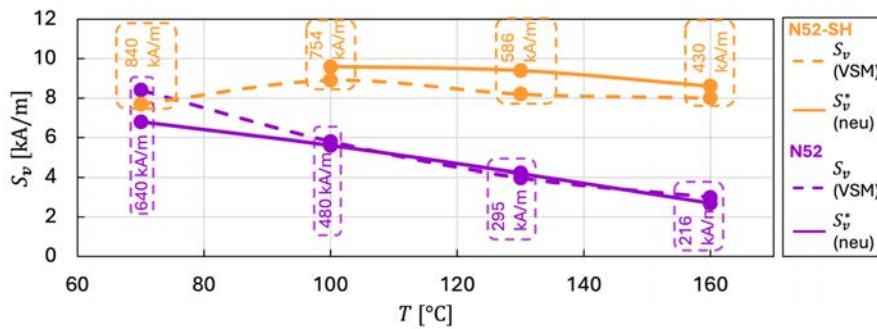


Abb. 5.61: Vergleich der in Feldwerte umgerechneten S_v^* [kA/m] Werte (Tab. 19 (Anhang)) mit Referenz- S_v -Messergebnissen aus VSM-Messungen bei den entsprechenden Temperaturen und internen Feldstärken H_{int} [kA/m]. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen mit Abweichungen von unter 20 %.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den S_v^* -Werten und den klassischen S_v -Werten. Lediglich der S_v^* -Wert der Probe N52 bei 70 °C weicht mit 6.8 kA/m um etwa 20 % vom dazugehörigen S_v -Wert von 8.4 kA/m ab. Alle anderen Abweichungen liegen unter 15 %.

5.3.6 Fluktuationenfeld und Fluktuationstemperatur

Wie in Abschnitt 2.3.2.2.3 beschrieben, erlaubt der feldbasierte Viskositätsparameter S_v über das zeitabhängige Fluktuationenfeld Gl. (14) eine Prognose zukünftiger Magnetisierungszustände, indem es zum maximalen Anwendungsfeld addiert wird Gl. (15). Analog ermöglicht der temperaturbasierte Viskositätsparameter S_v^T eine Fluktuationstemperatur Gl. (16), die zur maximalen Anwendungstemperatur addiert wird und so die effektive Temperatur T_{eff} ergibt Gl. (17). Abb. 5.62 veranschaulicht den Zusammenhang von Fluktuationenfeld und Fluktuationstemperatur beispielhaft für einen N52-Magneten im zeitlichen Verlauf nach $t_1 = 10$ min, $t_2 = 1$ Jahr, $t_3 = 10$ Jahren.

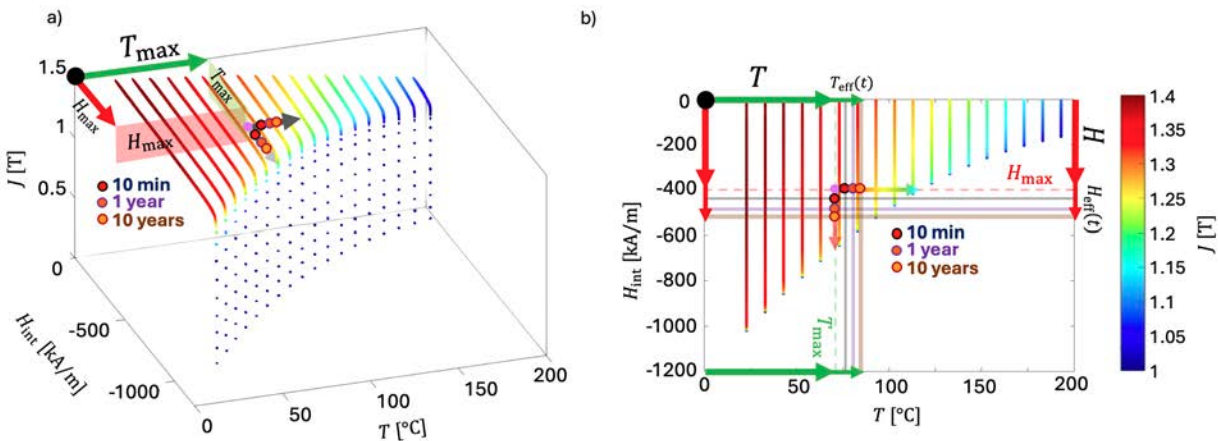


Abb. 5.62: $J(H, T)$ -Kurven einer N52-Probe, dargestellt mit der Probenpolarisation J als Farbgradient zu steigender Temperatur, einschließlich des Fluktuationenfeldes $H_f(t)$ und der Fluktuationstemperatur $T_f(t)$ zum Vergleich. a) 3D-Ansicht der $J(H, T)$ -Kurven. b) 2D-Projektion von a) auf die $H_{\text{int}}(T)$ -Ansicht. Die maximalen Betriebsbedingungen H_{max} und T_{max} (exemplarisch) werden zusammen mit ihren Fluktuationenkomponenten $H_f(t)$ und $T_f(t)$ angezeigt. Basierend auf dem Ausgangspunkt (pinke Markierung) mit 1.32 T bei -400 kA/m und 70 °C ergeben sich die prognostizierten Polarisationswerte: $t_1 \approx 1.31$ T, $t_2 \approx 1.30$ T und $t_3 \approx 1.29$ T, wodurch sich eine gute Übereinstimmung der beiden Prognosemethoden feststellen lässt.

In a) wird die temperatur- und feldabhängige Magnetisierung $J(H, T)$ dargestellt. b) vergleicht die beiden Prognosemethoden basierend auf Fluktuationenfeld und Fluktuationstemperatur auf der $H_{\text{int}}(T)$ -Ebene. Ausgangspunkt ($H_{\text{max}} = -400$ kA/m, $T_{\text{max}} = 70$ °C) mit $J = 1.32$ T ist der Magnetisierungszustand bei maximaler Temperatur und maximalem Feld zum Zeitpunkt $t = 0$ (pinke Markierung). Es wurde ein Wert des feldbasierten Viskositätsparameters von $S_v = 6.8$ kA/m sowie ein Wert des temperaturbasierten Viskositätsparameters

von $S_v^T = 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ gewählt. Aus der Extraktion der in Abb. 5.62b dargestellten Trendlinien ergeben sich aus den Schnittpunkten folgende prognostizierte Polarisationswerte:

- $t_1 = 10 \text{ min (6000 s)}$
 - $H_{\text{eff}}(t_1) = -460 \text{ kA/m}$ bei $T_{\text{max}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$: 1.315 T
 - $T_{\text{eff}}(t_1) = 77^\circ\text{C}$ bei $H_{\text{max}} = -400 \text{ kA/m}$: 1.313 T
- $t_2 = 1 \text{ Jahr (31 536 000 s)}$
 - $H_{\text{eff}}(t_2) = -520 \text{ kA/m}$ bei $T_{\text{max}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$: 1.30 T
 - $T_{\text{eff}}(t_2) = 84^\circ\text{C}$ bei $H_{\text{max}} = -400 \text{ kA/m}$: 1.293 T
- $t_3 = 10 \text{ Jahre (315 360 000 s)}$
 - $H_{\text{eff}}(t_3) = -533 \text{ kA/m}$ bei $T_{\text{max}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$: 1.294 T
 - $T_{\text{eff}}(t_3) = 86^\circ\text{C}$ bei $H_{\text{max}} = -400 \text{ kA/m}$: 1.289 T

Wodurch sich eine sehr gute Übereinstimmung der prognostizierten Polarisationswerte beider Ansätze zeigt.

5.4 Magnetische Stabilisierung

Variationen in Feld- und Temperaturbelastung führen bei zuvor voll aufmagnetisierten Permanentmagneten häufig zu irreversiblen Magnetisierungsänderungen. Zusätzlich unterliegen sie zeitabhängiger Entmagnetisierung (Abschnitt 5.2.1), wobei selbst hochkoerzitive Materialien der Güte N35-UH eine Abnahme der Magnetisierung zeigen (vgl. Abb. 5.28).

Eine gezielte Voralterung ermöglicht es, den Magneten gegen äußere Einflüsse zu stabilisieren, indem die Probe kontrolliert in einen reduzierten Magnetisierungszustand überführt wird. In diesem energetisch niedrigeren Zustand führen kleinere Feld- und Temperaturänderungen als während der Voralterung appliziert zu keinen weiteren irreversiblen Verlusten. Hierfür werden temperatur- und feldbasierte Stabilisierungsverfahren eingesetzt (Abb. 3.34).

Das Vorgehen der temperatur- und feldabhängigen Stabilisierung in Abhängigkeit von steigender Proben temperatur (Konzept 3) ist in Abb. 5.63 dargestellt in a) für die temperaturstabilisierte und in b) für die feldstabilisierte Variante.

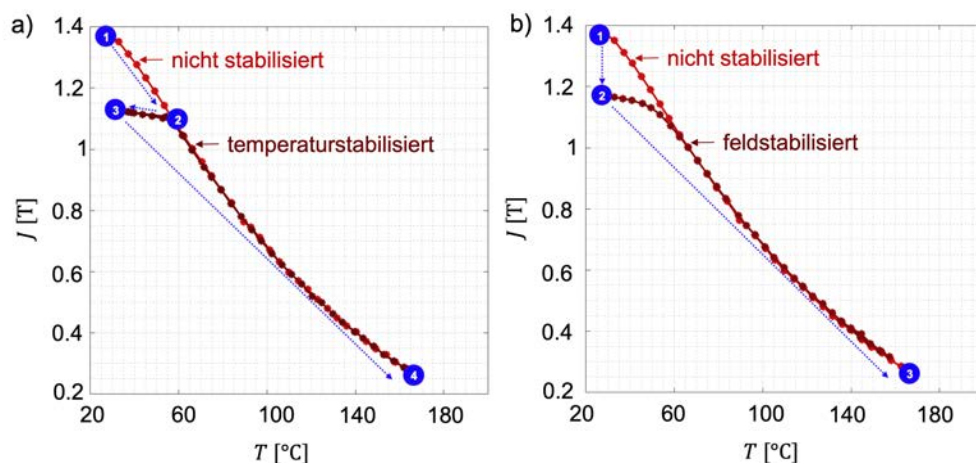


Abb. 5.63: Ablauf der Stabilisierung mit $J(T)$ Polarisations-Temperatur-Kurve einer N52-Probe mit $N = 0.82$, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.5a. a) Temperaturbasierte Stabilisierung: Schritt 1: Einbau der Probe in den Versuchsaufbau. Schritt 2: Aufheizen auf die gewünschte Stabilisierungstemperatur (hier $60 \text{ }^\circ\text{C}$). Schritt 3: Abkühlen auf Raumtemperatur. Schritt 4: Start der Temperaturrampe. b) Feldbasierte Stabilisierung: Schritt 1: Entmagnetisierung (Stabilisierung) der Probe mit externem Feldpuls (hier -220 kA/m). Schritt 2: Einbau der Probe in den Versuchsaufbau. Schritt 3: Start der Temperaturrampe.

Temperaturstabilisierung

Die Temperaturstabilisierung in Abb. 5.63a beginnt mit der Erwärmung der Probe auf die zu stabilisierende Maximaltemperatur von 60 °C (exemplarisch), woraus sich eine Probenpolarisation von ca. $J = 1.1$ T ergibt. Anschließend erfolgt eine Abkühlung auf Raumtemperatur, wodurch die reversiblen Änderungen reduziert werden und die Polarisation auf ca. $J = 1.15$ T ansteigt. Wird die Temperatur erneut in 5 °C-Schritten erhöht, zeigt sich ein nahezu linearer Abfall der Probenpolarisation mit geringer Steigung bis zur zuvor erreichten Stabilisierungstemperatur von 60 °C. Ab diesem Punkt verläuft die Entmagnetisierung identisch zur nicht vor-entmagnetisierten Referenz (nicht stabilisiert).

Feldstabilisierung

Für die feldbasierte Voralterung in Abb. 5.63b wurde die Probe vorab mit einem Pulsmagnetisierer ($H_{\text{ext}} = -220$ kA/m) auf eine reduzierte Polarisation von ca. 1.17 T entmagnetisiert. Anschließend erfolgt eine schrittweise Temperaturerhöhung im Prüfstand (in 5 °C-Schritten), analog zur thermischen Stabilisierung. Auch hier zeigt sich zunächst ein nur geringer Abfall der Magnetisierung bis etwa 55 °C. Darüber hinaus verläuft die Entmagnetisierung deckungsgleich mit der unbehandelten Probe.

Vergleich reversibler und irreversibler Verluste auf Basis von Temperatur

Zur direkten Gegenüberstellung von Temperatur- und Feldstabilisierung wurde dieselbe Probe (N52, $N = 0.82$) sowohl bei Temperaturen von 60 °C (hellgrün) und 120 °C (dunkelgrün) als auch bei externen Feldern (H_{ext}) von -220 kA/m (rot) und -435 kA/m (braun) entmagnetisiert. Anschließend wurden die $J(T)$ -Verläufe exemplarisch auf eine einheitliche Referenztemperatur von 20 °C unter Verwendung des reversiblen Temperaturkoeffizienten korrigiert. Abb. 5.64 a) zeigt die Originalmessung als $J(T)$, b) temperaturkompensiert als $J_{t.c.}(T)$. c) stellt die Kurven a) und b) überlagert dar. Es zeigen sich insbesondere Unterschiede zwischen den beiden Verfahren im Übergangsbereich von reversiblen zu irreversiblen Verlusten c). Dabei weisen die feldstabilisierten Kurven im Übergang eine höhere Abweichung mit runder Charakteristik auf, während die temperaturstabilisierten Kurven nahezu linear verlaufen.

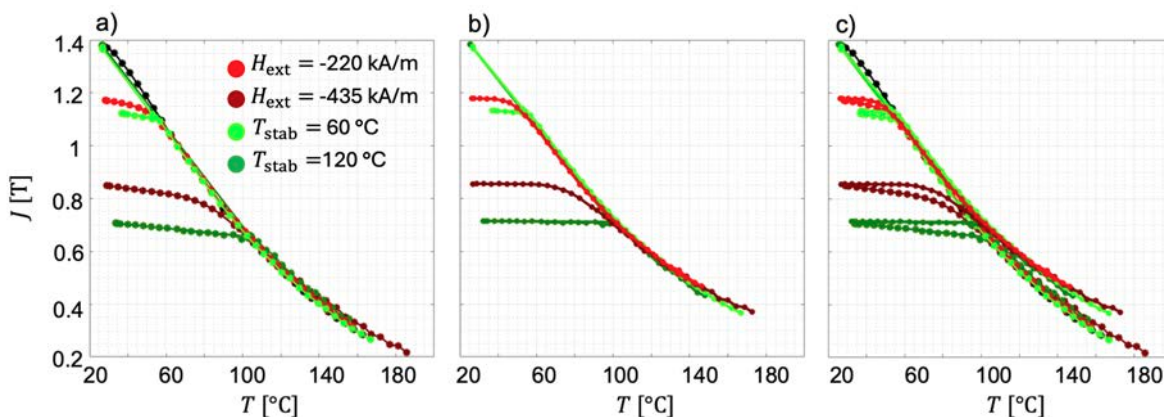


Abb. 5.64: Vergleich der temperatur- und feldbasierten Stabilisierung in Polarisations-Temperatur-Kurven $J(T)$ der Probe (N52, $N = 0.82$). Die Feldstabilisierung ist in Rot ($H_{\text{ext}} = -220$ kA/m) und Braun ($H_{\text{ext}} = -435$ kA/m) dargestellt, die Temperaturstabilisierung in Hellgrün ($T_{\text{stab}} = 60$ °C) und Dunkelgrün ($T_{\text{stab}} = 120$ °C). a) Polarisations- zu Temperaturverlauf $J(T)$ der stabilisierten Proben. b) $J(T)$ -Verlauf aus a) mit temperaturkompensierten Kurven $J_{t.c.}(T)$ unter Verwendung des reversiblen Temperaturkoeffizienten ($\alpha(B_r) = 0.1$ %/°C). c) Überlagerung der nicht kompensierten Messdaten aus a) mit den kompensierten Kurven aus b) zur Verdeutlichung der Unterschiede im Übergangsbereich von reversiblen zu irreversiblen Verlusten. In diesem Bereich zeigen die beiden feldstabilisierten Varianten größere Unterschiede als die temperaturstabilisierten Varianten.

Vergleich reversibler und irreversibler Verluste auf Basis von externem Feld

Ein vergleichbares Vorgehen wie in Abb. 5.64 wurde für dieselbe Probe unter Erhöhung des externen Feldes durchgeführt. Die Feldstabilisierung sowie die anschließende Gegenfeldpulsrampe erfolgten dabei mithilfe des Pulsomagnetisierers. Abb. 5.65a zeigt die nicht stabilisierte Probe (schwarz), die feldstabilisierte (braun) sowie die temperaturstabilisierte (grün). Zur weiteren Analyse wurde die gemessene Kennlinie $J_{\text{rec}}(H_{\text{ext}})$ manuell an die ursprüngliche Hystereseurve $J(H_{\text{int}})$ (Hystereseograph, grau gestrichelt) angepasst. Dabei wurde für jeden Messpunkt der Entmagnetisierungsfaktor so gewählt, dass beide Kurven lokal gut übereinstimmen. Aus den punktwisen Anpassungen wurde anschließend ein mittlerer Entmagnetisierungsfaktor bestimmt. Abb. 5.65b zeigt die resultierende Überlagerung beider Kurven. Der mittlere Entmagnetisierungsfaktor beträgt für die nicht stabilisierte Probe (schwarz) sowie für die feldstabilisierte Variante jeweils $N = 0.84$. Für die temperaturstabilisierte Probe (grün) wurde ein Wert von $N = 0.95$ ermittelt.

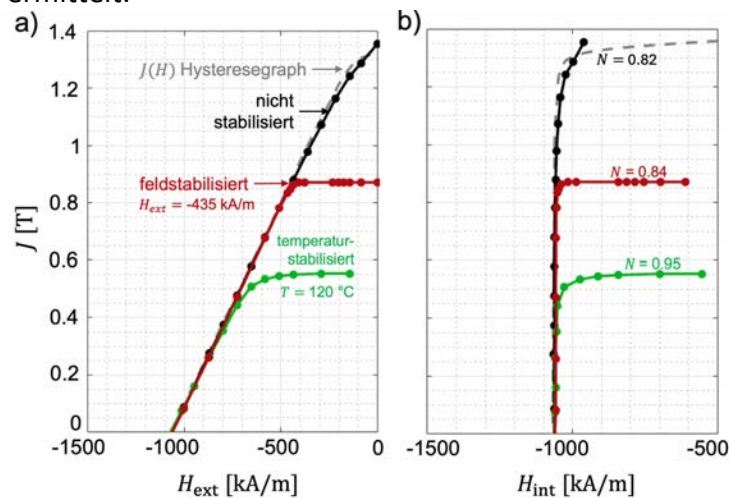


Abb. 5.65: Vergleich der temperatur- und feldbasierten Stabilisierung in Polarisations-Feld-Kurven $J(H)$ der Probe (N52, $N = 0.82$), entmagnetisiert und stabilisiert mittels Pulsomagnetisierer (offener Kreis) und gemessen mittels Helmholtz-Messspule. Die Feldstabilisierung ist in Dunkelrot ($H_{\text{ext}} = -435$ kA/m) dargestellt, die Temperaturstabilisierung in Dunkelgrün ($T_{\text{stab}} = 120$ °C), die nicht stabilisierte Probe in Schwarz und als Referenz eine unstabilisierte Hystereseurve (gemessen mit Hystereseograph) in Grau. a) Polarisations- zu externem-Feld-Verlauf $J(H_{\text{ext}})$. Der $J(H)$ -Verlauf der Referenz (grau) und der unstabilisierten Probe (schwarz) stimmen gut überein. Die feldstabilisierte Kurve verläuft bis zur Stabilisierungsfeldstärke nahezu linear, während die temperaturstabilisierte Probe bereits vorher, insbesondere im Übergang von reversiblen zu irreversiblen Verlusten, abfällt. b) Zur detaillierten Betrachtung des Abfalls sind die Kurven aus a) auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ entschert. Die schwarze unstabilisierte $J(H)$ -Kurve wurde auf die Referenzkurve (grau) mit einem mittleren Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.84$ angepasst. Die feldstabilisierte Kurve wurde ebenfalls mit $N = 0.84$ angepasst, die temperaturbasierte Kurve mit $N = 0.94$. Die Unterschiede im Entmagnetisierungsfaktor zeigen verschiedene Feldverteilungen während des Stabilisierungsvorgangs. Die Art der Stabilisierung sollte an die in der späteren Anwendung dominierende Belastung (Feld oder Temperatur) angepasst werden.

Vergleich zeitabhängiger Entmagnetisierungseffekte auf Basis von Temperatur

Zur Untersuchung der Stabilisierungseffektivität gegenüber zeitabhängiger Entmagnetisierung (Nachwirkung) wurde eine Temperaturstufenfunktion nach dem Schema in Abb. 3.33b durchgeführt, bei der die Temperatur in 5 °C-Schritten erhöht wird. Pro Stufe erfolgen 50 Messungen bei konstanter Temperatur innerhalb von 20 Minuten. In Abb. 5.66 sind drei Proben dargestellt: die nicht stabilisierte (schwarz), die feldstabilisierte (rot, stabilisiert mit $H_{\text{ext}} = -145$ kA/m) und die temperaturstabilisierte (grün, Stabilisierung bei $T = 55$ °C). Der zeitliche Verlauf der Magnetisierung ist in a) dargestellt, der temperaturabhängige in b). Die feldstabilisierte Probe zeigt bis etwa 40 °C eine konstante Polarisation, während die temperaturstabilisierte Probe bis 55 °C stabil bleibt, ohne dass zeitabhängige Entmagnetisierung auftritt. Oberhalb dieser Temperaturen verhalten sich beide Proben ähnlich der nicht stabilisierten Referenz, bei der bereits ab etwa 28 °C deutliche zeitabhängige Verluste auftreten.

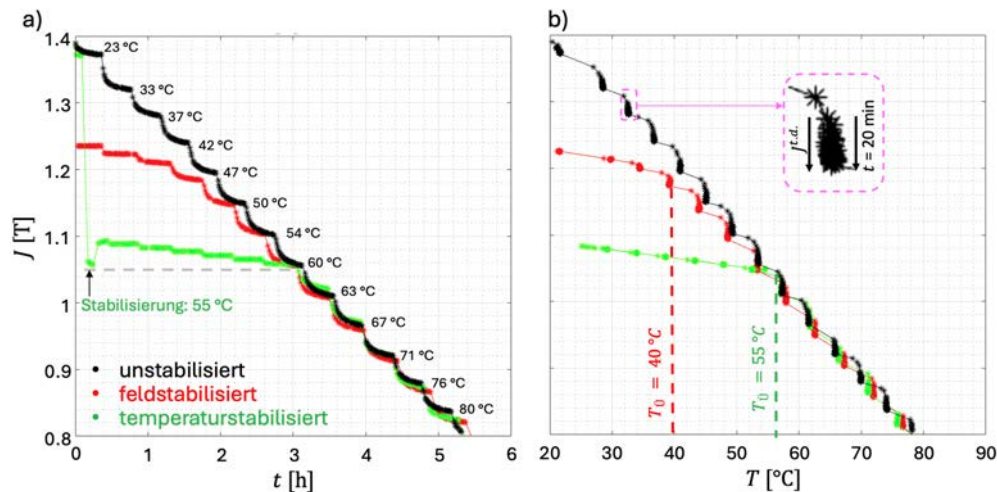


Abb. 5.66: Messergebnisse der N52-Probe, gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3.5b. a) $J(t)$ -Darstellung, b) $J(T)$ -Darstellung. Dargestellt sind die nicht stabilisierte Probe (schwarz), die feldstabilisierte Probe (rot, $H_{\text{ext}} = -145$ kA/m) und die temperaturstabilisierte Probe (grün, $T_{\text{stab}} = 55$ °C). Es zeigen sich neben den bereits zuvor festgestellten Unterschieden im Stabilisierungsverfahren (Temperatur: bessere Übereinstimmung bei Temperaturerhöhung im Vergleich zur Feldstabilisierung) auch ein nahezu vollständiger Ausschluss zeitabhängiger Verluste in der temperaturstabilisierten Probe bis zum erreichten Stabilisierungswert.

5.5 Drehmomentmessungen

Zur mechanischen Erfassung des Drehmoments basierend auf dem magnetischen Moment der Probe in Interaktion mit dem entmagnetisierenden Feld von Konzept 2 (Technischer Aufbau: Abb. 3.19b) wurde als Referenzfeld eine Feldstärke von $H_{\text{ext}} = -200$ kA/m gewählt, wie in Abb. 3.22 schematisch dargestellt. Diese Feldstärke liegt im linearen Bereich der drei ausgewählten Proben N35, N52 und N52-H. In Abb. 5.67 ist das Vorgehen für die drei Proben N35 (gelb), N52 (orange) und N52-H (blau) bei Raumtemperatur dargestellt. a) zeigt die resultierende Polarisationsabnahme $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$. b) zeigt den Drehmomentverlauf während der schrittweisen Erhöhung des Entmagnetisierungsfeldes (gestrichelte Linie, sekundäre y-Achse) sowie während des konstanten Referenzfeldes (Kreismarkierungen, primäre y-Achse). c) zeigt die Überlagerung des Drehmomentverlaufs bei konstantem Referenzfeld $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ (primäre y-Achse) mit $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ (sekundäre y-Achse). Es zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang der Magnetisierungsänderung J_r mit der Drehmomentänderung. Wie in c) ersichtlich weist die N35-Probe mit $J_r = 1.2$ T ein Drehmoment von etwa 0.75 Nm auf. Die beiden N52-Proben mit $J_r = 1.4$ T erreichen etwa 0.9 Nm. Über die Koerzitivfeldstärken der Proben (N35 und N52 ca. 1000 kA/m und N52-H ca. 1350 kA/m) zeigt sich der Nulldurchgang sowohl in der Polarisations- als auch in der Drehmomentmessung. Das maximale Drehmoment bei ansteigendem Feld tritt in den Kniepunkt Bereichen der Proben auf b). Für die N35-Probe bei ca. -510 kA/m mit 2 Nm, für die N52-Probe bei ca. -500 kA/m mit 2.5 Nm und für die N52H-Probe bei ca. -900 kA/m mit 4 Nm. Das selbe Vorgehen wurde bei einer Probentemperatur von 70 °C durchgeführt wie in Abb. 5.68 dargestellt. Hier zeigt sich der Einfluss der Temperatur sowohl in einer verringerten Magnetisierung als auch in einem reduzierten Koerzitivfeld (N35 und N52: -700 kA/m, N52-H: -900 kA/m). Im Vergleich zur Raumtemperatur zeigen sich bei 70 °C Probentemperatur vor allem eine Abnahme der Magnetisierung, welche sich auch im abnehmenden Drehmoment widerspiegeln:

- N35 (20 °C): $J_r = 1.1$ T, $T_Q = 2$ Nm $\rightarrow$ N35 (70 °C): $J_r = 0.6$ T, $T_Q = 1.2$ Nm
- N52 (20 °C): $J_r = 1.4$ T, $T_Q = 2.5$ Nm $\rightarrow$ N52 (70 °C): $J_r = 0.8$ T, $T_Q = 1.25$ Nm
- N52-SH (20 °C): $J_r = 1.4$ T, $T_Q = 4$ Nm $\rightarrow$ N52-SH (70 °C): $J_r = 0.9$ T, $T_Q = 2.5$ Nm

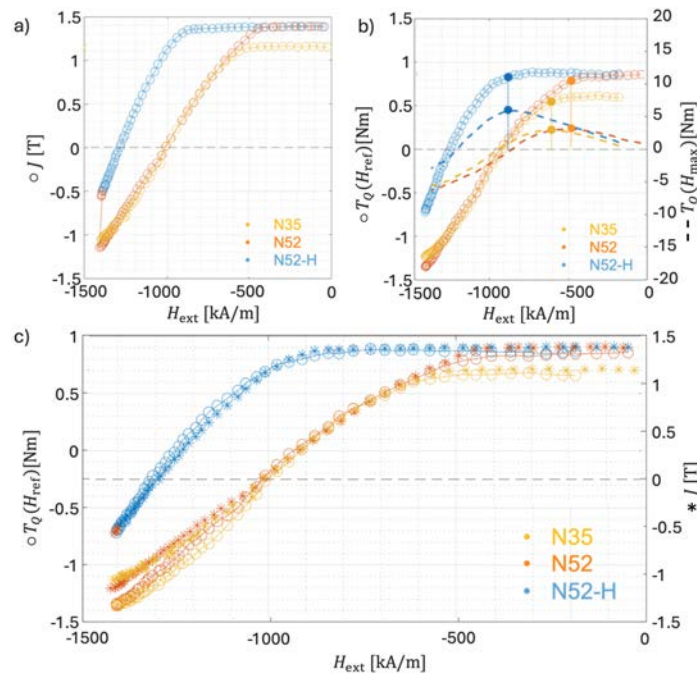


Abb. 5.67: Drehmoment- und Polarisationsverlauf in Abhängigkeit vom externen Feld als $T_Q(J(H_{\text{ext}}))$ bei 25 °C für die Proben N35 gelb, N52 orange und N52-H blau. Unterschieden wird zwischen der Feldbelastung unter Entmagnetisierungsfeld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ und einem konstanten Referenzfeld $H_{\text{ext}}^{\text{ref}} = -200$ kA/m nach dem Entmagnetisierungsfeld. Da bei ausschließlich zunehmendem Entmagnetisierungsfeld das Drehmomentsignal die Wechselwirkung zwischen äußerem Feld und Probenmagnetisierung widerspiegelt, wird zur direkten differentiellen Betrachtung der Probenpolarisation nach jedem Entmagnetisierungsfeldzyklus ein Messzyklus bei konstantem Referenzfeld durchgeführt gemäß Messprogramm 3.2.2.2.3. a) Polarisation zu Feld Verlauf $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ beim Referenzfeld. b) Drehmomentverlauf T_Q auf der primären y-Achse bei Referenzfeld $H_{\text{ext}}^{\text{ref}}$ und bei Entmagnetisierungsfeld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ auf der sekundären y-Achse. c) Überlagerung der Verläufe T_Q (primäre y-Achse) und J (sekundäre y-Achse) jeweils bezogen auf $H_{\text{ext}}^{\text{ref}}$. Es zeigt sich eine Proportionalität zwischen der abnehmenden Probenentmagnetisierung, bestimmt aus den $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ -Kurven, und der Drehmomentabnahme beim Referenzfeld $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$.

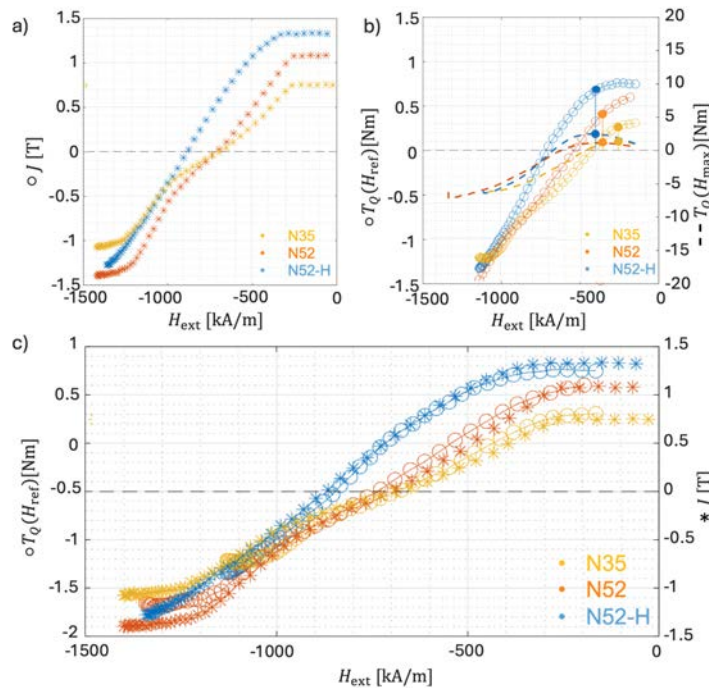


Abb. 5.68: Drehmoment- und Polarisationsverlauf in Abhängigkeit vom externen Feld als $T_Q(J(H_{\text{ext}}))$ bei 70 °C für die Proben N35 gelb, N52 orange und N52-H blau. a) Polarisations-zu-Feld-Verlauf $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ beim Referenzfeld. b) Drehmomentverlauf T_Q bei Referenzfeld $H_{\text{ext}}^{\text{ref}}$ (primäre y-Achse) und bei Entmagnetisierungsfeld $H_{\text{ext}}^{\text{max}}$ (sekundäre y-Achse). c) Überlagerung der Verläufe T_Q (primäre y-Achse) und J (sekundäre y-Achse) jeweils bezogen auf $H_{\text{ext}}^{\text{ref}}$. Es zeigt sich eine Proportionalität zwischen der abnehmenden Probenmagnetisierung, bestimmt aus den $J(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$ -Kurven, und der Drehmomentabnahme beim Referenzfeld $T_Q(H_{\text{ext}}^{\text{ref}})$. Im Vergleich zur Messung bei 25 °C ist die Probenmagnetisierung temperaturbedingt reduziert, die Proportionalität zwischen Polarisationsabnahme und Drehmomentabnahme ist jedoch auch hier festzustellen.

Zur Betrachtung der zeitabhängigen Entmagnetisierung wurde eine N52-Probe bei einer Proben­temperatur von 70 °C und einem konstanten externen Feld von etwa 700 kA/m über einen Zeitraum von 35 Minuten beaufschlagt. Abb. 5.69 vergleicht hierzu $T_Q(t)$ mit $J(t)$ und zeigt, dass mit abnehmender Magnetisierung auch das Drehmomentsignal über die Zeit abnimmt. Während die Probe zu Beginn ($t = 0$) vor dem Entmagnetisieren noch etwa 1.25 T und 1.9 Nm aufweist, reduziert sich ihre Magnetisierung nach dem ersten Entmagnetisierungszyklus auf etwa 0.52 T und 1.35 Nm. Nach $t = 2000$ s beträgt sie schließlich 0.47 T bzw. 1.2 Nm.

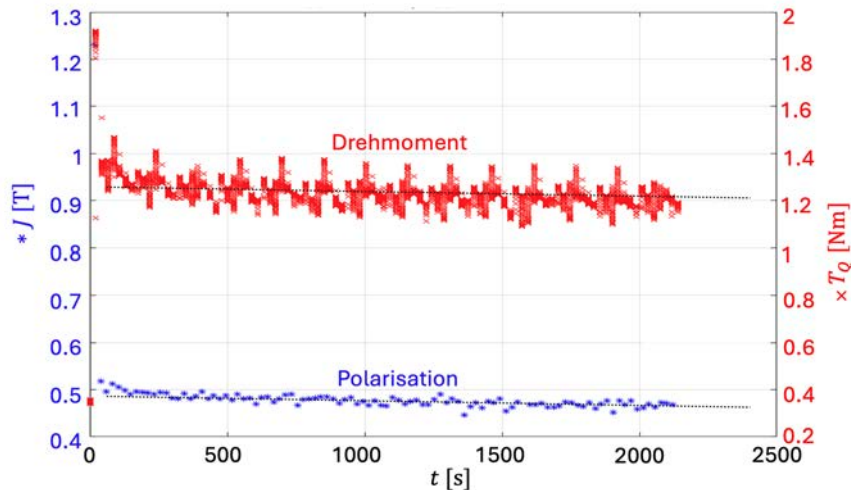


Abb. 5.69: Zeitlicher Drehmoment- und Polarisationsverlauf einer N52-Probe bei 70 °C unter konstantem Entmagnetisierungsfeld von $H_{\text{ext}} = -750$ kA/m. Dargestellt sind $J(t)$ auf der primären y-Achse sowie $T_Q(t)$ auf der sekundären y-Achse. Es zeigt sich ein annähernd proportionaler Zusammenhang zwischen zeitlicher Entmagnetisierung und abnehmendem Drehmomentmesssignal.

6 Praktische Anwendungsbeispiele und Szenarien

Kapitel 6 veranschaulicht die zuvor erarbeiteten Zusammenhänge anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele und Szenarien. In Abschnitt 6.1 wird ein Entscheidungsfluss zur Wahl geeigneter Ansätze wie Stabilisierung (zuvor vorgestellt in 5.4) oder Langzeitbetrachtung über feld- bzw. temperaturbasierte Viskositätsparameter (zuvor vorgestellt in 5.3) aufgeführt und auf Sensorsysteme in 6.1.1 sowie Elektromotoren in 6.1.3 angewendet. Abschnitt 6.2 zeigt und validiert Möglichkeiten zur Integration des Viskositätsparameters in Verbindung mit dem Fluktuationsfeld bzw. Fluktuationstemperatur in FEA. In Abschnitt 6.3 erfolgt ein Vergleich bisheriger Ansätze zur Identifikation intrinsischer Materialeigenschaften über Field-Mapping mit einem neuen zerstörungsfreien Verfahren an einer inhomogenen Modellprobe.

Die Beispiele dienen ausschließlich der Illustration und können bewusst idealisiert oder vereinfacht dargestellt sein, um zentrale Aspekte deutlicher hervorzuheben.

6.1 Anwendungsszenario: Magnetische Alterung

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wurde ein praxisnahes Flussdiagramm in Abb. 6.1 entwickelt, das als Entscheidungsorientierung zur Bewertung des magnetischen Alterungsverhaltens von Permanentmagneten dient und die Auswahl geeigneter Magnetgüten und Probengeometrien unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen unterstützt. Ausgangspunkt ist die Definition der anwendungsrelevanten Anforderungen (Schritt 1), etwa aus analytischen Berechnungen oder Simulationen. Dazu zählen die bevorzugte Magnetgüte und -geometrie sowie die maximal zu erwartende Feld- und Temperaturbelastung einschließlich der Dauer unter diesen Maximalbedingungen. Im nächsten Schritt 2 erfolgt die Bewertung der geforderten Magnetisierung. Diese bestimmt beispielsweise die Signalstärke im Sensorbetrieb oder die Kraft- bzw. Drehmomentstärke in Aktoren. Wird eine möglichst konstante und stabile Magnetisierung ohne irreversible Verluste unter wechselnden Feld-, Temperatur- und Zeitbedingungen benötigt, kann durch gezielte Stabilisierung (Schritt 3) eine dauerhafte Magnetisierungsstabilität erreicht werden. Abhängig von der dominierenden Einflussgröße, Feld oder Temperatur, sollte das entsprechende Stabilisierungsverfahren gewählt werden. Hierfür muss die Probe teilweise entmagnetisiert werden, was häufig aufgrund der Anwendungsspezifikationen nicht möglich ist, da die volle nominale Polarisierung nicht mehr zur Verfügung steht. Eine Alternative stellt die Langzeitabschätzung dar, mit der die zu erwartenden Langzeitverluste abgeschätzt und daraus die geeignete Materialgüte für die geforderte Stabilität ausgewählt werden kann (Schritt 4). Die Langzeitbetrachtung kann über die vorgestellten Ansätze des feld- oder temperaturbasierten Viskositätsparameters erfolgen, weshalb in Schritt 5 zwischen der dominanten Belastungsform unterschieden wird. Bei Systemen ohne externes Feld, etwa Sensoren im offenen Kreis, eignet sich die Betrachtung über den temperaturbasierten Viskositätsparameter S_v^T (Abschnitt 5.3.5). Bei Anwendungen mit externer Feldbelastung, wie Aktorsystemen, erfolgt die Betrachtung über den feldbasierten Viskositätsparameter S_v (Abschnitt 5.3). In Schritt 6 wird auf Basis dieser Parameter der zukünftige Magnetisierungszustand prognostiziert. Beim feldbasierten Vorgehen dient das Fluktuationsfeld, wobei der Schnittpunkt des effektiven Feldes $H_{\text{eff}}(t)$ (Gl. (15)) mit der $J(H)$ -Kurve bei der entsprechenden maximalen Temperatur bestimmt wird. Für das temperaturbasierte Vorgehen wird die zukünftige Magnetisierung aus dem Schnittpunkt der $J(T)$ -Kurve mit der effektiven Temperatur $T_{\text{eff}}(t)$ (Gl. (17)) unter Verwendung von S_v^T abgeleitet. Alternativ kann der temperaturbasierte Ansatz grob über den Schnittpunkt von H_{max} mit der um die Fluktuationstemperatur erhöhten $J(H)$ -Kurve bei $T_{\text{eff}}(t)$ approximiert werden. Im

letzten Schritt 7 wird die Position des prognostizierten Arbeitspunkts evaluiert. Liegt dieser nahe am Kniepunkt der $J(H)$ -Kurven bzw. am Übergangspunkt der $J(T)$ -Kurven, können bereits geringe Abweichungen in Feld oder Temperatur zu starker Entmagnetisierung führen. In diesem Fall ist die Wahl einer Probe mit höherer Koerzitivfeldstärke sinnvoll. Speziell im offenen oder teiloffenen Kreis kann zudem eine angepasste Probengeometrie mit geringerem Entmagnetisierungsfaktor ausreichen, da dadurch das Selbstfeld im Inneren des Magneten reduziert wird.

Das vorgestellte Flussdiagramm bildet somit eine fundierte Grundlage zur systematischen Bewertung der Langzeitstabilität und Alterungsresistenz von Permanentmagneten unter realitätsnahen Einsatzbedingungen, wie im Folgenden exemplarisch für Sensorsysteme und als grobe Annäherung für Anwendungen im Elektromotor gezeigt wird.

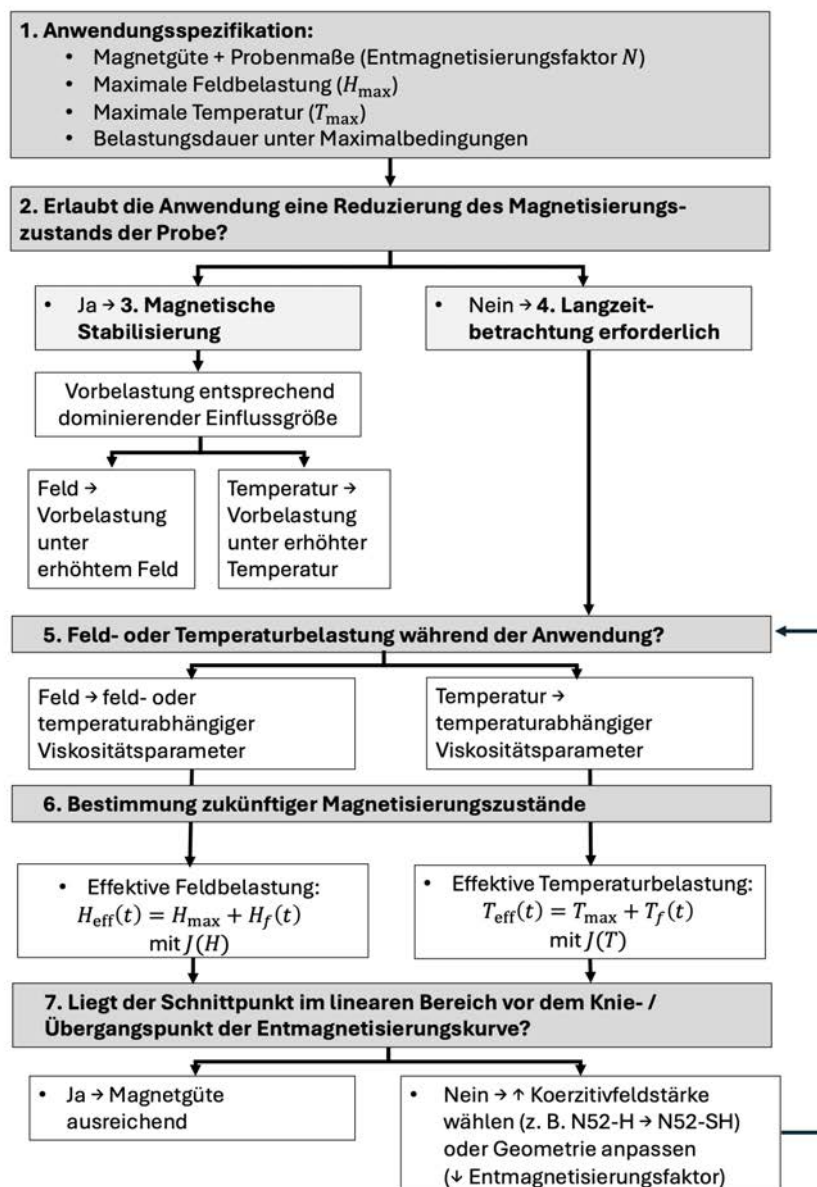


Abb. 6.1: Flussdiagramm zur praktischen Entscheidungsorientierung hinsichtlich der magnetischen Langzeitstabilität von Permanentmagneten im Magnetsystem. Grundlage bilden magnetische Stabilisierung sowie die Prognose der Langzeitmagnetisierung über feld- und temperaturbasierte magnetische Viskositätsparameter unter Anwendung der jeweiligen Fluktuationskomponenten: Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur. Auf dieser Basis können Langzeitverluste abgeschätzt und eine gezielte Probenauswahl hinsichtlich Magnetgüte und Geometrie getroffen werden.

