



MASTERARBEIT

ENTMAGNETISIEREN VON NDFEB MAGNETEN DES KEIMBILDUNGS-TYPS

**ZUM ERWERB DES AKADEMISCHEN GRADES EINES
DIPLOM-INGENIEURES DER STUDIENRICHTUNG
ROHSTOFFVERARBEITUNG**

Ausgeführt am
Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung
im Department Mineral Resources Engineering
an der Montanuniversität Leoben

Eingereicht von:
Doninger Georg, BSc

Betreuung:
Dipl.-Ing. Dr. mont. Flachberger Helmut

Leoben, am 20.01.2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

28.01.2015

Doninger Georg, BSc

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Rahmen dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Flachberger sowohl für die Betreuung als auch für die Begutachtung und die Verbesserungsvorschläge bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei den Firmen IFE Aufbereitungstechnik und Schaufler für die gute Zusammenarbeit.

Zudem möchte ich meinen Studien- und Aufbereiterkollegen für den Zusammenhalt und die erlebten Stunden in den letzten Jahren danken.

Vor allem gilt mein Dank aber meinen Eltern, die dieses Studium ermöglicht und unterstützt haben, und meiner Partnerin Karina, die bei entstehenden Komplikationen im Zuge dieser Arbeit immer ein offenes Ohr hatte.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurzfassung	1
2	Abstract	2
3	Einleitung und Aufgabenstellung	3
4	Einführung und Begriffe	4
5	Arten von Permanentmagneten	10
5.1	Aluminium-Nickel-Kobalt	10
5.2	Ferrite	11
5.3	Seltene Erden Permanentmagnete	12
5.4	Kunststoffgebundene Magnete	17
5.5	Vergleich der hartmagnetischen Werkstoffe	18
6	Entmagnetisierungskurve	22
6.1	Entmagnetisierungsfeld	22
6.2	Ermittlung des Arbeitspunktes	23
6.3	Rechtwinkligkeitsfaktor	26
7	Magnetisieren von Permanentmagneten	28
7.1	Magnetisieretechnik	28
7.2	Magnetisierungsverhalten	30
8	Entmagnetisieren von Permanentmagneten	36
8.1	Thermisches Entmagnetisieren	36
8.2	Entmagnetisieren mit Wechselstrom	39
8.3	Mechanisches Entmagnetisieren	40
9	Anwendungsgebiete von NdFeB Magneten	41
9.1	Kommunikations- und Unterhaltungselektronik	43
9.2	Fahrzeugbereich	45
9.3	Industrieanlagen	47
9.4	Windkraftanlagen	48
9.5	Zusammenfassung	49
9.6	Verwendung nach Güteklasse	51
10	Versuche zum Entmagnetisieren von NdFeB Magneten	54
10.1	Entmagnetisieren durch mechanische Beanspruchung	54
10.2	Entmagnetisieren durch thermische Beanspruchung	55

10.3	Entmagnetisieren durch Wechselstrom oder in Kombination mit thermischer Beanspruchung	58
11	Entmagnetisieren von NdFeB im Verbundstoff	65
11.1	Aufgabenstellung	65
11.2	Probenbeschreibung	65
11.3	Versuchsprogramm und -Durchführung	66
11.4	Ergebnisse und Diskussion	67
12	Zusammenfassung und Diskussion	69
13	Abkürzungsverzeichnis	71
14	Abbildungsverzeichnis	73
15	Tabellenverzeichnis	74
16	Formelverzeichnis	75
17	Quellenverzeichnis	77
18	Anhang	81

1 KURZFASSUNG

Den zu Beginn durchgeführten Erläuterungen grundlegender Begriffe zur Beschreibung hartmagnetischer Werkstoffe schließen sich Literaturrecherchen über die in der Industrie eingesetzten Permanentmagnete und die Möglichkeiten des Magnetisierens bzw. Entmagnetisierens selbiger an. Angefügt folgt eine überblicksmäßige Aufstellung der Anwendungsgebiete von NdFeB Legierungen sowie die Zuordnung magnetischer Kennwerte der jeweiligen Einsatzgebiete. Im praktischen Teil dieser Arbeit werden Versuche zur Abmagnetisierung von einzelnen oder im Verbundstoff eingebauten NdFeB Magneten durchgeführt, wobei insbesondere eine Kombination aus thermischer Vorbehandlung und nachgeschalteter Wechselstromspule zur vollständigen Entmagnetisierung getestet wird.