6.1.1 Einfluss variierender Temperaturen auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten in Sensorsystemen

Nachdem die Entscheidungsorientierung in Abb. 6.1 theoretisch vorgestellt wurde, folgt nun ein exemplarisches Praxisbeispiel zur Nutzung von Permanentmagneten in einem Sensorsystem zur 3D-Positionsbestimmung [162], [163]. Abb. 6.2 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Systems, hier mit einem N52-Kugelmagneten.

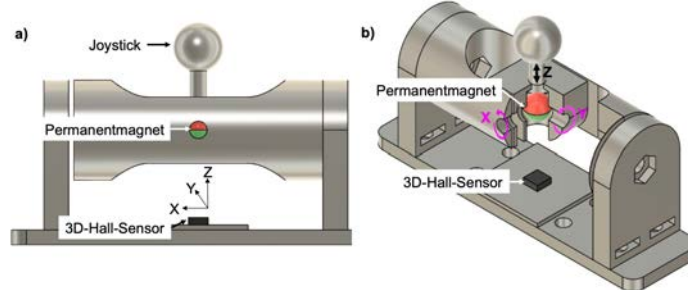


Abb. 6.2: Aufbau eines 3D-Positionierungssystems mit kugelförmigem Permanentmagneten und 3D-Hall-Sensor. a) Seitenansicht in der x, z -Ebene. b) Perspektivische Ansicht mit Schnitt und Achsenbeschriftung. Die räumliche Position des Kugelmagneten wird über einen einzelnen 3D-Hall-Sensor erfasst. Im Vergleich zu mechanischen Potentiometern ermöglicht dies eine kontaktlose Positionsbestimmung ohne mechanischen Verschleiß.

Da dieser Kugelmagnet bereits einen Entmagnetisierungsfaktor von $N = 1/3$ aufweist und dadurch eine hohe Stabilität mit einer Übergangstemperatur von ca. 120 °C besitzt, wird im folgenden exemplarischen Beispiel ein bewusst überzogenes Szenario betrachtet. Hierbei wird ein Magnet derselben Güte mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 2.5\text{ mm}^3$ ($N = 0.7$) eingesetzt, der unter Umgebungsbedingungen in einem magnetisch offenen Kreis betrieben wird. Abb. 6.3a zeigt die temperaturabhängige Entmagnetisierungskurve im Bereich von 25 °C bis 65 °C . Die Remanenz verringert sich dabei von 1.38 T bei 25 °C auf 1.15 T bei 65 °C , was einer Abweichung von etwa 15% entspricht. Diese Schwankungen sind kritisch, da bei dieser Konfiguration bereits ab etwa 30 °C irreversible Verluste auftreten können, die sowohl temperatur- als auch zeitabhängig sind (bspw. schwarze Markierung der Polarisationsabnahme $J(t)$ bei 46 °C). Um die Positionsgenauigkeit des Systems zu erhalten, ist eine dynamische Anpassung der Absolutwerte erforderlich. Da es in dieser Anwendung primär nicht auf möglichst hohe Streufeldwerte, sondern auf möglichst konstante Werte ankommt, bietet sich die magnetische Stabilisierung an. Hierzu wurde der Magnet bei ca. 65 °C vorstabilisiert, was in der stabilisierten Kurve mit deutlich reduzierten Gesamtverlusten sichtbar wird. Mithilfe des bekannten reversiblen Temperaturkoeffizienten der Probe (z.B. ca. -0.0012 %/°C [48]) und der gemessenen Proben temperatur lassen sich temperaturbedingte Schwankungen (hellgrüne Kurve) gezielt minimieren. Zur Betrachtung der zeitabhängigen Verluste dient die in Abb. 6.3a schwarz markierte Abnahme bei 46 °C . Diese Abnahme ist in b) als $J(t)$ über 11 Stunden dargestellt. In diesem Zeitraum verringert sich die Magnetisierung von 1.23 T auf ca. 1.20 T (etwa -2.5%). Zur Bestimmung der zukünftigen Magnetisierung wurde die zeitabhängige Verlustkurve $J(t)$ in c) mit logarithmischer Zeitachse in d) dargestellt. Die resultierende Trendgerade in d) entspricht der magnetischen Viskosität mit $S = -0.0031$. Basierend auf der Änderung der Temperatur (von 28 °C auf 46 °C) und der Magnetisierung (von 1.32 T auf 1.24 T), ergibt sich annähernd für die Temperaturänderung $\Delta J/\Delta T \approx -0.0041\text{ T/°C}$. Daraus berechnet sich der temperaturbasierte Viskositätsparameter zu $S_v^T = 0.75\text{ °C}$. Zur Validierung wird eine Zeit von $t_1 = 20\,000\text{ s}$ betrachtet. Daraus ergibt sich:

- $T_f(t_1) = 0.75 * \ln(t_1) = 7.5\text{ °C} \rightarrow T_{\text{eff}}(t_1) = 46\text{ °C} + 7.5\text{ °C} = 53.5\text{ °C}$

Dies entspricht einer prognostizierten Magnetisierung von etwa 1.195 T (blaue Markierung in a) und b) bei $T_{\text{eff}}(t_1)$). Da t_1 noch innerhalb des Messbereichs der Langzeitmessung liegt,

bestätigt sich der prognostizierte Wert. Für ein Beispiel außerhalb des Messbereichs mit $t_2 = 20\,000\text{ h}$, ergibt sich:

$$\bullet \quad T_f(t_2) = 0.75 \cdot \ln(t_2) = 14\text{ °C} \rightarrow T_{\text{eff}}(t_2) = 46\text{ °C} + 14\text{ °C} = 60\text{ °C}$$

Dies entspricht einer theoretischen Magnetisierung von ca. 1.16 T (blaue Markierung in a) bei $T_{\text{eff}}(t_2)$). Die prognostizierten Werte zeigen die zu erwartende Magnetisierung in Abhängigkeit von der Expositionsdauer und verdeutlichen damit die Notwendigkeit einer zeitabhängigen Magnetisierungsabschätzung.

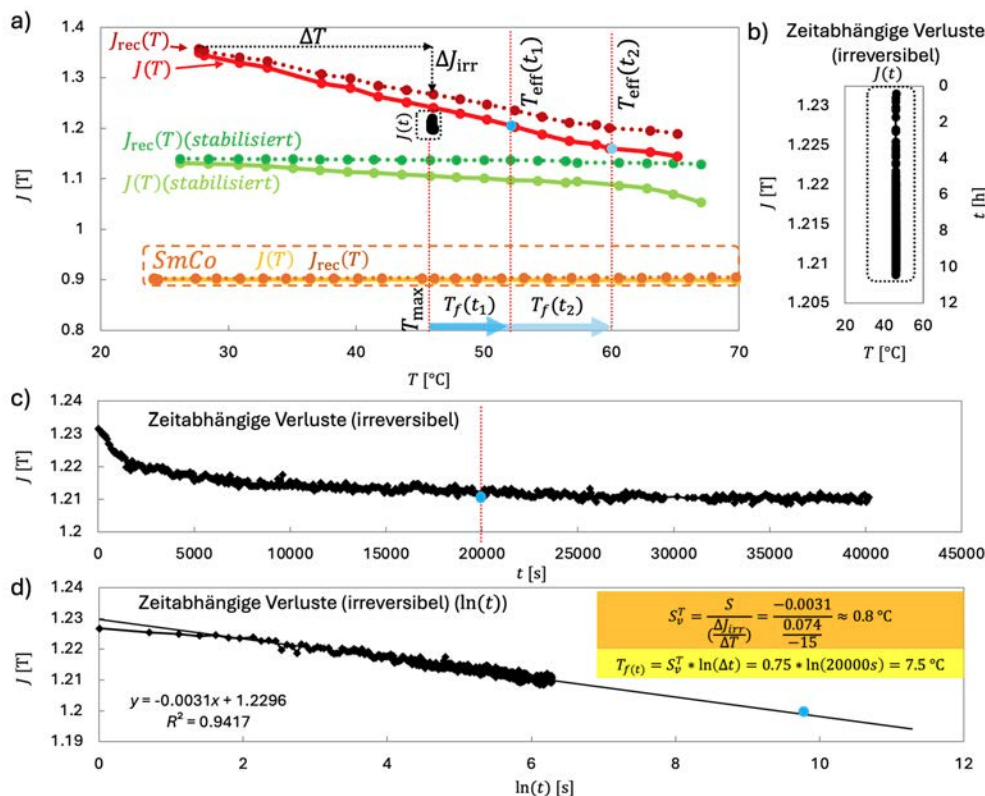


Abb. 6.3: a) $J(T)$ -Entmagnetisierungsverlauf einer N52-Probe mit $N = 0.7$ sowie eines temperaturstabilisierten SmCo-Magneten mit $N = 0.8$ zum Vergleich. Dargestellt sind jeweils der $J(T)$ -Verlauf mit unter Temperatur gemessenen Polarisationswerten sowie die Rücklauf-Polarisationswerte $J_{\text{rec}}(T)$ nach Temperaturbelastung und Abkühlung auf die Referenztemperatur von 28 °C. Rot zeigt den $J(T)$ -Verlauf der N52-Probe, dunkelrot gestrichelt den Verlauf $J_{\text{rec}}(T)$. Es zeigt sich eine durchgehend abnehmende Polarisation, die über $J_{\text{rec}}(T)$ ohne reversiblen Änderungsanteil auf eine irreversible Polarisationsabnahme schließen lässt. Nach Stabilisierung der N52-Probe bei 65 °C und erneutem Abkühlen reduziert sich die Polarisation von etwa 1.38 T auf 1.15 T im stabilisierten Zustand. Der stabilisierte Verlauf besteht aus $J(T)$ hellgrün und $J_{\text{rec}}(T)$ dunkelgrün gestrichelt und zeigt, dass in diesem Temperaturbereich keine weiteren irreversiblen Verluste auftreten. Als Referenz höchster Stabilität ist ein temperaturstabilisierter SmCo-Magnet dargestellt, der eine sehr hohe Stabilität mit geringem Temperaturkoeffizienten zeigt. Sowohl $J(T)$ gelb als auch $J_{\text{rec}}(T)$ orange weisen nahezu identische Verläufe auf. Zur Langzeitbetrachtung wurde die N52-Probe über etwa 10 h einer Temperatur von 46 °C ausgesetzt. Dies ist in a) durch die schwarze $J(t)$ -Markierung gekennzeichnet. b) zeigt den $J(T, t)$ -Verlauf der zeitabhängigen Entmagnetisierung. Der zeitabhängige Verlauf ist in c) als $J(t)$ dargestellt und zeigt eine exponentielle Polarisationsabnahme. In d) ist diese als $J(\ln(t))$ mit einer Trendgeraden aufgetragen, woraus sich eine Steigung, entsprechend der magnetischen Viskosität S , von etwa $S = -0.0031$ ergibt. Ausgehend vom Temperaturanstieg von 28 °C mit 1.32 T auf 46 °C mit 1.24 T und der Steigung der Trendgeraden ergibt sich ein temperaturabhängiger Viskositätsparameter $S_v^T = 0.8\text{ °C}$. Für exemplarische Dauerbelastungen von $t_1 = 20\,000\text{ s}$ und $t_2 = 20\,000\text{ h}$ resultieren Effektivtemperaturen von 53.5 °C bei 1.19 T sowie 60 °C bei 1.15 T.

Das Beispiel der Stabilisierung zeigt, dass im Verlauf von $J_{\text{rec}}(T)$ irreversible Entmagnetisierung ausgeschlossen werden kann. Allerdings treten weiterhin reversible Änderungen entlang der $J(T)$ Kurve auf. Diese sind prinzipiell über den Temperaturkoeffizienten und die gemessene Proben temperatur digital kompensierbar, wie dies beispielsweise in 3D-Hall-Sensoren, etwa dem TMA5273 von Texas Instruments (vgl. [164]), erfolgt. Eine absolute Stabilität wird dadurch jedoch nicht erreicht. Ursache hierfür sind unter anderem unvermeidbare Unsicherheiten bei der realen Temperaturerfassung der Probe, da in vielen Sensorsystemen lediglich die

Chiptemperatur und nicht die tatsächliche Proben­temperatur erfasst wird. Eine Möglichkeit zur Aufrechterhaltung einer konstant hohen Magnetisierung bei geringen Temperaturänderungen bietet die Verwendung speziell temperaturkompensierter SmCo-Magnete, wie in Abb. 6.3a gezeigt. Im Temperaturbereich von 20 bis 75 °C treten nur minimale temperaturbedingte Änderungen auf, zudem verlaufen $J_{\text{rec}}(T)$ und $J(T)$ nahezu deckungsgleich. Mit einem reversiblen Temperaturkoeffizienten von etwa $-0.02 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ergibt sich bei $\Delta T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Änderung von rund -0.009 T , was eine sehr hohe Stabilität belegt (Recoma STAB 02, [165]).

6.1.2 Einfluss externer Temperaturbelastung auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten im offenen Magnetkreis

Für Anwendungen ohne externe Feldbelastung kann der langfristige Magnetisierungszustand anhand der temperaturabhängigen Entmagnetisierungskurve $J(T)$ abgeschätzt werden, wie in 6.1.1 exemplarisch vorgestellt, folgt nun ein detaillierter Vergleich für unterschiedliche Materialien und Probenformen. Dazu wird der Schnittpunkt von $T_{\text{eff}}(t)$ mit der $J(T)$ -Kurve bestimmt, um den zu erwartenden Magnetisierungszustand nach der Einsatzdauer t bei maximaler Betriebstemperatur zu prognostizieren (Vorgehen schematisch in Abb. 2.16b dargestellt). Abb. 6.4 zeigt das Vorgehen exemplarisch für verschiedene Probengüten (N35, N35-UH, N52, N52-M, N52-H, N52-SH) mit einem Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.82$ in a) und unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren in b) bei einer maximalen Betriebstemperatur von $T_{\text{max}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

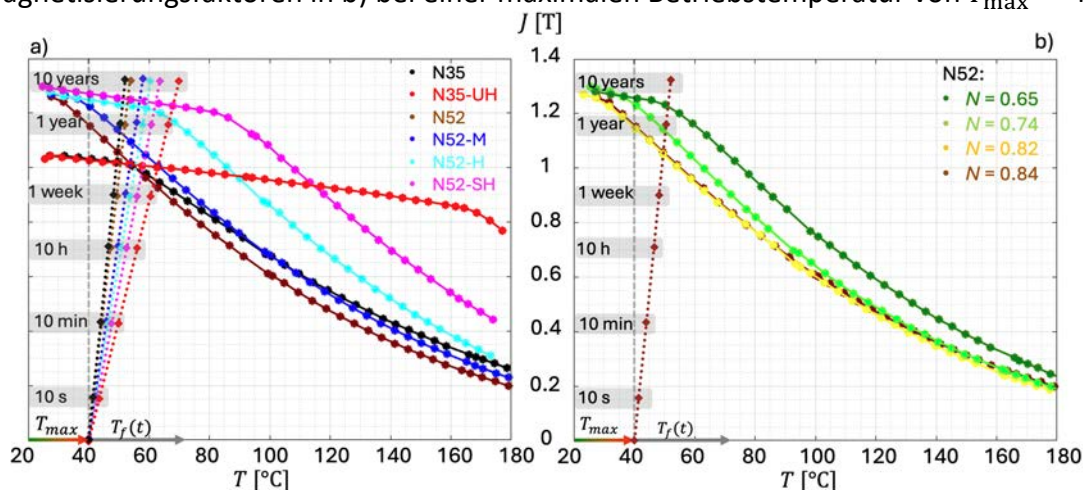


Abb. 6.4: Langzeitbetrachtung unterschiedlicher Magnetgüten und Geometrien durch Anwendung der Fluktuationstemperatur in $J(T)$ -Kurven bei einer maximalen Betriebstemperatur von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (offener Kreis, $H_{\text{ext}} = 0$). a) Unterschiedliche Probengüten: N35, N35-UH, N52, N52-M, N52-H, N52-SH mit einem Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.82$. b) Probengüte N52 mit unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren: $N = 0.65, 0.74, 0.80, 0.82$. Der prognostizierte Zustand ergibt sich aus dem Schnittpunkt der jeweiligen $J(T)$ -Kurve mit der entsprechend gefärbten Fluktuationstemperaturprognose $T_f(t)$. In a) zeigt sich, dass die Proben N35, N52 und N52-M keine Zeitstabilität aufweisen, während N52-H nach etwa 1 Jahr Dauerbelastung bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ nahe am kritischen Übergangspunkt liegt. Lediglich N35-UH und N52-SH weisen ausreichend Stabilität auf. In b) zeigt sich, dass die maximale Temperatur von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ lediglich bei der N52-Probe mit $N = 0.65$ noch im linearen Bereich liegt, während auch diese Probe nach 1 Woche Dauerbelastung den kritischen Übergangspunkt erreicht.

In a) befindet sich die Probe N52 bereits bei Erreichen von T_{max} nach ihrer Übergangstemperatur, weshalb sie in dieser Anwendung keine hohe zeitliche Stabilität mehr aufweist. Auch die Probe N52-M befindet sich in einem kritischen Bereich, da sie bei T_{max} bereits ihre Übergangstemperatur erreicht. Im Vergleich zeigt die Probe N35 ihre Übergangstemperatur erst nach etwa einer Woche. Die Probe N52-H erreicht nach etwa 10 Jahren einen kritischen Bereich nahe der Übergangstemperatur, während die höher koerzitativen Proben N52-SH und N35-UH auch nach 10 Jahren noch überhalb der Übergangstemperatur liegen. Im Vergleich zeigen die Proben der Güte N52 mit unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren in b), dass selbst eine N52-Probe mit geeigneter Geometrie die Anforderungen an eine hohe Langzeitbeständigkeit erfül-

len kann, wie im Beispiel mit einem Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.65$ über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr bis zum Erreichen der kritischen Übergangstemperatur.

6.1.3 Einfluss externer Feldbelastung auf die Langzeitstabilität von Permanentmagneten in elektrischen Aktoren

Wie in Abschnitt 5.5 gezeigt, erzielt ein Magnetkreis aus Elektromagnet und Permanentmagnet das höchste Drehmoment bei einer externen Feldstärke knapp unterhalb des Knie- bzw. Übergangspunkts des Permanentmagneten. Dieser Bereich ist besonders kritisch für mögliche Entmagnetisierung, sodass bereits geringe Abweichungen in Temperatur oder Feldstärke starke Auswirkungen zeigen. Zugleich nehmen die zeitabhängigen Verluste deutlich zu, weshalb das Verhalten des Systems unmittelbar vor dem Knipunkt zeitabhängig analysiert werden muss. In elektrischen Aktoren mit Permanentmagneten ist konstruktionsbedingt stets ein Luftspalt vorhanden, wodurch die Magnete in keinem vollständig geschlossenen Magnetkreis wirken und der Arbeitspunkt zusätzlich neben dem externen Feld die maximale Feldbelastung beeinflusst. Die Motortopologie ist hierbei wesentlich: Bei SMPM-Motoren sind die Magnete oberflächenmontiert, während sie bei IPM-Motoren in den Rotor eingebettet sind [166].

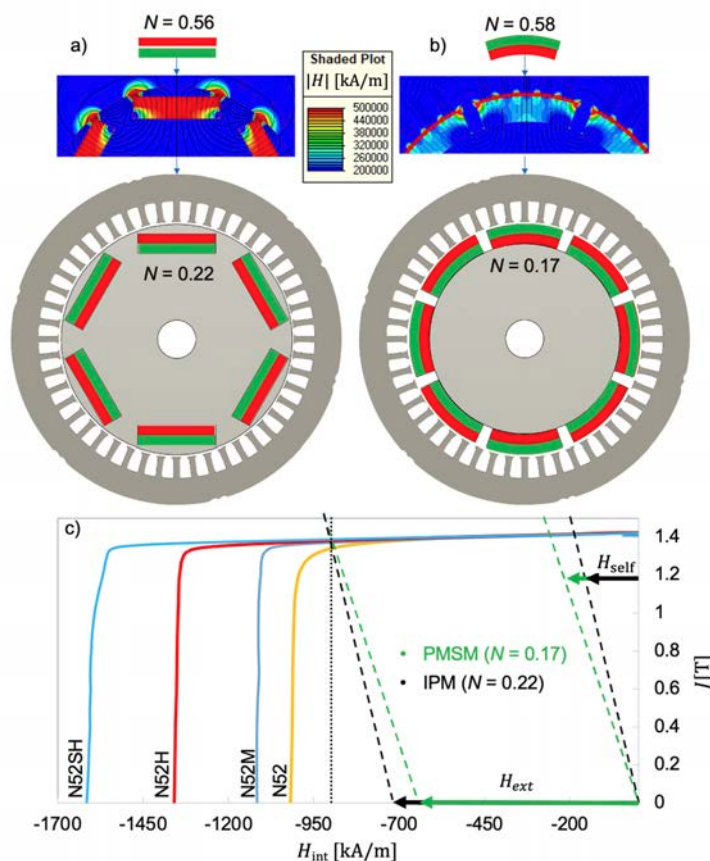


Abb. 6.5: Simulation exemplarischer Rotortopologien und deren Einfluss auf die Magnetkreisconfiguration über den Entmagnetisierungsfaktor N : a) IPM-Buried-Anordnung (Interior Permanent Magnet) und b) SMPM-Anordnung (Surface Mounted Permanent Magnet). Die Permanentmagnete weisen nominelle Entmagnetisierungsfaktoren in Luft von a) $N = 0.56$ und b) $N = 0.58$ auf. In der Anwendung im Motorsystem bei $H_{ext} = 0$ resultieren daraus a) $N = 0.22$ (IPM) und b) $N = 0.17$ (SMPM). Abb. in Anlehnung an [166]. c) Bei einem maximalen internen Feld $H_{max} = -900$ kA/m setzt sich dieses exemplarisch aus dem Selbstfeldanteil und dem externen Feldanteil H_{ext} zusammen: -655 kA/m (IPM) bzw. -710 kA/m (SMPM) (siehe Text). Damit erlaubt die SMPM-Konfiguration ein höheres externes Feld als die IPM-Konfiguration und zeigt ein homogeneres inneres Feld im Magneten.

Abb. 6.5 zeigt exemplarisch die beiden unterschiedlichen Motortopologien (IPM mit $N = 0.22$ a), SMPM mit $N = 0.17$ b)) sowie die zusätzliche innere Feldverteilung in den Magneten, die durch ihr eigenes Selbstfeld ohne externes Feld oder Strom verursacht wird. Die Simulationsergebnisse zeigen nicht nur unterschiedlich hohe Werte der inneren Feldverteilung in den Mag-

neten, mit höherem inneren Selbstfeld beim IPM in a) gegenüber dem SMPM in b), sondern auch Unterschiede in der lokalen Verteilung der maximalen Feldwerte im Material. Beim IPM ist die Feldverteilung vergleichsweise homogen, mit den niedrigsten Feldwerten am unteren äußeren Rand in Richtung Rotor. Beim PMSM treten die höchsten Feldbelastungen im Luftspalt an der Außenkante zum Stator, im Übergang zwischen den Magneten sowie zu den Statorzähnen auf, was zu einer inhomogenen Verteilung führt. Basierend auf den unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.22$ (IPM) und $N = 0.17$ (SMPM) ergeben sich unterschiedlich wirkende maximale externe Feldbelastungen. Bei einer N52-Probe ($N = 0.56$) ergibt sich folgendes Verhältnis von internem zu externem Feld (Abb. 6.5c): Um ein maximales internes Feld von ca. -900 kA/m zu erreichen, erlaubt der IPM ein externes Feld von ca. -655 kA/m , der SMPM etwa -710 kA/m . Damit ermöglicht die SMPM-Konfiguration in diesem Beispiel ein höheres externes Feld, bevor die Arbeitspunkte der Magnete den Kniebereich erreichen und dadurch eine irreversible Entmagnetisierung eintritt. Das Selbstfeld resultiert aus der Probenform und dem weichmagnetischen Rückschluss. Die Betrachtung ist exemplarisch und kann je nach externem Feld und realer Motorkonfiguration abweichen.

Die Untersuchung der zeitabhängigen Entmagnetisierung erfolgt über logarithmisch gestaffelte Zeiträume von 1 s bis 10 Jahren: 1 s, 10 s, 10 min, 10 h, 1 Woche (168 h), 1 Jahr (8 760 h) und 10 Jahren (87 600 h) bei einer maximalen internen Feldstärke von $H_{\max} = -900 \text{ kA/m}$. Diese Zeitbereiche dienen der Worst-Case-Validierung.

Typische Lebensdauern elektrischer Antriebe liegen im Maschinenbau bei etwa 20 000 bis 60 000 h [167], [168], während im Automobilsektor effektive Motorlaufzeiten im Bereich weniger tausend Stunden liegen [169], [170], [171]. Die hier betrachteten Zeiträume stellen daher eine konservative obere Abschätzung dar, da die effektive Belastungszeit bei maximalem Gegenfeld und erhöhter Temperatur im realen Betrieb deutlich geringer ist und stark von Anwendung, Regelstrategie und Motortopologie abhängt.

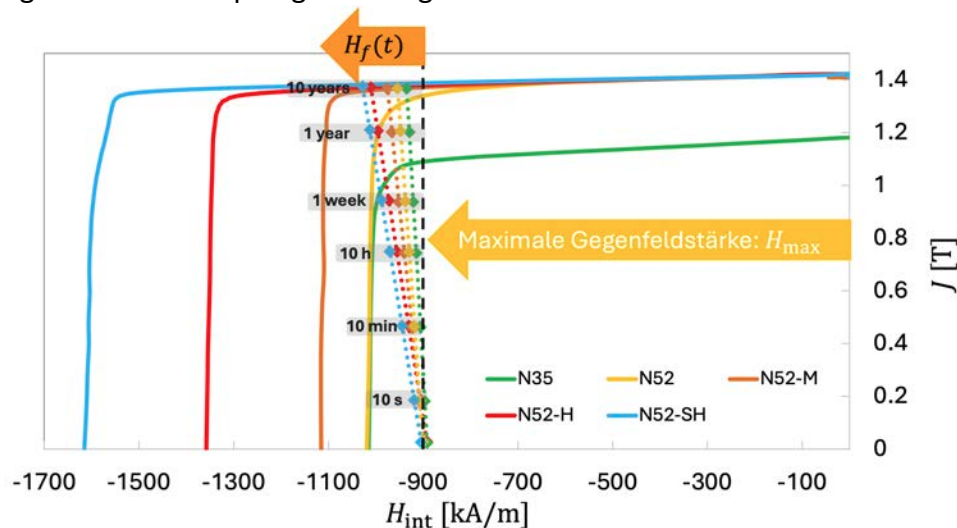


Abb. 6.6: Langzeitbetrachtung unterschiedlicher Magnetgüten durch Anwendung des Fluktuationfeldes in $J(H)$ -Kurven bei 25°C und einem maximalen Gegenfeld von -900 kA/m . Der prognostizierte Zustand ergibt sich aus dem Schnittpunkt der jeweiligen $J(H)$ -Kurve mit der entsprechend gefärbten Fluktuationfeldprognose $H_f(t)$. Die prognostizierten Effektivfelder der N35- und N52-Probe liegen zu allen Zeitpunkten im kritischen Bereich nahe des Kniepunkts, während die höherkoerzitativen Proben M, H und SH auch nach 10 Jahren Dauerbelastung noch genügend Feldreserve vor dem Kniepunkt aufweisen. Adaptiert aus Lanz et al. [172].

Neben Variationen der Koerzitivfeldstärke innerhalb der N52-Serie (N52, N52-M, N52-H, N52-SH) wird ein N35-Magnet zum Vergleich von $(BH)_{\max}$ betrachtet. Ein Vergleich bei 25°C (Abb. 6.6) und 70°C (Abb. 6.7) verdeutlicht temperaturbedingte Effekte auf das Magnetverhalten. In beiden Fällen wird das zeitabhängige Fluktuationfeld $H_f(t)$ über die genannten Zeiträume dargestellt, was eine annähernde Bewertung der kurz- bis langfristigen Magnetisierung anhand

des Viskositätsverhaltens der Proben erlaubt. Die Darstellung erfolgt gemäß dem in Abb. 2.16 schematisch gezeigten Vorgehen des Fluktuationfelds als Funktion der Belastungszeit. Bei 25 °C erreicht die effektive Feldstärke bei den Proben N35 und N52 bereits nach ca. 10 Minuten den Kniefunkt der jeweiligen Magnetisierungskurve. Der Arbeitspunkt verschiebt sich dabei in den Bereich, in dem mit fortschreitender Zeit eine zunehmende Entmagnetisierung beobachtet wird, sodass eine nahezu vollständige Entmagnetisierung nach 10 Jahren zu erwarten ist. Die Probe N52-M verbleibt über einen Zeitraum von bis zu zehn Jahren vor dem Kniebereich. Die Proben N52-H und N52-SH zeigen über den gesamten Beobachtungszeitraum von 10 Jahren keine signifikanten Veränderungen im Magnetisierungsverlauf. Angewandt auf das Motorbeispiel bedeutet dies, das mechanische Moment bleibt unter den gegebenen Bedingungen über die gesamte Zeitdauer weitgehend konstant. Bei Betrachtung des Verhaltens bei einer Proben-temperatur von 70 °C in Abb. 6.7 und einem maximalen Feld von –900 kA/m zeigt sich, dass lediglich die N52-SH-Probe noch einen ausreichenden Abstand zum Kniefunkt aufweist. Nach 1 Woche Belastung befindet sich allerdings auch ihr prognostizierter Arbeitspunkt nahe am Kniefunkt. Bei den übrigen Proben ist die Koerzitivfeldstärke geringer als das anliegende Gegenfeld von –900 kA/m. Diese Vorgehensweise zeigt somit die qualitative Materialvergleichsbetrachtung, wodurch prognostizierte Arbeitspunkte als Funktion der Zeit vorhergesagt werden können, um entsprechend die richtige Materialauswahl auf Basis der Anforderungen an Feld, Temperatur und Zeit zu erzielen und eine pauschale Abschätzung in Form von Überdimensionierung zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Es zeigt sich allerdings auch in den exemplarisch simulierten Motorkonfigurationen, dass dieses Vorgehen aufgrund der dynamisch variierenden Feldverteilung in der Probe nur schwer anwendbar ist, da der Entmagnetisierungsfaktor nur eine Volumenmittelgröße darstellt und kleinere lokale Inhomogenitäten so nur in geringem Maße berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass insbesondere in der SMPM-Konfiguration mit der höchsten Feldbelastung im Randbereich bzw. im Übergang zu den benachbarten Magneten anfangs Entmagnetisierungserscheinungen primär in diesem Bereich zu erwarten sind, während andere Bereiche wesentlich geringere Feldbelastungen erfahren. Im Vergleich dazu zeigt die IPM-Konfiguration generell ein höheres, homogener verteiltes Feld, wobei die betrachteten Beispiele auch nur die unbestromte Ausgangssituation darstellen. Es zeigt sich somit in diesen Beispielen der Bedarf zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens in numerischen Berechnungen und FEA-Software, wie im Folgenden in Abschnitt 6.2 aufgeführt wird.

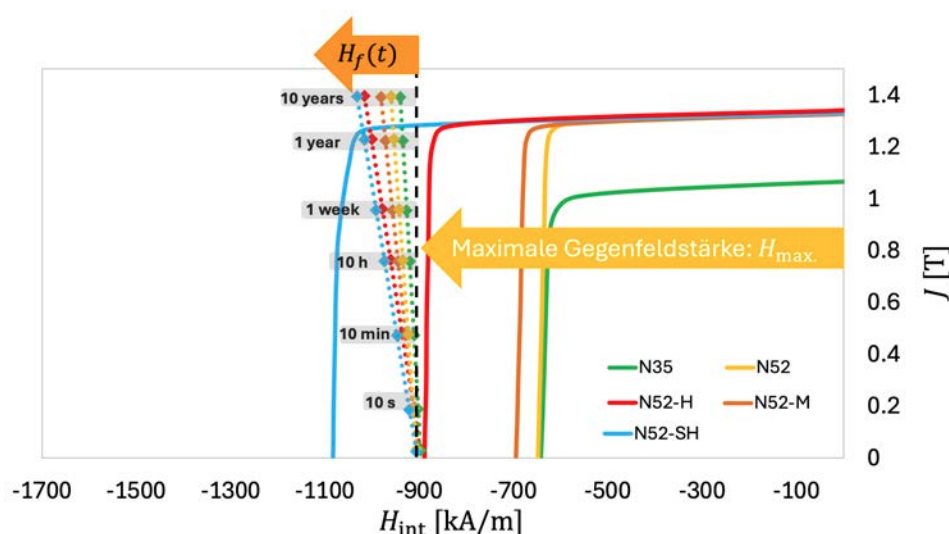


Abb. 6.7: Langzeitbetrachtung unterschiedlicher Magnetgetrieben durch Anwendung des Fluktuationfeldes in $J(H)$ -Kurven bei 70 °C und einem maximalen Gegenfeld von –900 kA/m. Der prognostizierte Zustand ergibt sich aus dem Schnittpunkt der jeweiligen $J(H)$ -Kurve mit der entsprechend gefärbten Fluktuationfeld $H_f(t)$ -Prognose. Im Vergleich zu 30 °C (Abb. 6.6) befindet sich bei 70 °C nur noch die SH-Probe vor dem kritischen Bereich, allerdings liegt auch diese nach etwa einer Woche Dauerbelastung im kritischen Bereich und weist keine Feldreserven mehr auf. Adaptiert aus Lanz et al. [172].

6.2 Integration zeitabhängiger Entmagnetisierung in FEA

In herkömmlichen Magnetsimulationssoftwares wie Ansys Maxwell [173] oder Simcenter Magnet [147] werden üblicherweise nur die maximal auftretenden magnetischen Felder und Temperaturen anhand von $B(H)$ -Kurven berücksichtigt, während zeitabhängige Entmagnetisierungsprozesse außer Acht gelassen werden. Richtige irreversible Entmagnetisierungsvorgänge, sowohl direkte als auch zeitabhängige, sind hingegen nicht ohne weiteres möglich: Zwar reduzieren externe Felder die Probenmagnetisierung entsprechend ihrer $J(H)$ bzw. $B(H)$ -Kennlinien, nach Reduzierung des Feldes bleiben jedoch keine irreversiblen Änderungen erhalten. Ein Ansatz besteht in der Berücksichtigung von Rücklaufkurven, wie in [174] vorgestellt, dieser Ansatz erfordert allerdings grundlegende Änderungen in der Software, weshalb zur Erweiterung bestehender Auslegungsmethoden zwei praxistaugliche Ansätze vorgestellt werden, mit denen die Auswirkungen zeitabhängiger Entmagnetisierung in Simulationssoftware durch einfache Anpassung der zu implementierenden Material Datenkurven integriert werden können. Hierzu zählt das Konzept des Fluktuationfeldes in Abschnitt 6.2.1 und das der Fluktuationstemperatur in Abschnitt 6.2.2, ergänzt durch einen Vergleich beider Ansätze in Abschnitt 6.2.3. Die explizite Berücksichtigung zeitabhängiger Magnetisierungsverluste im Systemdesign ermöglicht eine bedarfsgerechte Auslegung, wodurch insbesondere bisherige Überdimensionierungen in Form von Probengüten mit erhöhter Koerzitivfeldstärke reduziert werden können.

6.2.1 Feldbasierter Ansatz

Entmagnetisierungskurven aus Hysteresegraph-Messungen gelten als Standardverfahren zur Charakterisierung von Permanentmagneten. Die gemessenen $J(H)$ -Hystereseschleifen beinhalten jedoch sowohl direkte als auch zeitabhängige Verluste. Abb. 6.8 zeigt $J(H)$ -Hysteresekurven einer N52-Probe bei verschiedenen Feldänderungsraten (Messgeschwindigkeiten). Es zeigt sich eine Verschiebung der $J(H)$ -Kurven mit abnehmender Koerzitivfeldstärke H_{cj} bei zunehmender Messdauer: $20 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow H_{cj} = 1070 \text{ kA/m}$, $200 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow H_{cj} = 1082 \text{ kA/m}$, $400 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow H_{cj} = 1087 \text{ kA/m}$. Kürzere Messzeiten führen entsprechend zu höheren H_{cj} -Werten, da thermisch aktivierte Fluktuationen während längerer Messungen stärker wirken [175].

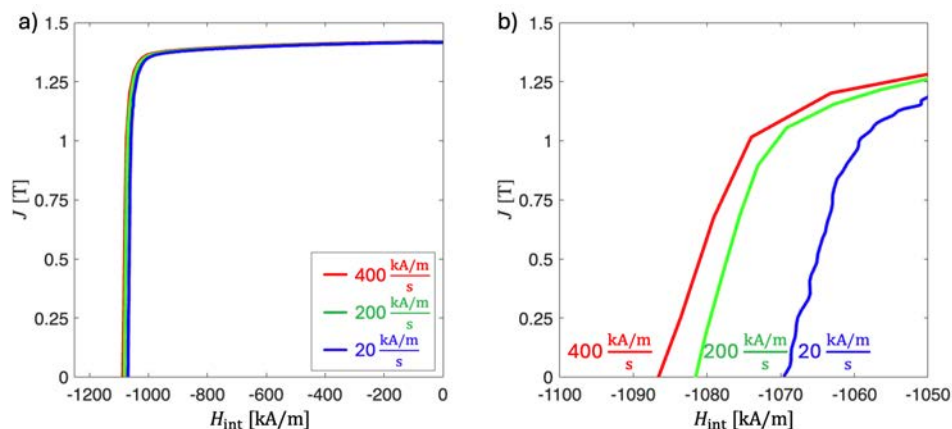


Abb. 6.8: $J(H)$ -Hysteresekurven einer N52-Probe bei verschiedenen Feldraten (rot: 400 (kA/m)/s , grün: 200 (kA/m)/s , blau: 20 (kA/m)/s), gemessen mit dem Hysteresegraphen. a) Gesamter Verlauf der $J(H)$ -Kurven, b) Detailansicht nahe der Koerzitivfeldstärke ($J = 0$). Mit abnehmender Feldrate nimmt die Koerzitivfeldstärke leicht ab: $20 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow 1070 \text{ kA/m}$, $200 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow 1082 \text{ kA/m}$, $400 \text{ (kA/m)/s} \rightarrow 1087 \text{ kA/m}$. Dies zeigt die Grundidee des feldbasierten Ansatzes: die Verschiebung der $J(H)$ -Kurven um den Betrag des Fluktuationfeldes.

Dieser zeitabhängige Effekt bildet die Grundlage für die Softwareimplementierung: Die $J(H)$ -Kurven des Materials werden feldabhängig verschoben, um die zeitabhängigen Verluste abzu-

bilden (Abb. 6.10). Hierbei wird der Einfluss der Zeit durch eine Verschiebung der $J(H)$ - bzw. $B(H)$ -Kennlinien um den Wert des effektiven Fluktuationfeldes $H_f(t)$ vorgenommen:

$$J(H, t) = J(H - H_f(t)) \quad (33)$$

Das Verfahren funktioniert besonders bei Proben mit nahezu linearem Verhalten vor dem Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve. Bei $J(H)$ - oder $B(H)$ -Kurven mit runderem Verlauf muss zusätzlich die Steigung des reversiblen Anteils vor der Verschiebung extrahiert und nach der Verschiebung erneut berücksichtigt werden.

6.2.2 Temperaturbasierter Ansatz

Analog zum feldbasierten Ansatz lässt sich eine Fluktuationstemperatur definieren, die gemäß Abschnitt 5.3.6 aus dem temperaturbasierten Viskositätsparameter und dem Logarithmus der Zeit folgt (Gl. (16)). Da die Probentemperatur in den meisten numerischen Simulationsprogrammen als Standardfunktion verfügbar ist, ist der temperaturbasierte Ansatz besonders einfach anwendbar. Die effektive Temperatur wird als Summe aus maximaler Temperatur und Fluktuationstemperatur gemäß Gl. (17) definiert.

Analog zu zeitabhängigen Verlusten in $J(H)$ -Kurven bei variierender Messgeschwindigkeit (vgl. Abb. 6.8) lassen sich diese Effekte auch in $J(T)$ -Kurven bei unterschiedlichen Temperaturänderungsraten beobachten, wie in Abb. 6.9a an einer N52-Probe dargestellt. Ausgehend von $T_{\max} = 80^\circ\text{C}$ zeigt die schnelle Referenzmessung (s, blau) den Polarisationszustand J_A^s , während die langsame Messung (l, orange) J_B^l ergibt. Der Zustand J_B^l kann auch mit der schnellen Messung (s) bei etwa 87°C erreicht werden. Die daraus resultierende Temperaturdifferenz ΔT_f entspricht der Fluktuationstemperatur. In Abb. 6.9b führt die zusätzliche Fluktuationstemperatur zu erhöhten effektiven Probentemperaturen, z. B. von 80°C als Referenz bei t_0 auf 85°C nach 200 s und 87°C nach 1000 s thermischer Dauerbelastung. Auf diese Weise lassen sich $J(H)$ -Kurven effektiven Probentemperaturen und damit effektiven Belastungszeiten zuordnen, die anschließend in der FEA berücksichtigt werden können.

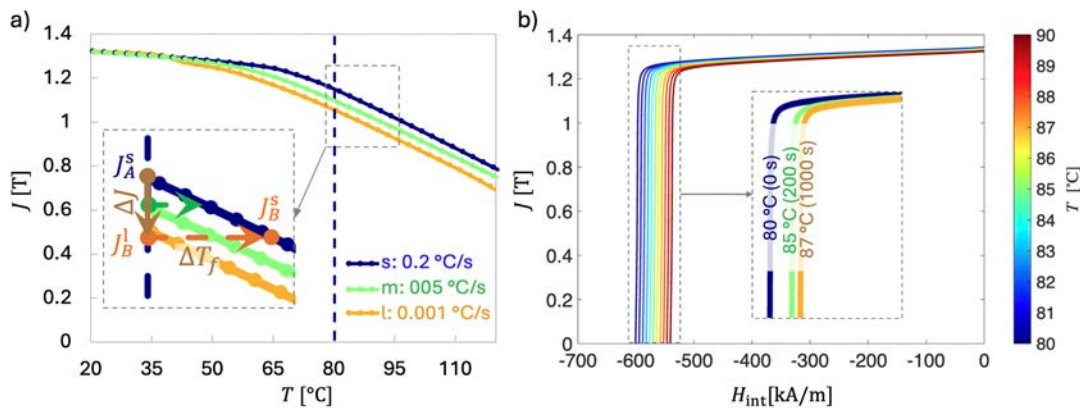


Abb. 6.9: Grundkonzept zur Implementierung der Fluktuationstemperatur in der FEA. a) $J(T)$ -Kurven bei Heizraten von 0.2°C/s (schnell (s), blau), 0.005°C/s (mittel (m), grün) und 0.001°C/s (langsam (l), orange). Mit abnehmender Heizrate zeigt sich eine geringere Temperaturbeständigkeit, erkennbar an einem früheren Abfall der Polarisation. Bei 80°C liegt der Polarisationszustand J_B^l auf der orangenen Kurve, der über eine zusätzliche Temperatur ΔT_f auch mit der grünen bzw. blauen Kurve bei J_B^s erreicht werden kann. b) Veranschaulichung des Konzepts anhand von $J(H)$ -Kurven zwischen 80 und 90°C . Die Basiskurve zum Bezugszeitpunkt (blau, 80°C) entspricht 85°C (grün, 200 s) und 87°C (orange, 1000 s) thermischer Dauerbelastung. Der temperaturbasierte Ansatz berücksichtigt somit die Zeitabhängigkeit über $J(H)$ -Kurven unterschiedlicher Probentemperaturen.

6.2.3 Vergleich von feldbasiertem und temperaturbasiertem Ansatz zur Implementierung in FEA

Zur theoretischen Validierung der beiden Ansätze des feld- und temperaturbasierten Vorgehens wurde eine N52-Probe ($N = 0.56$, $20 \times 10 \times 5\text{ mm}^3$) mit folgenden Parametern gewählt: $S_v = 6.5\text{ kA/m}$, $S_v^T = 0.82^\circ\text{C}$ und $T_{\max} = 80^\circ\text{C}$. Für den feldbasierten Ansatz dienen

Hysteresegraph-Messungen bei 80 °C als Referenz für $t_0 = 1$ s. Die Kurven wurden entsprechend dem Wert des Fluktuationsfelds $H_f(t)$ (siehe Tab. 15) verschoben und als Materialkurven in Simcenter Magnet FEA [147] verwendet. Für den temperaturbasierten Ansatz ergibt sich eine zusätzliche Temperaturbelastung $T_f(t)$, die in Verbindung mit $T_{\max}$ zur effektive Proben temperatur $T_{\text{eff}}(t)$ (Gl. (17)) führt, wie ebenfalls in Tab. 15 aufgeführt.

Tab. 15: Zeit-, Feld- und Temperaturwerte als Ergebnis des feldbasierten Vorgehens $H_f(t)$ sowie des temperaturbasierten Vorgehens mit $T_f(t)$ und resultierendem $T_{\text{eff}}(t)$ einer N52-Probe ($N = 0.56$) mit $S_v = 6.5$ kA/m, $S_v^T = 0.82$ °C und $T_{\max} = 80$ °C.

Zeit	t [min]	t [s]	$H_f(t)$ [kA/m]	$T_f(t)$ [°C]	$T_{\text{eff}}(t)$ [°C]
t_1	2	120	31.6	3.93	83.9
t_2	10	600	41.6	5.25	85.25
t_3	60	3600	53.2	6.7	86.7
t_4	240	1440	62.2	7.9	87.9

Die um den Betrag von $H_f(t)$ verschobenen sowie die durch $T_f(t)$ erhöhten $J(H)$ -Kurven auf Basis von Hysteresegraphmessungen sind in Abb. 6.10 dargestellt.

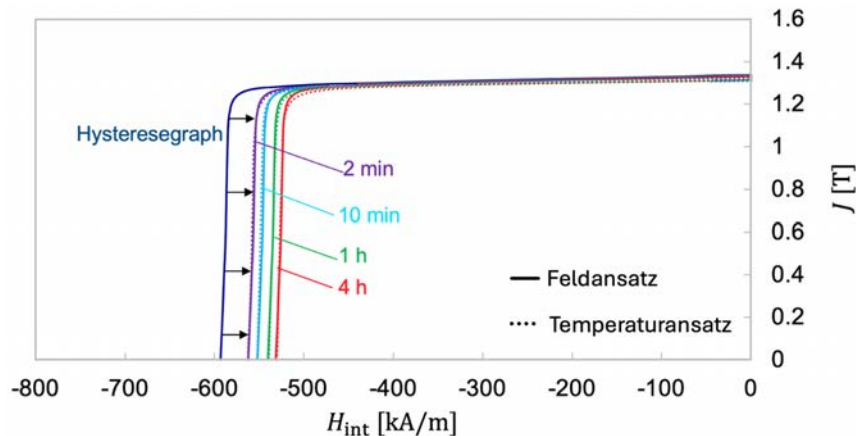


Abb. 6.10: $J(H)$ -Hysteresekurven (Hysteresegraph) zum Vergleich der beiden theoretischen Ansätze bei unterschiedlichen Zeiten (t_0 (dunkelblau), 2 min (lila), 10 min (hellblau), 1 h (grün) und 4 h (rot)). Der zeitliche Einfluss durch das Fluktuationsfeld zeigt sich als Verschiebung der $J(H)$ -Kurven gemäß Gl. (33) (durchgezogene Linien), während der Einfluss über die Fluktuations temperatur durch $J(H)$ -Kurven der entsprechenden Temperatur nach Gl. (17) (gestrichelt) dargestellt ist. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Ansätzen.

Zur experimentellen Validierung wurde mittels Konzept 3 eine Langzeit-Magnetisierungsmessung durchgeführt. Abb. 6.11a zeigt die Ergebnisse einer 4-stündigen Messung der N52-Probe bei 80 °C, die die zeitabhängige Nachwirkung $J(T, t)$ darstellt.

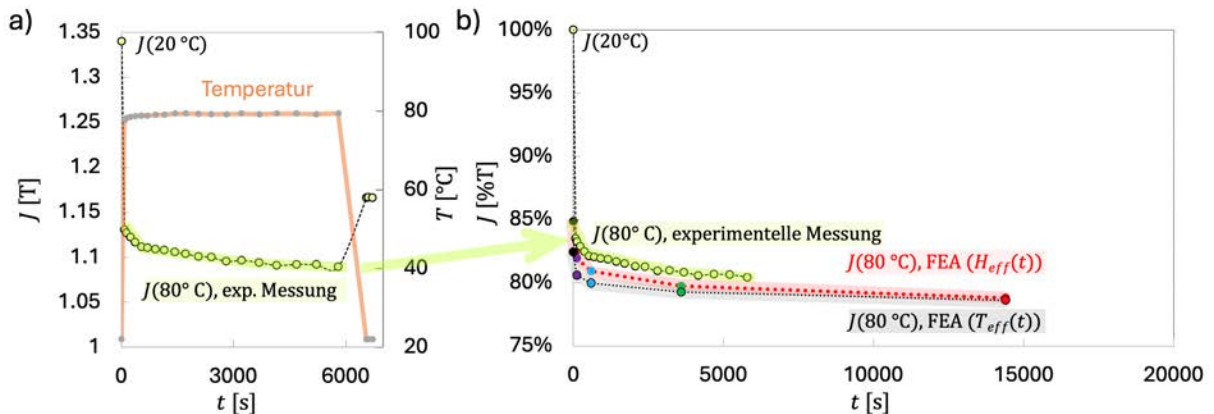


Abb. 6.11: Validierung der beiden theoretischen Ansätze (feld- und temperaturbasiert) zur FEA-Implementierung im Vergleich mit einer experimentellen Langzeitmessung. a) Darstellung der $J(T, t)$ -Messung einer N52-Probe ($N = 0.56$), gemessen mittels Konzept 3. In b) ist der Vergleich der theoretischen Ansätze Fluktuationsfeld $H_{\text{eff}}(t)$ und Fluktuations temperatur $T_{\text{eff}}(t)$ mit der experimentellen Langzeitmessung aus a) dargestellt. Farblich sind die Messpunkte nach ihrer Basis- $J(H)$ -Kurve aus Abb. 6.10 markiert. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den aus der FEA berechneten Polarisationswerten und den experimentell bestimmten Polarisationswerten zu den entsprechenden Zeitpunkten.

Zum Vergleich der theoretischen und experimentellen Ansätze in der FEA wurde die quaderförmige Probe entsprechend den in Abb. 6.10 dargestellten $J(H)$ -Materialkurven simuliert. Anschließend erfolgte die Berechnung der integralen Polarisierung des Probenvolumens über den Mittelwert von J . Aufgrund unterschiedlicher Anfangspolarisationen zwischen Simulation und Experiment sind die Ergebnisse in Abb. 6.11b) als prozentuale Differenz der Polarisierung dargestellt. Der Vergleich der experimentellen und simulierten Verläufe zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Dies bestätigt die vorgeschlagenen theoretischen Ansätze, die $J(H)$ -Kurven um $H_f(t)$ zu verschieben bzw. die Probentemperatur um $T_f(t)$ zu erhöhen und ermöglichen so eine einfache und effektive Methode zur Berücksichtigung zeitabhängiger magnetischer Verluste in FEA.

6.3 Anwendungsszenario: Zerstörungsfreier Koerzitivfeldstärkenverlauf

Nachdem mithilfe von Konzept 2 lokale Unterschiede in der Koerzitivfeldstärke zunächst qualitativ durch Variationen in der Streufeldverteilung identifiziert und entsprechenden Proben-segmenten zugeordnet werden konnten (Abschnitt 5.1.3.3), ergab sich die Notwendigkeit einer quantitativen, orts aufgelösten Analyse dieser Effekte. Dies ermöglicht eine detaillierte Betrachtung von bspw. lokal verstärkter GBD-Magnete, bei denen der Einsatz seltener, rohstoffkritischer Elemente wie Dysprosium und oder Terbium gezielt auf Bereiche beschränkt werden kann, in denen eine Erhöhung der Koerzitivfeldstärke tatsächlich erforderlich ist [82]. Hierfür wurde eine Modellprobe auf Basis eines N35-Magneten erstellt. Diese Modellprobe wurde einseitig mit 1.25 Vol.-% Dy eindiffundiert (Diffusionsseite), was zu einem Gradienten zunehmender Koerzitivfeldstärke in Richtung der Eindiffusionsseite führt (vgl. Abb. 6.12).

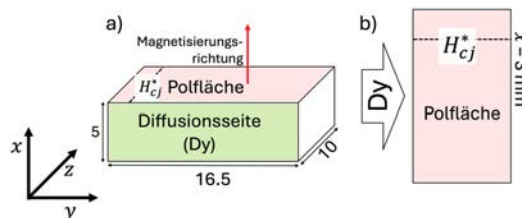


Abb. 6.12: Modellprobe mit markierten Seitenflächen der Eindiffusionsseite, der Polfläche sowie der Magnetisierungsrichtung in a). b) Polflächenansicht für die in Abb. 6.13 und Abb. 6.15 dargestellten Field Maps. Zusätzlich ist der H_{cj}^* -Extraktionsbereich bei $x = 3 \text{ mm}$ für die zerstörungsfreie Analyse in Abb. 6.16 markiert. Adaptiert aus Lanz et al. [176].

Abb. 6.13 zeigt eine Messreihe temperaturabhängiger Field Maps mittels Konzept 4 und verdeutlicht eine inhomogene Reduzierung des Streufeldes mit zunehmender Probentemperatur. Erste Anzeichen in der Streufeldverteilung treten auf der nicht Dy-eindiffundierten Seite ab etwa dem Übergangspunkt bei 65°C mit einer Magnetisierung von ca. $J = 1.05 \text{ T}$ auf, während die Diffusionsseite ab ca. 75°C mit etwa $J = 1.01 \text{ T}$ ebenfalls leicht geringere Streufeldverteilung aufweisen. Ab 130°C zeigt sich über dem nicht eindiffundierten Bereich eine Streufeldverteilung von nahezu $B_z = 0 \text{ T}$, während die Dy-eindiffundierte Seite weiterhin Werte über $B_z = 0.05 \text{ T}$ (Streufeld) aufweist, was in Summe noch etwa $J = 0.47 \text{ T}$ entspricht.

Es zeigt sich ein Gradient, der jedoch nur qualitativ mit der jeweils angewandten Temperatur in Beziehung gesetzt werden kann. Eine direkte Bestimmung des Koerzitivfelds erfordert zusätzliche Vergleichsmessungen mittels Hysteresegraph oder die Unterstützung durch Simulationen. Um einen direkten Zusammenhang zur Koerzitivfeldstärkenverteilung herzustellen, wurde ein alternativer Ansatz entwickelt, der es ermöglicht, Streufeldverteilungen mit der lokal wirkenden Koerzitivfeldstärke in Beziehung zu setzen. Hierfür wurde ein kombinierter Ansatz gewählt, bei dem die Probe zunächst integral mittels Hysteresegraph im magnetisch geschlossenen Kreis entmagnetisiert wird und anschließend mithilfe eines 3D-Field-Mappers

lokal die Streufeldverteilung der Polfläche erfasst wird. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abb. 6.14 dargestellt.

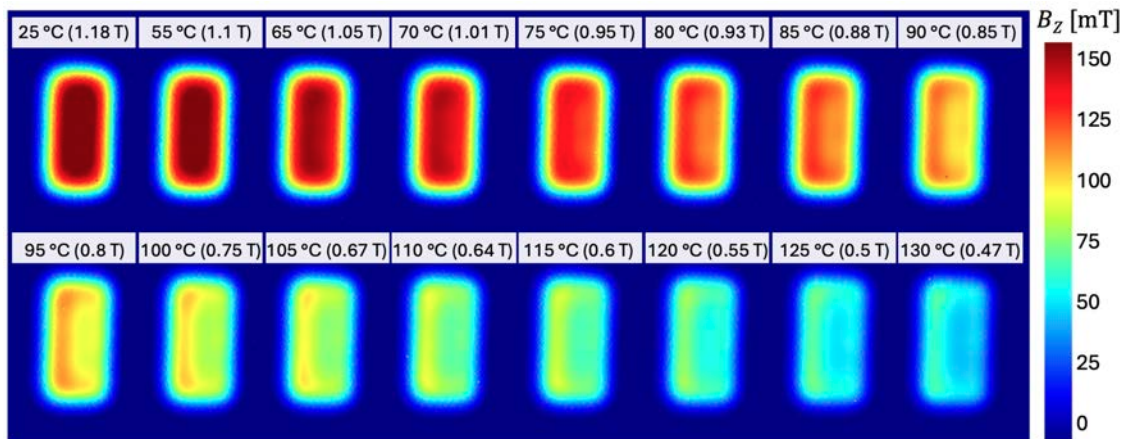


Abb. 6.13: Temperaturabhängige Field Maps der Modellprobe bei zunehmender Probentemperatur mit angegebenen integralen Polarisationswerten (gemessen gemäß Messprogramm 3.2.3.3a mit einem vertikalen Abstand von etwa 2 mm). Es zeigt sich eine von der rechten Seite beginnende Abnahme der Streufeldintensität, die mit steigender Temperatur weiter zunimmt, während die Diffusionsseite (links) erst bei höheren Temperaturen nachlässt. Insgesamt nimmt die Streufeldintensität mit zunehmender Probentemperatur graduell über die Probenbreite ab.

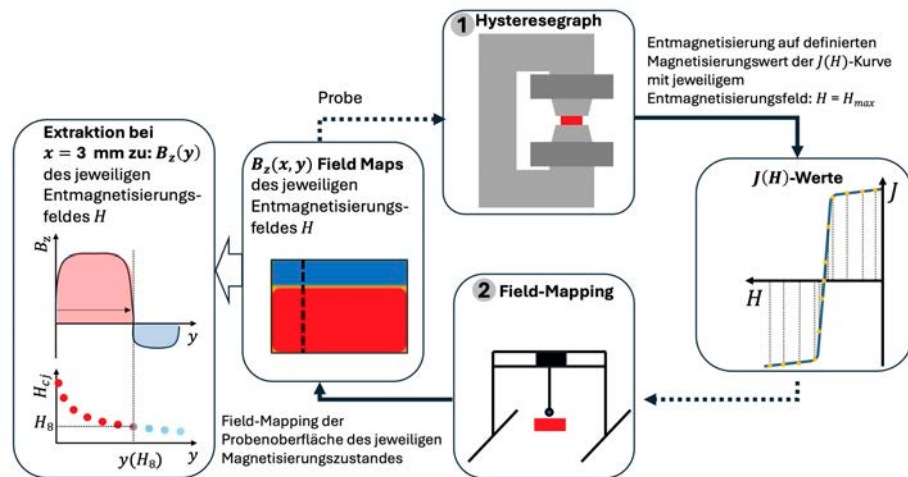


Abb. 6.14: Schematischer Ablauf zur zerstörungsfreien Erfassung des Koerzitivfeldstärkenverlaufs: (1) integrale Entmagnetisierung auf den gewählten Polarisationszustand J zwischen $\pm J_r$ mittels Feldstärke H im Hysteresegraph $J(H)$, gefolgt vom Field-Mapping (2) und der Auswertung der y -Position des Nulldurchgangs ($B_z = 0$) mit dem jeweils angelegten Gegenfeld H für den betrachteten Polarisationswert J aus der vorherigen Hysteresegraphmessung. Anschließend erfolgt die erneute Entmagnetisierung auf den nächsten Magnetisierungszustand J_n (siehe Text) mit gleichem Ablauf.

Die Probe wird dabei nacheinander mit den Feldwerten H_n ent- bzw. aufmagnetisiert, wodurch die jeweils resultierenden Polarisationswerte J_n entstehen: (1) 0 kA/m, 1.2 T; (2) 865 kA/m, 1 T; (3) 868 kA/m, 0.9 T; (4) 882 kA/m, 0.8 T; (5) 887 kA/m, 0.6 T; (6) 898 kA/m, 0.4 T; (7) 912 kA/m, 0.2 T; (8) 924 kA/m, 0 T; (9) 948 kA/m, -0.2 T; (10) 962 kA/m, -0.4 T; (11) 964 kA/m, -0.6 T; (12) 1019 kA/m, -0.8 T; (13) 1098 kA/m, -1 T; (14) 1204 kA/m, -1.2 T.

Abb. 6.15 zeigt insgesamt 14 Field Maps $B_z(x, y, z = 0.5 \text{ mm})$, bezeichnet nach dem zuvor angelegten Entmagnetisierungsfeld (H_n). Die Farbskala ist so gewählt, dass rote Bereiche positive und blaue Bereiche negative Streufeldintensitäten anzeigen. Die Maps bei H_1 und H_{14} stellen die gesättigten Zustände dar, mit einem positiven Wert von $J = 1.2 \text{ T}$ bei H_1 und einem negativen Wert von $J = -1.2 \text{ T}$ bei H_{14} . Zwischen H_2 und H_{13} lässt sich eine zunehmende Veränderung der Feldverteilung beobachten. Diese beginnt am rechten Rand mit zunächst geringeren Intensitätsänderungen in H_2 und H_3 . Ab H_4 treten negative Amplituden auf, die mit zunehmendem Entmagnetisierungsfeld in x -Richtung immer größer werden. Schließlich zeigt H_{14} eine vollständig negative Flussdichteverteilung.

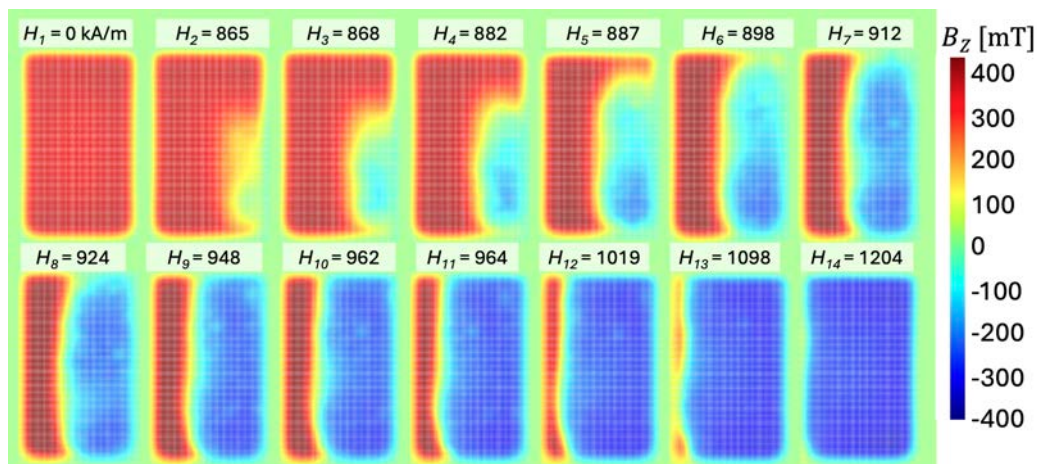


Abb. 6.15: Field Maps ausgewählter Magnetisierungszustände in $B_z(x, y)$, gemessen in einem Abstand von $z = 0.5 \text{ mm}$ gemäß: 3.3.3. Dargestellt sind Magnetisierungszustände bei definierten Feldstärken H_{max} von H_1 bis H_{14} . Mit zunehmender Feldstärke nimmt die Streufeldintensität von rechts ab, wodurch sich ebenfalls ein gradueller Verlauf im Vergleich zu Abb. 6.13 zeigt. Adaptiert aus Lanz et al. [176].

Basierend auf den 14 Field Maps wurde an einer zentralen Position mit durchschnittlicher Streufeldverteilung der $B_z(y)$ -Verlauf entlang einer Linie bei $x = 3 \text{ mm}$ extrahiert und in Abb. 6.16 dargestellt. Für jeden Scan wurde anschließend der Nulldurchgang sowie der maximale Feldwert bestimmt.

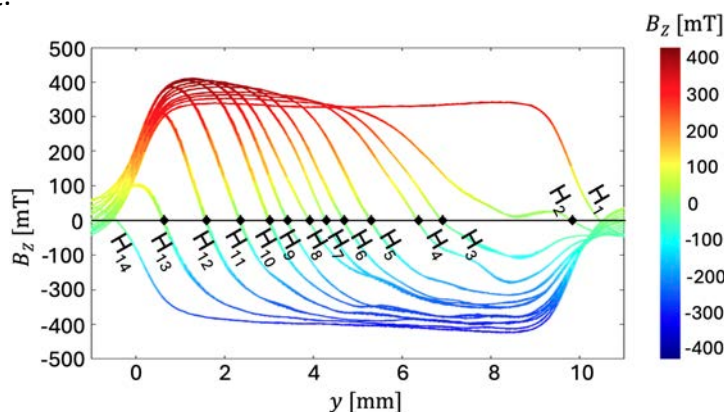


Abb. 6.16: Seitenansicht des Flussdichteverlaufs B_z entlang der y -Achse bei $x = 3 \text{ mm}$ als $B_z(x = 3 \text{ mm}, y, z = 0.5 \text{ mm})$ der Field Maps aus Abb. 6.15 für alle angelegten Feldstärken H_1 bis H_{14} . Die jeweiligen Nulldurchgänge des Streufeldverlaufs ($B_z = 0$) sind mit der jeweils applizierten Feldstärke angegeben. Hieraus wird pro Feldzustand 1 bis 14 die jeweilige Position des Nulldurchgangs erfasst. Adaptiert aus Lanz et al. [176].

Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass Nulldurchgänge die Übergänge zwischen positiver und negativer Magnetisierung markieren. Daraus werden Streufeldbereiche zugeordnet: positive Amplituden kennzeichnen Bereiche mit höherer Koerzitivfeldstärke als das zuvor angelegte maximale Feld H_n , negative Amplituden Bereiche mit geringerer Koerzitivfeldstärke. Der Nulldurchgang entspricht dem scheinbaren Koerzitivfeld H_{cj}^* , welches dem zur Erreichung der Zielentmagnetisierung angelegten Feld entspricht. Dieses Vorgehen ist in Abb. 6.18 als ortsaufgelöste Verteilung der Koerzitivfeldstärke $H_{cj}^*(y)$ dargestellt.

Zusätzlich wurde die Probe zerstörend analysiert, um einen realen Vergleich zwischen den aus Field Maps abgeleiteten scheinbaren Koerzitivfeldstärken und den tatsächlich gemessenen Werten zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde die Probe, wie in Abb. 6.17 dargestellt, in insgesamt elf Segmente unterteilt. Die Bereiche A (schwarz, 0 bis 10 mm), B (blau, 0 bis 5 mm) und C (grau, 5 bis 10 mm) wurden zunächst durch Sägen voneinander getrennt.

Die Segmente B und C wurden jeweils weiter in B1, B2 beziehungsweise C1, C2 untergliedert. Segment B1 wurde darüber hinaus in vier Lagen (B1.1 bis B1.4) bis zu einer minimalen Schichtdicke von 0.1 mm abgeschliffen. Alle Teilsegmente wurden einzeln mit dem Hysteresegraph

vermessen. Für die orts aufgelöste Darstellung wurden jeweils die mittlere Segmentposition in Bezug auf die ursprüngliche Gesamtprobenlänge berücksichtigt. So wurde beispielsweise für Segment B mit einer Länge von 5 mm in y -Richtung der Wert bei 2.5 mm angesetzt.

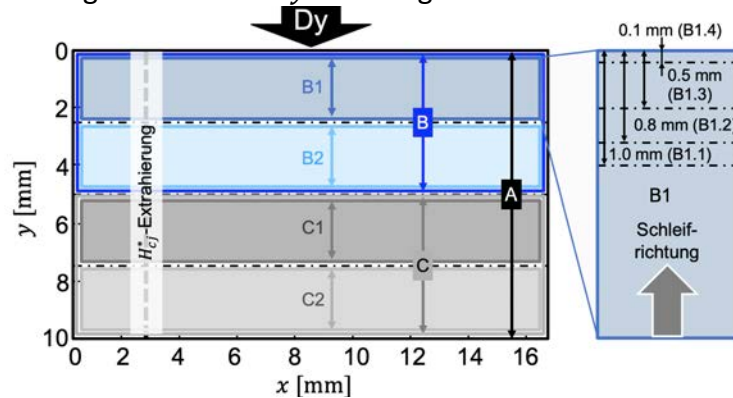


Abb. 6.17: Darstellung des Schnittmusters der sequenziellen Methode. Die Ausgangsprobe (A, schwarz 10 mm breite) wurde entlang der Dy-Diffusionsrichtung ($y = 0$ mm) in die Segmente (B, blau) und (C, grau) mit je 5 mm Dicke getrennt. Diese wurden weiter in (B1, B2) bzw. (C1, C2) (2.5 mm dick) getrennt. Das Segment (B1), direkt an der Diffusionsseite, wurde zusätzlich in die Scheiben (B1.1–B1.4) geschliffen (bis 0.1 mm). Alle Segmente wurden einzeln mit dem Hysteresegraphen vermessen; die resultierenden Koerzitivfeldstärken sind den jeweiligen Segmentbreiten und deren Positionen im Magnet zugeordnet und in Abb. 6.18 dargestellt. Adaptiert aus Lanz et al. [176].

Abb. 6.18 zeigt den Verlauf der aus der Streufeldmessung abgeleiteten maximalen Gegenfeldwerte $H_{cj}^*(y)$ sowie die durch die sequenzielle (zerstörende) Messung bestimmten realen Koerzitivfeldstärken $H_{cj}(y)$. Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der beiden Verfahren mit nur kleinen Differenzen von unter 5 % wie zwischen Punkt B1 und H_{12} .

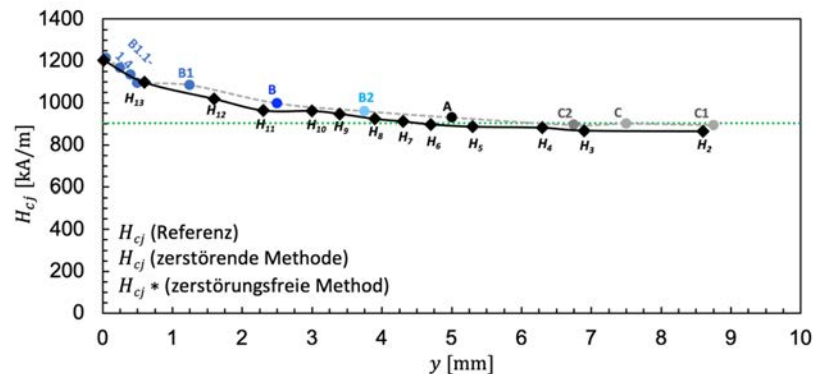


Abb. 6.18: $H_{cj}(y)$ -Verlauf der zerstörungsfreien Methode im Vergleich zur sequenziellen Methode. Dargestellt sind die Ergebnisse der zerstörungsfreien Methode (H_{cj}^* , schwarz), markiert mit den ausgewählten Feldstärken H_2 – H_{13} aus den Nulldurchgängen in Abb. 6.15, sowie zum Vergleich die Koerzitivfeldstärken der Schnittsegmente aus der sequenziellen Methode (grau, vgl. Positionen von Abb. 6.17). Die Koerzitivfeldstärke der Referenzprobe ohne Dy-Diffusion ist zusätzlich in grün aufgeführt. Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen der zerstörungsfreien und der sequenziellen Methode, womit die Anwendbarkeit des neuen Ansatzes bestätigt werden kann. Adaptiert aus Lanz et al. [176].

Im Vergleich zur temperaturbasierten Vorgehensweise (siehe Abb. 6.13) ermöglicht die Kombination aus Entmagnetisierung im Hysteresegraph und Streufelderfassung mittels Field-Mapper eine orts aufgelöste, quantitative Auswertung mit direktem Bezug auf intrinsische Materialeigenschaften. Der temperaturbasierte Ansatz von Konzept 4 zeichnet sich durch einen voll automatisierten Ablauf aus: Die in Abb. 6.13 dargestellte Temperaturrampe ist in weniger als einer halben Stunde abgeschlossen. Dagegen erfordert die Kombination aus manueller Entmagnetisierung und Field-Mapping (Abb. 6.14) für 14 Zustände mit jeweils 15 Minuten Scanzeit sowie je 5 Minuten für vollständige Auf- und Entmagnetisierung mittels Pulsmagnetisierer und Hysteresegraph einen Gesamtzeitaufwand von über vier Stunden bei vollem Personaleinsatz. Zur schnellen Visualisierung einer indirekten Koerzitivfeldverteilung über die Temperatur bietet Konzept 4 eine zeiteffiziente Alternative in unter 30 Minuten. Für eine präzise, feldabhängige Materialcharakterisierung stellt jedoch das kombinierte Verfahren die überlegene Lösung dar.

7 Diskussion

Kapitel 7 dient der Diskussion der entwickelten Konzepte sowie der im Ergebniskapitel 5 vorgestellten Untersuchungen.

In Abschnitt 7.1 erfolgt eine technische und funktionale Bewertung der Messverfahren mit Abgleich zu konventionellen Methoden. Zunächst wird die magnetische Kreiskonfiguration behandelt, einschließlich des Einflusses des Entmagnetisierungsfaktors in offenen und geschlossenen Kreisen (7.1.1) sowie der integralen und lokalen Magnetisierungserfassung. Ergänzend werden in Abschnitt 7.1.2 die technische Temperatur- und Feldstabilität betrachtet. Eine funktionsbezogene Einordnung der Konzepte nach Messziel und Eignung anhand zentraler Basisziele erfolgt in Abschnitt 7.1.3 und umfasst Entmagnetisierungskurven, Viskositätsmessungen, Streufeldvisualisierungen und mechanische Drehmomentmessungen. Abschnitt 7.1.4 fasst die funktionalen Erkenntnisse der Prüfstandstechniken zusammen.

Abschnitt 7.2 analysiert die Ergebnisse aus der Anwendung der Prüfstandskonzepte und diskutiert deren übergeordnete Bedeutung. Dies umfasst die direkte und zeitabhängige Entmagnetisierung 7.2.1, sowohl in integraler Form über Entmagnetisierungskurven als auch lokal über Field Maps. Abschnitt 7.2.2 behandelt Field Maps und die daraus ableitbaren Aussagen, 7.2.3 den feldbasierten Viskositätsparameter unter Berücksichtigung externer sowie material- und prozessbezogener Einflussfaktoren. Darauf folgt der temperaturbasierte Viskositätsparameter in 7.2.4, gefolgt vom Vergleich beider Ansätze in 7.2.5. Abschnitt 7.2.6 diskutiert die Anwendung von Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur einschließlich FEA-Implementierung. Ergänzend werden in 7.2.7 die Wirksamkeit magnetischer Stabilisierung und in 7.2.8 die Möglichkeit der Extraktion des Magnetisierungszustands durch Drehmomentmessungen

7.1 Technische Bewertung der Messverfahren im Vergleich zu konventionellen Methoden

7.1.1 Magnetische Kreiskonfiguration und Magnetisierungsmessung

Da die realisierten Konzepte sowohl auf unterschiedlichen Magnetkreiskonfigurationen als auch auf verschiedenen Magnetisierungserfassungen basieren, folgt in Abschnitt 7.1.1.1 die Diskussion des Einflusses des Magnetkreises auf die Proben und in 7.1.1.2 die Darstellung der unterschiedlichen Strategien zur Erfassung der integralen Magnetisierung.

7.1.1.1 Einfluss des Entmagnetisierungsfaktors: offener und geschlossener Magnetkreis

Wie in Kapitel 4 zu den Prüfstandskonzepten aufgeführt, besteht der magnetische Kreis der Konzepte 1 und 2 aus einem teilgeschlossenen Kreis, während sich die Proben in den Konzepten 3 und 4 in einem vollständig offenen Kreis befinden. Hieraus ergeben sich für die Proben unterschiedliche Feldbelastungen im Vergleich zum geschlossenen Magnetkreis des Hysteresegraphen. Besonders relevant ist hierbei das Selbstentmagnetisierungsfeld, das im offenen Kreis den Arbeitspunkt der Proben bestimmt. Während im geschlossenen Kreis gilt, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}}$, ergibt sich im offenen Kreis das innere Feld gemäß Gl. (2). Hierbei spielt der Entmagnetisierungsfaktor N eine zentrale Rolle, z. B. für einen Standard-Quadermagneten $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ beträgt $N = 0.56$ (offener Kreis). Während sich in den Konzepten 3 und 4, also im vollständig offenen Kreis, der Ansatz von Aharoni [57] mit einem über das gesamte Magnetvolumen gemittelten statischen Faktor (hier: $N = 0.56$) bewährt, ist die Anwendung eines einheitlichen Faktors in den magnetisch teilgeschlossenen Kreisen der Konzepte 1 und 2 deutlich problembehafteter. Der statische, teilgeschlossene Magnetkreis in Konzept 1 zeigt, wie in Abb.

4.4 dargestellt, einen deutlichen Einfluss auf die Probe und deren Feldverteilung. Der durch Simulation ermittelte mittlere Entmagnetisierungsfaktor liegt für den Standard-Quadermagneten in Konzept 1 etwas niedriger als in Luft bei ca. $N = 0.52$. Dieser bleibt gemäß Abb. 4.5 bis zum Beginn irreversibler Verluste weitgehend konstant und fällt dann mit abnehmender Polarisation bis $J = 0$ T auf etwa $N = 0.5$ ab. Für einen weiterführenden Vergleich dient Abb. 4.6, in der ein hochkoerzitiver N35-EH-Magnet verwendet wurde, um irreversible Verluste zu vermeiden. Der Entmagnetisierungsfaktor verläuft auch hier im linearen Bereich der Hysteresekurve zunächst weitgehend stabil, bis zu einer Feldstärke von etwa 1500 kA/m (Abb. 4.6a) bzw. 160 A Strom (Abb. 4.6b). Ab diesen Feldstärken geraten zunehmend größere Bereiche des Magnetjochs (Elektroblech) in lokale Sättigung (vgl. Abb. 4.2). Auch die Polschuhe erreichen dabei Sättigung, verlieren ihre hohe magnetische Permeabilität und es entsteht ein verstärkter Streufluss. Dieser wirkt wie ein zunehmend offener Magnetkreis und erhöht den effektiven Entmagnetisierungsfaktor der Probe, welcher in Richtung des Werts im offenen Kreis von $N = 0.56$ ansteigt.

Für einen weiteren Vergleich dient ein Kugelmagnet, wie simuliert in Abb. 2.6b dargestellt. Die Besonderheit der Kugelform liegt in der homogenen Feldverteilung ihres Selbstfelds, wodurch sich der statische Entmagnetisierungsfaktor der Kugel mit $N = 1/3$ exakt anwenden lässt. Mit diesem Wert wurde die $J(H)$ -Kurve aus dem VSM (vollständig offener Kreis) entschert, siehe Abb. 5.8. Im Prüfstandskonzept 1 wurde aufgrund des teil-offenen Magnetkreises dagegen ein etwas niedrigerer Wert von $N = 0.3$ gewählt, um experimentell eine bessere Übereinstimmung der Kurvenformen zu erreichen.

Bei Prüfstandskonzept 2 wurde ein vergleichbares Verfahren angewandt. Hier ergab sich ein Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.51$ für die Quaderprobe und $N = 0.32$ für die Kugelprobe. Beim Feldverlauf der N52-Probe (Abb. 4.12) nimmt der Entmagnetisierungsfaktor mit ansteigender Entmagnetisierung ab und erreicht bei 0 T etwa $N = 0.46$. Im Vergleich zu Konzept 1 ($N = 0.5$) ergibt sich eine stärkere Feldinhomogenität, die in Abb. 7.1 schematisch auf die rotierende Probe übertragen ist.

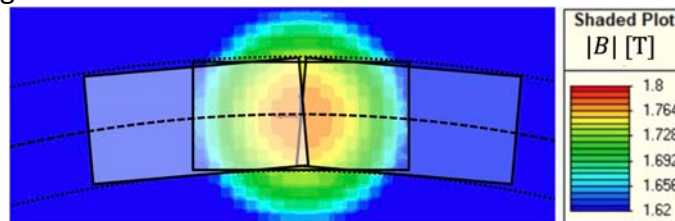


Abb. 7.1: Simulierte Feldverteilung des externen Feldes mit symbolischer Probenrotation (weiß transparent, schwarz umrandet) durch das entmagnetisierende Feld von Konzept 2. Es zeigt sich die Inhomogenität der runden Polschuhe mit radial konzentrischer Feldverteilung: Das Feld ist im Probenzentrum am stärksten und nimmt nach außen hin ab. Die Rotation der Probe führt zu einer periodischen Variation der Feldstärke am Probenrand.

Neben der inhomogenen radialen Feldverteilung mit einem Maximum im Probenzentrum zeigt sich eine zeitlich (positionsabhängig) variierende, dynamische Feldverteilung. Die runden Polschuhe bündeln das Feld im Luftspalt und erzeugen eine radiale Jochfeldverteilung mit zentralem Maximum. Dort überlagern sich externes und das selbstentmagnetisierende Feld, was zur höchsten lokalen Feldbelastung führt, während die Randbereiche geringer beeinflusst werden. Dennoch lässt sich mit dem simulierten Entmagnetisierungsfaktor von $N = 0.51$ eine gute mittlere Annäherung erreichen, wie experimentell mit dem Hysteresegraph in Abb. 5.2 verglichen.

7.1.1.2 Magnetisierungserfassung

Die Magnetisierungserfassung basiert auf unterschiedlichen Messprinzipien. Konzept 1 verwendet Hall-Sonden im Luftspalt über der örtlich fixierten Probe im Magnetjoch. Konzepte 2, 3 und 4 basieren auf der Helmholtz-Messspulenmessung.

Konzept 1: Hall-Flussdichtewerte

Die Messmethode von Konzept 1 nutzt drei Hall-Sonden im Luftspalt zwischen Probe und Polschuhen des Jochs (vgl. Abschnitt 3.2.1.1). Um aus den lokalen Magnetfeldern der Probe unter Wechselwirkung mit den Polschuhen integrale Magnetisierungswerte zu erhalten, werden die Flussdichtewerte der Hall-Sonden im Ausgangszustand einer voll aufgesättigten Probe bei der jeweiligen Temperatur linear an die $J(T)$ -Werte aus Helmholtz-Messspulenmessungen angepasst. Grundlage hierfür sind die temperaturabhängigen Helmholtz-Messspulenwerte der jeweiligen Probe, gemessen mit Konzept 3.

Zur Validierung wurde mittels Simulation in Abb. 3.5 die Flussdichte an verschiedenen Orten oberhalb der Probe sowie die durchschnittliche magnetische Polarisation eines $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ N52-Quadermagneten extrahiert. Die Werte zeigen die durchschnittliche Abweichung über acht externe Feldstärken von 0 bis -1140 kA/m (Abb. 3.5b). Die durchschnittliche Abweichung der Magnetisierungserfassung liegt hierbei zwischen 0.5 und 10 %, abhängig von der Position der Hall-Sonden. Position (C-1) direkt über der Probe zeigt die höchste Abweichung von 10 % zur integralen durchschnittlichen Magnetisierung. Position (A) im Randbereich, insbesondere vertikal mittig zwischen Polschuh und Probe, zeigt die geringste Abweichung von etwa 0.5 % des integralen Magnetisierungswerts. Die Abweichung des externen Felds (ohne Probe) an Position (A) beträgt etwa 0.6 % von Position (C) (vertikal mittig zwischen Probe und Polschuh) 0.32 %. Deshalb wurden Hall-Sonden an den Positionen (C), (A) und hinter (C) positioniert.

Die Streuung der Hall-Sonden beträgt im Leerzustand etwa 0.00008 T und reduziert sich mit einer temperaturstabilen SmCo-Leerprobe auf etwa 0.00004 T , was eine sehr geringe Messwertstreuung bestätigt.

Langzeitstabile Magnetisierungsmessung mittels bewegter Probe (Konzepte: 2, 3 und 4)

Da die statische Helmholtz-Messspulenmessung aufgrund von Drift des Fluxmeters über die Zeit keine langzeitstabilen Messwerte liefert, muss die Probe bewegt werden, um die reine, von der Probe induzierte Spannung (magnetisches Moment) zu erfassen. Hierfür werden unterschiedliche Strategien eingesetzt wie in Abb. 7.2 dargestellt.

In den Konzepten 2 und 4 wird die Probe durch die Helmholtz-Messspule bewegt (Konzept 2 radial, Konzept 4 linear), wodurch eine unipolare Spannungsinduktion mit nur einem einzelnen Signalpeak entsteht. Diese Messung ist störanfällig gegenüber externen Einflüssen, insbesondere durch elektrische Störfelder und Fluxmeterdrift. Die vorgestellte Zweipunktmethode reduziert diese Störungen sowohl in Konzept 2 mit einer Streuung von 0.001 T (vgl. Abb. 3.27) als auch in Konzept 4 mit einer Streuung von 0.01 T (vgl. Abb. 3.16), erreicht jedoch nicht die Genauigkeit von Konzept 3.

In Konzept 3 wird die Probe um ihre Magnetisierungsachse rotiert (vgl. Abb. 7.2). Dies erzeugt eine bipolare Spannungsinduktion wie in Abb. 3.25 dargestellt. Durch die Rotation über zwei vollständige Perioden kann die mittlere peak-to-peak-Amplitude zwischen Minimum und Maximum bestimmt werden. Diese Methode minimiert Störeinflüsse auf das Messergebnis signifikant und gewährleistet eine deutlich höhere Stabilität. So variieren die Signalauswerte dabei zwischen 0.00015 T ohne Temperaturregelung und 0.0002 T bei einer Temperaturregelung von $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens wurde mit einer temperaturstabilen SmCo-Probe überprüft, wobei ein konstantes Rauschniveau von 0.0002 T festgestellt wurde.

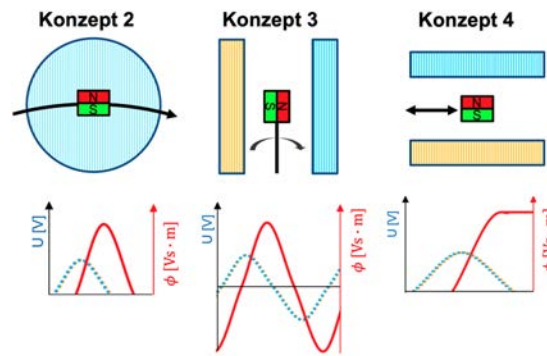


Abb. 7.2: Schematische Übersicht von Spannungsinduktionen der Konzepte 2, 3 und 4 in der Helmholtz-Messspule (hier blau und gelb dargestellt). Während bei den Konzepten 2 und 4 die quasi eindimensionale Probenbewegung nur zu einer unipolaren Spannungsinduktion (blau, gelb) führt, erzeugt die Rotation der Probe eine bipolare Spannungsinduktion in Form eines Sinussignals. Zusätzlich ist die Integration der Spannungssignale in (rot) dargestellt. Die Probenrotation ermöglicht eine höhere Genauigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung möglicher Fluxmeter-Drifts und Offsets.

Validierung der offenen Magnetkreismessungen

Zur Validierung der Messwerte der offenen Kreismessungen unter Temperatureinfluss für Konzept 3 und 4 wurden, wie in Abb. 5.3 dargestellt, $J(H_{\text{int}})$ -Hysteresemessungen im Temperaturbereich von 20 bis 200 °C durchgeführt. Die in Abb. 5.3a eingezeichneten Arbeitslinien basieren auf den durch die jeweilige Probengeometrie bedingten Entmagnetisierungsfaktoren nach Aharoni [57]. Die Schnittpunkte dieser Arbeitslinien mit den $J(H_{\text{int}})$ -Kurven definieren die Arbeitspunkte im offenen Kreis für die entsprechenden Temperaturen. Die zugehörigen J -Werte wurden in Abb. 5.3b zusammen mit den Ergebnissen der offenen Kreismessungen aus Konzept 3 dargestellt. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten des Hysteresegraphen und den Ergebnissen aus Konzept 3.

Die Ergebnisse spiegeln den Entmagnetisierungsfaktor infolge der Probenform in Bezug auf die Magnetisierung über den Arbeitspunkt und dessen Abstand zum Koerzitivfeld wider und validieren die Polarisations- sowie die Temperaturbestimmung von Konzept 3.

7.1.2 Quantifizierung der Feld- und Temperaturstabilität

In diesem Abschnitt werden die beiden technischen Prozessgrößen Feld und Temperatur hinsichtlich ihrer Erfassung und ihrer Langzeitstabilität diskutiert.

In Abschnitt 7.1.2.1 folgt die Diskussion zur Quantifizierung des Feldes, einschließlich Erfassung und Stabilität. Abschnitt 7.1.2.2 schließt die Diskussion zur Quantifizierung der Temperatur und deren Stabilität an. Damit wird die Eignung der Konzepte aus technischer Sicht diskutiert, bevor in 7.1.3 die Anwendung auf die Hauptmessziele erfolgt.

7.1.2.1 Felderfassung und Feldstabilität

Konzept 1

Wie in Abb. 4.7b dargestellt, variieren die Messsignale der Flussdichte (externes Feld im Luftspalt) selbst bei niedrigen Feldwerten nur gering und liegen zwischen $CV = 0.015\%$ und $CV = 0.08\%$. Diese Werte sind für reale Messungen als sehr stabil einzustufen. Sie resultieren aus dem analogen Vorgabesignal über den DAC an den Stromverstärker, dem daraus erzeugten Stromsignal an die Erregerspulen sowie der Signalaufnahme über Hall-Sonden bzw. Stromzange mit nachgeschaltetem ADC.

Das resultierende Flussdichtesignal wird durch die Hall-Sonden mit einem hochauflösenden 24-Bit-ADC erfasst. Die Strommessung zur indirekten Felderfassung basiert auf einer Stromzange mit 16-Bit-ADC. Das zugehörige Messsignal ist in Abb. 4.7a dargestellt. Aufgrund des großen

Messbereichs der Stromzange (0 bis 250 A) zeigt das analoge Ausgangssignal mit 1 mV/A eine höhere Streuung, was sich in Variationskoeffizienten von $CV = 0.045\%$ bis $CV = 0.17\%$ äußert. Auch diese Werte sind jedoch für reale Messungen als stabil einzuordnen (siehe Abschnitt 4.1). Das Quantisierungsrauschen der ADCs beeinflusst insbesondere im unteren Messbereich die Messunsicherheit, was sich in höheren CV -Werten bei niedrigen Strömen und Flussdichten zeigt. Mit zunehmender Signalamplitude sinkt der CV , was die relative Messunsicherheit verringert.

Aus der Anwendung einer Stufenfunktion (Abb. 4.8) wurden folgende Quantisierungsschritte als Mindestnachweisgrenze ermittelt:

- Magnetfeldmessung (Hall-Sonden): $< 0.001\text{ T}$
- Strommessung (Stromzange): $> 0.12\text{ A}$

Diese Werte stellen für ein Eigenbaukonzept eine zufriedenstellende Auflösung selbst kleiner Magnetisierungsänderungen im niedrigen Prozentbereich. Ab 0.2 A bietet auch die Strommessung eine ausreichende Auflösung.

Konzept 2

Die Feldmessung über eine rotierende Hall-Sonde erweist sich insbesondere bei höheren Feldstärken als präzise und stabil, wie in Abb. 4.13a gezeigt. Die gemessenen Variationskoeffizienten zeigen, dass das Quantisierungsrauschen des 16-Bit-ADCs sowie das Sensorsystem im unteren Feldbereich (z. B. bei 0.0164 T) noch deutliche Streuungen verursachen ($CV = 2\%$). Mit steigender Feldstärke sinkt der CV deutlich unter 0.1 % und erreicht bei 1 T einen Wert von 0.031 %, was eine hohe Regelgüte (vgl. Abschnitt 4.1) und ein geringes Rauschen bei praxisrelevanten Feldstärken belegt.

Die effektive Mindestnachweisgrenze für externe Feldänderungen liegt bei etwa 0.00238 T (entspricht 0.02 % bei 1 T) und belegt die Eignung des Konzepts für die Detektion selbst kleiner Änderungen im externen Feld. Im Unterschied zu Konzept 1 erfolgt die Felderfassung des entmagnetisierenden Feldes (H_{ext}) nicht über das Stromsignal, sondern direkt über die Hall-Sonde. Dadurch entfällt die Unsicherheit durch die Strommessung bei niedrigen Feldstärken. Gleichzeitig nimmt die Messgenauigkeit der Hall-Sonde bei niedrigen Feldern ab, da die erzeugte Hall-Spannung im Vergleich zum Gesamt-Rauschen von Sonde, Verstärker und ADC klein wird.

Die integrale Magnetisierungserfassung zeigt im leeren Zustand (ohne Probe) eine hohe Streuung ($CV = 12\%$). Mit einer SmCo-Referenzprobe reduziert sich dieser Wert signifikant auf 0.2 % (Abb. 4.13b), was den dominanten Einfluss der Spannungsinduktion der Probe auf das Messsignal bestätigt. Der hohe Rauschanteil bei Leermessungen resultiert aus einer Kombination von ADC-Rauschen und Drift des Fluxmeters bei fehlender Probe. Eine Streuung von etwa 0.001 T, ermittelt mit einer temperaturstabilen SmCo-Probe, zeigt dennoch eine gute Auflösung. Die Systemempfindlichkeit reicht damit aus, um auch geringe Magnetisierungsänderungen der Probe sowie des externen Felds zuverlässig zu erfassen. Insgesamt zeigt sich Konzept 2 als gut geeignet für stabile Feldmessungen im mittleren bis hohen Feldbereich.

Langzeitfeldstabilität von Konzept 1 und Konzept 2 im Vergleich

Die Langzeitfeldstabilität der Konzepte 1 und 2 unterscheidet sich insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Spulenkühlung. Während die Spulen von Konzept 1 aus massivem Kupferdrahtband bestehen, werden in Konzept 2 Kupferrohrwicklungen mit Wasserkühlung eingesetzt. Bei Konzept 1 führt die Spulenerwärmung bei hohen Strömen, wie in Abb. 7.3 dargestellt, zu einem Anstieg des temperaturabhängigen elektrischen Widerstands, wodurch die Feldstärke im Joch theoretisch abnimmt. Im Konstantstrombetrieb kompensiert die Stromquelle dies durch eine automatische Spannungserhöhung, sodass der Stromfluss konstant bleibt. Die Standardmessprogramme (3.2.1.2) zeigen dabei während des Betriebs keine signifikanten Ab-

weichungen der Feldstärke, was auch im Verlauf der Flussdichte $B_{\text{ext}}(t)$ über 25 min in Abb. 7.3 deutlich wird. Bei Konzept 2 konnte dank Wasserkühlung über mehrere Stunden weder ein signifikanter Temperaturanstieg noch eine Feldänderung oberhalb des Rauschniveaus festgestellt werden.

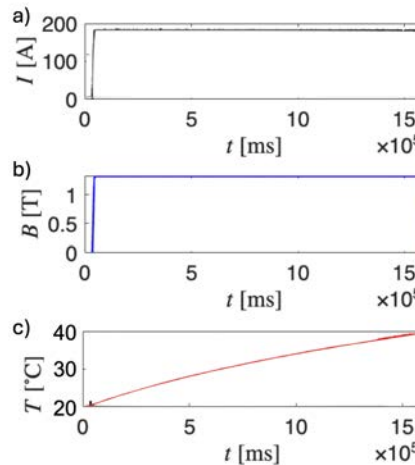


Abb. 7.3: Langzeitfeldstabilität von Konzept 1 über 25 min bei ca. 1.3 T im Luftspalt ohne Probe. a) Erregerspulenstrom zu Zeit $I(t)$ Verlauf, b) Flussdichte (Feld) zu Zeit $B_{\text{ext}}(t)$, c) Spulentemperatur zu Zeit $T_{\text{coil}}(t)$. Der Temperaturanstieg bei ca. 190 A Strom erhöht den elektrischen Widerstand der Spulen. Die Konstantstromquelle kompensiert dies durch eine höhere Spannung, um den Erregerspulenstrom I [A] und dadurch die Flussdichte B [T] (Feld) nahezu konstant zu halten.

7.1.2.2 Temperaturerfassung und Temperaturstabilität

Die Temperaturstabilität stellt eine wesentliche Voraussetzung für vergleichbare Messungen dar. In Konzept 1 kann die statisch positionierte Probe mit einer durchschnittlichen Abweichung von ± 0.15 $^{\circ}\text{C}$ über die Temperaturspanne präzise geregelt werden. In Konzept 2 gestaltet sich die Regelung aufgrund der Luftmassenbewegung der rotierenden Probe schwieriger, was sich in einer durchschnittlichen Stabilität von ± 0.25 $^{\circ}\text{C}$ äußert. Die Konzepte 3 und 4 basieren ausschließlich auf Temperatur und Zeit als aktive Regelgrößen und erfordern daher eine besonders hohe Stabilität. Konzept 3 erreicht durch direkte Proben temperierung eine Temperaturstabilität von ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ und erlaubt dadurch präzise Untersuchungen zeitabhängiger Verluste unter konstanter Temperatur. Zur schnelleren Abkühlung, insbesondere für Rücklauf-Temperaturkurven (vgl. Abb. 5.10) und die Erfassung reversibler Anteile, sind Lüfter installiert, die bei einer Über- oder Unterschreitung von 5 % der Solltemperatur aktiviert werden.

Da die Heizplattentemperatur an mehreren Stellen zur Regelung herangezogen wird, liegt die tatsächliche Proben temperatur in der Regel knapp unterhalb oder auf dem Sollwert (vgl. Abb. 4.16). Für die indirekte Temperaturregelung mittels Bauraumtemperierung in Konzept 3 wird eine konstante Umgebungstemperatur von 28 $^{\circ}\text{C} \pm 0.015$ $^{\circ}\text{C}$ über mehrere Tage erreicht (vgl. Abb. 4.15). Diese hohe Regelgüte ermöglicht Viskositätsmessungen ohne signifikanten Temperatureinfluss und erhöht die Aussagekraft der Messergebnisse. In Konzept 4 führen, ähnlich wie in Konzept 2, Luftmassenbewegungen zu Temperaturschwankungen. Die Stabilität liegt hier bei etwa ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$.

7.1.3 Funktionsbezogene Einordnung der Konzepte

Die Einordnung der Konzepte erfolgt anhand der Hauptmessziele: Entmagnetisierungskurven (7.1.3.1), Viskositätsmessungen (7.1.3.2), Streufeldvisualisierungen (7.1.3.3) und mechanische Drehmomentmessungen (7.1.3.4). Damit wird die Eignung der Konzepte in Bezug auf die Messziele diskutiert. Neben den validierenden Vergleichsmessungen mit konventionellen Techniken werden die Stärken, Einschränkungen und spezifischen Anwendungsmöglichkeiten jedes Konzepts aufgezeigt.

7.1.3.1 Entmagnetisierungskurven

Während der State-of-the-Art-Hysteresegraph integrale Magnetisierungsmessungen unter Feld- und Temperaturvariationen im magnetisch geschlossenen Kreis ermöglicht, befinden sich die Proben in allen Prüfstandskonzepten im offenen bzw. teiloffenen magnetischen Kreis. Hysteresegraphen erreichen typischerweise maximale Feldstärken von ± 1900 kA/m bei einer Feldänderungsrate von 0.5 T/s und Temperaturen von Raumtemperatur bis ca. 200 °C mit einer Heizrate von ca. 0.67 °C/s (vgl. Tab. 7). Konzept 1 erlaubt klassische $J(H)$ - und $J_{\text{rec}}(H)$ -Messungen in Bezug auf das externe Feld mit bis zu ± 1400 kA/m bei Temperaturen von 20 bis 260 °C (vgl. Tab. 12). Die Erfassung erfolgt über Hall-Sonden im Luftspalt und entspricht einer quasi-integralen Messung (vgl. Abschnitt 3.2.1.1). Durch das Elektrolechjoch lassen sich schnelle Feldänderungen realisieren, sodass B ohne angelegtes Feld mit einer Restremanenz von nahezu 0 kA/m bzw. 0 T gemessen werden kann. Mit einer maximalen Feldänderungsrate von etwa 10 T/s und einer Heizrate von 1.3 °C/s werden wesentlich höhere Messgeschwindigkeiten erreicht.

Konzept 2 ermöglicht im Vergleich höhere Feldstärken von bis zu 1910 kA/m bei Temperaturen bis 180 °C (vgl. Tab. 13). Der Unterschied zu Konzept 1 liegt in der Messmethodik: Während bei Konzept 1 auch unter angelegtem Feld die totalen Magnetisierungsänderungen erfasst werden, können in Konzept 2 durch die Probenrotation ausschließlich irreversible Magnetisierungsänderungen ohne externes Feld gemessen werden (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.3). Zudem lassen sich bei Konzept 2 im Vergleich zu Konzept 1 keine Feldrichtungsänderungen realisieren, da nur eine unipolare DC-Stromversorgung vorliegt. Die praktische Feldänderungsrate ist hier durch die Rotationszeit der Probe begrenzt, sodass bei normaler Rotationsgeschwindigkeit von 10 s pro Umdrehung nur alle 10 s eine Feldänderung appliziert werden kann.

Ein weiteres Standardmessgerät für Entmagnetisierungsmessungen ist das VSM, das im vollständig offenen Kreis arbeitet und höhere Feldstärken von bis zu 16 T sowie Temperaturen von –273 bis 730 °C ermöglicht (Tab. 8). Allerdings ist das System auf spezifische Probenformen limitiert. Die maximalen Feldwechsel betragen 1.14 T/min (0.019 T/s), während Temperaturänderungen mit einer Heizrate von 0.167 °C/s bzw. einer Abkühlrate von 0.1 °C/s erfolgen. Diese Einschränkungen machen anwendungsorientierte Feld- und Temperaturbelastungsszenarien kaum möglich. Die Prüfstandskonzepte erlauben hingegen die Untersuchung unterschiedlichster Probengeometrien der gängigsten Größen ohne aufwändige Probenpräparation sowie bei wesentlich höheren Feld-, Heiz- und Abkühlraten. Im Gegensatz zu den feldentmagnetisierenden Konzepten 1 und 2 im teiloffenen Kreis ermöglichen die Konzepte 3 und 4, ähnlich wie das VSM, einen vollständig offenen magnetischen Kreis. Dadurch ist eine unbeeinflusste Magnetisierungsmessung ohne Wechselwirkungen mit dem Elektrolechjoch möglich. Die Messung erfolgt mittels Helmholtz-Messspulen bei Probentemperaturen von 20 bis 260 °C (vgl. Tab. 14). Die direkte Temperaturregelung der Probe ermöglicht schnelle Änderungen mit einer Heizrate von ca. 0.7 °C/s. In Kombination mit externen Lüftern sind Abkühlraten bis zu 0.15 °C/s erreichbar. Konzept 3 liefert durch sein Messprinzip (Abschnitt 7.1.1.2) eine höhere Auflösung und geringere Streuung als Konzept 4, das für Field Mapping vorgesehen ist.

Zusammenfassend bietet Konzept 1 den größten Funktionsumfang für feldabhängige Entmagnetisierungskurven, sowohl für klassische als auch für schnelle, pulsbasierte Messungen zur totalen und irreversiblen Magnetisierung. Konzept 2 ermöglicht höhere Feldstärken und die Erfassung von $J_{\text{rec}}(H)$ -Kurven, besonders geeignet für Field-Mapping. Konzept 3 erlaubt temperaturbasierte Messungen mit hoher Auflösung für quantitative $J(T)$ -Analysen. Konzept 4 dient primär dem Field Mapping und erzielt eine niedrigere integrale Auflösung. Die Konzepte kombinieren hohe Feld- und Temperaturdynamik mit flexiblen Probengeometrien und ermög-

lichen praxisnahe Messungen sowohl für reversible als auch irreversible Magnetisierungsänderungen.

7.1.3.2 Temperatur- und feldabhängige Viskositätsmessungen

Bei Konzept 1 zeigten sich nach anfänglichen Versuchen der zeitabhängigen Viskositäts-erfassung Probleme bei der Bestimmung des Magnetisierungswerts auf Basis des reinen von der Probe ausgehenden Streufelds unter angelegtem Feld. Abb. 7.4 zeigt das Prinzip, bei dem der externe Flussdichtewert $B_{\text{ext}}(I)$ aus Leermessungen ohne Probe ermittelt und anschließend vom gemessenen Gesamtwert $B_{\text{tot}}(I)$ unter angelegtem Feld (Hall-Sonde) subtrahiert wird. Dadurch ergibt sich theoretisch nur der Anteil des Felds, der von der Probe stammt und kann in einen quasi-Polarisationswert umgewandelt werden.

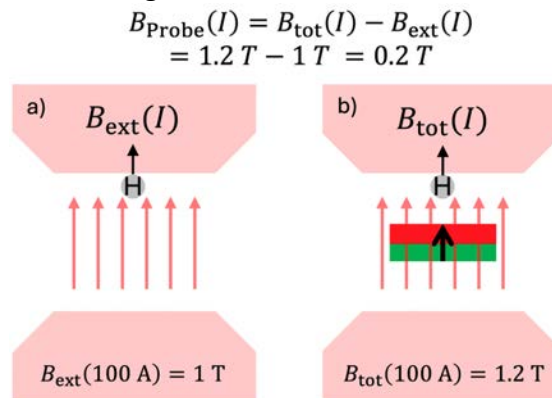


Abb. 7.4: Schematische Darstellung zur Bestimmung der quasi integralen Probenmagnetisierung auf Basis des Subtraktionsverfahrens zur Messung bei angelegtem Feld mittels Hall-Sonde H . a) Messung der externen Flussdichte $B_{\text{ext}}(I)$ (Leermessung ohne Probe) als Funktion des Stroms. b) Messung der totalen Flussdichte $B_{\text{tot}}(I)$, die sich aus dem externen Feld und dem Feld der Probe ergibt, als Funktion des Stroms. Der von der Probe erzeugte Flussdichteanteil wird durch Subtraktion des externen Flussdichtewertes ohne Probe vom totalen Messwert bestimmt.

Praktisch führen unterschiedliche Probenpositionen und Probengeometrien bei diesem Vorgehen allerdings zu lokal variierenden Sättigungseffekten in den Polschuhen, was zu zusätzlichen Fehlern führt. Deshalb wird die Magnetisierung der Probe bei der Viskositätsmessung ohne externes Feld ($H_{\text{ext}} = 0$) erfasst. Nach jedem Feldpuls folgt ein feldfreier Abschnitt. Zur Erfassung der irreversiblen Magnetisierung dient ein schneller Feldpuls, wodurch die maximale Feldänderungsrate von 10 T/s (vgl. Tab. 12) zur Anwendung kommt, um zeitabhängige Verluste möglichst gering zu halten. Lediglich für die Bestimmung der reversiblen Suszeptibilität, bei der es nicht auf Absolutwerte, sondern auf die Steigung der Polarisation zum Feld ankommt, wird unter angelegtem Feld gemessen. Die Ermittlung der irreversiblen Suszeptibilität sowie der Viskosität erfolgt in Konzept 1 somit über eine pulsierende Feldbelastung. Diese basiert auf kurzen Pulsen anstelle eines Dauerfelds, wodurch die thermische Belastung der Erregerspulen zusätzlich reduziert wird. Bereits nach 30 Pulsen (ca. 180 s effektive Feldzeit) ist meist eine ausreichende Abnahme der Probenpolarisation, insbesondere im irreversiblen Bereich der $J(H)$ -Kurven erzielbar.

In Konzept 2 hingegen führt die Rotation der Probe durch das entmagnetisierende Feld und daraufhin durch die Helmholtz-Messspule (Magnetisierungserfassung) schon bauartbedingt zu einer variierender (recoil) Feldbelastung. Hierbei ermöglichen die wassergekühlten Erregerspulen einen Dauerbetrieb des externen Feldes. Aufgrund des großen Rotorscheibendurchmessers (Probenteller) beträgt die Messzeit pro Umdrehung etwa 10 s. Der effektive Beitrag des entmagnetisierenden Felds pro Zyklus, betrachtet nur für die Zeitintervalle, in denen $B_z > 0.99 B_{\text{ext}}$, beträgt $\sum t_{\text{eff}} \approx 0.2 \text{ s}$ (vgl. Abb. 7.5). Hierdurch werden mehrere Umdrehungen erforderlich, um ein vergleichbares viskoses Verhalten wie in Konzept 1 zu erfassen und erst nach mehr als 75 Umdrehungen (750 s) kann eine ausreichend quantifizierbare Abnahme über

die Zeit festgestellt werden. In Bezug auf den magnetischen Viskositätsparameter, der bei externen Feldern gemäß Gl. (12) über χ^{rev} angepasst werden muss, fehlt dem Prüfstandskonzept im Vergleich zu Konzept 1 die Möglichkeit, reversible Änderungen zu erfassen, da die Probe ohne Feldeinfluss durch die Helmholtz-Messspule rotiert. Infolgedessen treten systematische Abweichungen auf, die sich als Bias im Wert von S_v äußern.

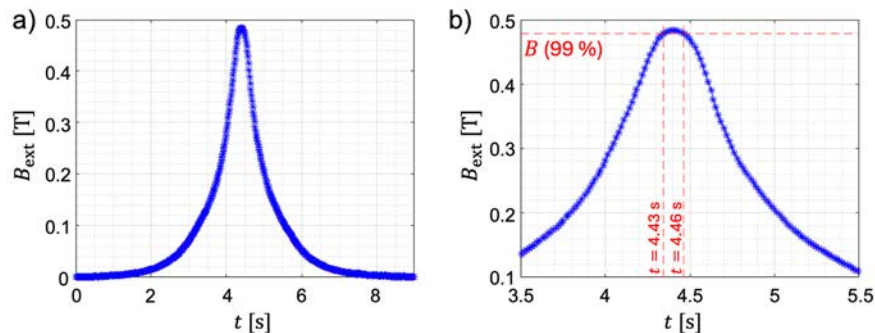


Abb. 7.5: Externe Feldbelastung $B_{\text{ext}}(t)$ als Funktion der Zeit von Konzept 2 (Rotation der rotierenden Hall-Sonde durch das entmagnetisierende Feld des Elektromagneten). a) Gesamtübersicht. b) Bestimmung der 1 %-Abweichung vom Maximalwert, basierend auf den Schnittpunkten des Signalverlaufs mit 99 % der maximalen Amplitude zur Bestimmung der durchschnittlichen Belastungsdauer ($\sum t_{\text{eff}}^{0.99} \approx 0.2 \text{ s}$) pro Umdrehung.

Ähnlich arbeitet das VSM: Bei konstantem Feld wird die Probe bewegt, wodurch in den Pick-up-Spulen eine Spannungsinduktion entsteht (vgl. Abschnitt 2.5.3.2). Das VSM bietet weitere technische Vorteile: Die Proben lassen sich zuvor vollständig aufmagnetisieren, das externe Feld entspricht einem offenen Kreis ohne Polschuh- und Sättigungseffekte und die Magnetisierungserfassung über die Pick-up-Spulen-Anordnung (vgl. Abb. 2.32) ist präziser und deckt einen größeren Feld- und Temperaturbereich ab. Allerdings sind die Probenmaße, wie in Abschnitt 2.5.3.2 aufgeführt, stark limitierend, weshalb vergleichbare Studien, wie in dieser Arbeit stattgefunden haben, aufgrund der zerstörenden Probenpräparation wesentlich mehr Zeit erfordern. Messungen über Probengeometrie oder Segmentierung sind zudem messtechnisch problematisch aufgrund der maximalen Probenmaße. Konzept 1 zeigt hier seine Stärken: Es ermöglicht zwar weniger auflösende, aber stabile Messungen, wie in Abschnitt 7.2.3.1 diskutiert, und erlaubt die Untersuchung einer großen Anzahl unterschiedlicher Probengeometrien und Segmentierungszustände.

Für die temperaturabhängige Viskosität und die Messung des neu eingeführten temperaturbasierten Viskositätsparameters wurde Konzept 3 entwickelt. Durch die Rotation der Probe um ihre Magnetisierungsachse (Abschnitt: 7.1.1.2) liefert Konzept 3 präzisere Messergebnisse als Konzept 2 und Konzept 4 (vgl. Abb. 7.2). Die direkte Temperaturregelung der Probe ermöglicht Aufheizraten von ca. 0.7 °C/s , wodurch direkte temperaturabhängige Verluste ohne signifikante zeitabhängige Beiträge erfasst werden können. Die Stabilität von $\pm 0.1 \text{ °C}$ erlaubt die präzise Messung zeitabhängiger Verluste für die Viskositätsbestimmung. Für die Erfassung reversibler temperaturabhängiger Änderungen ermöglichen die externen Lüfter mit Abkühlraten von bis zu 0.15 °C/s (vgl. Tab. 14) eine effiziente Lösung. Ein anfängliches Überspringen sowie langfristige Temperaturabweichungen konnten durch manuelle PID-Optimierung größtenteils ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend bietet Konzept 1 (feldbasiert) mit seiner hohen effektiven Feldzeit und der Erfassung sowohl reversibler als auch irreversibler Änderungen den größten Leistungsumfang zur Bestimmung des magnetischen Viskositätsparameters. Konzept 2 (feldbasiert) weist aufgrund der dynamischen Belastung eine geringere effektive Feldzeit auf und erfasst ausschließlich irreversible Änderungen. Das VSM erlaubt reversible und irreversible Messungen bei höheren Feldstärken und höherer Auflösung, ist jedoch auf kleine Probenmaße beschränkt und erfordert eine zeitaufwendige (zerstörende) Probenpräparation, was die praktische Anwendbar-

keit einschränkt. Für die Erfassung des temperaturbasierten Viskositätsparameters bietet Konzept 3 (temperaturbasiert) mit präziser Temperaturregelung sowie hohen Auf- und Abkühlraten einen effizienten Aufbau zur Bestimmung des Parameters.

7.1.3.3 Field-Mapping

Die Konzepte 2 und 4 erlauben sowohl die lokale Streufelderfassung als auch integrale Magnetisierungsmessungen mit in-situ Feld- und oder Temperaturregelung (Konzept 2: Feld und Temperatur, Konzept 4: Temperatur). Diese Kombination ist mit konventionellen Geräten in dieser Form nicht realisierbar und stellt daher einen eigenständigen Ansatz dar. Zur Vergleichbarkeit sind in Tab. 16 die durchschnittlichen Messzeiten sowie die horizontale Auflösung der einzelnen Verfahren im Vergleich zum konventionellen Field-Mapper dargestellt.

Konzept 2 ermöglicht bei moderater Messdauer eine horizontal aufgelöste Streufelderfassung mit einem horizontalen Mindestrasterabstand von etwa 0.4 mm in x -Richtung und 0.33 mm in y -Richtung durch Rotation der Probe. Ein Standard-Scan mit 30 y -Schritten und 30 Umdrehungen entlang der x -Achse mit je 30 s pro Umdrehung dauert etwa 12 Minuten. Konzept 4 erreicht mit 120 x -, y -Zeilen innerhalb von 3 Minuten nicht nur eine höhere Messgeschwindigkeit, sondern auch eine höhere horizontale Auflösung von etwa 0.16 mm in x - und y -Richtung, jedoch ausschließlich temperaturbasiert, ohne externes Feld.

Tab. 16: Durchschnittliche Messzeiten sowie die horizontale Auflösung (Schrittweite) zum Field-Mapping eines Standardquadermagneten $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$.

Verfahren	Feldkomponenten (Sonde)	x [mm]	y [mm]	Dauer [min]
Konzept 2	B_x, B_y, B_z	0.4	0.33	12
Konzept 4	B_z	0.16	0.16	2
Field-Mapper (Senis)	B_x, B_y, B_z	0.01	0.01	6

Bei Konzept 2 limitiert die Probenfixierung (4 mm z -Höhe) den minimalen Luftspalt auf etwa 4 mm. Zusätzlich sorgt die Wärmestrahlung zu einer erhöhten Sondentemperatur, weshalb trotz Temperaturkompensation der Abstand von ca. 5 mm gewählt wurde.

Konzept 4 ermöglicht eine geringere Sondenhöhe ab 2 mm. Aufgrund der x, y -Rasterung befindet sich die Sonde jedoch dauerhaft über der Probe. Die resultierende Wärmestrahlung der Probe (bis zu 260 °C) sorgt für einen Anstieg der Hall-Sonden-Temperatur, weshalb diese in einem aktiv gekühlten Aluminiumkörper installiert wurde (vgl. Abb. 3.26 (D)). Dadurch werden Temperaturanstiege der Sonde auf maximal 1–2 °C auch bei großflächigen Proben (z. B. $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$) begrenzt.

Im Vergleich zu konventionellen Hall-basierten Field-Mappern (Tab. 6) mit einem minimalen Sondenabstand $< 0.5 \text{ mm}$, einer Positionierungsgenauigkeit $< 0.05 \text{ mm}$ und einer Feldauflösung von ca. 0.0001 T (Messbereich $\pm 2000 \text{ mT}$) zeigt Konzept 4 mit einem Positionierungsfehler von etwa 0.4 mm sowie einer praktischen Auflösung von ca. 0.0002 T leichte Schwächen sowohl in der horizontalen Ortsauflösung (bedingt durch die Schrittmotorweite) als auch in der technischen Auflösung der Streufelderfassung.

Allerdings ermöglichen konventionelle Geräte keine simultane Feld- oder Temperaturvariation, keine automatisierte Zeitsteuerung und keine integrale Messung, die zur Interpretation lokaler Änderungen erforderlich ist.

Zusammenfassend eignet sich Konzept 2 (feldbasiert) zur Analyse vollständiger Hysteresekurven, zeigt jedoch aufgrund des mechanischen Aufbaus und der geringen Rotationsgeschwindigkeit eine reduzierte horizontale Auflösung, während Konzept 4 (temperaturbasiert) eine hohe horizontale Auflösung ermöglicht und besonders zur Untersuchung temperaturinduzierter lokaler Inhomogenitäten geeignet ist.

7.1.3.4 Mechanische Drehmomentmessungen

Die Drehmomentmessung dient der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Dipolmoment der Probe $\vec{m}$ und dem externen Magnetfeld $\vec{B}$ anhand des entstehenden mechanischen Drehmoments $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$ [34, p. 148]. Im Gegensatz zur realen Anwendung im Elektromotor, in der zusätzliche Wärmeentwicklung der Erregerspulen und Permanentmagnete sowie die Motorregelung das Drehmoment beeinflussen, wird in diesem Aufbau basierend auf Konzept 2 durch wassergekühlte Erregerspulen ein näherungsweise konstantes Erregerfeld erzeugt. Damit wird nahezu ausschließlich die direkte Wirkung des magnetischen Moments der Probe erfasst. Der Einfluss der Lagerung der Rotationsscheibe ist im Vergleich zur Größe des magnetischen Drehmoments vernachlässigbar. Erfasst wird somit das durch das magnetische Moment der Probe in Verbindung mit dem externen Feld des Jochs verursachte Drehmoment. Dabei zeigen sich sowohl feldabhängige Änderungen (vgl. Abb. 5.67) als auch zeitabhängige Abnahmen im Drehmomentsignal (vgl. Abb. 5.69). Dadurch lässt sich die Drehmomentabhängigkeit der Magnetisierung unter verschiedenen Feld- und Temperaturbedingungen bei paralleler Magnetisierungsmessung untersuchen.

7.1.4 Zusammenfassung der Prüfstandstechniken

Je nach Fragestellung kommen unterschiedliche Prüfstandskonzepte zum Einsatz:

- **Konzept 1** dient der Erfassung klassischer feldabhängiger Entmagnetisierungskurven sowie Rampenversuchen in Feld- und Gegenfeldrichtung und der Bestimmung des (feldbasierten) magnetischen Viskositätsparameters.
- **Konzept 2** ermöglicht feldabhängige Entmagnetisierungsmessungen mit simultanem in-situ Field-Mapping zur automatisierten Erfassung feldabhängiger Streufeldverteilungen sowie Erfassung mechanischer Wechselwirkungen durch Drehmomentmessungen.
- **Konzept 3** erlaubt temperaturbasierte Entmagnetisierungsmessungen im vollständig offenen Magnetkreis und ist für hochpräzise Langzeitmessungen (Viskosität), temperaturabhängige Stabilisierung und zur Bestimmung des temperaturbasierten Viskositätsparameter ausgelegt.
- **Konzept 4** ergänzt Konzept 3 um die Möglichkeit zur Erfassung lokaler Streufelder (Field Mapping) im offenen Kreis, wodurch sowohl temperatur- als auch zeitabhängige Streufeldverteilungen aufgenommen werden können.

Zusammengefasst zeigt Tab. 17 die Leistungsumfänge der unterschiedlichen Konzepte sowie deren Eignung hinsichtlich der entsprechenden Einflussgrößen (Prozessgrößen), der verwendeten Messmethode und der magnetischen Kreiskonfiguration.

Tab. 17: Übersicht der technischen Prozessgrößen, Messmethoden und magnetischen Konfigurationen aller Konzepte hinsichtlich ihrer praktischen Eignung.

Konzepte	Prozessgrößen				Messmethode			Magnetkreis- konfiguration
	Feldbelastung	Temperatur- belastung	Eignungsfähigkeit		Eignungsfähigkeit			
			Kurzzeit	Langzeit	integral	lokal (Field Mapping)	mechanisch	
1	konstant, wechselnd	konstant						statisch (halb offen)
2	wechselnd	konstant						dynamisch (halb offen)
3		konstant, wechselnd						offen
4		konstant, wechselnd						offen

Legende	
Farbe	Eignung
	sehr gut
	gut
	neutral
	schlecht
	nicht vorhanden

7.2 Ergebnisse und Zusammenhänge aus den Prüfstandsmessungen

Die Diskussion der Ergebnisse und Zusammenhänge der untersuchten Permanentmagnete unter Verwendung der Prüfstandskonzepte und state-of-the-art-Verfahren gliedert sich in mehrere Abschnitte. In Abschnitt 7.2.1 wird die direkte und zeitabhängige Entmagnetisierung behandelt, einschließlich feld- und temperaturbasierter Effekte. Abschnitt 7.2.2 diskutiert die Streufeldaufnahmen im Hinblick auf die integrale Magnetisierung und deren Informationsgehalt. Die Ergebnisse der Viskositätsparametermessungen werden in Abschnitt 7.2.3 betrachtet, gefolgt von der Einführung des temperaturbasierten Viskositätsparameters in Abschnitt 7.2.4. Abschnitt 7.2.5 erörtert die Anwendung beider Verfahren anhand von Fluktuationfeld und Fluktuationstemperatur, während Abschnitt 7.2.6 die Langzeitstabilitätsabschätzung einschließlich Implementierung und Validierung in FEA behandelt. Abschließend werden in Abschnitt 7.2.7 Ansätze zur magnetischen Stabilisierung zur Minimierung zeitabhängiger Verluste und in Abschnitt 7.2.8 die mechanische Drehmomentmessung als anwendungsorientierte Charakterisierungsmethode diskutiert, anhand derer Rückschlüsse auf den Magnetisierungszustand der Proben gezogen werden können.

7.2.1 Direkte und zeitabhängige Entmagnetisierung

Feld- und Temperatur

Zur gezielten Analyse geometrischer, magnetischer und temperaturbedingter Entmagnetisierungsprozesse wurden systematisch verschiedene Magnetgüten nach Tab. 11 mit definierten Koerzitivfeldstärken und Ausgangspolarisationen (Remanenzen) verglichen. Dabei wurden zwei zentrale Vergleichsansätze verfolgt:

1. Gleiche Materialgüte, variierende Probenform: Variation des Entmagnetisierungsfaktors und des inneren Selbstfeld H_{self} .
2. Gleiche Geometrie, unterschiedliche Magnetgüte: Variation von Remanenz und Koerzitivfeld.

Untersucht wurden insbesondere Quaderproben mit inhomogener innerer Selbstfeldverteilung und Kugelmagnete mit homogener Verteilung, die als Referenz für die ideale Feldverteilung dienen.

7.2.1.1 Feldbasierte Entmagnetisierung

Zur Beurteilung der feldbasierten Entmagnetisierung wurden unterschiedliche Probengüten untersucht. Abb. 5.4 zeigt, dass die maximale Feldstärke von Konzept 1 (1400 kA/m) nur für die Proben N35, N52 und N52-M bei Raumtemperatur zur vollständigen Entmagnetisierung ausreicht. Konzept 2 erreicht bis zu 1910 kA/m und kann alle ausgewählten Proben vollständig entmagnetisieren (vgl. Abb. 5.5). Die Entscherung der experimentellen $J(H_{\text{ext}})$ -Kurven auf das interne Feld $J(H_{\text{int}})$ erfolgt über die mittels Simulation bestimmten Entmagnetisierungsfaktoren. Konzept 2 zeigt im Kniebereich der $J(H)$ -Kurven rundere Entmagnetisierungskurven als Konzept 1, was auf die inhomogenere Feldverteilung und die dynamische Probenposition zurückgeführt werden kann (vgl. Abb. 7.1), wodurch insbesondere im Kniebereich stärkere Inhomogenitäten entstehen.

Quaderproben mit unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren bei gleicher Koerzitivfeldstärke (Abb. 5.6) zeigen bezogen auf das externe Feld mit zunehmendem Faktor eine abnehmende Steigung zwischen Kniepunkt und Koerzitivfeld. Nach Entscherung auf das interne Feld sind die Unterschiede weitgehend aufgehoben; nur im Kniebereich bleiben geringe Abweichun-

gen durch die Verwendung des statischen Mittelwerts des Entmagnetisierungsfaktors vorhanden.

Kugelmagnete ($N = 1/3$) mit homogener innerer Selbstfeldverteilung bilden ein enges Bündel an $J(H_{\text{ext}})$ -Kurven (Abb. 5.7) und erlauben durch die homogene Feldverteilung eine bessere Entschärfung auf das interne Feld. Zum Vergleich mit den inhomogenen Feldverteilungen der Quaderproben (vgl. Abb. 2.6) wurde eine 3 mm große N35-Kugel mit Konzept 1 und dem VSM vermessen und entschärft (Abb. 5.8). Die Kugelform erlaubt eine direkte Entschärfung mit nur einem Entmagnetisierungsfaktor, während Quaderformen (Abb. 7.8) zahlreiche Feldstufen und unterschiedliche Arbeitspunkte zeigen, die sich feldabhängig verschieben und so die Entschärfung erschweren.

7.2.1.2 Temperatur- und zeitbasierte Entmagnetisierung im offenen Kreis

Zur Betrachtung der temperaturabhängigen Entmagnetisierung und der daraus ableitbaren Übergangstemperaturen sind in Abb. 5.9a verschiedene Probengüten dargestellt. Mit zunehmender Koerzitivfeldstärke steigen die Übergangstemperaturen. Der Vergleich von N35 und N52 zeigt zudem einen zusätzlichen Einfluss von $(BH)_{\text{max}}$ auf die Übergangstemperatur: Bei ähnlicher Koerzitivfeldstärke führt das höhere innere Selbstfeld der N52-Probe bereits bei Raumtemperatur zu irreversiblen Verlusten, während die N35-Probe mit geringerem Selbstfeld, ähnlich wie höherkoerzitive Proben, erst bei höheren Temperaturen ihre Übergangstemperatur erreicht. Der Vergleich reversibler und irreversibler Änderungen (Abb. 5.10) verdeutlicht, dass ab dem Übergangspunkt irreversible Verluste dominieren, während zuvor lediglich reversible Änderungen auftreten. Die Viskositätsmessungen bei Raumtemperatur (Abb. 5.27a) bestätigen diesen Trend: Die N52-Probe mit dem geringsten Koerzitivfeld zeigt die stärkste zeitabhängige Abnahme, während höherkoerzitive Proben wie N35-UH kaum Veränderungen aufweisen.

Aufgrund von Temperaturschwankungen im Labor ($> 2^\circ\text{C}$) und der sehr geringen zeitabhängigen Entmagnetisierung hochkoerzitiver Magnetproben wurden stabile Umgebungsbedingungen durch den Einsatz einer Klimakammer mit $\pm 0.15^\circ\text{C}$ Stabilität sichergestellt (Abb. 5.28, Kapitel 3.2.3.1). Dadurch konnte selbst bei der N35-UH Probe ein leichter zeitabhängiger Trend festgestellt werden, der mit einer Messstreuung von 0.00015 T jedoch an der Nachweisgrenze des Messaufbaus liegt. Nachdem zunächst die Probengüten variiert wurden, erfolgt im nächsten Schritt die Untersuchung der Probenformen für unterschiedliche Arbeitspunkte (Entmagnetisierungsfaktoren, Abb. 7.6). Aus Abb. 5.9b lässt sich eine steigende Übergangstemperatur mit abnehmendem Entmagnetisierungsfaktor feststellen, was sich auch in den Langzeitmessungen (Abb. 5.29) durch abnehmende zeitabhängige Verluste widerspiegelt. Neben der Koerzitivfeldstärke erweist sich damit auch die Probenform als maßgeblich für den Arbeitspunkt auf der $J(H)$ -Hysteresekurve. Wie in Abb. 7.6 gezeigt, treten bei Proben nahe dem Koerzitivfeld die höchsten zeitabhängigen Verluste und die niedrigsten Übergangstemperaturen auf. Der Abstand des Arbeitspunkts zum Koerzitivfeld ist dabei entscheidend für die Stabilität. Proben mit gleichem Abstand zum Koerzitivfeld, jedoch unterschiedlichen Güten und Probenformen, zeigen vergleichbare Übergangstemperaturen. So weisen in Abb. 5.9 die Proben N52-M (D) mit $N = 0.82$ und N52 (C3) mit $N = 0.74$ beide eine Übergangstemperatur von etwa 50°C auf. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in den zeitabhängigen Verläufen: Die N52-SH-Probe in Abb. 5.27 weist mit $S = -0.0014$ eine vergleichbare Steigung auf wie die N52-Probe mit $N = 0.74$ in Abb. 5.29 mit $S = -0.0016$. Die spezifischen Auswirkungen des Entmagnetisierungsfaktors im offenen Kreis werden in Abschnitt 7.2.1.3 diskutiert.

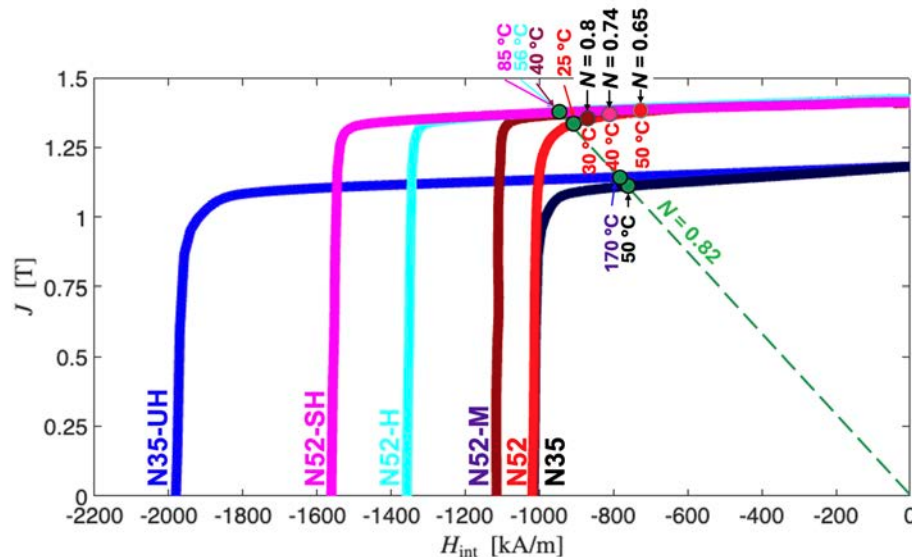


Abb. 7.6: $J(H)$ -Kurven ausgewählter Proben mit markierten Arbeitspunkten (markiert durch Entmagnetisierungsfaktoren N) und Übergangstemperaturen aus Abb. 5.9. Grün: Arbeitspunkte mit Entmagnetisierungsfaktor $N = 0.82$. Rot: N52-Probe mit variierenden Entmagnetisierungsfaktoren $N = 0.80, 0.74, 0.65$. Es zeigt sich, dass die Übergangstemperaturen mit abnehmendem Abstand zum Koerzitivfeld abnehmen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Entmagnetisierungsfaktor im magnetisch offenen Kreis maßgeblich bestimmt, wie empfindlich eine Probe auf äußere Belastungen reagiert.

7.2.1.3 Zusammenhang zwischen Entmagnetisierungsfaktor, Arbeitspunkt, Feld und Temperatur

Das Selbstfeld H_{self} bestimmt über die Arbeitsgerade den Arbeitspunkt auf der $J(H)$ -Hysteresekurve. Dieser Arbeitspunkt legt fest, wie stabil die Magnetisierung gegenüber äußeren Einflüssen ist. Externe Felder verschieben den Arbeitspunkt entlang der Arbeitsgeraden und können, abhängig vom Abstand zum Koerzitivfeld, zu einer teilweisen oder vollständigen Entmagnetisierung führen (vgl. Abb. 2.10). Eine Temperaturerhöhung beeinflusst dagegen Remanenz und Koerzitivfeld, die über ihre Temperaturkoeffizienten abnehmen. Dadurch kann sich auch ohne äußere Felder der Arbeitspunkt dem Koerzitivfeld annähern, was die Stabilität reduziert und Entmagnetisierungsprozesse begünstigt (vgl. Abb. 2.11). Der Zusammenhang von Entmagnetisierungsfaktor, Temperatur und Feld zur Polarisation ist in Abb. 7.7 dargestellt ($N = 0.80$ (schwarz), $N = 0.56$ (blau), $N = 0.30$ (grün)).

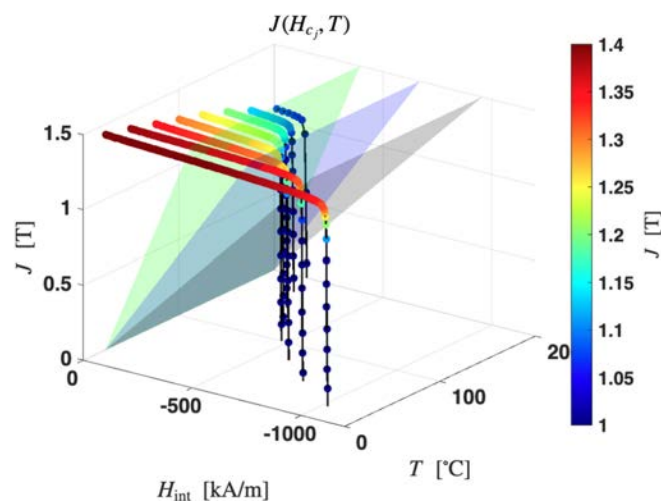


Abb. 7.7: $J(H, T)$ -Kurven mit unterschiedlichen Arbeitsgeraden, dargestellt als Flächen (Probengeometrien mit $N = 0.80$, schwarz; $N = 0.56$, blau; $N = 0.30$, grün). Es zeigt sich das bereits in Abb. 2.10 dargestellte Verhalten einer abnehmenden Koerzitivfeldstärke mit zunehmender Proben temperatur, wodurch der Arbeitspunkt entlang der Arbeitsgeraden immer näher an das Koerzitivfeld rückt.

Neben dem bekannten Temperaturverhalten zeigt sich, dass höhere Entmagnetisierungsfaktoren zu höheren Selbstfeldern und damit zu einer geringeren Temperaturresistenz führen.

Neben dem quantitativen Wert des Entmagnetisierungsfaktors spielt die Probenform eine wesentliche Rolle. Während Kugelmagnete eine homogene Selbstfeldverteilung aufweisen, stellt der Entmagnetisierungsfaktor bei Quadern nur einen Mittelwert dar. In solchen Geometrien ist das Selbstfeld inhomogen verteilt: Im Zentrum tritt aufgrund erhöhter Selbstfelder irreversible Entmagnetisierung früher auf, während die Randbereiche stabil bleiben (vgl. Abb. 2.6). Entsprechend existiert eine Bandbreite von Arbeitspunkten, von denen einige bereits im Ausgangszustand nahe am Koerzitivfeld liegen (z.B. bei $N > 0.80$, Abb. 7.13). Abb. 7.8 zeigt dies exemplarisch für $N = 0.82, 0.65$ und 0.33 (Würfel) mit einer $\pm 1\sigma$ -Verteilung. Im Vergleich dazu besitzen Kugeln mit homogener Feldverteilung nur eine Arbeitsgerade mit $N = 0.33$.

Die Stabilität der Magnetisierung wird dementsprechend sowohl durch den Entmagnetisierungsfaktor als auch durch die Probengeometrie bestimmt. Höhere Entmagnetisierungsfaktoren und inhomogene Selbstfelder führen zu einer Annäherung des Arbeitspunkts an das Koerzitivfeld, wodurch irreversible Entmagnetisierung bereits bei niedrigeren Temperaturen einsetzen kann.

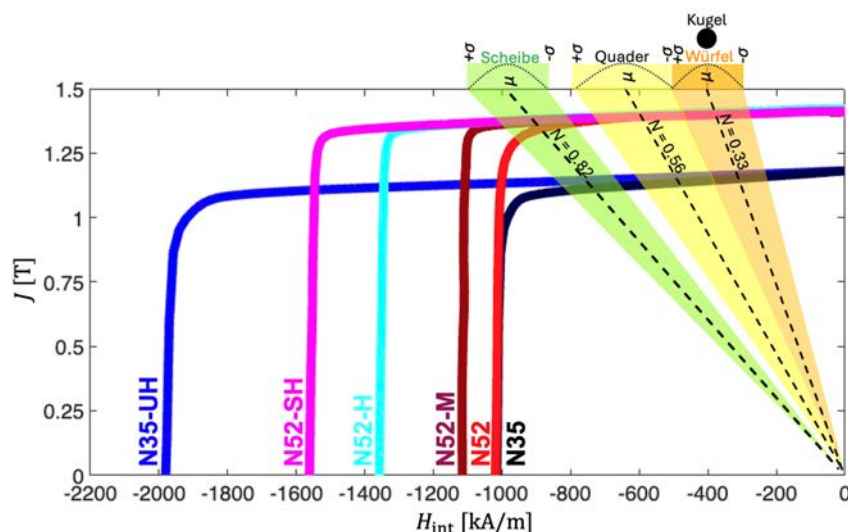


Abb. 7.8: $J(H)$ -Kurven ausgewählter Materialien mit markierten Arbeitsgeraden als Schar der inhomogenen inneren Selbstfeldverteilung im $\pm 1\sigma$ -Bereich (Simulationsergebnis). Es zeigt sich die starke Inhomogenität in den jeweiligen $\pm 1\sigma$ -Bereichen. Bei $N = 0.82$ der N52-Probe (braun) liegen Teile der inneren Selbstfelder bereits im Kniefunkt, während andere Teile noch davor liegen. Im Vergleich weist eine Kugel mit $N = 0.33$ und homogenem Selbstfeld nur einen Arbeitspunkt auf. Ein Würfel mit ebenfalls $N = 0.33$ zeigt eine stärkere Verteilung.

7.2.1.4 Vergleich der Belastungsarten

Unipolare Feldrampe

Bei der Betrachtung einer konstanten und einer pulsierenden Feldbelastung über vergleichbare Zeitskalen zeigt Abb. 5.11, dass die Signalform: Feldpuls im Vergleich zu Konstantfeld, eine untergeordnete Rolle spielt. Das Hauptmerkmal ist die effektive Wirkzeit des angelegten Feldes, aus der sich ableiten lässt, dass die Signalform ein Resultat aus direkten und zeitabhängigen Verlustanteilen ist. Während bei schnellen Pulsen oder Dreieckssignalen der zeitabhängige Verlustanteil gering bleibt, ist er bei langsamen Rechteckpulsen deutlich erhöht, sodass die Wirkung der Signalform stets als Funktion der Zeit zu sehen ist.

Bipolare Feldrampe

Die in Abb. 3.7 schematisch dargestellten beidseitig anwachsenden Teilschleifen repräsentieren eine realitätsnahe Belastungssituation, wie sie bei transienten Abweichungen zwischen Rotorlage und lokalem Magnetfeld im Elektromotor, beispielsweise in einer PMSM, auftreten können.

nen. Abb. 5.12 zeigt die bipolare Feldrampe. Ausgehend vom Arbeitspunkt wird die Probe mit gleich hohen $\pm H_{\text{ext}}$ Anteilen belastet. Im reversiblen Bereich vor dem Kniepunkt zeigt sich bei $+H_{\text{ext}}$ ein Anstieg in Richtung Sättigungspolarisation J_s , wie exemplarisch in Abb. 7.9a dargestellt. Nach dem Kniepunkt überwiegt bei $-H_{\text{ext}}$ aufgrund des Selbstentmagnetisierungsfeldes ($N \cdot J / \mu_0$) der negative Beitrag zum inneren Selbstfeld gemäß Gl. (2), sodass die Entmagnetisierung mit $-H_{\text{ext}}$ stärker ausfällt als die Aufmagnetisierung mit $+H_{\text{ext}}$. Infolgedessen verschiebt sich die Teilschleifenfolge zunehmend in Richtung $J = 0$ und es entsteht ein Offset zwischen auf- und entmagnetisiertem Zustand. Dieses Verhalten bleibt bestehen, bis die nahezu vollständige Entmagnetisierung erreicht ist (vgl. Markierung in Abb. 5.12 und Abb. 7.9b). Ein Feldpuls in $+H_{\text{ext}}$ kann anschließend eine Wiederaufmagnetisierung bewirken, ebenso $-H_{\text{ext}}$ eine Magnetisierung in entgegengesetzter Richtung. Wird die Amplitude der bipolaren Feldbelastung reduziert, läuft J gegen Null, was zu einer vollständigen Entmagnetisierung führt (Abb. 7.9c). Zusätzlich zeigt die bipolare Feldrampe mit Konstantfeldanteil in Abb. 5.13 eine ausgeprägte Zeitabhängigkeit. Die Steigungen der Zyklen nehmen über alle Messungen hinweg ab und nähern sich der Steigung null, ohne wieder zuzunehmen. Auch hier zeigt sich der Einfluss des Selbstentmagnetisierungsfeldes, welches dazu führt, dass die negative Belastung aus $H_{\text{ext}} + H_{\text{self}}$ größer ausfällt als die positive aus $H_{\text{ext}} - H_{\text{self}}$. Dies deutet auf irreversible zeitabhängige Verluste während der Entmagnetisierungspulse hin, da gleich hohe Aufmagnetisierungspulse $+H_{\text{ext}}$ keine weitere Änderung der Steigungen bewirken (vgl. Abb. 5.13b).

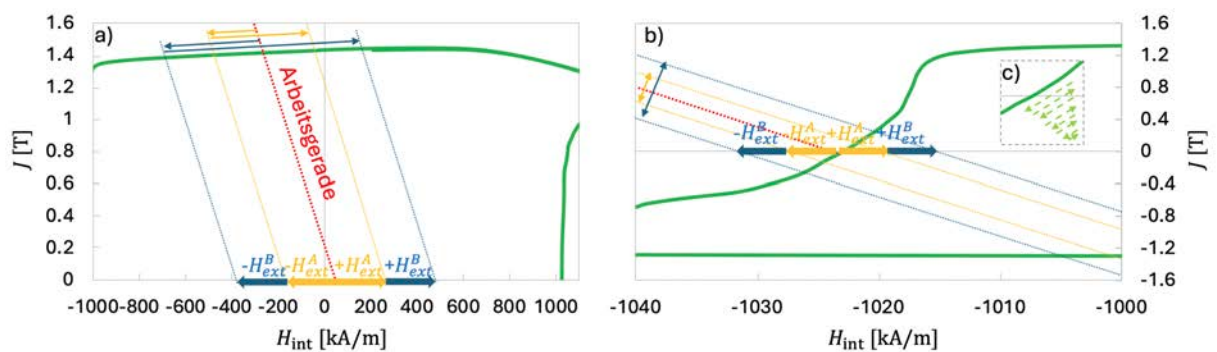


Abb. 7.9: Auswirkungen einer bipolaren Feldbelastung auf den Arbeitspunkt in $J(H)$ -Kurven. Darstellung der Arbeitsgeraden (rot) mit exemplarischer beidseitiger Verschiebung um $\pm H_{\text{ext}}^A = 250$ kA/m und $\pm H_{\text{ext}}^B = 500$ kA/m. a) Gesamtübersicht, b) Detailansicht der Koerzitivfeldregion ($J = 0$, Q2 linke Seite). Bei der geringen Feldstärke $+H_{\text{ext}}^A$ wird der Arbeitspunkt (Schnittpunkt Arbeitsgerade mit $J(H)$ -Kurve) noch nicht aus dem zweiten Quadranten verschoben, während der negative Beitrag $-H_{\text{ext}}^A$ dominiert. Bei der höheren Amplitude $+H_{\text{ext}}^B$ wird deutlich, dass der Arbeitspunkt der Probe in den ersten Quadranten verschoben wird, wobei einerseits eine leichte Zunahme der Polarisation, andererseits eine stärkere Abnahme zu erwarten ist, insbesondere nach dem Kniepunkt in Q2. In b) zeigt sich, dass der Einfluss des Selbstentmagnetisierungsfeldes bei $J = 0$ nicht mehr vorhanden ist, wodurch die Probe sowohl auf- als auch entmagnetisiert werden kann. Wie zusätzlich in c) durch zu- und abnehmende Pfeile markiert, führt ein Auf- und Abmagnetisieren zu einer vollständigen Entmagnetisierung.

7.2.2 Field Maps

Der Abschnitt dient der Diskussion und methodischen Abgrenzung des Informationsgehalts, der aus Field Maps gewonnen werden kann. In Abschnitt 7.2.2.1 wird die Aussagefähigkeit von Field Maps bewertet und diskutiert. Abschnitt 7.2.2.2 beurteilt, welchen Einfluss die Magnetkreis-konfiguration auf die Messungen hat, während 7.2.2.3 die feldabhängigen Effekte von Field Maps diskutiert. In Abschnitt 7.2.2.4 werden die temperaturabhängigen Field Maps und deren zeitabhängige Veränderungen diskutiert. Abschnitt 7.2.2.5 behandelt die praktische Anwendung von Field Maps für die Charakterisierung von Permanentmagneten und reflektiert deren methodische Vor- und Nachteile. Abschließend werden in 7.2.2.6 die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und im Kontext der methodischen Eignung eingeordnet.

7.2.2.1 Aussagefähigkeit von Field Maps

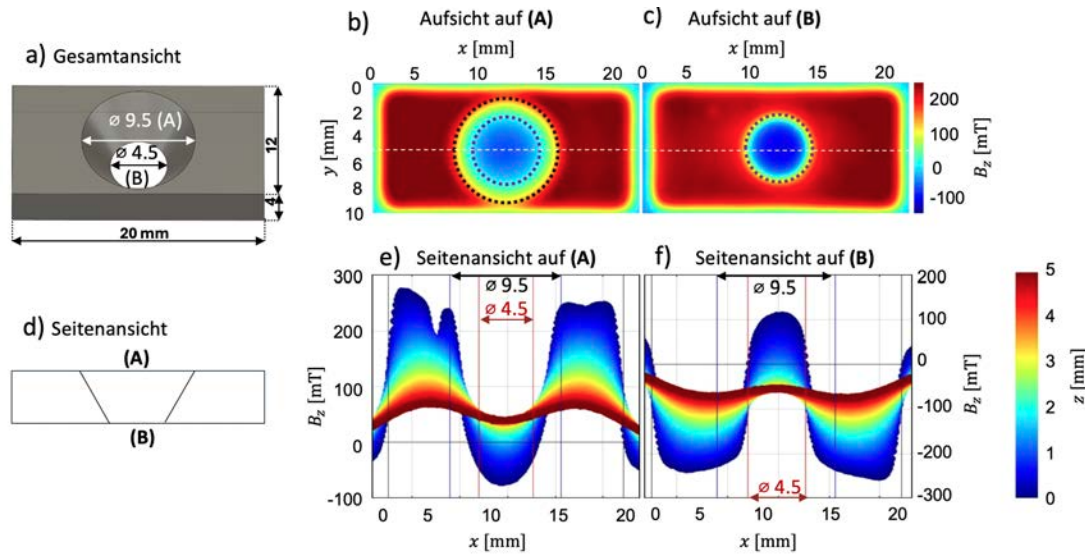


Abb. 7.10: Field Maps der „Lochprobe“. a) Schematische Übersicht der Probe mit Seitenflächen (A) und (B) sowie zugehöriger Seitenansicht in d). (b, c) Field Maps in ca. 0.5 mm Höhe über den Seitenflächen (A) in b) und (B) in c). (e, f) Seitenansichten als $B_z(x, z)$ -Darstellung in Abhängigkeit vom zunehmenden Abstand z bei $y = 5$ mm. Es zeigt sich ein inhomogenes Streufeldbild, wobei der Einfluss des größeren Durchmessers der Bohrung (Seitenfläche A) in der Seitenansicht B in f) nicht ohne Weiteres feststellbar ist.

Für ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen lokaler Feldverteilung, Hall-Sondenabstand zur Probenoberfläche und integraler Magnetisierung wurde Field-Mapping an ausgewählten Proben durchgeführt. Ein zentrales Ergebnis ist, dass die lokale Streufeldverteilung nicht direkt mit der integralen Magnetisierung gleichgesetzt werden kann. Lokale Abweichungen wie Inhomogenitäten oder Segmentgrenzen sind zwar unmittelbar über der Probe erkennbar, die Aussagekraft für die Gesamtmagnetisierung bleibt jedoch eingeschränkt.

Dies wird besonders bei asymmetrischen Strukturen deutlich, beispielsweise bei einer Probe mit konkav zulaufendem Senkloch mit 45° -Abschrägung und unterschiedlichen Durchmessern auf beiden Seiten, wie schematisch in Abb. 7.10a dargestellt. Abb. 7.10 (b, c) zeigt die Streufeldansicht oberhalb der Polflächen für Seite (A) mit großem Durchmesser in b) und Seite (B) mit kleinem Durchmesser in c). Die Seitenansichten e) und f) zeigen Linienscans entlang der x -Achse bei $y = 5$ mm mit zunehmendem Abstand in z -Richtung, wobei e) der Seitenansicht oberhalb von Seite (A) und f) oberhalb von Seite (B) entspricht. Im Bereich der Bohrung wechselt das Streufeld sein Vorzeichen. In f) ist erkennbar, dass die kleine Bohrung ($D = 4.5$ mm) bis zu einem Abstand von etwa $z = 2$ mm nahe dem Verlauf $B_z = 0$ liegt und mit größerem Abstand bis $z = 3$ mm dem Wendepunkt angenähert wird. In e) ist die kleine Bohrung auf der 9.5-mm-Seite nicht mehr eindeutig identifizierbar; auch die große Bohrung ($D = 9.5$ mm) führt nicht zu einem klaren $B_z = 0$ -Durchgang, sondern markiert bis $z = 1$ mm die Abnahme der Streufeldintensität mit dem Übergang vom magnetisierten Material zur Luftbohrung.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Streufeldverlauf und Sondenabstand zur Probenoberfläche (Polfläche) wurden drei Probenvarianten in Abb. 7.11 betrachtet: a) homogene N52-Probe, b) segmentierte N52+N52-Probe und c) segmentierte N35+N52-Probe. Field-Mapping wurde in Seitenansicht als Rampenfunktion entlang der y -Achse in der Mitte der x -Achse durchgeführt. Nach jedem 2D-Linienscan wurde der Abstand in z -Richtung von 0.6 mm bis 2.6 mm erhöht. Für ausgewählte y -Positionen wurden die Schnittpunkte mit den $B_z(y)$ -Verläufen ermittelt und als $B_z(z)$ dargestellt, ergänzt durch lineare Trendgeraden. In homogenen Bereichen zeigt sich eine nahezu lineare Abnahme von etwa $m = -50$ mT/mm, während in Bereichen mit Luft- oder Klebspalten nur etwa -28 mT/mm festgestellt werden konnten. Mit zunehmendem Abstand reduziert sich der Detailgrad deutlich, wie Abb. 7.11b zeigt, da kleinere Inhomogenitäten

genitäten wie Luftspalte zwischen Segmenten nicht mehr erfasst werden können. Umgekehrt steigt die räumliche Auflösung bei geringen Abständen.

Diese Ergebnisse verdeutlichen die methodischen Grenzen von Field Mapping: Während lokale Materialunterschiede bei geringem Abstand gut detektierbar sind, eignet sich die Methode nur eingeschränkt zur quantitativen Bestimmung der integralen Magnetisierung, insbesondere bei komplexen Geometrien.

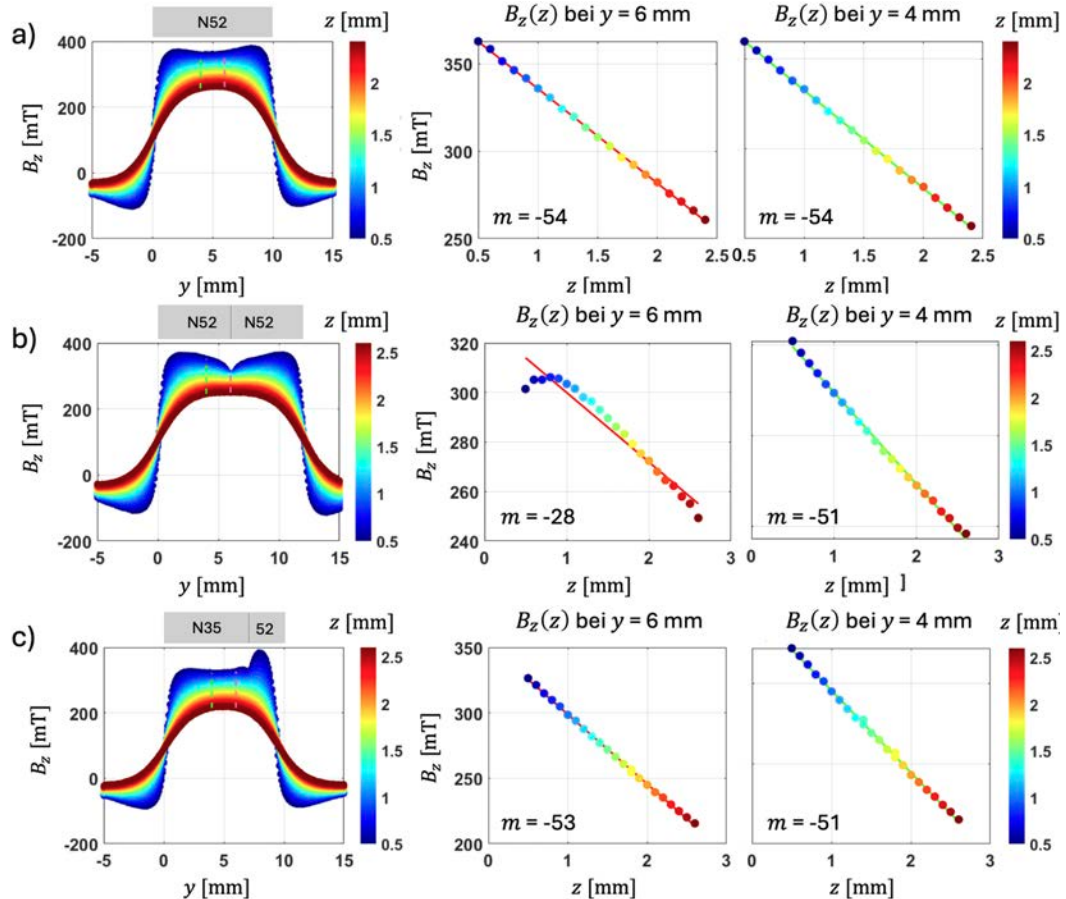


Abb. 7.11: Streufeldverlauf als Seitenansicht mit zunehmendem Sondenabstand (z -Richtung) sowie zugehörige Darstellung als $B_z(z)$ -Verlauf mit Trendgeraden. a) N52-Magnet, b) N52 segmentiert, zwei Segmente, c) N35+N52 segmentiert, siehe graue Skizzierung. Für alle Proben zeigt sich im homogenen Bereich eine lineare Abnahme des Streufelds mit zunehmendem Abstand in z -Richtung. Zusätzlich sind bei kleinen Abständen Details wie Klebspalte (Luftspalte) zwischen den Segmenten detektierbar, die mit zunehmendem Sondenabstand nicht mehr feststellbar sind.

7.2.2.2 Field Maps und der Einfluss der Magnetkreiskonfiguration

Field Maps werden grundsätzlich im offenen Magnetkreis durchgeführt, da hier das von der Probe ausgehende äußere Streufeld ungehindert messbar ist und primär die Magnetisierungsverteilung abbildet. Die Entmagnetisierung kann im offenen oder geschlossenen Magnetkreis erfolgen, jeweils mit unterschiedlichem Einfluss auf das Streufeld wie in Abb. 7.12 schematisch visualisiert.

Im offenen Magnetkreis führen Rückkopplungen inhomogener Selbstfelder und Wechselwirkungen zwischen benachbarten Bereichen zu einer komplexen Entmagnetisierungsverteilung. Die Streufeldverteilung enthält Beiträge aus lokalen Koerzitivfeldunterschieden und geometriebedingten Selbstfeldeffekten. Eine direkte Rückführung auf Materialeigenschaften ist erschwert, liefert jedoch praxisnahe Betriebsbedingungen, wie in Elektromotoren durch feldinhomogene Belastung oder Temperaturgradienten entstehen (vgl. Abb. 5.17, Abb. 5.23). Temperaturerhöhungen reduzieren Koerzitivfeldstärke und Remanenz und verschieben den Arbeitspunkt näher an den Kniepunkt; eine vollständige Ummagnetisierung allein durch Temperatur ist ohne Gegenfeld nicht möglich. Im geschlossenen Magnetkreis hingegen wirkt ein ho-

mogenes externes Feld zwischen den Polschuhen (wie in Abschnitt 6.3 durchgeführt), sodass materialbedingte Koerzitivfeldunterschiede den Entmagnetisierungsverlauf dominieren. Anschließend im offenen Kreis gemessene Streufelder lassen sich präziser intrinsischen Materialparametern zuordnen. Der kombinierte Einsatz offener und geschlossener Magnetkreise mit orts aufgelösten Field Maps ermöglicht eine differenzierte Analyse von Inhomogenitäten der Koerzitivfeldverteilung.

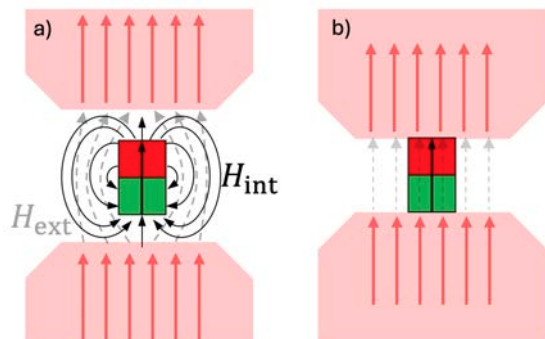


Abb. 7.12: Schematische Darstellung der beiden Magnetkreiskonfigurationen zur Entmagnetisierung von Permanentmagneten. a) Offener Kreis, bei dem das Probenmagnetfeld H_{int} durch das externe Feld H_{ext} (grau) beeinflusst wird. b) Geschlossener Kreis, bei dem das innere Feld des Magneten dem externen Feld entspricht.

7.2.2.3 Feldabhängige Field Maps

Wie in Abschnitt 5.1.3.3 beschrieben, ermöglicht Konzept 2 die vollständige Erfassung des Entmagnetisierungsvorgangs. Die Probe N52-SH in Abb. 5.21 zeigt bei 80 °C eine homogene, zunächst abnehmende und anschließend in entgegengesetzter Richtung zunehmende Feldverteilung. Der Feldpeak bleibt über alle Feldstärken hinweg symmetrisch in der Probenmitte bei etwa $y = 15$ mm positioniert. Nahe dem Koerzitivfeld (Map 6) ist die Feldverteilung beinahe flach und frei von Inhomogenitäten.

Ein vergleichbares Verhalten wurde bei der segmentierten Probe beobachtet (Abb. 5.23). In diesem Fall treten jedoch nahe dem Koerzitivfeld, Unterschiede in der Feldverteilung auf, weshalb die Schrittweite der entmagnetisierenden Feldstärken verringert wurde. Ab etwa 25 kA/m vor dem Koerzitivfeld (Abb. 5.24 (Map 32)) zeigen sich erste Anzeichen einer lokalen Umkehr der Feldrichtung im linken Bereich der Feldverteilung. In Nähe des Koerzitivfelds ist der negative (ummagnetisierte) Streufeldbereich flächenmäßig etwa gleich groß wie der noch positive (aufmagnetisierte) Bereich. Die anschließende, zerstörende Analyse der Probe durch Trennung in zwei Segmente und deren Vermessung mittels Hysteresegraph ergab unterschiedliche Koerzitivfeldstärken (vgl. Abb. 5.25). Segment A weist ein H_{cj} von -1321 kA/m auf, Segment B ein H_{cj} von -1357 kA/m. Die Differenz von 36 kA/m entspricht etwa 2.5 % der Koerzitivfeldstärke und liegt im Bereich der Streuung von zehn weiteren Proben gleicher Spezifikation. Bei diesen wurden ebenfalls Abweichungen zwischen 30 und 70 kA/m festgestellt. Solche Schwankungen gelten als üblich und werden durch Angaben in Herstellerdatenblättern gestützt, die in der Regel lediglich Mindestwerte für die Koerzitivfeldstärke angeben, jedoch keine engen Toleranzgrenzen [177], [178]. Die Ergebnisse zeigen, dass das eingesetzte Verfahren, bestehend aus lokaler Streufelderfassung, integraler Magnetisierungsmessung und gezielter Entmagnetisierung, lokale Unterschiede in der Koerzitivfeldstärke zuverlässig detektiert.

7.2.2.4 Temperatur und zeitabhängige Field Maps

Zur Untersuchung temperaturbasierter Veränderungen in der lokalen Streufeldverteilung wurde temperaturabhängiges Field Mapping durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Field Maps bei steigender Probentemperatur aufgenommen (Abb. 5.17), die den Einfluss reversibler und irreversibler temperaturabhängiger Magnetisierungsänderungen veranschaulichen.

Abhängig von Probenform (Entmagnetisierungsfaktor), Magnetisierung und Koerzitivfeldstärke zeigen sich ähnliche Trends wie in integraler Form (Abschnitt 7.2.1.2). Die Streufeldverteilung der N52-Probe reduziert sich bereits bei niedrigen Temperaturen, während das Streufeld der N35-Probe aufgrund ihrer geringeren remanenten Magnetisierung und ihres daraus niedrigeren Arbeitspunkts erst bei höheren Temperaturen abnimmt. Maßgeblich ist dabei die Position des Arbeitspunkts in Verbindung mit der Koerzitivfeldstärke. Die stärksten Veränderungen treten im Zentrum der Probe auf, wo das Selbstfeld den Arbeitspunkt näher an das Koerzitivfeld verschiebt.

Zur detaillierten Betrachtung der reversiblen und irreversiblen Prozesse wurde im zweiten Schritt ein Rücklauf-Temperaturprofil an einer N35-Probe durchgeführt (Abb. 5.18). Ab etwa 50 °C treten erste irreversible Effekte auf, erkennbar an einer dauerhaft reduzierten Streufeldintensität oberhalb des Probenzentrums. Die Streufeldverteilung bleibt bis etwa 70 °C im Randbereich stärker erhalten als im Zentrum, was den Einfluss des Selbstfelds bestätigt. Zur Untersuchung zeitabhängiger Effekte wurden Field Maps bei Raumtemperatur mit dem konventionellen Field-Mapper durchgeführt (Abb. 5.30). Eine Styropor-Thermobox gewährleistet eine Temperaturstabilität von unter ± 0.5 °C. Bei der N52-Probe zeigt sich über die Zeit eine deutliche Abnahme der Streufeldverteilung oberhalb des Probenzentrums, insbesondere in der differentiellen Darstellung in Abb. 5.30a. Die Entmagnetisierung beginnt im Bereich maximaler Selbstentmagnetisierungsfelder im Zentrum, während der Randbereich unverändert bleibt. Abb. 7.13 zeigt die simulierte innere Selbstfeldverteilung der N52- und N35-UH-Scheiben.

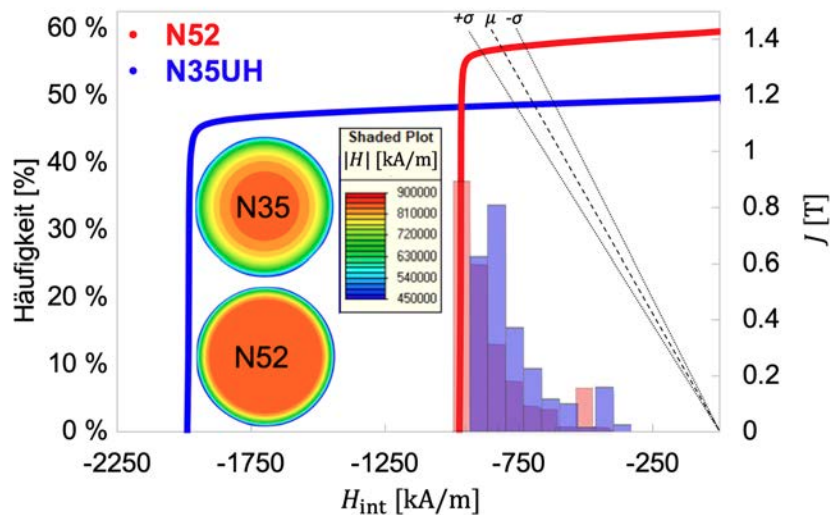


Abb. 7.13: $J(H)$ -Kurven der N52- und N35-UH-Probe (Scheibe, $N = 0.82$) mit eingezeichneten Arbeitslinien basierend auf der Probengeometrie als Mittelwert μ der Verteilung von $N = \mu_0 \cdot H/J$. Der ± 1 -Sigma-Bereich visualisiert die Streuung dieser Verteilung. Zusätzlich ist die innere Selbstfeldverteilung ohne externes Gegenfeld (simuliert) als Histogramm der Häufigkeit auf der primären y-Achse dargestellt. Bei der N52-Probe liegt ein großer Teil (>35 %) der lokalen Felder nahe des Koerzitivfelds (rote Balken), während die N35-UH-Probe schwächere Feldverteilungen aufweist, die aufgrund des höheren Koerzitivfelds vollständig im linearen Bereich liegen.

Die N52-Probe weist einen höheren Anteil hoher Entmagnetisierungsfelder (>800 kA/m) auf, sodass im offenen Magnetkreis ein Großteil der Felder bereits nahe dem Knipunkt sowie dem Koerzitivfeld ($H_{cj} = -1000$ kA/m) liegt. Die hochkoerzitive N35-UH-Probe (Abb. 5.30b), deren Arbeitspunkt deutlich vor dem Knipunkt liegt, zeigt keine signifikanten Änderungen. Die eingesetzte Hall-Sonde mit 0.1 % Genauigkeit (entsprechend 2 mT bei ± 2000 mT Messbereich) erreicht hier ihre Nachweisgrenze. Auch die zeitabhängigen Untersuchungen unter Temperatur (Abb. 5.31) zeigen dieses Verhalten: Nach Erreichen der Zieltemperatur treten im Vergleich zur Temperaturerhöhung (direkte Verluste) vergleichsmäßig geringe Änderungen oberhalb des Probenzentrums auf, während der Randbereich weitgehend stabil bleibt.

Zusammenfassend zeigen die Field Maps im offenen Magnetkreis, dass reversible- und irreversible Entmagnetisierungsprozesse stets im Probenzentrum beginnen, wo das Selbstfeld den Arbeitspunkt näher an das Koerzitivfeld verschiebt.

7.2.2.5 Anwendung von Field Maps für die Charakterisierung von Permanentmagneten

Die in Abb. 5.19 dargestellten Field Maps einer Multikomponentenprobe bei zunehmenden Temperaturen verdeutlichen die unterschiedliche thermische Stabilität der verwendeten Materialgüten. Mit steigender Temperatur treten lokale Unterschiede im Streufeld zunehmend hervor. Der zentrale Bereich oberhalb der N35-Komponente zeigt aufgrund der geringeren remanenten Magnetisierung eine geringere Feldintensität als der N52-basierte Randbereich. Das reduzierte Magnetisierungsniveau führt zu einem schwächeren Selbstfeld (niedrigerer Arbeitspunkt), wodurch sich Intensitätsänderungen in der Streufeldverteilung erst bei höheren Temperaturen bemerkbar machen. Mit weiter zunehmender Temperatur werden auch Unterschiede in den Koerzitivfeldstärken erkennbar: Während im Bereich oberhalb der N52-H-Komponenten ab etwa 90 °C erste Feldabnahmen sichtbar werden, zeigen die SH-Komponenten erst ab ca. 125 °C signifikante Veränderungen, was die höhere thermische Stabilität widerspiegelt. Die $J(T)$ -Kurve in Abb. 5.22 liefert Informationen zur integralen Magnetisierung der Gesamtprobe. Der zusätzlich dargestellte gemittelte Summenwert der Streufelderfassung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der integralen Magnetisierung und erlaubt bei homogener Magnetisierungsverteilung entlang der Magnetisierungsrichtung (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) eine differenzielle Zuordnung zwischen lokaler Streufeldmessung und integraler Magnetisierung. Das Verfahren ermöglicht somit eine einfache und zerstörungsfreie Analyse von Multikomponentenproben durch steigende Proben temperatur.

Dieses temperaturbasierte Vorgehen wurde auf eine lokal verstärkte GBD-Modellprobe übertragen (vgl. Abb. 6.12). In Abb. 6.13 zeigt sich ein mit der Temperatur zunehmender Gradient: Die linke Eindiffusionsseite bleibt stabil, da durch die lokale Dysprosiumdiffusion die Koerzitivfeldstärke erhöht wurde, während auf der gegenüberliegenden, nicht verstärkten Seite die Streufeldintensität deutlich abnimmt. Das vollautomatisierte, temperaturbasierte Verfahren liefert relative Unterschiede innerhalb der Probe, erlaubt jedoch nur eingeschränkt quantitative Zuordnungen. Deshalb bietet die Kombination aus manueller Entmagnetisierung im Hysteresegraph (magnetisch geschlossener Kreis) und Field-Mapping mit schematischem Ablauf nach Abb. 6.14 eine orts aufgelöste, quantitative Analyse (Abb. 6.15). Die aus den Nulldurchgängen der Field Maps ($B_z(y) = 0$) extrahierten Positionen dienen in Verbindung mit den zuvor angelegten Feldern der Bestimmung des quasi-Koerzitivfeldstärkenverlaufs $H_{cj}^*(y)$, wodurch eine direkte Ableitung intrinsischer Eigenschaften über variierende Koerzitivfeldstärken möglich wird (Abb. 6.18). Der Vergleich mit der zerstörenden Analyse (Schema nach Abb. 6.17) weist eine maximale Abweichung <5 % auf und bestätigt damit die Validität der zerstörungsfreien Methode. Diese Abweichungen können durch die Zuordnung der resultierenden y -Position der einzelnen Segmente beim zerstörenden Verfahren entstehen, da jedem Segmentstück die jeweilige mittlere Breite zugeordnet wird, die aufgrund inhomogener Koerzitivfeldstärkenverteilung jedoch zu einem leicht verfälschten Ergebnis führen kann.

Methodisch eignet sich das temperaturbasierte Vorgehen mit Konzept 4 sowie das feldbasierte Vorgehen mit Konzept 2 für ein schnelles, automatisiertes Screening, während das kombinierte Verfahren mit Entmagnetisierung im geschlossenen Kreis eine präzise Übertragung auf intrinsische Materialeigenschaften (Koerzitivfeldstärkenverteilung) ermöglicht.

7.2.2.6 Zusammenfassung Field Maps

- **Aussagefähigkeit und Grenzen von Field Maps**

Field Maps ermöglichen die orts aufgelöste Identifizierung lokaler Inhomogenitäten wie Segmentgrenzen und materieller Unterschiede anhand lokaler Feldvariationen, beispielsweise infolge unterschiedlicher Koerzitivfeldstärken. Aussagen über die integrale Magnetisierung sind jedoch nur eingeschränkt möglich: Besonders bei asymmetrischen Strukturen zeigt sich, dass bestimmte Inhomogenitäten nur einseitig detektierbar sind. Bei homogener Magnetisierungsverteilung lassen sich hingegen Rückschlüsse auf die integrale Magnetisierung ziehen, insbesondere bei geringem Messabstand der Sonde zur Probe. Mit zunehmendem Abstand nimmt der Detailgrad der erfassbaren Strukturen ab; lokale Inhomogenitäten lassen sich dann nicht mehr eindeutig identifizieren.

- **Einfluss der Magnetkreiskonfiguration**

Im offenen Magnetkreis spiegeln Streufeldverteilungen sowohl material- als auch geometriebedingt feldbasierte Effekte wider. Eine Entmagnetisierung im geschlossenen Kreis hingegen minimiert diese Einflüsse und erlaubt so eine gezielte Charakterisierung von Materialeigenschaften. Durch die Kombination aus offenem und geschlossenem Magnetkreis lassen sich sowohl reale Auswirkungen als auch Materialeigenschaften erfassen, was eine umfassende und differenzierte Analyse des Magnetverhaltens ermöglicht.

- **Feldabhängige Field Maps**

Durch gezielte Variation des äußeren Magnetfelds lassen sich Entmagnetisierungsvorgänge orts aufgelöst darstellen. Besonders die Arbeitspunkte einzelner Magnetbereiche innerhalb von Multikomponentenproben werden durch sich ändernde Streufeldverteilungen sichtbar. Wird die Magnetisierung im geschlossenen Magnetkreis durchgeführt, lassen sich orts aufgelöst Koerzitivfeldstärkenverteilungen mit hoher Genauigkeit bestimmen und quantitativ auswerten. Dies ermöglicht eine direkte, zerstörungsfreie Analyse lokaler Materialeigenschaften.

7.2.3 Feldbasierter Viskositätsparameter

Die Diskussion des feldbasierten Viskositätsparameters gliedert sich in drei Unterkapitel. Zunächst erfolgt in 7.2.3.1 der Abgleich der Ergebnisse mit VSM-Messungen, um die Validität der Messwerte zu prüfen. Anschließend werden in 7.2.3.2 die Ergebnisse der externen Einflussfaktoren diskutiert, bevor in 7.2.3.3 die material- und prozessbezogene Einflussfaktoren betrachtet werden.

7.2.3.1 Abgleich mit VSM-Messungen

Zur Validierung des neuen Prüfverfahrens auf Basis von Konzept 1 wurden dessen Ergebnisse mit VSM-Messungen verglichen. Beim Vergleich der beiden Messserien einer N52-Probe bei 100 °C von $S_v(H_{int})$ in Abb. 5.35, zeigen sich gute Übereinstimmungen insbesondere im Bereich von H_{D5} bis zum Koerzitivfeld. Die VSM-Messungen basieren auf Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.3$ bis 0.4 und starten damit mit geringeren externen Feldstärken sowie wechselnder Polarität, um auch Messwerte unterhalb des Arbeitspunktes zu erfassen ($\pm H_{ext}$). Im Gegensatz dazu ist das Standardmessprogramm von Konzept 1 auf den Arbeitspunkt der Probe ($H_{ext} = -1400$ kA/m bis 0 kA/m) beschränkt. Die Messung beginnt daher beim Selbstfeld der Proben mit Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0.3$ bis 0.7 , das um den Betrag des externen Feldes verschoben wird. Wie in Absatz 7.2.1.3 erläutert, stellt die Entsicherung von externem Feld auf das interne Feld über einen statischen Entmagnetisierungsfaktor lediglich einen Mittelwert dar. Dies erlaubt einen allgemeinen Vergleich, führt jedoch zu zusätzlichen quantitativen Unsicherheiten. Aus diesem Grund wurde die Feldstärke H_{D5} als Vergleichsgröße gewählt, da sie ein

Maß für die maximale Feldstärke beim Übergang von reversiblen zu irreversiblen Verlusten darstellt und aus Anwendungssicht eine grobe Abschätzung der maximal zulässigen Feldstärke vor signifikanter Entmagnetisierung erlaubt.

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, wird H_{D5} üblicherweise über eine parallele Verschiebung des linearen Bereichs bei 5 % irreversibler Entmagnetisierung bestimmt (Schnittpunkt mit der $J(H)$ -Kurve). Die Bestimmung im VSM erfolgt nach demselben Prinzip.

Für das neue Verfahren nach Abb. 5.34 ist dem eine parallele Verschiebung der reversiblen Verluste nicht erforderlich, da nur irreversible Änderungen bei $H_{\text{ext}} = 0$ erfasst werden. Der Schnittpunkt von $J^{\text{rec}}(H)$ bei 95 % von $J_{\text{max}}^{\text{rec}}$ dient als Näherung für H_{D5} . Insgesamt zeigen sich gute Übereinstimmungen, sowohl im direkten $S_v(H_{\text{int}})$ -Verlauf (Abb. 5.35) als auch bei den anderen Proben und Temperaturen (Abb. 5.36). Die fehlende Werte der N52-Probe bei 160 °C in beiden Verfahren resultieren daraus, dass die Probe im ersten Messzyklus bereits unter H_{D5} entmagnetisiert wird. Über alle Temperaturen und Proben ergibt sich somit eine durchschnittliche Abweichung von kleiner 5 %, bis auf die N52-SH Probe bei 70 °C. Hier ergeben sich Abweichungen von etwa 20 %, durch den Übergang des Kniefunktes bei der H_{D5} -Feldstärke. Dieser ist bei der N52-SH-Probe rechteckiger als bei den Vergleichsproben, wie in Abb. 7.14 in Rot dargestellt, wodurch Fehler bei der Bestimmung von S_v im Übergangsbereich des Kniefunktes entstehen können.

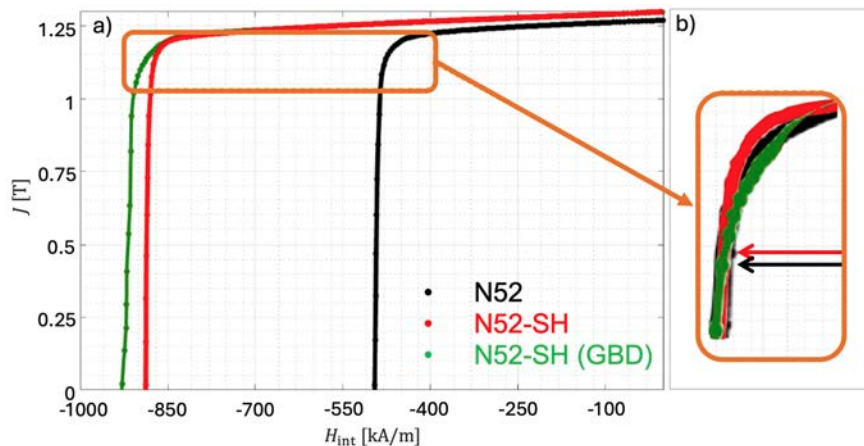


Abb. 7.14: $J(H)$ -Kurven der Proben N52 (schwarz), N52-SH (rot) und N52-SH (GBD) (grün) bei 100 °C. a) Gesamtübersicht der $J(H)$ -Kurven. b) Vergrößerte, überlagerte Darstellung aller drei Kurven, auf denselben H_{cJ} -Wert verschoben. Es zeigt sich ein steilerer Übergang der roten Kurve (N52-SH) im Vergleich zu den übrigen Proben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die S_v -Messung mittels Konzept 1 insbesondere im Bereich vor dem Koerzitivfeld eine hohe Übereinstimmung mit den VSM-Ergebnissen aufweisen. Zur Beurteilung der praktischen Wiederholbarkeit wurde, wie in Abb. 5.37 dargestellt, ein N52-Magnet bei 30 °C sechsmal gemessen. Die Überlagerung aller sechs Messreihen zeigt im Bereich der H_{D5} -Feldstärke eine Streuung von etwa ± 0.361 kA/m im Bereich der Standardabweichung. Während in diesem Bereich nur geringe Abweichungen von bis zu 3.1 % auftreten, zeigen sich nahe des Koerzitivfeld deutlich größere Abweichungen von über 20 %. Der berechnete Variationskoeffizient CV liegt bei im Feldbereich der H_{D5} -Feldstärke bei unter 6 % und stellt unter realen Messbedingungen eine gute Wiederholbarkeit dar. Besonders im relevanten Bereich um H_{D5} erlaubt dies eine verlässliche Bestimmung des Viskositätsparameters mit einer Genauigkeit besser als ± 0.5 kA/m. Um den Einfluss der Feldabstände zwischen den Zyklen zu betrachten, wurden mehrere Messprogramme entworfen und in Abb. 5.38 als 2 Varianten der am wenigsten schwankenden Lösungen dargestellt. Programm P_A zeigt einen größeren (statischen) Feldabstand zwischen den Zyklen als P_B , bei dem der Feldabstand dynamisch ansteigt. Anfangs sind die Unterschiede gering und liegen unter 0.5 kA/m im Vergleich zur $S_v(H)$ -Kurve von P_A . Im Verlauf ansteigender Feldstärken zeigt P_A allerdings stabilere Werte, weshalb es für die weiteren Messungen verwendet wurde. Es zeigt sich außerdem, dass insbesondere der

Feldabstand zwischen den Zyklen zur Erfassung der Suszeptibilität und der Viskosität einen starken Einfluss auf den Wert des Viskositätsparameters hat. Wie in Abb. 7.15 dargestellt, lässt sich S_v in diesem Beispiel eines N52-Magneten bis etwa $J = 0.2$ T zuverlässig bestimmen, da der Feldabstand zur Erfassung von χ^{tot} noch ausreichend groß ist. Unterhalb dieses Wertes verkleinert sich der Abstand zunehmend und nähert sich bei $J = 0$ T gegen null, sodass S_v nicht mehr zuverlässig bestimmt werden kann, da die beiden Verlustanteile ineinander übergehen. In diesem Bereich nimmt zudem die Streuung zu (vgl. Abb. 5.37), verstärkt durch die Sättigung des Jochs.

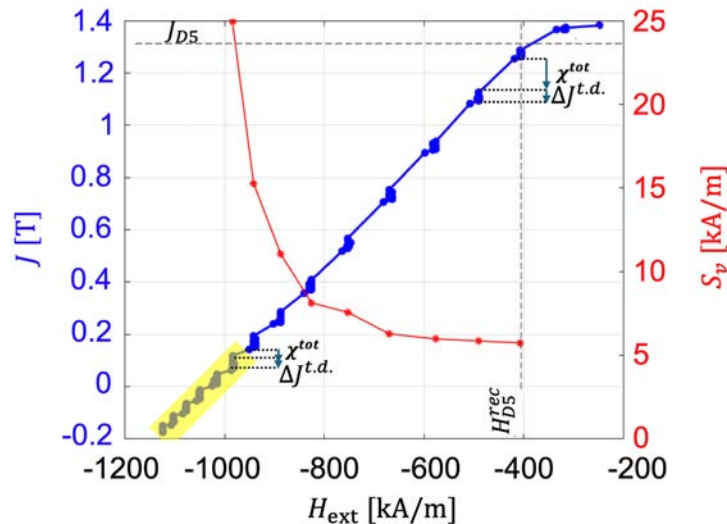


Abb. 7.15: Ablauf der $S_v(H_{ext})$ -Messung (N52) (rot) mit Messverlauf als $J(H_{ext})$ -Kurve (blau). Markiert sind Bereiche zur Bestimmung von χ^{tot} und $\Delta J^{t.d.}$. Ausschlaggebend für die Bestimmung von S_v ist hierbei der Abstand zur Bestimmung von χ^{tot} , welcher sich mit abnehmender Probenpolarität und zunehmender Jochsättigung verringert, wodurch die Bestimmung ihres Verhältnisses zunehmend fehlerhaft wird

7.2.3.2 Externe Einflussfaktoren

Zu den externen Einflussfaktoren zählen sowohl messtechnische Einflüsse als auch geometrische Eigenschaften der Probe, insbesondere die externe Feldstärke (Feldverlauf), die Proben-temperatur und die Probensegmentierung.

Feldverlauf

Der Vergleich in Abb. 5.42 zeigt, dass der Verlauf von $S_v(H)$ sowohl durch die Koerzitivfeldstärke als auch durch das maximale Energieprodukt $(BH)_{max}$ beeinflusst wird. In Abb. 5.42a ist eine leichte Zunahme von S_v mit steigendem $(BH)_{max}$ erkennbar, während Abb. 5.42b den dominanten Einfluss der Koerzitivfeldstärke verdeutlicht: Proben mit höherem H_{cj} , wie N52-H, weisen einen verschobenen $S_v(H)$ -Verlauf entlang der Feldachse und ein insgesamt höheres S_v -Niveau auf.

Die Verschiebung entlang der x -Achse korreliert mit der jeweiligen Lage von H_{D5}^{rec} und reflektiert die Veränderung des Arbeitspunktes der Probe.

Probentemperatur

Bei Variation der Probentemperatur zeigt sich eine Abnahme der Koerzitivfeldstärke mit steigender Temperatur (vgl. Abb. 5.43). Infolge des reduzierten Koerzitivfelds weisen die gemessenen S_v -Werte niedrigere Werte auf, wie in Abb. 5.44 dargestellt. Thermische Fluktuationen begünstigen zeitabhängige Magnetisierungsprozesse, führen jedoch gleichzeitig zu einer Reduktion von H_{cj} .

Die niedrigeren S_v -Werte spiegeln damit die verminderte Koerzitivfeldstärke wider und entsprechen dem Verhalten in den Überlagerungskurven, z. B. für H- und SH-Proben in Abb. 5.45.

Probenform / Entmagnetisierungsfaktor

Die Probenform und die Remanenz beeinflussen den Arbeitspunkt der Probe wesentlich. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, liegt dieser im magnetisch offenen beziehungsweise teilgeschlossenen Kreis im zweiten Quadranten der Hysteresekurve und wird durch das Selbstentmagnetisierungsfeld bestimmt. Die Messung des Viskositätsparameters im teilgeschlossenen Kreis beginnt bei externer Feldstärke null am jeweiligen Arbeitspunkt der Probe.

Die Ergebnisse in Abb. 5.46 zeigen, dass sich bei Kugelmagneten (N35, N42) mit homogener Feldverteilung ($N = 1/3$) im Vergleich zu Quadermagneten vergleichbarer Güte mit inhomogener Feldverteilung ($N = 0.56$; N35, N40) keine signifikanten Unterschiede der S_v -Werte ergeben, die über die Messunsicherheit hinausgehen. Auch die S_v -Werte der N52-Proben liegen für Entmagnetisierungsfaktoren zwischen $N = 0.45$ und 0.75 im Bereich von 6.7 bis 7.1 kA/m und stimmen damit weitgehend mit der Standardform ($N = 0.56$) überein.

Die Ergebnisse zeigen, dass Unterschiede im Entmagnetisierungsfaktor innerhalb der betrachteten Probenauswahl den Wert des Viskositätsparameter S_v nicht systematisch beeinflussen.

Segmentierung

Die Ergebnisse in Abb. 5.58 deuten auf einen leichten Anstieg des Wertes von S_v mit zunehmendem Segmentierungsgrad hin. Die nicht segmentierte Probe weist 8 kA/m auf, die vierfach segmentierte 8.5 kA/m. Die Wiederholgenauigkeit beträgt ± 0.5 kA/m, sodass die Unterschiede innerhalb der Messunsicherheit liegen. Eine nicht segmentierte Vergleichsprobe eines anderen Herstellers (N48-UH) zeigt mit 8.6 kA/m einen vergleichbar hohen S_v -Wert. Damit liegen die Variationen des Segmentierungsgrads nicht nur innerhalb der Messstreuung, sondern können auch durch Vergleichsgüten relativiert werden.

Diese Ergebnisse zeigen damit, dass der Segmentierungsgrad im untersuchten Probenspektrum nur einen untergeordneten Einfluss auf den Wert von S_v hat.

7.2.3.3 Material- und prozessbezogene Einflussfaktoren

Die Untersuchung der Probengüte besteht aus der Betrachtung des Koerzitivfeld, der Remanenz und des jeweiligen $(BH)_{\max}$ der Probe.

Betrachtung des maximalen Energieprodukts

Zur Untersuchung des Einflusses des maximalen Energieprodukts $(BH)_{\max}$ auf den Viskositätsparameter S_v wurden die Proben nach ihrem Koerzitivfeld in die Reihen Standard, H und SH gegliedert. In der Standardreihe (Abb. 5.47) zeigt sich bei einzelnen Proben ein schwacher Anstieg von S_v mit zunehmendem jeweiligen $(BH)_{\max}$. Dieser Trend ist jedoch nicht konsistent, da einzelne Proben mit höherem $(BH)_{\max}$ niedrigere S_v -Werte aufweisen als Proben geringerer Güte, beispielsweise N54 im Vergleich zu N42, N45 oder N48. Auch innerhalb der N52- und N54-Güten treten höhere Werte als bei der N52-Referenz auf, wodurch der Zusammenhang insgesamt nur schwach ausgeprägt ist. In der H-Reihe (Abb. 5.48) sowie in der SH-Reihe (Abb. 5.49) ist kein relevanter Zusammenhang zwischen $(BH)_{\max}$ und S_v erkennbar. Die Werte streuen innerhalb der jeweiligen Reihen ohne systematische Abhängigkeit vom Energieprodukt.

Insgesamt lässt sich lediglich für die Standardreihe ein schwacher Zusammenhang vermuten, der jedoch nicht ausreichend ausgeprägt ist, um auf eine übergreifende oder verallgemeinerbare Abhängigkeit von $(BH)_{\max}$ zu schließen. Ein klarer oder linearer Zusammenhang

zwischen dem maximalen Energieprodukt und dem Viskositätsparameter S_v kann für die betrachtete Probenauswahl nicht festgestellt werden.

Betrachtung der Koerzitivfeldstärke

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen H_{cj} und $S_v(H_{D5}(H_{cj}))$ zeigt je nach Probenserie unterschiedlich stark ausgeprägte lineare Trends (Abb. 5.50 bis Abb. 5.5). Für die N35-Serie (Abb. 5.50) ergibt sich eine Steigung von etwa 0.0045 bei $R^2 = 0.955$ auf Basis von 6 Proben, was auf einen konsistenten linearen Zusammenhang hinweist. Die N40/42-Serie (Abb. 5.51) zeigt eine Steigung von 0.0035 bei $R^2 = 0.75$ ebenfalls mit 6 Proben, wobei die geringere Anzahl die Genauigkeit der Anpassung einschränkt. Die Serien N45–N48 (Abb. 5.52) mit 12 Proben weisen eine Steigung von 0.002 und $R^2 = 0.48$ auf, wobei trotz größerer Probenzahl die Streuung hoch ist. Die N52-Serie (Abb. 5.53) zeigt eine Steigung von 0.0016 bei $R^2 = 0.75$ auf Basis von 8 Proben, was auf einen moderaten, relativ konsistenten linearen Zusammenhang hindeutet.

Insgesamt liegen damit die Steigungen für alle betrachteten Serien zwischen 0.0015 und 0.0046, wobei die Anzahl der Messwerte die Robustheit der linearen Trendabschätzung erhöht. Abb. 7.16 zeigt die $S_v(H_{cj})$ -Verteilung konventioneller Proben mit gleichen Maßen von $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$. Dabei zeigt sich eine mittlere Steigung von etwa 0.0025 bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.58$, was auf eine moderate lineare Korrelation hinweist. Daraus ergibt sich als grobe Abschätzung: $S_v(H_{D5}) = 0.0025 \cdot H_{cj} + 3.32 \text{ [kA/m]}$.

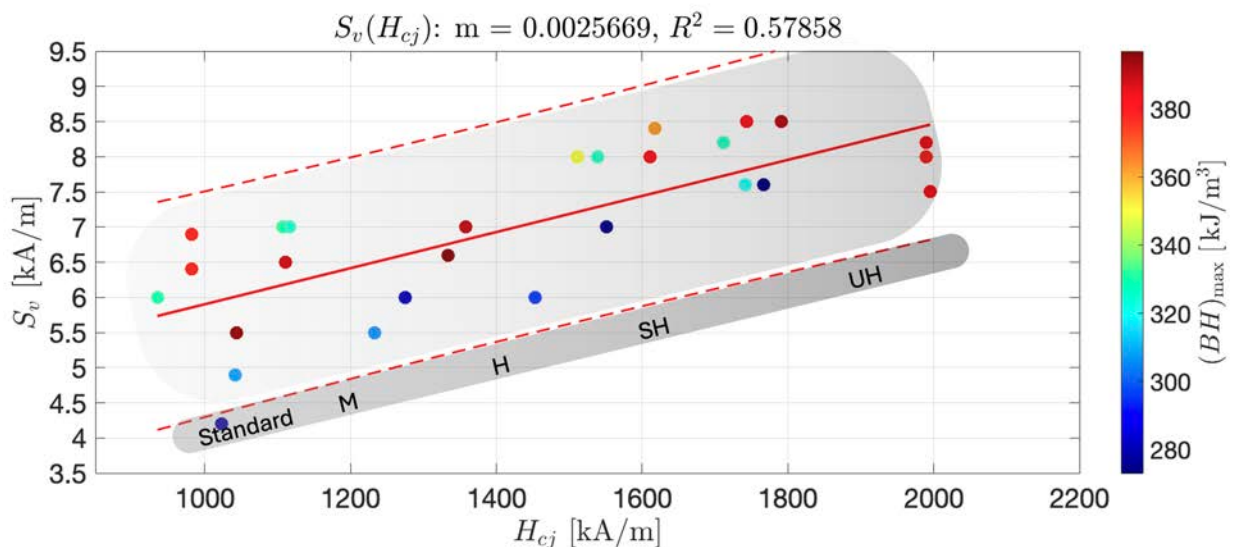


Abb. 7.16: Darstellung von $S_v(H_{D5})$ zu H_{cj} ausgewählter Proben mit und ohne GBD. Es zeigt sich eine lineare Steigung (Trendgerade) von etwa 0.00257. Der $\pm 2\sigma$ Bereich ist in rot gestrichelt dargestellt. Zusätzlich sind die jeweiligen Bezeichnungen der Probengüten dargestellt.

Vergleich werkseitig GBD-behandelter Magnete mit nicht behandelten Proben gleicher Güte

Die Ergebnisse in Abb. 5.54 und Abb. 5.55 zeigen, dass der Einfluss des GBD-Prozesses auf den Viskositätsparameter S_v innerhalb der betrachteten Probenauswahl nicht einheitlich ist. Bei den N52-SH-Proben führt die GBD-Behandlung im Vergleich zur entsprechenden Referenzprobe ohne GBD zu einer moderaten Erhöhung von etwa 0.5 kA/m, während bei der N54-SH-Probe kein Unterschied erkennbar ist. Die N54-H-Probe mit GBD liegt sogar unterhalb der N52-H-Referenz ohne GBD. Ein konsistenter Trend über verschiedene Güten und Temperaturklassen hinweg lässt sich daraus nicht ableiten. Auch ein weiterer Vergleich der kommerziellen N35-EH und N38-EH-Proben (vgl. Abb. 5.55) bestätigt dieses Bild. Zwar zeigen die mit Dy- und insbesondere die Tb-behandelten Proben erhöhte S_v -Werte, diese korrelieren jedoch mit der jeweils höheren Koerzitivfeldstärke. Diese Unterschiede in S_v sind daher nicht als Auswirkung des GBD-

Prozesses zu interpretieren, sondern lassen sich primär durch die erhöhte Koerzitivfeldstärke durch den GBD-Prozess erklären. Der GBD-Prozess beeinflusst S_v damit nicht eigenständig, sondern wirkt indirekt über seine bekannte Erhöhung von H_{cj} .

Diese Interpretation entspricht den Ergebnissen früherer Studien [132], die ebenfalls keine direkten Unterschiede des Wertes von S_v zwischen GBD-Proben und nicht GBD-Proben ohne Zusammenhang der Koerzitivfeldstärke nachweisen konnten.

Ausgewählte unterschiedliche Materialeinflüsse durch Herstellverfahren

Zur Untersuchung weiterer Materialeinflüsse wurden Magnete mit reduziertem oder ohne schweren Seltenerdanteil sowie mit erhöhtem Cer-Anteil analysiert. Abb. 5.56 zeigt die jeweiligen Proben im Vergleich zu ihren Referenzgütern. Die N35-Cer-Probe weist einen geringfügig niedrigeren S_v -Wert als die Standard-N35-Probe auf, die Abweichung liegt jedoch innerhalb der Messstreuung und ist damit nicht signifikant. Die N40-Cer-Probe zeigt hingegen einen leicht erhöhten S_v -Wert gegenüber der Standard-N40-Probe, auch hier ohne Überschreiten der Messunsicherheit. Für die Proben N48-SH (red.) und N48-SH liegen die ermittelten S_v -Werte nahe beieinander, wobei die beobachtete Differenz keine systematische Wirkung der Reduktion des schweren Seltenerdanteils erkennen lässt. Ein analoges Bild zeigt sich bei den Proben N42-SH (konventionell) und N42-SH (red.), deren S_v -Werte ebenfalls innerhalb der Messunsicherheit übereinstimmen. Auch bei den N48-H-Proben unterschiedlicher Hersteller und mit unterschiedlicher Materialzusammensetzungen bleiben die Werte in einem engen Bereich ohne konsistente Abweichung.

Die Untersuchung aller Einzelproben zeigt, dass weder die Cer-Substitution noch die Variation des schweren Seltenerdanteils bei vergleichbarer Magnetgüte einen signifikanten Einfluss auf S_v erkennen lassen.

Mittlere Korngröße

Wie in Absatz 2.4.1.2 beschrieben, besteht ein bekannter Zusammenhang zwischen der Gefügestärke und dem Koerzitivfeld; kleinere Korngrößen führen zu einer höheren Koerzitivfeldstärke [85], [86]. Abb. 7.17 zeigt die Gesamtübersicht ausgewählter (konventioneller) Proben mittlerer Korngröße über H_{cj} . Mit einer Regressionssteigung von 0 und einem $R^2 = 0.004$ zeigt sich kein Zusammenhang, da nur eine sehr geringe erklärte Varianz vorliegt.

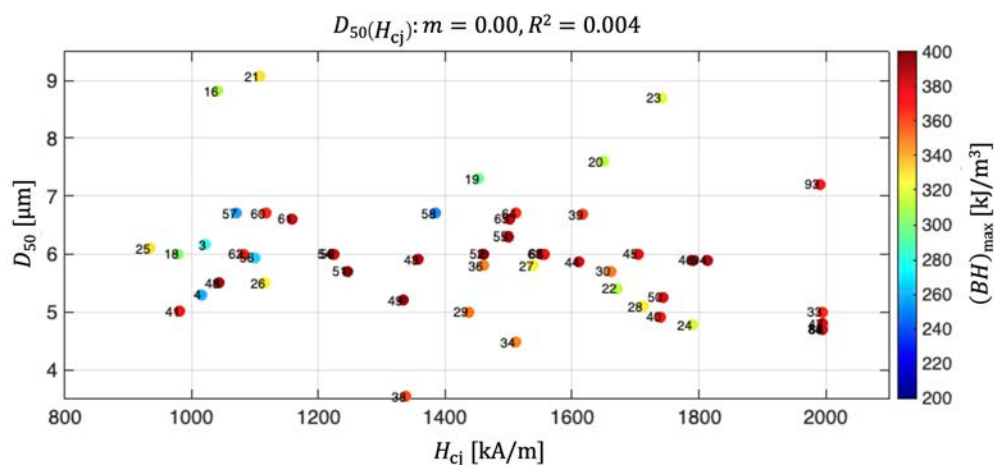


Abb. 7.17: Mittlere Korngröße D_{50} in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke H_{cj} der ausgewählter (konventioneller) Proben. Es zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen mittlerer Korngröße und Koerzitivfeldstärke in dieser Stichprobe.

In Abb. 5.40c sind alle Proben im Bezug von S_v auf die mittlere Korngröße dargestellt. Dort zeigt sich eine Steigung von 0.37 bei einem $R^2 = 0.11$, was nur auf einen schwachen Zusammenhang

hinweist. Bei separater Betrachtung der Probenreihen mit konstantem Koerzitivfeld zeigt sich bei keiner der untersuchten Reihen ein Zusammenhang. Weder die Standard-Serie (vgl. Abb. 5.47) noch die H-Reihe (vgl. Abb. 5.48) oder die SH-Reihe (vgl. Abb. 5.49) weisen einen erkennbaren Trend auf. Da zuvor ein leichter Zusammenhang von S_v zu H_{cj} festgestellt wurde, wird in Abschnitt 5.3.4.2 die Korngröße in Bezug auf S_v bei konstantem $(BH)_{\max}$ untersucht. Auch hier ergibt sich insgesamt nur ein geringer Zusammenhang. Die N35-Reihe zeigt eine Steigung von 0.23 bei $R^2 = 1$, allerdings nur bei 2 Proben (vgl. Abb. 5.50). Für die N40/42-Proben (vgl. Abb. 5.51) ergibt sich eine negative Steigung von -0.19 bei $R^2 = 0.062$ (9 Proben). In der N45–48-Reihe (vgl. Abb. 5.52) beträgt die Steigung -0.04 bei $R^2 = 0.002$ (12 Proben). Die N52-Serie (vgl. Abb. 5.53) zeigt einen moderaten Zusammenhang mit einer Steigung von 1.14 bei $R^2 = 0.59$, wobei nur 4 unterschiedliche mittlere Korngrößen vorliegen. Auch beim Vergleich von GBD- und konventionellen Proben (vgl. Abb. 5.54) ergibt sich kein klarer Zusammenhang zwischen Viskositätsparameter und Korngröße, weder innerhalb der GBD-Proben noch im Vergleich zu konventionellen Proben. Die Übersicht verschiedener Materialeigenschaften (vgl. Abb. 5.56) zeigt ebenfalls keinen erkennbaren Trend bei insgesamt 18 Proben. Zur weiteren Überprüfung wurden Nachwärmebehandlungsversuche an kommerziellen N52-SH-Magneten in Abb. 5.57 durchgeführt. Trotz variierender Korngrößen im Bereich von 5.9 – 6.7 μm konnte kein eindeutiger Einfluss der Korngröße auf den Wert von S_v festgestellt werden, der über den bekannten Einfluss der Koerzitivfeldstärke hinausgeht.

Zusammenfassend zeigt die Betrachtung variierender Korngrößen in der betrachteten Probenauswahl keinen eindeutigen Zusammenhang mit den S_v -Werten.

7.2.4 Temperaturbasierter Viskositätsparameter

Wie zuvor in Abschnitt 2.3 aufgeführt, ergibt sich der Magnetisierungszustand eines Permanentmagneten aus dem Zusammenspiel des inneren Selbstfeldes mit der Koerzitivfeldstärke der Probe. Zusätzlich wird er durch die Temperatur beeinflusst, die sowohl Koerzitivfeldstärke als auch Remanenz verändert. Die magnetische Viskosität beruht auf thermisch aktivierten Fluktuationen (vgl. Abb. 2.13). Mit steigender Temperatur lässt sich, ähnlich zu einem erhöhten äußeren Feld, eine verstärkte Entmagnetisierung beobachten. Dieser temperaturinduzierte Effekt beruht jedoch nicht auf einer Verschiebung des Arbeitspunktes durch äußere Felder, sondern auf einer Verringerung der $J(H)$ -Kurve, wodurch das Koerzitivfeld näher an den Arbeitspunkt rückt (vgl. Abb. 2.10).

Daraus folgt, dass das Verhältnis von Viskosität zu Suszeptibilität, definiert als Viskositätsparameter, nicht nur feldabhängig, sondern auch temperaturabhängig erfasst werden kann. Voraussetzung hierfür ist die Umrechnung von $J(T)$ auf $J(H)$. Die direkte Übertragung der Temperatur auf ein äquivalentes Feld über Hysteresegraphmessungen erwies sich jedoch als unpraktikabel, da hierfür zahlreiche temperaturabhängige $J(H)$ -Kurven notwendig wären. Mit dem neu definierten Parameter S_v^T wird daher ein praktisches Maß eingeführt, das die Langzeitstabilität des Magnetisierungszustandes beschreibt und eine alternative Bewertung zeitabhängiger Verluste ermöglicht. Dabei ersetzt die temperaturabhängige Änderung der Magnetisierung die bislang verwendete feldabhängige Suszeptibilität. Diese Größe ist funktional mit der totalen Suszeptibilität vergleichbar, da sie sowohl reversible als auch irreversible Beiträge umfasst (vgl. Abb. 2.12). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das teils fehleranfällige Entscheren des externen Feldes auf das interne Feld des Magneten entfällt. Der klassische Entmagnetisierungsfaktor liefert lediglich einen groben Mittelwert und berücksichtigt die inhomogene Feldverteilung nur näherungsweise (vgl. Abb. 7.8, Abschnitt 7.2.1.3). Während sowohl die direkten temperaturabhängigen Verluste als auch die zeitabhängige Abnahme temperatur- und probenformabhängig sind, zeigt deren Verhältnis S_v^T keinen direkten Einfluss der Probenform oder des

Selbstentmagnetisierungsfeldes, was durch die geringen Abweichungen bei unterschiedlichen Entmagnetisierungsfaktoren bestätigt wird (vgl. Abb. 5.59 (c, d)). Die Umrechnung von S_v^T [°C] in ein feldabhängiges Maß S_v^* [kA/m] über den Temperaturkoeffizienten der Koerzitivfeldstärke gemäß Gl. (32) zeigt in Abb. 5.61 eine gute Übereinstimmung mit klassischen VSM-Messungen, bei einer maximalen Abweichung von etwa 20 %. Die Abweichung zwischen fünf Einzelmessungen liegt bei unter 10 %, was einer Wiederholbarkeit von über 90 % entspricht. Die Ergebnisse in Abb. 5.59 zeigen, analog zum feldbasierten Viskositätsparameter, einen Anstieg von S_v^T mit zunehmender Koerzitivfeldstärke der Probe. Zwischen N35- und N52-Proben lässt sich ein Offset erkennen, der auf einen geringen Einfluss von $(BH)_{\max}$ hinweisen kann. Die Validität des Ansatzes setzt eine homogene Proben temperatur voraus. Kontrollversuche mit verteilten Temperatursensoren belegen, dass sich die Temperatur innerhalb einer kurzen Stabilisationszeit angleicht, wie in Abschnitt 7.1.2.2 aufgeführt. Der temperaturbasierte Viskositätsparameter ermöglicht dadurch eine einfache, kostengünstige Untersuchung des Langzeitverhaltens von Permanentmagneten. Der Ansatz reduziert die Anforderungen an das Messequipment erheblich, da keine externe Feldquelle benötigt wird. Allerdings erfolgen die Messungen ohne externes Feld, sodass lediglich vom Arbeitspunkt der Probe aus gemessen werden kann, wie in Abb. 5.61 anhand der angegebenen internen Feldstärken als Funktion der Temperatur dargestellt und in Abschnitt 7.2.5 genauer betrachtet. Die erreichbare Bandbreite an Proben wird durch den von Probenform, Materialgüte und maximaler Messtemperatur (260 °C) bestimmten Arbeitspunkt begrenzt, der im Bereich zwischen Knipunkt und Koerzitivfeldstärke liegen sollte. Während sich Magnetproben mit ausreichend hohem Entmagnetisierungsfaktor (> 0.56) und Koerzitivfeldstärken bis etwa 1600 kA/m (entsprechend SH-Güten) zuverlässig vermessen lassen, überschreiten höherkoerzitive Güten wie N35-UH die Messgrenzen. Die Probengröße orientiert sich an der Größe der 1 %-homogenen Bereiche der verendeten Helmholtz-Messspulen: ca. 50 × 70 mm für die MS-150 und 70 × 95 mm für die MS-210 (vgl. Abb. 2.24, [102]).

Die Definition von S_v^T eröffnet eine praktikable Möglichkeit, zeitabhängige Verluste, ohne aufwändige feldabhängige Messungen im offenen Kreis zu erfassen.

7.2.5 Vergleich des feld- und temperaturbasierten Viskositätsparameters

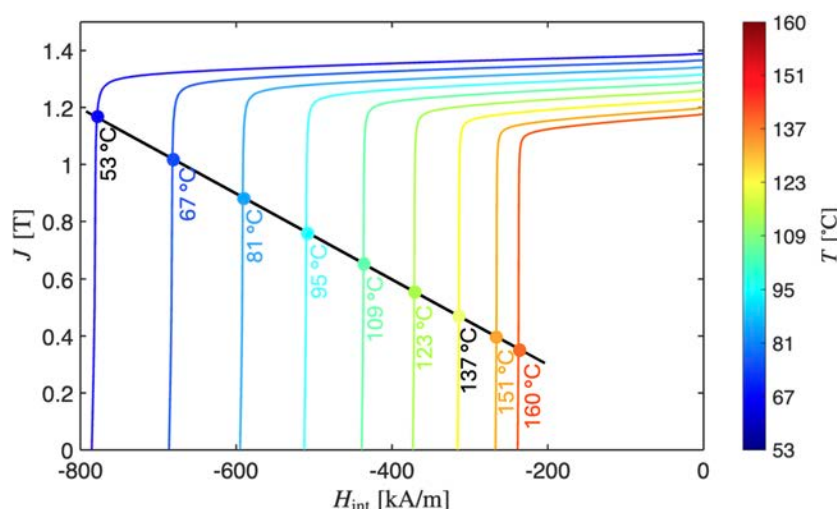


Abb. 7.18: $J(H)$ -Kurven bei den in Abb. 5.59 betrachteten Proben temperaturen von 53 °C bis 160 °C zur Abschätzung der resultierenden Arbeitspunkte (Feldstärken). Aus den initialen Polarisationswerten nach Erreichen der Zieltemperatur (siehe Abb. 3.32) ergeben sich die markierten $J(H)$ -Werte gemäß Gl. (1). Für die betrachtete Probe liegen alle Arbeitspunkte nach dem Knipunkt im steilen Bereich der Hysteresekurve, wobei der Schnittpunkt mit der $J(H)$ -Kurve bei 53 °C in etwa einer irreversiblen Entmagnetisierung von 10 % entspricht, entsprechend H_{D10} .

Methodisch unterscheiden sich die beiden Verfahren darin, dass S_v feldabhängig durch Variation von H_{ext} und Temperatur bis zum Koerzitivfeld bestimmt wird, während S_v^T ohne externe Feldbelastung ausschließlich als Funktion der Temperatur ermittelt wird. S_v liefert feldspezifische Werte (z. B. bei H_{D5}), wohingegen S_v^T bei $H_{\text{ext}} = 0$ am durch das innere Selbstfeld entstehenden Arbeitspunkt gemessen wird. Praktisch sind diese Unterschiede zu $S_v(H_{D5})$ -Werten gering, wie das Beispiel der ermittelten Parameter mit angewandtem Fluktuationsfeld und Fluktuationstemperatur in Abb. 5.62 anhand der gemessenen Polarisationswerte verdeutlicht. In Abb. 7.18 ist dargestellt, wie aus der Polarisation die internen Feldwerte pro Temperatur berechnet und mit der jeweiligen $J(T)$ -Kurve der entsprechenden Temperatur kombiniert wurden. Der Arbeitspunkt bei $N = 0.80$ befindet sich entsprechend nach dem Kniepunkt im steilen Bereich mit starker irreversibler Entmagnetisierung. Bei der 53 °C-Messung entspricht der Schnittpunkt einer irreversiblen Entmagnetisierung von etwa 10 %, was annähernd einem Feldwert von H_{D10} entspricht. Damit zeigt sich, dass S_v^T im Vergleich zu $S_v(H_{D5})$ auch als grobe Näherung für Langzeitbetrachtungen unter externer Feldbelastung verwendet werden kann. Für $H_{\text{ext}} \neq 0$ ergibt sich die interne Feldbelastung zu $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} - H_{\text{self}}$ mit $H_{\text{self}} = \frac{N \cdot J}{\mu_0}$. Für $H_{\text{ext}} = 0$ folgt daraus $H_{\text{int}} = -H_{\text{self}} = -\frac{N \cdot J}{\mu_0}$.

7.2.6 Anwendung von Fluktuationsfeld und Fluktuationstemperatur zur Langzeitstabilitätsbetrachtung

Zur Betrachtung der Langzeitstabilität erlauben die beiden Konzepte Fluktuationsfeld und Fluktuationstemperatur, zeitabhängige Entmagnetisierungsverluste zu prognostizieren. Beide Ansätze führen zu konsistenten Prognosen, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit. Für Anwendungen mit externer Feldbelastung erweist sich der feldbasierte Ansatz durch Bestimmung des Schnittpunkts des Fluktuationsfelds mit der $J(H)$ -Kurve, wie in Abb. 6.6 gezeigt, als geeigneter Ansatz.

Für Anwendungen ohne externe Feldbelastung bzw. mit einer Feldbelastung um das jeweilige Selbstfeld der gewählten Probe bietet der temperaturbasierte Ansatz eine einfache Möglichkeit, insbesondere ohne komplizierte, fehleranfällige Entschering der Feldbelastungen von externen auf interne Felder. Für den Ansatz mit $J(H)$ -Kurven dienen die Materialkurven der entsprechenden Effektivtemperatur. Die maximale Feldbelastung H_{max} in der Anwendung markiert den Arbeitspunkt, der wie im feldbasierten Ansatz für eine hohe Zeitstabilität einen gewissen Abstand zum Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve besitzen sollte, wie in Abb. 7.19 exemplarisch mit $H_{\text{max}} = -600$ kA/m aufgeführt.

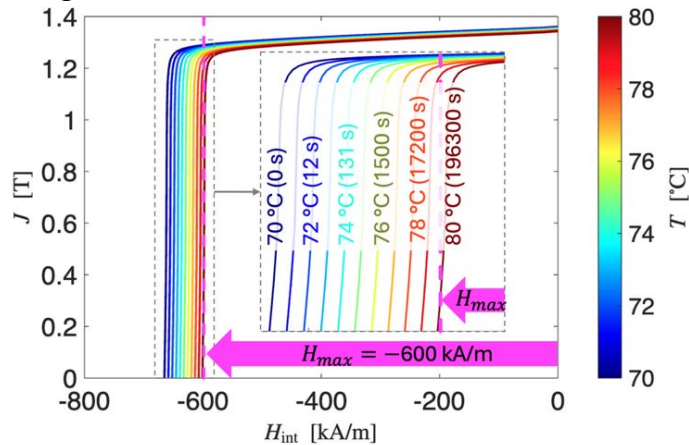


Abb. 7.19: Exemplarische Anwendung der Fluktuationstemperatur anhand von $J(H)$ -Kurven entsprechender Effektivtemperaturen. Die Position des maximalen Anwendungsfeldes H_{max} (pink markiert) auf der $J(H)$ -Kurve definiert den prognostizierten Arbeitspunkt. Ein maximales Gegenfeld von -600 kA/m bei 70 °C zeigt bis zu 131 s (74 °C) noch einen Abstand vor dem Kniepunkt (ausreichend), während die Kniepunkte der $J(H)$ -Kurven für Temperaturen > 78 °C bereits unterhalb des maximalen Feldes liegen und somit keine Stabilität mehr aufweisen.

Im offenen Kreis kann auch ein einfacher Vergleich zur Abschätzung der Langzeitstabilität mittels der Effektivtemperatur und deren Position auf der $J(T)$ -Materialkurve dienen.

Zur Validierung des temperaturbasierten Ansatzes ist in Abb. 7.20 die Temperaturmessung aus Abb. 6.3 aufgeführt und wird für zwei Zeitpunkte mit Zeitpunkt $t_1 = 20000$ s und $t_2 = 20\ 000$ h in b) dargestellt. Hierbei stimmen die Polarisationswerte der beiden Zeitpunkte in b) mit den Schnittpunkten der mit der Fluktuationstemperatur umgerechneten Effektivtemperaturen im $J(T)$ -Verlauf der Probe in a) gut überein.

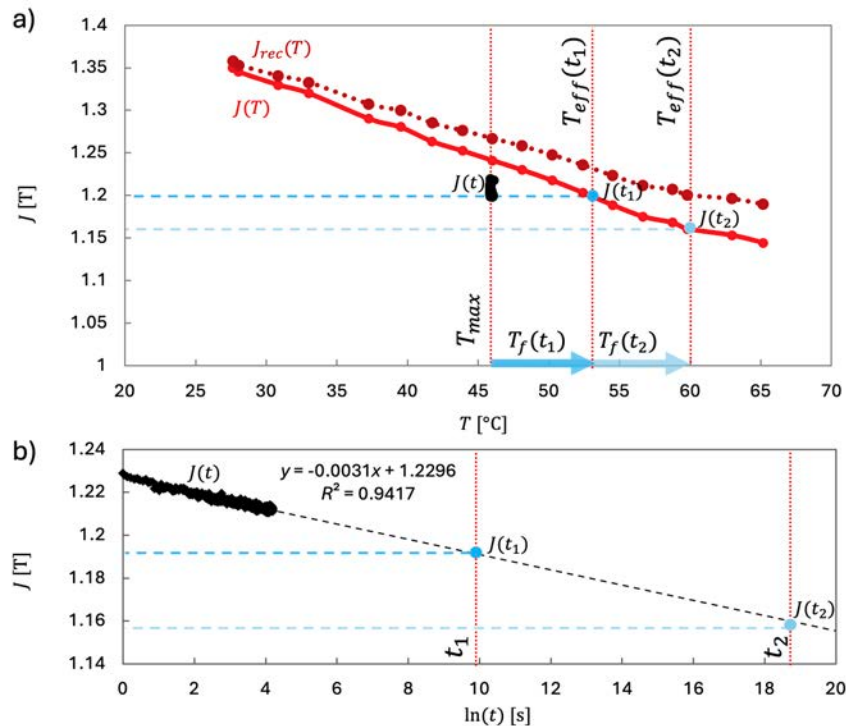


Abb. 7.20: a) $J(T)$ -Verlauf einer N52-Probe mit $N = 0.7$ basierend auf Abb. 6.3. b) $J(t)$ -Verlauf mit markierten Polarisationswerten zu den in Abb. 6.3 definierten Zeitpunkten, eingezeichnet auf dem erweiterten prognostizierten $J(\ln(t))$ -Verlauf. Die prognostizierten Werte stimmen gut mit den entsprechenden Schnittpunkten des erweiterten $J(\ln(t))$ -Verlaufs überein.

Zur zusätzlichen Implementierung irreversibler, zeitabhängiger Effekte in numerische Simulationen wurden der in Abschnitt 6.2.1 beschriebene feldbasierte Ansatz und der in Abschnitt 6.2.2 beschriebene temperaturbasierte Ansatz in FEA integriert.

Beide Varianten zeigen bei direkten Vergleichen, wie in Abb. 5.62, eine hohe Übereinstimmung der prognostizierten Polarisationswerte. Die Validierung wird zunächst durch die Überlagerung beider Verfahren in Abb. 6.10 als $J(H)$ -Kurven illustriert, die Abweichungen $< 5\%$ aufweisen. Zur praktischen Validierung dient die experimentelle Langzeitmessung in Abb. 6.11a. Ihr Verlauf stimmt in Abb. 6.11b sehr gut mit den aus FEA extrahierten theoretischen Polarisationswerten überein, Abweichungen liegen unter 2% .

Während irreversible, zeitabhängige Magnetisierungsverluste erst ab dem Kniepunkt der $J(H)$ -Kurve bzw. oberhalb der Übergangstemperatur der $J(T)$ -Kurven auftreten, führt eine einfache Verschiebung der $J(H)$ -Kurven aufgrund der Steigung des linearen Bereichs zu geringfügigen Fehlern infolge von Polarisationsabnahmen im reversiblen Bereich, in dem normalerweise keine signifikanten zeitabhängigen irreversiblen Polarisationsabnahmen zu erwarten sind. Für eine präzise Implementierung des Fluktuationfelds sollten die $J(H)$ -Kurven daher zunächst ohne reversible Steigung verschoben und anschließend die reversible Steigung wieder berücksichtigt werden.

Ein ähnliches Problem zeigt sich auch beim temperaturbasierten Vorgehen, da eine reine Temperaturerhöhung ebenfalls zu einer Verringerung im reversiblen Bereich der $J(H)$ -Kurven führt, in dem nahezu keine irreversiblen zeitabhängigen Verluste zu erwarten sind, wodurch auch hier

geringe Abweichungen auftreten können. Für höchste Genauigkeit sollten daher auch in diesem Fall die $J(H)$ -Kurven zunächst ohne reversiblen Anteil (reversibler Temperaturkoeffizient) verschoben werden. Die generelle Übereinstimmung zwischen feld- und temperaturbasierten Vorhersagen und den experimentellen Daten bestätigt allerdings die Praxistauglichkeit beider Ansätze zur Berücksichtigung irreversibler Magnetisierungszustände in FEA.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass durch die anwendungsabhängige Wahl zwischen feld- und temperaturbasiertem Ansatz kritische Arbeitspunkte identifiziert und Langzeitverluste realistisch bewertet werden können, ohne auf pauschale Überdimensionierungen der Magnetgüte zurückzugreifen.

7.2.7 Magnetische Stabilisierung

Nachdem in den experimentellen Ergebnissen in Abb. 5.64 gezeigt werden konnte, dass Feld- und Temperaturstabilisierung unterschiedliche Auswirkungen auf das Entmagnetisierungsverhalten der Proben haben, wurde im nächsten Schritt zur Analyse reversibler und irreversibler Verluste eine Korrektur zum Ausschluss reversibler Anteile mittels des Temperaturkoeffizienten $\alpha(B_r)$ durchgeführt (Abb. 5.64, Abb. 7.21a). Hierbei zeigen sich insbesondere nahe der Übergangstemperatur Unterschiede zwischen der feld- und der temperaturstabilisierten Probe. Mit zunehmender Probentemperatur liegen die temperaturstabilisierten Proben enger an der Referenzkurve, während die feldstabilisierten Proben bereits vor Erreichen der Übergangstemperatur einen Abfall der Magnetisierung zeigen (pinke Markierung in Abb. 7.21a).

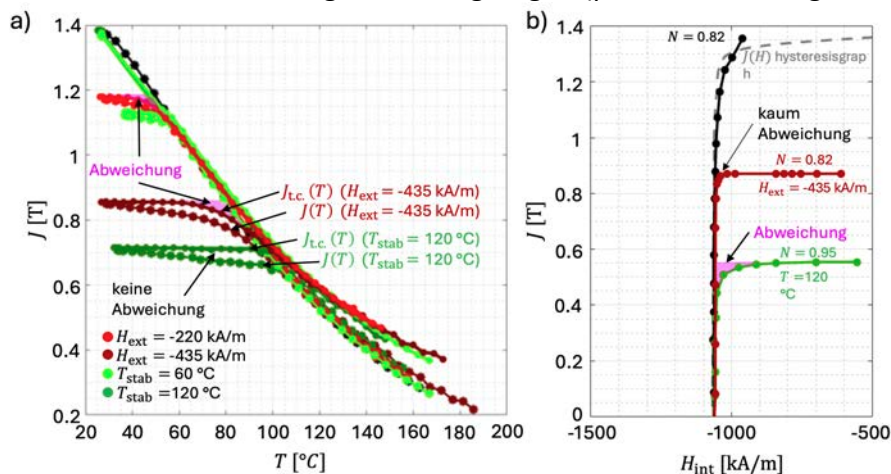


Abb. 7.21: Vergleich von Temperatur- und Feldstabilisierung. a) $J(T)$ -Verlauf der N52-Probe aus Abb. 5.64. Auf Temperaturbasis zeigen die feldstabilisierten Verläufe (rot, braun) im Übergangsbereich von überwiegend reversiblen zu irreversiblen Verlusten einen früheren Abfall (Markierung: Abweichung) als die temperaturstabilisierten Proben (grün, Markierung: keine Abweichung). Der temperaturstabilisierte Verlauf mit $J_{L.C.}(T)$ stellt den um die reversiblen Änderungen kompensierten Verlauf dar. b) $J(H)$ -Verlauf aus Abb. 5.65. Auf Feldbasis zeigt der temperaturstabilisierte Verlauf in grün (Markierung: Abweichung) eine größere Abweichung als der feldstabilisierte Verlauf in braun (Markierung: kaum Abweichung). Dies spiegelt sich auch im Entmagnetisierungsfaktor wider. Bei der feldstabilisierten Methode stimmt er näherungsweise mit dem der vollständig gesättigten Probe überein, während er bei der temperaturstabilisierten Methode höhere Werte erreicht.

Die Unterschiede deuten auf unterschiedliche Wirkmechanismen während der Stabilisierung hin, weshalb in Abb. 5.65 gezielt externe Feldvariationen untersucht wurden. Hierbei wird ein entsprechend ähnliches Verhalten ersichtlich: Mit zunehmender Feldstärke weist die Feldstabilisierung eine höhere Übereinstimmung mit der Referenz $J(H)$ -Kurve auf als die Temperaturstabilisierung (Abb. 7.21b). Zur genaueren Betrachtung wurden die $J(H_{ext})$ -Verläufe aus Abb. 5.65 auf $J(H_{int})$ -Verläufe auf Basis der ursprünglichen, mit $N = 0,82$ entscherten Referenzkurve angepasst. Hierdurch konnten unterschiedliche (mittlere) Entmagnetisierungsfaktoren von $N = 0,82$ für die feldstabilisierte und $N = 0,95$ für die temperaturstabilisierte Probe identifiziert werden. Diese Unterschiede deuten auf eine veränderte Magnetisierungsverteilung

durch den Stabilisierungsvorgang hin. Daraus folgt, dass die Stabilisierungsart idealerweise an die dominierende spätere Belastung (Feld oder Temperatur) angepasst werden sollte. Zur Validierung der Langzeitstabilität (Ausschluss zeitabhängiger Verluste) wurden Stufenversuche (Abb. 5.66) durchgeführt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass zeitabhängige irreversible Verluste durch Voralterung bis zum Stabilisierungspunkt zuverlässig ausgeschlossen werden können. Die temperaturstabilisierte Probe zeigt bis zum Erreichen der Stabilisierungstemperatur keine weiteren irreversiblen Verluste, während die nicht stabilisierte Vergleichsprobe bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen zeitabhängige Verluste aufweist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sowohl die Feld- als auch die Temperaturstabilisierung geeignete Methoden sind, um irreversible, zeitabhängige Entmagnetisierungseffekte bis zu den definierten Feld- oder Temperaturgrenzen zuverlässig auszuschließen. Die Wahl der entsprechenden Methode sollte sich nach der dominierenden Belastungsart in der jeweiligen Anwendung richten.

7.2.8 Drehmomentmessungen

Die Drehmomentmessung basiert auf der Erfassung des mechanischen Drehmoments, das durch die Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Moment der Probe und dem externen Feld entsteht (vgl. Abschnitt 7.1.3.4). Bei den untersuchten Permanentmagnetproben in Abb. 5.67 zeigt sich eine eindeutige Korrelation zwischen Magnetisierungsänderung und gemessenem Drehmoment. Das gewählte Referenzfeld von -200 kA/m liegt oberhalb des durch Lagerung und Wellenführung verursachten mechanischen Systemwiderstands und innerhalb des linearen Bereichs der $J(H)$ -Kurve vor dem Knipunkt, also vor dem Eintritt irreversibler Verluste. In diesem Feldbereich besteht eine annähernde Proportionalität zwischen der Polarisierung J_r und dem resultierenden Drehmoment T_Q : Magnete mit höheren Polarisationswerten, wie N52 ($J_r = 1.4 \text{ T}$), erzeugen bei gleicher externer Feldstärke höhere Drehmomente als ein N35-Magnet ($J_r = 1.2 \text{ T}$). Mit zunehmender externer Feldstärke steigt das Drehmoment zunächst an, erreicht im Knipunktbereich der Probe ein Maximum und fällt anschließend im irreversiblen Bereich infolge der Probenentmagnetisierung wieder ab (vgl. Abb. 5.67). Die höhere Koerzitivfeldstärke einer N52-SH-Probe im Vergleich zur N52-Probe erlaubt entsprechend höhere externe Feldstärken, bevor irreversible Entmagnetisierung eintritt, wodurch ein höheres maximales Drehmoment entsteht. Die Temperaturabhängigkeit bei 70°C (Abb. 5.68) zeigt deutliche Reduktionen von magnetischem Moment und mechanischem Drehmoment gegenüber Raumtemperatur. Die verringerte Koerzitivfeldstärke führt zu früherer Entmagnetisierung, was sich in niedrigeren Drehmomentwerten äußert. Das Verfahren erlaubt nicht nur die Bestimmung maximaler Drehmomentwerte, sondern auch praxisnahe Aussagen zur mechanischen Leistungsfähigkeit unter kombinierter thermischer und magnetischer Belastung. Die Untersuchung der zeitabhängigen Entmagnetisierung bei konstantem Feld (vgl. Abb. 5.69) zeigt eine proportionale Abnahme von Magnetisierung und Drehmoment und bestätigt damit die indirekte Magnetisierungserfassung der Probe über das Drehmoment bei konstanter externer Feld- und Temperaturbelastung.

8 Zusammenfassung

Permanentmagnete sind zentrale Bauelemente zahlreicher industrieller Anwendungen. Obwohl sie als „permanent“ bezeichnet werden, zeigen sie in Abhängigkeit von Materialgüte, Probengeometrie sowie äußeren Feld- und Temperatureinflüssen und deren Einwirkdauer sowohl direkte als auch zeitabhängige Entmagnetisierungseffekte. Diese beeinflussen das Langzeitverhalten und die Stabilität maßgeblich und sind damit entscheidend für die Leistungsfähigkeit von Aktoren, für die Präzision von Sensoren sowie für zahlreiche weitere magnetische Systeme. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Frameworks von Prüfstandskonzepten zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Permanentmagneten. Darauf aufbauend erfolgt die systematische Anwendung dieser Konzepte zur Untersuchung ihrer zeit-, feld- und temperaturabhängigen Entmagnetisierung. Anschließend werden praxisrelevante Methoden für Langzeitbewertung, Stabilisierung und Materialauswahl abgeleitet.

Entwicklung von Prüfstandskonzepten

Da vorhandene Messmethoden nur eingeschränkt eine umfassende anwendungsorientierte Untersuchung des zeit-, feld- und temperaturabhängigen Entmagnetisierungsverhaltens von Permanentmagneten erlauben, wurden vier experimentelle Konzepte realisiert, die die Grundlage des Frameworks der Belastungs- und Prüfmethodik bilden.

Konzept 1: Wechselfeldjoch

Das erste Konzept basiert auf einem Elektromagneten aus Elektroblechmaterial und erlaubt sowohl schnelle als auch konstante Feld- und Temperaturbelastungen. Es ist vergleichbar mit dem Funktionsumfang eines Vibrationsmagnetometers und eines Hysteresegraphen in einem magnetisch teilgeschlossenen Kreis. Das System ermöglicht schnelle Feldänderungen von bis zu 10 T/s sowie zeitlich konstante Feldbelastungen bis ± 1340 kA/m über einen breiten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 280 °C. Dadurch eignet sich das Konzept speziell für $J(H)$ -Entmagnetisierungskurven, Pulsrampen in Feld- und Gegenfeldrichtung sowie zur Bestimmung des feldbasierten Viskositätsparameters als Routinemessung in kurzem Zeitrahmen (ca. 1 h) an real dimensionierten Proben.

Konzept 2: Rotierende Probe

Das zweite Konzept besteht aus einem Elektromagneten mit wassergekühlten Erregerwindungen und einer rotierenden Probenscheibe mit Proben temperierung. Diese Kombination aus lokaler und integraler Magnetisierungsmessung erlaubt Feldstärken von bis zu 2000 kA/m und Temperaturen von bis zu 180 °C. Dabei werden in-situ Entmagnetisierung, orts aufgelöstes Field Mapping, integrale Magnetisierungsmessung sowie mechanische Drehmomentmessungen ermöglicht. Neben der Aufnahme von $J(H)$ -Kurven können insbesondere feldabhängige Streufeldverteilungen während des Entmagnetisierungsvorgangs erfasst werden, wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen lokalen Feldänderungen und der integralen Probenpolarisation hergestellt werden kann.

Konzept 3: Momentmessspule

Das dritte Konzept basiert auf einer Helmholtz-Messspule mit rotierender Probeneinheit. Hierbei rotiert die Probe unter gezielter Temperierung von RT bis 260 °C in einer Helmholtz-

Messspule, wodurch hochpräzise integrale Magnetisierungsmessungen bei kontrollierter Temperaturführung mit hohen Aufheizraten (0.7 °C/s) und Abkühlraten (0.15 °C/s) ermöglicht werden. Damit können temperaturabhängige $J(T)$ -Entmagnetisierungskurven sowie zeitabhängige Magnetisierungsänderungen erfasst werden. Insbesondere ermöglicht das Verfahren Langzeitmessungen zur Bestimmung der magnetischen Viskosität sowie des eingeführten temperaturbasierten Viskositätsparameters. Darüber hinaus können gezielte thermische Stabilisierungsversuche durchgeführt werden.

Konzept 4: Momentmessspule mit Scanfunktion und Probertemperaturierung

Das vierte Konzept erweitert die Methodik von Konzept 3 um eine zusätzliche lokale Streufelderfassung, sodass sowohl integrale als auch lokale, orts aufgelöste Messungen zeit- und temperaturabhängiger Magnetisierungsänderungen ermöglicht werden. Dieser Funktionsumfang ermöglicht neben der Erfassung zeitabhängiger Streufeld- und Polarisationsänderungen insbesondere ein schnelles Field Mapping von Multikomponenten- und GBD-Proben bei steigender Probertemperatur.

Ergebnisse und Erkenntnisse aus Anwendung der Prüfstandskonzepte

Die aus der Anwendung der Prüfstandskonzepte gewonnenen Ergebnisse lassen sich in lokale und integrale Betrachtungen unterteilen. Während integrale Magnetisierungsmessungen die gesamte von der Probe ausgehende Polarisation erfassen, beschränken sich lokale Betrachtungen (Field Mapping) auf die Erfassung des von der Probe ausgehenden Streufelds.

Field Mapping

Lokale Messungen der Streufeldverteilung oberhalb der Magnetprobe zeigen, dass sowohl reversible als auch irreversible, einschließlich zeitabhängiger, Entmagnetisierungsprozesse im offenen Magnetkreis im Zentrum der Probe beginnen, also im Bereich maximaler innerer Selbstentmagnetisierungsfelder. Unter zunehmendem Feld- oder Temperatureinfluss zeigen sich zudem Unterschiede zwischen Standardproben mit nahezu homogener Koerzitivfeldstärkenverteilung und Multikomponentenproben, die aufgrund ihrer inhomogenen Koerzitivfeldstärkenverteilung deutliche Inhomogenitäten im Streufeld aufweisen.

Auf dieser Grundlage wurde eine zerstörungsfreie Methode zur Bauteilcharakterisierung entwickelt, mit welcher Hysteresekurven sowohl integral als auch lokal orts aufgelöst erfasst werden können. Für GBD-Proben, insbesondere lokal verstärkte Proben, ermöglicht die Methode die näherungsweise Betrachtung von Koerzitivfeldstärkenverteilungen durch feld- und temperaturabhängige Entmagnetisierung im offenen Magnetkreis. Die quantitative Bestimmung erfolgt durch Kombination mit Messungen im magnetisch geschlossenen Kreis, wodurch ein Verfahren zur orts aufgelösten Bestimmung lokaler Koerzitivfeldverteilungen entwickelt wurde. Dies erlaubt positionsabhängige Aussagen zur lokalen magnetischen Stabilität und stellt ein Werkzeug zur Prozessoptimierung und Qualitätssicherung dar.

Entmagnetisierung

Integrale Messungen erfassen die gesamte von der Probe ausgehende Magnetisierung und resultieren aus direkten und zeitabhängigen Verlusten. Die Entmagnetisierung verläuft im zweiten Quadranten der $J(H)$ -Kurve und besteht aus überwiegend reversiblen Änderungen vor dem Kniepunkt sowie überwiegend irreversiblen Verlusten nach dem Kniepunkt. Die jeweiligen Anteile hängen von den spezifischen Probenarbeitspunkten im Verhältnis zum Koerzitivfeld ab. Ein analoges Verhalten zeigt sich für temperaturbasierte Entmagne-

tisierung. Auch hier existiert ein Bereich mit überwiegend reversiblen Änderungen vor einer charakteristischen Übergangstemperatur, während oberhalb dieser Temperatur irreversible Verluste dominieren. Neben diesen als direkte Verluste bezeichneten Polarisationsabnahmen treten zeitabhängige Verluste insbesondere ab dem Kniepunkt auf. Sie werden sowohl durch die Geschwindigkeit der Feld- und Temperaturänderungen als auch durch die effektive Dauer der maximalen Belastung bestimmt, die sich aus der Summe aller erfahrenen Feld- und Temperaturwerte ergibt. Hierbei konnte selbst bei Raumtemperatur bei Proben mit Arbeitspunkten nahe oder oberhalb des Kniebereichs eine signifikante zeitabhängige Polarisationsabnahme festgestellt werden. Diese zeitliche Polarisationsabnahme, die magnetische Viskosität S , ist jedoch schwer vergleichbar, da bereits geringe Abweichungen von Temperatur, Feld und dessen Verteilung signifikante Auswirkungen auf dessen Wert zeigen. Der magnetische Viskositätsparameter S_v , basierend auf der Proportionalität von S zur Suszeptibilität χ , stellt dagegen eine robuste Methode zur Anwendung in unterschiedlichen Szenarien dar.

Aufbauend darauf wurde neben dem klassischen feldabhängigen Ansatz des feldbasierten Viskositätsparameters S_v ein neuer temperaturbasierter Viskositätsparameter S_v^T eingeführt, der eine vereinfachte experimentelle Bestimmung ermöglicht. Beide Ansätze zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von unter 10 % und erlauben somit eine konsistente Quantifizierung zeitabhängiger Verluste.

Viskositätsparametermessungen

Aus den Schwerpunktmessungen unter Berücksichtigung externer sowie material- und prozessbezogener Einflussgrößen ergibt sich, dass die Abhängigkeit von S_v primär von der Koerzitivfeldstärke H_{cj} der Probe bestimmt wird. Für eine N52-Probe ($H_{cj} = 950$ kA/m) ergibt sich ein Wert von 6.4 kA/m, für eine N52-SH-Probe ($H_{cj} = 1600$ kA/m) 8.4 kA/m. Die Koerzitivfeldstärke H_{cj} stellt damit die dominierende Einflussgröße auf S_v dar.

Die Steigungen von S_v zu H_{cj} für alle betrachteten Serien liegen zwischen 0.0015 und 0.0046. Bei Betrachtung konventioneller Proben mit $N = 0.56$ ergibt sich eine mittlere Steigung von etwa 0.0025. Daraus folgt als grobe Abschätzung für den Viskositätsparameter bei der Feldstärke H_{D5} : $S_v(H_{D5}) = 0.0025 \cdot H_{cj} + 3.32$ [kA/m].

Ein signifikanter Zusammenhang von Materialvariationen wie durch den GBD-Prozess, reduziertem bzw. vollständigem Ausschluss von schwerem Seltenerdgehalt, Cer-Substitution oder variierenden Korngrößen auf S_v konnte nicht festgestellt werden. Ein direkter Einfluss von $(BH)_{\max}$ auf S_v kann ebenfalls nicht nachgewiesen werden, da auch hier die Auswirkungen unterschiedlicher Koerzitivfeldstärken dominieren. Eine zunehmende Proben temperatur führt zu einem abnehmenden Wert von S_v , analog zur temperaturbedingten Reduktion der Koerzitivfeldstärke. Probenform, Entmagnetisierungsfaktor sowie homogene Feldverteilung bei Kugeln oder inhomogene Feldverteilung bei Quadern zeigen keinen signifikanten Einfluss, ebenso wenig die Anzahl der Segmente.

Da der Wert des Viskositätsparameters zwar einen vergleichbaren Materialmesswert darstellt, eine direkte quantifizierbare Abschätzung zukünftiger Verluste jedoch nicht unmittelbar möglich ist, dienen das Konzept des Fluktuationsfelds für den feldbasierten sowie die Fluktuationstemperatur für den temperaturbasierten Viskositätsparameter als Grundlage zur Verlustprognose. Diese Größen wurden durch experimentelle Langzeitmessungen validiert und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und experimenteller Messung.

Magnetische Stabilisierung

Neben der Verlustbestimmung ermöglicht die magnetische Stabilisierung den vollständigen Ausschluss irreversibler, zeitabhängiger Entmagnetisierung durch eine gezielte Teilentmagnetisierung vor der Anwendung. Hierfür werden die Proben mittels einer definierten Vorentmagnetisierung durch entweder Temperatur- oder Feldbelastung auf einen irreversibel reduzierten Polarisationszustand gebracht, bis zu dem spätere Temperatur- und Feldbelastungen in der Anwendung zu keiner weiteren irreversiblen Entmagnetisierung führen. Dies ermöglicht stabile Betriebsbereiche während des Einsatzes, was insbesondere für Anwendungen mit hohen Anforderungen an eine konstante Magnetisierung relevant ist. Exemplarisch zeigt sich bei einer N52-Probe ($J_r = 1.4$ T) bei einer Feldbelastung von $H_{\max} = -900$ kA/m über 1 Jahr ein $J = 1.17$ T. Würde die Probe hingegen durch ein Feld von 950 kA/m irreversibel auf $J = 1.3$ T vormagnetisiert werden, treten über die Zeit bei Feldbelastungen bis $H_{\max}$ lediglich reversible Änderungen von $J = 1.35$ T bis 1.3 T auf. Die Wahl der Stabilisierungsart (Feld- oder Temperaturstabilisierung) sollte an der in der späteren Anwendung dominierenden Einflussgröße, Feld oder Temperatur, ausgerichtet werden.

Workflow zur Systemoptimierung

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein anwendungsorientierter Workflow entwickelt, der in Abb. 6.1 als Flussdiagramm dargestellt ist. Er dient der optimalen Systemauslegung und der zielgerichteten Materialauswahl zur Sicherstellung eines stabilen Langzeitverhaltens von Permanentmagneten bei Feld- und Temperaturvariationen. Das Vorgehen unterscheidet zwischen Anwendungen, bei denen eine magnetische Stabilisierung möglich ist, und solchen, bei denen eine Langzeitbewertung erforderlich ist. Im Fall einer möglichen Reduktion der remanenten Polarisation stellt die Stabilisierung eine effektive Methode dar, um zeitabhängige Verluste im Betrieb vollständig auszuschließen. Hierbei sollte die Stabilisierungsmethode, also Feld- oder Temperaturstabilisierung, der dominierenden Einflussgröße in der Anwendung entsprechen. Wenn hingegen eine hohe remanente Polarisation gefordert ist und geringe Verluste über die Zeit tolerierbar sind, erfolgt die Bewertung über den feld- oder temperaturabhängigen Viskositätsparameter. Die Auswahl des geeigneten Ansatzes hängt dabei von der Art der Belastung ab. In Anwendungen mit dominanter Feldbelastung, wie beispielsweise Elektromotoren oder elektrischen Aktoren, ermöglicht der feldabhängige Ansatz eine gezielte Auslegung anhand maximal auftretender Feldstärken und Temperaturen. Für Anwendungen ohne externe Feldbelastung, insbesondere in Sensorsystemen, bietet der temperaturbasierte Ansatz eine einfache Möglichkeit zur Prognose des Langzeitverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturbelastungen.

Die Materialauswahl erfolgt auf Basis der prognostizierten Belastung in Relation zur $J(H)$ - bzw. $J(T)$ -Kurve. Liegt der prognostizierte Arbeitspunkt im reversiblen Bereich mit ausreichendem Abstand zum kritischen Kniepunkt, ist eine stabile Probenmagnetisierung über die angegebene Betriebszeit zu erwarten. Befindet sich der Arbeitspunkt hingegen im irreversiblen Bereich der Kurve, sind weitere Anpassungen erforderlich. Diese können durch Erhöhung der Koerzitivfeldstärke der Probe erfolgen (bspw. N52 zu N52-SH: N52 mit $J_r = 1.4$ T zeigt nach 1 Jahr bei -900 kA/m ein $H_f = 112$ kA/m und $J = 1.17$ T, während eine N52-SH-Probe $H_f = 155$ kA/m und $J = 1.38$ T aufweist), durch Optimierung der Probengeometrie zur Reduktion des Entmagnetisierungsfaktors (bspw. $N = 0.56$ zu 0.4) oder durch Anpassung der Betriebsbedingungen, etwa durch Reduzierung der resultierenden Feldbelastung H_{ext} oder der Temperatur T .

Schlussfolgerungen

Das entwickelte Framework zerstörungsfreier Mess- und Prüfmethode n erlaubt eine anwendungsorientierte Langzeitbewertung sowie Materialtestung von Permanentmagneten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass durch die anwendungsabhängige Kombination von feld-, temperatur- und zeitbasierten Bewertungsansätzen eine realistische Beschreibung des Langzeitverhaltens von Permanentmagneten möglich ist. Dadurch können kritische Arbeitspunkte vorab identifiziert und gezielt vermieden werden, ohne auf eine pauschale Überdimensionierung der Materialgüte zurückgreifen zu müssen. Gleichzeitig ermöglicht das zerstörungsfreie, lokale Field-Mapping-Verfahren die Sicherstellung der benötigten Eigenschaften durch die Analyse der Koerzitivfeldstärkenverteilung der jeweiligen Proben. Dies reduziert den Bedarf an schweren Seltenerdelementen und erlaubt eine kostenoptimierte sowie langzeitstabile Auslegung magnetischer Systeme. Darüber hinaus liefert das Framework wertvolle Erkenntnisse für die gezielte Prozessoptimierung, Qualitätssicherung und Materialentwicklung, indem lokale Inhomogenitäten und potenzielle Schwachstellen frühzeitig erkannt werden.

9 Verzeichnis der wissenschaftlichen Publikationen

Im Rahmen dieser Dissertation sind folgende wissenschaftliche Publikationen entstanden:

1. [139] Lanz M., Martinek G., Schneider G., Goll D. ***In Situ Visualization of Inhomogeneities in the Magnetic Properties of Permanent Magnets***. *Metrology*. 2024; 4(3):506–516. DOI: 10.3390/metrology4030031.
2. [136] Lanz M., Martinek G., Kresse T., Schneider G., Goll D. ***Magnetic Viscosity Characterization of Fe–Nd–B Permanent Magnets Using a Novel Measurement Approach***. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2025; 61(4):1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2025.3544856.
3. [144] Lanz M., Martinek G., Kresse T., Schneider G., Goll D., Georgiadis A. ***Application-Oriented In-Situ Testing Methods for Permanent Magnet Characterization***. Poster P48, Proceedings SMSI 2025, Nürnberg; 6–8 May 2025. pp. 327–328. DOI: 10.5162/SMSI2025/P48.
4. [176] Lanz M., Böttle M., Martinek G., Schneider G., Goll D. ***Non-destructive analysis of coercivity distributions in permanent magnets with locally enhanced magnetic properties***. *physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters*. 2025; DOI: 10.1002/pssr.202500307.
5. [172] Lanz M., Martinek G., Kresse T., Schneider G., Goll D. ***Evaluation of time-dependent magnetic losses of permanent magnets***. *Metals* 2026, 16(3), 322; DOI: 10.3390/met16030322
6. [145] Lanz M., Martinek G., Kresse T., Georgiadis A., Schneider G., Goll D. ***Development of a New Measurement System for Investigating the Long-Term Stability of Permanent Magnets for Sensor and Actuator Systems***. *Sensoren und Messsysteme* 2026, Nürnberg, 09–10.06.2026; DOI: 10.5162/sensoren2026/S3-5
7. [145] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, A. Georgiadis, G. Schneider, and D. Goll, ***Non-destructive Measurement Framework for Integral and Local Analysis of Permanent Magnets in Quality Control and System Design***. *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2026, Nancy)*, accepted, in press
8. [161] Lanz M., Martinek G., Schneider G., Goll D. ***Temperature-Based Magnetic Viscosity Parameter for Evaluating Long-Term Magnetization Stability of Permanent Magnets***. *Metals* 2026, 16(6), 605; DOI: 10.3390/met16060605

Teilnahme an internationalen Konferenzen

1. Coiltech Pordenone (2023), World magnetic Conference: In-situ visualization of demagnetization states of permanent magnets
2. Coiltech Augsburg (2024), World magnetic Conference: Investigation of time-dependent demagnetization for long-term use of permanent magnets
3. MSE Darmstadt (2024): Time-dependent magnetization losses of permanent magnets
4. Coiltech Augsburg (2025), World magnetic Conference: Evaluating Long Term Performance of Permanent Magnets for Electric Motors
5. SMSI Nürnberg (2025): Application-Oriented In-Situ Testing Methods for Permanent Magnet Characterization
6. Coiltech Augsburg (2026), World magnetic Conference: Optimized Permanent Magnet Selection Considering Irreversible Magnetization Losses
7. I2MTC IEEE Nancy (2026): Non-destructive Measurement Framework for Integral and Local Analysis of Permanent Magnets in Quality Control and System Design

8. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme Augsburg (2026): Development of a New Measurement System for Investigating the Long-Term Stability of Permanent Magnets for Sensor and Actuator Systems

10 Anhang

Der Anhang besteht aus Tabellen zu den im Ergebniskapitel dargestellten Messergebnissen in 10.1 sowie der Probenübersicht mit den verwendeten Probeneigenschaften und Messwerten für die Viskositätsparameteruntersuchung in 10.2.

10.1 Tabellen der Messergebnisse

10.1.1 Temperaturbasierter Viskositätsparameter

Für die in Abschnitt 5.3.5 beschriebene Umrechnung des temperaturbasierten Viskositätsparameters S_v^T [°C] in feldbasierte Werte S_v^* [kA/m] wurden Hysteresegraphmessungen der jeweiligen Probe bei unterschiedlichen Temperaturen verwendet. Basierend auf dem Temperaturgradienten der Koerzitivfeldstärke nach Gl. (31) wird der absolute Temperaturkoeffizient bestimmt (Tab. 18). Dieser wird mit dem temperaturbasierten S_v^T -Wert multipliziert, woraus die in Tab. 19 aufgeführten feldabhängigen Werte S_v^* resultieren.

Tab. 18: Umrechnungsfaktoren für S_v^* : Temperaturgradient des Koerzitivfeldes ($\alpha_{H_{cj}}^{\text{abs}}$).

T [°C]	N52		N52-M		N52-H		N52-SH		N35	
	H_{cj} [kA/m]	$\Delta H_{cj}/\Delta T$ [(kA/m)/°C]	H_{cj} [kA/m]	$\Delta H_{cj}/\Delta T$ [(kA/m)/°C]	H_{cj} [kA/m]	$\Delta H_{cj}/\Delta T$ [(kA/m)/°C]	H_{cj} [kA/m]	$\Delta H_{cj}/\Delta T$ [(kA/m)/°C]	H_{cj} [kA/m]	$\Delta H_{cj}/\Delta T$ [(kA/m)/°C]
20	1026		1116		1375		1537		1060	
50	790	7.87								
70	625	8.25	690		889		1100		711	10.16
80	580	4.5	637	5.3	804	8.5	999	10.1	650	8.13
100	473	5.35	513	6.2	644	8	832	8.35	514	5.14
120	357	5.8	422	4.55	522	6.1	691	7.05	445	3.71
150	283	2.47	301	4.03	363	5.3	501	6.333	333	2.22
170	250	1.65								
180					267		345		240	1.33
200	118	4.4			202	3.25	249	4.8		
Linear Fit:	$-0.0335x + 8.9682$		$-0.0241x + 7.7282$		$-0.0446x + 12.028$		$-0.0413x + 12.694$		$-0.0439x + 9.9572$	

Die so berechneten S_v^* -Werte wurden anschließend mit VSM-Messungen verglichen, wie in Tab. 19 tabellarisch und in Abb. 5.61 (basierend auf den Feldwerten aus Abb. 5.60) dargestellt.

Tab. 19: S_v^T und S_v^* im Vergleich mit VSM-Messergebnissen bei ähnlichen Temperatur- und Feldbedingungen. Die exakten $S_v(H)$ -Werte wurden durch lineare Interpolation zwischen den beiden nächstgelegenen Messpunkten bestimmt.

T [°C]	Probe	$H_{int} (S_v^T)$ [kA/m]	S_v^T [°C]	$\alpha_{H_{cj}}^{abs} = \frac{\Delta H_{cj}}{\Delta T} \left[\frac{\text{kA/m}}{^\circ\text{C}} \right]$	S_v^* [kA/m]	S_v (VSM) [kA/m]
70	N52	640	0.82	8.3	6.8	8.4
	N52-SH	840	/	9.7	/	7.7
100	N52	480	1.05	5.3	5.6	5.8
	N52-SH	754	1.2	8	9.6	8.9
130	N52	295	1.17	3.6	4.2	3.98
	N52-SH	586	1.37	6.8	9.4	8.2
160	N52	216	1.28	2.1	2.7	3
	N52-SH	430	1.5	5.7	8.6	8

10.2 Übersichtstabelle Probendaten

Tab. 20: Probenübersicht über die konventionellen Proben.

Hersteller	Proben Nr.	Besonderheit	Kategorie	Bezeichnung	N	Mittlere Korngröße D50 [µm]	H _{ej} [kA/m] (30°C)	J _r [T] (30°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (30 °C)	H _{ej} [kA/m] (70°C)	J _r [T] (70°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (70 °C)	H _{ej} [kA/m] (100°C)	J _r [T] (100°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (100 °C)	H _{ej} [kA/m] (130°C)	J _r [T] (130°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (130 °C)	H _{ej} [kA/m] (160°C)	J _r [T] (160°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (160 °C)	S _v [kA/m] (30 °C)	S _v [kA/m] (70 °C)	S _v [kA/m] (100 °C)	S _v [kA/m] (130 °C)	
A	1	SmCo	SmCo	R28	0,56	1987	1,1	225	1756	0,967			1593	0,94	176	1456	0,932	173	1368	0,731	106	13				
J	2	GBD	GBD	N30-AH	0,56	11,55	2786	1,11	235	2173			1775		0	1401		0	1075			142	13,2	12,5	10	
B	3	standard	standard	N35	0,56	6,16	1023	1,17	279	711	1,1	241	514	1,09	236	393	1,05	219	289	0,98	191	4,2	4,5	4,4	3,34	
C	4	Cer	Cer	N35-Cer	0,56	5,3	1016	1,16	258	628	1,06	212	460	1,02	207	326	0,98	191	215	0,88	154	4	5	4,7	3,4	
B	5	standard	standard	N35-M	0,56	1275	1,21	281	773	1,14	248	556	1,09	236	305	0,995	197					6	7	6	5	
B	6	standard	standard	N35-H	0,56	1551	1,2	274	1041	1,11	234	775	1,08	232	446	1,03	211					7	6	4,8	4,5	
B	7	standard	standard	N35-SH	0,56	1767	1,2	273	1283	1,11	231	942	1,07	228	703	1,02	207					7,6	7,5	7	6,8	
C	8	standard	standard	N35-UH	0,56	4,7	1995	1,2	269	1571	1,08	227	1218	1,05	219	931	1	199				7,8	10	10	10	
B	9	standard	standard	N35-EH	0,56	2387	1,2	305	1692	1,17	266	134	1,1	241	1098	1,09	236							12	11	
B	10	standard	standard	N38-EH	0,56	2387	1,22	300					1553	1,08	232	1254	1,13	254						12	9,5	
B	11	GBD	GBD+Dy	N38-EH + Dy =AH	0,56	2400	1,22	301					1815	1,07	228	1507	1,12	250							10	
B	12	GBD	GBD+Tb	N38-EH + Tb=AH	0,56	2300	1,22	264					1961	1,08	232	1639	1,12	250							11	
B	13	standard	standard	N40	0,56	8,81	1042	1,26	308				521	1,15	263	389	1,1	241				4,9	4,5	4,2	3,9	
D	14	standard	standard	N40	0,56	1233	1,24	306	807	1,17	258	587	1,13	254	431	1,08	232					5,5	5,2	4,7	4,2	
D	15	Cer	Cer	N40-Cer	0,56	6	980	1,26	300	624	1,16	255	448	1,11	245	319	1,06	224				5,3	5	4	3,94	
C	16	standard	standard	N40-H	0,56	7,3	1453	1,23	296	950	1,17	266	699	1,12	250	501	1,07	228				6	6,6	5,8	5,3	
E	17	standard	red. HfE	N40-SH-R	0,56	7,6	1649	1,26	310	1097	1,19	270	802	1,15	263	578	1,1	241				8,3	9	8	6,2	
E	18	standard	standard	N42	0,56	9,07	1107	1,32	331	696	1,22	280	505	1,17	272	365	1,12	250				7	5,4	4,6	3,8	
D	19	Cer	Cer	N42-SH Cer	0,56	5,4	1671	1,27	310	1150	1,19	278	921	1,17	272	694	1,12	250				7,6	10	8,5	7,9	
D	20	standard	standard	N42-SH	0,56	8,7	1741	1,3	320	1213	1,21	278	921	1,17	272	761	1,13	254				7,8	7,25	8	6,8	
F	21	standard	red. HfE	N42-SH-R	0,56	4,77	1790	1,28	317	1302	1,21	283	1021	1,17	272	761	1,13	254								
C	22	standard	standard	N45	0,56	6,1	935	1,33	330	531	1,23	278	376	1,16	268	247	1,1	241				6	4,5	4,25	4,3	
C	23	standard	standard	N45-M	0,56	5,5	1116	1,38	326	681	1,25	294	484	1,2	286	344	1,14	259				7	6,5	6	5,8	
C	24	standard	standard	N45-H	0,56	5,8	1539	1,3	327	989	1,21	278	721	1,15	263	523	1,11	245				8	7,5	5,5	5,4	
C	25	standard	standard	N45-SH	0,56	5,1	1712	1,3	328	1173	1,22	283	909	1,17	272	685	1,13	254				8,2	7	6	5,5	
E	26	standard	zero HfE	Z546-H	0,56	5	1437	1,35	352	938	1,26		710	1,23	301	525	1	326				7,5	6	5,4	4,7	
E	27	standard	red. HfE	N46-SH-R	0,56	5,7	1661	1,34	350	1131	1,25	866	1,23	301	667	1,18	277					6	7,5	7	6	
E	28	GBD	GBD	N46-EH	0,56	5,5	2390	1,34	351	1731	1,26	1406	1,23	301	1127	1	282					9	10,5	10	10	
E	29	standard	red. HfE	N46-UH-RS	0,56	1994	1,34	352	1469	1,29			1186	1,27	321	920	1,22	296				8	7	8	7	
E	30	GBD	GBD	N46-UH	0,56	5	1994	1,34	356	1510	1,3		1207	1,26	316	978	1	291				7,5	7	7	7	
F	31	standard	standard	N47-JH-R	0,56	4,48	1511	1,34	349	991	1,24		752	1,22	296	546	0,17	6				8	6,9	6,5	5,5	
D	32	Cer	Cer	N48-Cer	0,56	940	1,34	353	558	1,25			393	1,22	296	270	1	268				6	4,5	4,7	3,4	
E	33	standard	red. HfE	RS48-H	0,56	5,8	1460	1,35	349	956	1,28	314	710	1,23	301	515	1,17	272				7,4	6,16	6	5,4	
E	34	standard	zero HfE	Z548-H	0,56	1202	1,37	358	764	1,3	318	568	1,25	311	650	1	232				232	297	1	245	7	
F	35	standard	red. HfE	N48-H/F	0,56	3,54	1338	1,36	359	869	1,26		651	1,23	301	474	1,19	282				7	7	5,5	5	
B	36	standard	standard	N48-SH	0,56	6,68	1617	1,37	363	1227	1,26		947	1,23	301	650	1,18	277				8,4	7,5	7	6,7	
E	37	standard	red. HfE	N48-SH-R	0,56	4,91	1740	1,37	369	1270	1,26		720	1,23	301	540	1,31	341				8	8,3	7,6	6,8	

Hersteller	Proben Nr.	Besonderheit	Kategorie	Bezeichnung	N	Mittlere Korngröße D50 [µm]	H _{ej} [kA/m] (30°C)	J _r [T] (30°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (30 °C)	H _{ej} [kA/m] (70°C)	J _r [T] (70°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (70 °C)	H _{ej} [kA/m] (100°C)	J _r [T] (100°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (100 °C)	H _{ej} [kA/m] (130°C)	J _r [T] (130°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (130 °C)	H _{ej} [kA/m] (160°C)	J _r [T] (160°C)	(BH) _{max} [kJ/m³] (160 °C)	S _v [kA/m] (30 °C)	S _v [kA/m] (70 °C)	S _v [kA/m] (100 °C)	S _v [kA/m] (130 °C)	
B	38	standard	standard	N52	0.56	5.01	982	1.42	378	649	1.33	339	473	1.27	321	342	1.24	306				6.4	6.2	5.2	4.8	
B	39	standard	standard	N52-M	0.56		1111	1.43	388	695	1.33	334	512	1.28	326	376	1	296				6.5	5	4.75	3.7	
B	40	standard	standard	N52-H	0.56	5.91	1358	1.42	390	889	1.34	343	692	1.29	331	507	1.24	306				7	6.4	5	5.8	
B	41	standard	standard	N52-SH	0.56	5.86	1611	1.42	383	1083	1.33	340	860	1.3	336	615	1.23	301				8	9	8	8	
E	42	standard	red, HRE	N52-SH-R	0.56	6	1704	1.4	379	1164	1.33	344	882	1.28	326	667	1.23	301	483	1.15	263	7.5	8	7.6	7.4	
B	43	GBD	GBD	N52-SH	0.56	5.9	1791	1.43	391	1241	1.34	348	962	1.3	336	725	1.24	306				8.5	8	6.7	7	
E	44	GBD	GBD	N52-UH	0.56	4.8	1995	1.42	382													7.5	9	10	8	
B	45	standard	standard	N54	0.56	5.5	1044	1.43	395	631	1.34	342	449	1.3	336	315	1.24	306				5.5	5.8	6.47	6	
B	46	GBD	GBD	N54-H	0.56	5.2	1334	1.42	397	911	1.35	351	687	1.31	341	511	1.26	316				6.6	6	6	6.2	
D	47	standard	standard	N54-SH	0.56	5.26	1743	1.41	382	1274	1.34	337	1001	1.28	326	763	1.23	301				8.5	10	8.9	5.8	
E	48	GBD	GBD	N58-M	0.56	5.7	1246	1.46	408	767	1.38	360	563	1.34	357	393	1.28	326				8.2	6.5	5.4	5.4	
E	49	GBD	GBD	N58-H	0.56	6	1461	1.46	409	898	1.38	356	667	1.33	352	493	1.28	326				9	7.5	5	4.2	
D	50	GBD	GBD	N58-SH	0.56		1572	1.44	398	1122	1.35	345	857	1.32	347	644	1.26	316				9.5	8	7	8	
B	51	standard	N	N52, 0.75	0.75		982	1.42	378													7.1	6	6	6	
B	52	standard	N	N52, 0.56	0.56		982	1.42	378													6.9	6.2	5.2	6	
B	53	standard	N	N52, 0.5	0.5		982	1.42	378													6.9	6	5.4	6	
B	54	standard	N	N52, 0.45	0.45		982	1.42	378													6.7	5.7	5.3	5	
L	55	standard	Kugel	N35, Kugel 0.3	0.33		982	1.17	270													4.5				
L	56	standard	Kugel	N38, Kugel 0.3	0.33		982	1.22	290													5.5				
L	57	standard	Kugel	N42, Kugel 0.3	0.33		982	1.3	320													5				
B	58	Segmentierung	segmentiert	N52-UH / 1	0.6	4.7	1995	1.42	383													8	7.2	8	7	
B	59	Segmentierung	segmentiert	N52-UH / 2	0.6	4.7	1995	1.42	383													8.2	7.4	7.8	7.2	
B	60	Segmentierung	segmentiert	N52-UH / 4	0.6	4.7	1995	1.42	383													8.5	7.3	7.9	7.3	
L	61	GBD	GBD	54-UH	0.6		1990	1.46	383													8.2	6.2	7.8	7.5	
L	62	GBD	GBD	N48-UH	0.69		1994	1.37	385													7.5	8.5	9	8.5	
L	63	GBD	GBD	N42-SH	0.68		1740	1.34	344													7.6	8.5	8	7.5	
L	64	GBD	GBD	N52-EH	0.7		2390	1.4	377															7	8.5	8
L	65	GBD	GBD	N52-UH	0.6		1990	1.4	378													8	7	7	8	
K	66	GBD	GBD	N52-UH	0.3		1810	1.41	381													8.3	10	7	8	
I	67	GBD	GBD	N48-UH	0.57	7.2	1990	1.38	370													8.6	8	6	7	
F	68	GBD	GBD	N52-SH	0.3	5.9	1813	1.42	390													7.4	8	6.5	7	
H	69	GBD	GBD	N54-SH	0.3		1783	1.4	360													8.6	8	7	6	

Tab. 21: Probenübersicht der Nachwärmebehandlungsversuche.

Hersteller	Proben Nr.	Besonderheit	Kategorie	Bezeichnung	N	Mittlere Korngröße D_{50} [μm]	H_{ej} [kA/m] (30°C)	J_r [T] (30°C)	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³] (30 °C)	H_{ej} [kA/m] (70°C)	J_r [T] (70°C)	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³] (70 °C)	H_{ej} [kA/m] (100°C)	J_r [T] (100°C)	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³] (100 °C)	H_{ej} [kA/m] (130°C)	J_r [T] (130°C)	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³] (130 °C)	S_v [kA/m] (30 °C)	S_v [kA/m] (70 °C)	S_v [kA/m] (100 °C)	S_v [kA/m] (130 °C)
B	70	nachbehandelt	GBD	NS2-SH (A)	0,56	6,7	1117	1,41	367	637	1,32	309				342	1,23	301	8,4	9	8,5	8,4
B	71	nachbehandelt	GBD	NS2-SH (A, wh.)	0,56	6,7	1512	1,4	366	1032	1,33	327	782	1,28		585	1,23	301	7,6	6,3	5,77	6,13
B	72	nachbehandelt	GBD	NS2-SH (B)	0,56	6,6	1159	1,41	387									0	9	9,3	8,9	8,7
B	73	nachbehandelt	GBD	NS2-SH (B, wh.)	0,56	6,6	1501	1,41	389	1033	1,34	348	772	1,29		573	1,23	301	9,1	7	5,99	5,8
B	74	nachbehandelt	GBD	NS2-SH ((A, B) _{ref})	0,56	6	1082	1,4	365									0	8,45	8,9	8,4	8,2
B	75	nachbehandelt	GBD	NS2-SH ((A, B) _{ref} , wh.)	0,56	6	1556	1,4	378	1071	1,32	339	817	1,27		595	1,22	296	9	6	6,04	5,3

Literaturverzeichnis

- [1] S. Zhang *et al.*, "Permanent magnet technology for electric motors in automotive applications," in *2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nuremberg, Germany: IEEE, Oct. 2012, pp. 1–11. doi: 10.1109/EDPC.2012.6425118.
- [2] T. Yee Heng, T. Jian Ding, C. Choe Wei Chang, T. Jian Ping, H. Choon Yian, and M. Dahari, "Permanent Magnet Synchronous Generator design optimization for wind energy conversion system: A review," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 277–282, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.239.
- [3] P. Zacharias, *Magnetische Bauelemente: Grundlagen und Anwendungen*. in Lehrbuch. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-24742-3.
- [4] D. D. München and H. M. Veit, "Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs)," *Waste Management*, vol. 61, pp. 372–376, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.01.032.
- [5] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, "Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient," *Advanced Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 821–842, Feb. 2011, doi: 10.1002/adma.201002180.
- [6] M. Haavisto, S. Tuominen, H. Kankaanpää, and M. Paju, "Time Dependence of Demagnetization and Flux Losses Occurring in Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 9, pp. 3582–3584, Sep. 2010, doi: 10.1109/TMAG.2010.2047262.
- [7] M. Haavisto and M. Paju, "Temperature Stability and Flux Losses Over Time in Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 12, pp. 5277–5280, Dec. 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2023907.
- [8] R. Skomski, J. Zhou, R. D. Kirby, and D. J. Sellmyer, "Magnetic Aging," *MRS Proc.*, vol. 887, pp. 0887-Q07-07, 2005, doi: 10.1557/PROC-0887-Q07-07.
- [9] J. Faiz and H. Nejadi-Koti, "Demagnetization Fault Indexes in Permanent Magnet Synchronous Motors—An Overview," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 4, pp. 1–11, Apr. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2480379.
- [10] K. Dambrauskas, J. Vanagas, T. Zimnickas, A. Kalvaitis, and M. Ažubalis, "A Method for Efficiency Determination of Permanent Magnet Synchronous Motor," *Energies*, vol. 13, no. 4, p. 1004, Feb. 2020, doi: 10.3390/en13041004.
- [11] O. Bilgin and F. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," Sep. 2016, pp. 2080–2085. doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732809.
- [12] S. Ruoho, M. Haavisto, E. Takala, T. Santa-Nokki, and M. Paju, "Temperature Dependence of Resistivity of Sintered Rare-Earth Permanent-Magnet Materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 1, pp. 15–20, Jan. 2010, doi: 10.1109/TMAG.2009.2027815.
- [13] S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo, and A. Arkkio, "Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet

- Synchronous Motor,” *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 949–953, Apr. 2010, doi: 10.1109/TMAG.2009.2033592.
- [14] S. Ruoho and A. Arkkio, “Partial Demagnetization of Permanent Magnets in Electrical Machines Caused by an Inclined Field,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 7, pp. 1773–1778, Jul. 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.921951.
- [15] H. Xiong, J. Zhang, M. Degner, C. Rong, F. Liang, and W. Li, “Permanent Magnet Demagnetization Test Fixture Design and Validation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 1–1, Jul. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2544739.
- [16] D. C. Crew, G. McCormick, and R. Street, “Measurement of magnetic viscosity in NdFeB,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 4356–4358, Sep. 1996, doi: 10.1109/20.538867.
- [17] J. R. Brauer, *Magnetic actuators and sensors*, Second edition. in Wiley-IEEE Press. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, Wiley, 2014. doi: 10.1002/9781118779262.
- [18] G. Zhang, X. Guo, J. Zhou, and W. Hua, “Review on the Development and Applications of Permanent Magnet Vernier Motors,” *Energies*, vol. 18, no. 9, p. 2353, May 2025, doi: 10.3390/en18092353.
- [19] J. E. C. Williams, “Superconducting Magnets for MRI,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 31, no. 4, pp. 994–1005, 1984, doi: 10.1109/TNS.1984.4333424.
- [20] H. Krieger, “Grundlagen zur Teilchenbeschleunigung und Strahloptik,” in *Strahlungsquellen für Physik, Technik und Medizin*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, pp. 19–54. doi: 10.1007/978-3-662-66746-0_2.
- [21] International Energy Agency, “Global EV Outlook 2025.” IEA, Paris, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [22] C. C. Chan and K. T. Chau, “An advanced permanent magnet motor drive system for battery-powered electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 180–188, Feb. 1996, doi: 10.1109/25.481836.
- [23] D. Givord, P. Tenaud, T. Viadieu, and G. Hadjipanayis, “Magnetic viscosity in different Nd-Fe-B magnets,” *Journal of Applied Physics*, vol. 61, no. 8, pp. 3454–3456, Apr. 1987, doi: 10.1063/1.338751.
- [24] A. G. Clegg, I. M. Coulson, G. Hilton, and H. Y. Wong, “The temperature stability of NdFeB and NdFeBCo magnets,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 5, pp. 1942–1944, Sep. 1990, doi: 10.1109/20.104578.
- [25] H. D. Glass *et al.*, “Stability tests of permanent magnets built with strontium ferrite,” in *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Cat. No.97CH36167)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, 1998, pp. 3260–3262. doi: 10.1109/PAC.1997.753174.
- [26] he Hongwen, Z. Nana, and C. Sun, “Efficiency Decrease Estimation of a Permanent Magnet Synchronous Machine with Demagnetization Faults,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2718–2724, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.922.
- [27] S. Trout, “Use of Helmholtz coils for magnetic measurements,” *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 2108–2111, Aug. 1988, doi: 10.1109/20.3411.

- [28] S. Möwius, N. Kropff, and M. Velicescu, "Measurement technologies for permanent magnets," *ACTA IMEKO*, vol. 7, p. 15, Jan. 2019, doi: 10.21014/acta_imeko.v7i4.572.
- [29] S. Foner, "Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer," *Review of Scientific Instruments*, vol. 30, no. 7, pp. 548–557, Jul. 1959, doi: 10.1063/1.1716679.
- [30] Quantum Design, "Physical Property Measurement System (PPMS)." [Online]. Available: <https://qd-europe.com/be/en/product/physical-property-measurement-system-ppms/>
- [31] M. Blagojevic and D. Mancic, "The system for magnetic field mapping based on the integrated 3D Hall sensor," Nov. 2016, pp. 1–8. doi: 10.1109/TELFOR.2016.7818852.
- [32] D. Givord, Q. Lu, and M. F. Rossignol, "Coercivity in Hard Magnetic Materials," in *Science and Technology of Nanostructured Magnetic Materials*, vol. 259, G. C. Hadjipanayis and G. A. Prinz, Eds., in NATO ASI Series, vol. 259, Boston, MA: Springer US, 1991, pp. 635–656. doi: 10.1007/978-1-4899-2590-9_70.
- [33] D. Goll and H. Kronmüller, "High-performance permanent magnets," *Naturwissenschaften*, vol. 87, no. 10, pp. 423–438, Nov. 2000, doi: 10.1007/s001140050755.
- [34] R. Hilzinger and W. Rodewald, *Magnetic materials: fundamentals, products, properties, and applications*. Erlangen: Hanau, Germany: Publicis; VAC, VACUUMSCHMELZE, 2013.
- [35] G. R. Kahler, L. H. Bennett, and E. Della Torre, "Coercivity and the critical switching field," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 372, no. 1–2, pp. 1–4, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.physb.2005.10.005.
- [36] L. Vaidman, "Torque and force on a magnetic dipole," *American Journal of Physics*, vol. 58, no. 10, pp. 978–983, Oct. 1990, doi: 10.1119/1.16260.
- [37] F. Lowes, "The torque on a magnet," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 337, pp. 555–567, 1974, doi: 10.1098/rspa.1974.0067.
- [38] T. H. Boyer, "The force on a magnetic dipole," *American Journal of Physics*, vol. 56, no. 8, pp. 688–692, Aug. 1988, doi: 10.1119/1.15501.
- [39] H. R. Kirchmayr, "Permanent magnets and hard magnetic materials," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 29, no. 11, pp. 2763–2778, Nov. 1996, doi: 10.1088/0022-3727/29/11/007.
- [40] R. C. O’Handley and H. H. Liebermann, "Magnetic and Electronic Properties of Rapidly Quenched Materials," in *Elements of Rapid Solidification*, vol. 29, M. A. Otonari, Ed., in Springer Series in Materials Science, vol. 29, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 153–186. doi: 10.1007/978-3-642-45755-5_6.
- [41] H. Stöcker, Ed., *Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten*, 4., Korrigierte Aufl. Thun Frankfurt am Main: Deutsch, 2000.

- [42] M. L. Coffman, "Source Equation for Magnetic Flux Density," *American Journal of Physics*, vol. 30, no. 12, pp. 926–927, Dec. 1962, doi: 10.1119/1.1941851.
- [43] J. Bahrtdt, "Permanent magnets including undulators and wigglers," in *CERN Accelerator School: Course on Magnets*, Mar. 2011.
- [44] International Electrotechnical Commission, "IEC 60404-8-1: Magnetic Materials – Part 8-1," IEC, 60404-8-1, 2015. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/22780>
- [45] G. Martinek, S. Ruoho, and U. Wyss, "Measurement of Rare-Earth Magnet Properties – Arnold Magnetic Technologies (White Paper, Juli 2021)," Jul. 2021. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2021/11/White-Paper-Measurement-07.23.2021MS2a4.pdf>
- [46] Dura Magnetics, "What is Maximum Energy Product / (BH)max and How Does It Correspond to Magnet Grade?," Dura Magnetics Tech Briefs. [Online]. Available: <https://www.duramag.com/techtalk/tech-briefs/what-is-maximum-energy-product-bhmax-and-how-does-it-correspond-to-magnet-grade/>
- [47] Arnold Magnetic Technologies Corporation, *Neodymium–Iron–Boron Magnet Catalog / Arnold Neo Catalog*. Rochester, NY: Arnold Magnetic Technologies Corp., 2019. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2019/06/Arnold-Neo-Catalog.pdf>
- [48] "Gesinterter NdFeB-Magnete – Bomatec AG," Bomatec AG. [Online]. Available: <https://www.bomatec.com/de/produkte/magnete/gesinterter-ndfeb-magnete>
- [49] "Neo Catalog – Arnold Magnetics (Juni 2019)," Arnold Magnetics. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2019/06/Arnold-Neo-Catalog.pdf>
- [50] BEC GmbH, "Gesinterter korrosions- und temperaturbeständiger NdFeB der TERRAMAG® H-N 58/70 Klasse," BEC GmbH, Aug. 2024. [Online]. Available: https://www.bec-gmbh.de/wp-content/uploads/2025/03/HN_58-80_Rev-6.pdf
- [51] D. Rao and M. Bagianathan, "Selection of Optimal Magnets for Traction Motors to Prevent Demagnetization," *Machines*, vol. 9, no. 6, 2021, doi: 10.3390/machines9060124.
- [52] Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, "Rare Earth Permanent Magnets – VACODYM, VACOMAX," 2014, [Online]. Available: https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/VACODYM-VACOMAX%20de.pdf
- [53] H. Cui *et al.*, "Analytical Calculation of Stray Magnetic Field in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Under Static Eccentricity Considering Nonlinear and Nonuniform Magnetic Saturation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 61, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2025, doi: 10.1109/TMAG.2024.3504497.
- [54] G. Xiao-fan, Y. Yong, and Z. Xiao-jing, "Analytic expression of magnetic field distribution of rectangular permanent magnets," *Appl Math Mech*, vol. 25, no. 3, pp. 297–306, Mar. 2004, doi: 10.1007/BF02437333.
- [55] A. C. Malloy, R. F. Martinez-Botas, and M. Lamperth, "Measurement of Magnet Losses in a Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine," *IEEE*

- Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 323–330, Mar. 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2353133.
- [56] J. M. D. Coey, *Magnetism and magnetic materials*, Repr. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013.
- [57] A. Aharoni, “Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms,” *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 6, pp. 3432–3434, Mar. 1998, doi: 10.1063/1.367113.
- [58] D.-X. Chen, J. A. Brug, and R. B. Goldfarb, “Demagnetizing factors for cylinders,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 4, pp. 3601–3619, Jul. 1991, doi: 10.1109/20.102932.
- [59] R. Street and J. C. Woolley, “A Study of Magnetic Viscosity,” *Proc. Phys. Soc. A*, vol. 62, no. 9, p. 562, Sep. 1949, doi: 10.1088/0370-1298/62/9/303.
- [60] J.-C. Barbier, “Le trainage magnétique de fluctuation,” *Ann. Phys.*, vol. 12, no. 9, pp. 84–140, 1954, doi: 10.1051/anphys/195412090084.
- [61] R. Street, R. K. Day, and J. B. Dunlop, “Magnetic viscosity in NdFeB and SmCo5 alloys,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 69, no. 1, pp. 106–112, Oct. 1987, doi: 10.1016/0304-8853(87)90217-4.
- [62] L. Néel, “Le traînage magnétique,” *J. Phys. Radium*, vol. 12, no. 3, pp. 339–351, 1951, doi: 10.1051/jphysrad:01951001203033900.
- [63] L. Néel, “Théorie du traînage magnétique des substances massives dans le domaine de Rayleigh,” *J. Phys. Radium*, vol. 11, no. 2, pp. 49–61, Feb. 1950, doi: 10.1051/jphysrad:0195000110204900.
- [64] R. Street and J. C. Woolley, “A Study of Magnetic Viscosity,” *Proc. Phys. Soc. A*, vol. 62, no. 9, pp. 562–572, Sep. 1949, doi: 10.1088/0370-1298/62/9/303.
- [65] S. Constantinides, “Stabilization and Calibration of Permanent Magnets,” *SMMA Technical Conference*, 2009.
- [66] M. Haavisto, H. Kankaanpää, T. Santa-Nokki, S. Tuominen, and M. Paju, “Effect of Stabilization Heat Treatment on Time-Dependent Polarization Losses in Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnets,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 40, p. 06001, 2013, doi: 10.1051/epjconf/20134006001.
- [67] M. Haavisto, *Studies on the Time-Dependent Demagnetization of Sintered NdFeB Permanent Magnets*. in Tampere University of Technology. Publication. Tampere: Tampere University of Technology, 2013.
- [68] C. E. Webb, “The stability of permanent magnets,” *Proceedings of the IEE - Part C: Monographs*, vol. 108, no. 14, pp. 317–324, Sep. 1961, doi: 10.1049/pi-c.1961.0043.
- [69] W. L. Zingery, W. B. Whalley, E. B. Romberg, and F. W. Wheeler, “Evaluation of Long-Term Magnet Stability,” *Journal of Applied Physics*, vol. 37, no. 3, pp. 1101–1103, Mar. 1966, doi: 10.1063/1.1708352.
- [70] J. Cui *et al.*, “Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets,” *Acta Materialia*, vol. 158, pp. 118–137, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.actamat.2018.07.049.
- [71] D. Brown, B.-M. Ma, and Z. Chen, “Developments in the processing and properties of NdFeb-type permanent magnets,” *Journal of Magnetism and Magnetic*

- Materials*, vol. 248, no. 3, pp. 432–440, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0304-8853(02)00334-7.
- [72] J. M. D. Coey, “Permanent magnet applications,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 248, no. 3, pp. 441–456, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0304-8853(02)00335-9.
- [73] F. Chen, “Recent progress of grain boundary diffusion process of Nd-Fe-B magnets,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 514, p. 167227, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmmm.2020.167227.
- [74] L. Q. Yu, Y. H. Wen, and M. Yan, “Effects of Dy and Nb on the magnetic properties and corrosion resistance of sintered NdFeB,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 283, no. 2–3, pp. 353–356, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.jmmm.2004.06.006.
- [75] K. Hioki, “Development of High-Performance Hot-Deformed Neodymium–Iron–Boron Magnets without Heavy Rare-Earth Elements,” *Materials*, vol. 16, no. 19, p. 6581, Oct. 2023, doi: 10.3390/ma16196581.
- [76] S. Glöser-Chahoud, A. Kühn, and L. A. Tercero Espinoza, “Globale Verwendungsstrukturen der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium: Eine szenariobasierte Analyse der Auswirkung der Diffusion der Elektromobilität auf den Bedarf an Seltenen Erden,” May 2016, doi: 10.24406/PUBLICA-FHG-297883.
- [77] J. Li, H. Sepehri-Amin, T. Sasaki, T. Ohkubo, and K. Hono, “Most frequently asked questions about the coercivity of Nd-Fe-B permanent magnets,” *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 22, no. 1, pp. 386–403, Dec. 2021, doi: 10.1080/14686996.2021.1916377.
- [78] A. Mazilkin *et al.*, “Grain boundary oxide layers in NdFeB-based permanent magnets,” *Materials & Design*, vol. 199, p. 109417, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109417.
- [79] T. T. Sasaki, T. Ohkubo, and K. Hono, “Structure and chemical compositions of the grain boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnets,” *Acta Materialia*, vol. 115, pp. 269–277, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.05.035.
- [80] H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, and K. Hono, “Grain boundary structure and chemistry of Dy-diffusion processed Nd–Fe–B sintered magnets,” *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 9, p. 09A745, May 2010, doi: 10.1063/1.3351247.
- [81] Z. Dai, K. Li, Z. Wang, T. Wang, W. Liu, and Z. Zhang, “Grain boundary diffusion mechanism in Dy-diffused Nd–Fe–B sintered magnets,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 57, no. 30, p. 305004, Aug. 2024, doi: 10.1088/1361-6463/ad3bc6.
- [82] W. Li *et al.*, “Enhancement of local anti-demagnetization ability of permanent magnet by selected area grain boundary diffusion toward high-speed motors,” *AIP Advances*, vol. 14, no. 3, p. 035233, Mar. 2024, doi: 10.1063/9.0000757.
- [83] T. Tomše *et al.*, “Multicomponent permanent magnets for enhanced electrical device efficiency,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 494, p. 165750, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.165750.
- [84] A. Durgun *et al.*, “Toward Maximum Utilization of Heavy Rare Earths in Sintered Nd–Fe–B Magnets by Grain Boundary Diffusion Source and Application Area

- Optimization,” *Adv Eng Mater*, vol. 27, no. 22, p. e202501145, Nov. 2025, doi: 10.1002/adem.202501145.
- [85] R. Ramesh, G. Thomas, and B. M. Ma, “Magnetization reversal in nucleation controlled magnets. II. Effect of grain size and size distribution on intrinsic coercivity of Fe-Nd-B magnets,” *Journal of Applied Physics*, vol. 64, no. 11, pp. 6416–6423, Dec. 1988, doi: 10.1063/1.342055.
- [86] M. F. De Campos, “Effect of Grain Size on the Coercivity of Sintered NdFeB Magnets,” *MSF*, vol. 660–661, pp. 284–289, Oct. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.284.
- [87] K. Uestuener, M. Katter, and W. Rodewald, “Dependence of the Mean Grain Size and Coercivity of Sintered Nd–Fe–B Magnets on the Initial Powder Particle Size,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2897–2899, Oct. 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.879889.
- [88] Wan-Ying Huang, A. Bettayeb, R. Kaczmarek, and J.-C. Vannier, “Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 381–387, Jun. 2010, doi: 10.1109/TEC.2009.2036250.
- [89] J. Vannest and J. Zhang, “Partially Segmented Permanent-Magnet Losses in Interior Permanent-Magnet Motors,” *Energies*, vol. 18, no. 11, p. 2879, May 2025, doi: 10.3390/en18112879.
- [90] Arnold Magnetic Technologies, “Recoma Combined 160301,” Arnold Magnetic Technologies, Mar. 2016. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Recoma-Combined-160301.pdf>
- [91] Arnold Magnetic Technologies, “RECOMA® Samarium-Kobalt-Magnete,” Arnold Magnetic Technologies, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.de/products/recoma-samarium-cobalt-magnets/>
- [92] Arnold Magnetic Technologies, “Samarium-Cobalt vs Neodymium-Iron-Boron – Arnold Magnetic Technologies,” Arnold Magnetic Technologies. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.co.uk/resources/samarium-cobalt-vs-neodymium-iron-boron/>
- [93] R. Martis, N. Gupta, S. Sankar, and V. Rao, “Permanent magnetic materials with low reversible temperature coefficient,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 15, no. 2, pp. 948–950, Mar. 1979, doi: 10.1109/TMAG.1979.1060289.
- [94] C. Ji, J. Yang, W. Mao, Y. Yang, W. Li, and X. Yu, “High performance 2:17 type SmCo permanent magnets with low temperature coefficients,” *Solid State Communications*, vol. 108, no. 9, pp. 667–670, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0038-1098(98)00441-4.
- [95] Arnold Magnetic Technologies, “Recoma Stab – Temperature Compensated Rare Earth Magnets,” Jan. 2020. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2020/02/Recoma-stab-23.01.2020.pdf>

- [96] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to magnetic materials*, Second edition. Piscataway: IEEE Press, 2009. doi: 10.1002/9780470386323.
- [97] "Hall-Sensor," Wikipedia. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hall-Sensor>
- [98] D. C. Giancoli, *Physik: Lehr- und Übungsbuch ; [mit über 3000 Aufgaben, komplette Lösungswege im Internet zum Download]*, 3., Erweiterte Auflage. in ph - Physik. München Boston San Francisco Harlow, England Don Mills, Ontario Sydney Mexico City Madrid Amsterdam: Pearson Studium, 2010.
- [99] Metrolab Technology SA, "Fluxmeter – Technologie." [Online]. Available: <https://old.metrolab.com/technology/fluxmeter/>
- [100] M. Cunningham and G. Bibby, "Electrical Measurement," in *Electrical Engineer's Reference Book*, Elsevier, 2003, pp. 11-1-11–43. doi: 10.1016/B978-075064637-6/50011-3.
- [101] E. Ramsden, "Development Tools," in *Hall-Effect Sensors*, Elsevier, 2006, pp. 187–202. doi: 10.1016/B978-075067934-3/50011-9.
- [102] Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, "MS Helmholtz Coils," Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Köln, Germany, 2024. [Online]. Available: <https://www.magnet-physik.de/wp-content/uploads/2024/04/MS-Helmholtz-coils-e-3261.pdf>
- [103] Dr. Brockhaus Messtechnik GmbH & Co. KG, "Measurements using the Helmholtz coil: Magnetic moment M and polarization J," Dr. Brockhaus Messtechnik GmbH & Co. KG, Lüdenscheid, Germany, 2024. [Online]. Available: <https://www.brockhaus.com>
- [104] D. W. Carnegie and J. Timpf, "Characterizing permanent magnet blocks with Helmholtz coils," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 319, no. 1, pp. 97–99, Aug. 1992, doi: 10.1016/0168-9002(92)90537-E.
- [105] E. H. Hall, "On a New Action of the Magnet on Electric Currents," *American Journal of Mathematics*, vol. 2, no. 3, p. 287, Sep. 1879, doi: 10.2307/2369245.
- [106] A. C. Beer, "The Hall effect and related phenomena," *Solid-State Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 339–351, May 1966, doi: 10.1016/0038-1101(66)90148-1.
- [107] M. Crescentini, S. F. Syeda, and G. P. Gibiino, "Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 11, pp. 10137–10151, Jun. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3119766.
- [108] D. R. Popovic, S. Dimitrijevic, M. Blagojevic, P. Kejik, E. Schurig, and R. S. Popovic, "Three-Axis Teslameter With Integrated Hall Probe," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 4, pp. 1396–1402, Aug. 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.900133.
- [109] M. El Malki and D. Bria, "Realization of a Teslameter Based on an Analog Low-Cost Hall Effect Sensor for Educational Uses," in *Advanced Materials for Sustainable Energy and Engineering*, E. M. Elkhatabi, M. Boutahir, K. Termentzidis, K. Nakamura, and A. Rahmani, Eds., in Springer Proceedings in Energy. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 353–357. doi: 10.1007/978-3-031-57022-3_43.

- [110] M. El Malki and D. Bria, "Design of a Digital Teslameter Based on a Magnetic Sensor," in *Advanced Materials for Sustainable Energy and Engineering*, M. Boutahir and E. El Mehdi, Eds., in Engineering Materials. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 55–65. doi: 10.1007/978-3-031-75032-8_5.
- [111] Magcam NV, "Magcam MiniCube3D 3D Magnetic Field Camera." [Online]. Available: <https://www.magcam.com/magnetic-field-measurement-systems/MiniCube-3D>
- [112] Senis AG, "SENIS SEN-3D-CAM True 3D Magnetic Field Camera." [Online]. Available: <https://www.senis.swiss/mappers/sen-3d-cam-magnetic-field-camera/>
- [113] K. Erglis, J. Cimurs, and G. Kitenbergs, "Low-Cost Solution for Magnetic Field Mapping Device," in *2018 22nd International Conference Electronics*, Jun. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELECTRONICS.2018.8443648.
- [114] "Development of low-cost real-time data acquisition system for process automation and control." Accessed: Sep. 13, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7847826>
- [115] Senis Swiss AG, "Mappers Datasheet – Senis Swiss (August 2022)," 2022, [Online]. Available: <https://www.senis.swiss/wp-content/uploads/2022/08/Datasheet-Mappers.pdf>
- [116] E. J. Dennison, "The hysteresisgraph as a quality control tool," in *Proceedings of Electrical/Electronics Insulation Conference*, Chicago, IL, USA: IEEE, 1993, pp. 221–227. doi: 10.1109/EEIC.1993.631056.
- [117] Magnet-Physik GmbH, "PERMAGRAPH C: Zur rechnergesteuerten Messung der Magnetisierungskurven hartmagnetischer Werkstoffe," Magnet-Physik GmbH, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://www.magnet-physik.de/wp-content/uploads/2023/02/18162877-Permagraph-C-d-3116.pdf>
- [118] F. Fiorillo, C. Beatrice, O. Bottauscio, and E. Patroi, "Measuring the Hysteresis Loop of Permanent Magnets With the Pulsed Field Magnetometer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 7, pp. 3159–3164, Jul. 2007, doi: 10.1109/TMAG.2007.893536.
- [119] W. Burgei, M. J. Pechan, and H. Jaeger, "A simple vibrating sample magnetometer for use in a materials physics course," *American Journal of Physics*, vol. 71, no. 8, pp. 825–828, Aug. 2003, doi: 10.1119/1.1572149.
- [120] Cryogenic Ltd, "Cryogen-Free Measurement Systems and Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Options." Cryogenic Ltd, 2025. [Online]. Available: <https://www.cryogenic.co.uk/products/vibrating-sample-magnetometer-vsm>
- [121] Metis Instruments & Equipment NV, "HyMPulse Brochure," Metis Instruments & Equipment NV, Leuven, Belgium, 2022. [Online]. Available: https://www.metis.be/sites/default/files/downloads/2022%20Brochure_Metis_drieluik_HyMPulse.pdf
- [122] M. Przybylski, D. Kapelski, B. Ślusarek, and S. Wiak, "Impulse Magnetization of Nd-Fe-B Sintered Magnets for Sensors," *Sensors*, vol. 16, no. 4, p. 569, Apr. 2016, doi: 10.3390/s16040569.

- [123] MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH, "Impulsmagnetisierer K-Serie – Modell IM-K-3170," 2020, [Online]. Available: <https://www.magnet-physik.de/wp-content/uploads/2023/02/38565773-IM-K-d-3170.pdf>
- [124] E. Hering, "Elektrische Messtechnik," in *Elektrotechnik und Elektronik in Maschinenbau und Mechatronik*, E. Hering, R. Martin, J. Kempkes, and J. Gutekunst, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024, pp. 553–582. doi: 10.1007/978-3-662-67538-0_9.
- [125] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-19303-8.
- [126] Texas Instruments, "ADS1256 24-Bit ADC with PGA – Texas Instruments." [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/de-de/ADS1256>
- [127] Texas Instruments, "ADS1115 16-Bit ADC with Programmable Comparator – Texas Instruments." [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>
- [128] APsemi, "APsemi G8211 Datasheet (rev. 2, 04.03.2015)." [Online]. Available: http://apsemi.com/data/item/oimg/APsemi_G8211_datasheet_rev.2_150304_1638444655.pdf
- [129] H. Bernstein, *Measuring Electronics and Sensors: Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing*, 1st ed. 2022. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-35067-3.
- [130] Arduino, *Arduino IDE*. (2025). Arduino AG. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [131] The MathWorks, "MATLAB," vol. R2024a, 2024, Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [132] T. Kresse, G. Martinek, G. Schneider, and D. Goll, "The Field-Dependent Magnetic Viscosity of FeNdB Permanent Magnets," *Materials*, vol. 17, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17010243.
- [133] T. Tomše *et al.*, "Magnetic Performance and Anticorrosion Coating Stability of Thermally Demagnetized Nd-Fe-B Permanent Magnets for Reuse Applications," *Materials*, vol. 17, no. 23, p. 5927, Dec. 2024, doi: 10.3390/ma17235927.
- [134] X. Ding, K. Ding, S. Cui, Y. Sun, and M. Li, "Effect of optimal aging treatment on magnetic performance and mechanical properties of sintered Nd-Fe-B permanent magnets," *J. Cent. South Univ.*, vol. 23, no. 3, pp. 515–522, Mar. 2016, doi: 10.1007/s11771-016-3097-x.
- [135] R. Street and J. C. Woolley, "Time Decrease of Magnetic Permeability in Alnico," *Proc. Phys. Soc. B*, vol. 63, no. 7, pp. 509–519, Jul. 1950, doi: 10.1088/0370-1301/63/7/305.
- [136] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, G. Schneider, and D. Goll, "Magnetic Viscosity Characterization of Fe–Nd–B Permanent Magnets Using a Novel Measurement Approach," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 61, no. 4, pp. 1–5, Apr. 2025, doi: 10.1109/TMAG.2025.3544856.
- [137] thyssenkrupp Steel Europe AG, "Lieferprogramm Nicht kornorientiertes Elektroband powercore®," thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg, Deutschland,

2023. [Online]. Available: https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/lieferprogramme/thyssenkrupp_lieferprogramm_no_elektroband_powercore_steel_de.pdf
- [138] R. S. Popovic, "High resolution Hall magnetic sensors," in *2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings - MIEL 2014*, Belgrade, Serbia: IEEE, May 2014, pp. 69–74. doi: 10.1109/MIEL.2014.6842087.
- [139] M. Lanz, G. Martinek, G. Schneider, and D. Goll, "In Situ Visualization of Inhomogeneities in the Magnetic Properties of Permanent Magnets," *Metrology*, vol. 4, no. 3, pp. 506–516, Sep. 2024, doi: 10.3390/metrology4030031.
- [140] ChenYang Technologies GmbH & Co. KG, "CYSJ362A GaAs Hall-Effekt-Elemente," 2016, [Online]. Available: <https://www.chenyang-gmbh.com/media/pdf/7c/7e/7d/CYSJ362A.pdf>
- [141] SENIS AG, "SENM3Dx Evaluation Kit v2.4," 2024, [Online]. Available: https://www.senis.swiss/wp-content/uploads/2022/08/SENIS_SENM3Dx_Eval_Kit_v2.4_rev1.1.pdf
- [142] KTR Systems GmbH, "DATAFLEX® Drehmomentmesswelle," 2024, [Online]. Available: https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Tools_Downloads/kataloge/09_Drehmomentmesswellen.pdf
- [143] S. Hesse, *Sensoren Für Die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*, 7th ed. Wiesbaden: Vieweg, 2018.
- [144] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, A. Georgiadis, G. Schneider, and D. Goll, "Application-Oriented In-Situ Testing Methods for Permanent Magnet Characterization," *SMSI-Nuremberg 2025*, vol. AMA-Science, pp. 327–328, 2025, doi: 10.5162/SMSI2025/P48.
- [145] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, A. Georgiadis, G. Schneider, and D. Goll, "Development of a New Measurement System for Investigating the Long-Term Stability of Permanent Magnets for Sensor and Actuator Systems," presented at the *Sensoren und Messsysteme 2026*, Nürnberg, Jun. 2026. doi: 10.5162/sensoren2026/S3-5.
- [146] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, A. Georgiadis, G. Schneider, and D. Goll, "Non-destructive Measurement Framework for Integral and Local Analysis of Permanent Magnets in Quality Control and System Design," presented at the *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, accepted, in press, Nancy, France, May 2026.
- [147] Siemens Digital Industries Software, *Simcenter MAGNET*. Siemens Digital Industries Software. [Online]. Available: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/>
- [148] S.-J. L. Kang, "9 - ABNORMAL GRAIN GROWTH," in *Sintering*, S.-J. L. Kang, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005, pp. 117–135. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075066385-4/50009-1>.

- [149] J. Puhani, "Beschreibende Statistik," in *Kleine Formelsammlung zur Statistik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025, pp. 1–13. doi: 10.1007/978-3-658-48362-3_1.
- [150] H. Bernstein, *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*, 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. doi: 10.1007/978-3-658-38929-1.
- [151] V. N. Tondare, J. G. Whiting, A. L. Pintar, S. P. Moylan, A. Neveu, and F. Francqui, "An interlaboratory study for assessing repeatability and reproducibility of the data generated by rotating drum powder rheometers (Part 1: Granudrum)," *Powder Technology*, vol. 441, p. 119810, May 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119810.
- [152] CalculatingHub, "Koeffizient der Variation Rechner – Vergleichen Sie Datenvariabilität." [Online]. Available: <https://www.calculatinghub.com/de/calculators/statistics/coefficient-of-variation/>
- [153] H. Cantwell, Ed., *Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*, 3rd ed. Eurachem, 2025. [Online]. Available: <http://www.eurachem.org>
- [154] International Organization for Standardization, "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method," *ISO 5725-2*, 1994.
- [155] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, *Principles of instrumental analysis*, 7. edition. Boston, MA: Cengage Learning, 2018.
- [156] H. Kaiser, "Report for analytical chemists. II. Quantitation in elemental analysis," *Anal. Chem.*, vol. 42, no. 4, pp. 26A – 59a, Apr. 1970, doi: 10.1021/ac60286a027.
- [157] K. M. Ramachandran and C. P. Tsokos, "Linear regression models," in *Mathematical Statistics with Applications in R*, Elsevier, 2021, pp. 301–341. doi: 10.1016/B978-0-12-817815-7.00007-5.
- [158] M. H. Kutner, Ed., *Applied linear statistical models*, 5th ed. in The McGraw-Hill/Irwin series operations and decision sciences. Boston: McGraw-Hill Irwin, 2005.
- [159] B. Everitt, *The Cambridge dictionary of statistics*, 3rd ed. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [160] S. M. Ross, "Linear Regression," in *Introductory Statistics*, Elsevier, 2010, pp. 537–604. doi: 10.1016/B978-0-12-374388-6.00012-0.
- [161] M. Lanz, G. Martinek, G. Schneider, and D. Goll, "Temperature-Based Magnetic Viscosity Parameter for Evaluating Long-Term Magnetization Stability of Permanent Magnets," *Metals*, vol. 16, no. 6, p. 605, 2026, doi: 10.3390/met16060605.
- [162] P. Malagò *et al.*, "Magnetic Position System Design Method Applied to Three-Axis Joystick Motion Tracking," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6873, Dec. 2020, doi: 10.3390/s20236873.

- [163] C. Schott, R. Racz, and S. Huber, "CMOS three axis hall sensor and joystick application," in *Proceedings of IEEE Sensors, 2004.*, Vienna, Austria: IEEE, 2004, pp. 977–980. doi: 10.1109/ICSENS.2004.1426335.
- [164] Texas Instruments Incorporated, "TMAG5273 Low-Power Linear 3D Hall-Effect Sensor With I2C Interface (Data Sheet)." Texas Instruments, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmag5273.pdf>
- [165] Arnold Magnetic Technologies, "Recoma STAB 02," 2017. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Recoma-Combined-160301.pdf>
- [166] H. Ahn, H. Park, C. Kim, and H. Lee, "A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 1177–1187, May 2020, doi: 10.1007/s42835-020-00398-6.
- [167] Motorhersteller A, "Persönliche Kommunikation: Laufzeiten von Elektromotoren," Sep. 2025.
- [168] Motorhersteller B, "Lebensdauer von BLDC-Motoren – technische Auskunft," Bonndorf im Schwarzwald, 2025.
- [169] Inc. Tesla, "Fahrzeuggarantie." [Online]. Available: https://www.tesla.com/de_de/support/vehicle-warranty
- [170] BMW AG, "BMW Gewährleistung & Garantien." [Online]. Available: <https://www.bmw.de/de/topics/neuwagen/gewaehrleistung.html#garantien>
- [171] Volkswagen AG, "Volkswagen Garantieverlängerung und -verlängerung." [Online]. Available: <https://www.volkswagen.de/de/angebote-und-produkte/versicherungen/garantien.html#Hersteller>
- [172] M. Lanz, G. Martinek, T. Kresse, G. Schneider, and D. Goll, "Evaluation of Time-Dependent Magnetic Losses of Permanent Magnets," *Metals*, vol. 16, no. 3, p. 322, Mar. 2026, doi: 10.3390/met16030322.
- [173] Ansys Inc., *Ansys Maxwell*. Ansys Inc., Canonsburg, PA. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [174] W. Bekir, O. Messal, and A. Benabou, "Permanent Magnet Non-Linear Demagnetization Model for FEM Simulation Environment," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 2, pp. 1–5, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3084445.
- [175] V. Basso, "Hysteresis and relaxation effects in magnetic materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3176–3181, Sep. 2000, doi: 10.1109/20.908728.
- [176] M. Lanz, M. Böttle, G. Martinek, G. Schneider, and D. Goll, "Non-destructive analysis of coercivity distributions in permanent magnets with locally enhanced magnetic properties," *physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters*, 2025, doi: 10.1002/pssr.202500307.
- [177] Arnold Magnetic Technologies Corp, "Datasheet NdFeB, G52-UH, Rev. 210607." Jun. 2021. [Online]. Available: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2018/11/N52UH_GBDD_181031.pdf
- [178] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, "Datasheet VD801DTP," Jul. 2023, [Online]. Available: https://vacuumschmelze.de/03_Documents/Datasheets%20-%20Drawings/Permanent%20Magnets/VD801DTP_20C_180C_typ.pdf