2 ABSTRACT

At first basic terms and definitions to describe magnetically hard materials are specified. Subsequently, a literature study on different types of permanent magnets and the possibilities to magnetize or demagnetize them is performed. Furthermore the main applications of NdFeB magnets are determined and their characteristic magnetic values are dedicated. The experimental work includes tests to demagnetize the magnetic material as single components or embedded in compounds. A combination of preheating the magnets, followed by a complete demagnetization with an AC coil is tested particularly.

3 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

NdFeB Magnete stellen die derzeit stärksten verfügbaren Permanentmagnete dar, sie sind unter anderem charakterisiert durch hohe Koerzitivfeldstärken und remanente Flussdichten, wodurch sich auch hervorragende Werte des Energieproduktes ergeben. Die Hauptelemente dieses hartmagnetischen Werkstoffes sind Neodym, Eisen und Bor, wobei in geringeren Mengen auch Praseodym, Dysprosium, Terbium und Kobalt verwendet werden. Einsatz finden diese Legierungen unter anderem in Computern, Mobiltelefonen, Elektrofahrzeugen, Elektrofahrräder, Magnetscheidern und Windkraftanlagen, allerdings liegt der Fokus dieser Arbeit auf den dem Recycling von Elektroschrott zugeführten NdFeB Magneten.

Diese liegen nicht in freier Form vor, sondern sind in Verbundstoffen (z.B. Festplatten, Lautsprecher, etc.) fest eingebaut. Nach derzeitigem Stand besteht das Problem, wonach die Magnete während des erforderlichen Zerkleinerungsprozesses der Verbundstoffe aufgrund ihrer herausragenden magnetischen Eigenschaften an den Innenwandungen und den Werkzeugen der Zerkleinerungsaggregate haften bleiben und somit für eine gezielte Anreicherung aufgrund von Abrasion in fein- und feinstdispenser Form in den unterschiedlichsten (Zwischen-)Produkten der zum Einsatz gelangenden Prozesse unwiederbringlich verloren gehen. Die NdFeB Magnete sollen daher noch vor dem ersten Zerkleinerungsschritt im Verbundstoff entmagnetisiert werden, um zu verhindern, dass magnetische Partikel an ferromagnetischen Materialien haften bleiben. Im Anschluss soll es möglich sein, die hartmagnetischen zerkleinerten und entmagnetisierten Partikel rückzugewinnen.

Es sollen demzufolge Entmagnetisierungsversuche an diesen magnetischen Werkstoffen durchgeführt werden, wobei die Abmagnetisierung durch Prall- bzw. Schlagbeanspruchung, Erhitzen oder mit einer Wechselstromspule erreicht werden kann. Vor allem die Kombination aus Entmagnetisierung mit einer Wechselstromspule und einer vorab durchgeführten thermischen Beanspruchung erscheint als aussichtsreich. Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche über das Entmagnetisierungsverhalten dieser hartmagnetischen Legierungen soll dazu der Stand des Wissens erhoben werden.

Die daran angeschlossenen Versuche sollen zuerst an einzelnen Magneten und anschließend an in Verbundstoffen eingebauten Magneten durchgeführt werden.

4 EINFÜHRUNG UND BEGRIFFE

Ferromagnetische Materialien sind durch eine spontane Magnetisierung gekennzeichnet, wobei in einem Körper, der aus einem solchen Material besteht, die Magnetisierung derart randomisiert auftritt, dass nach außen kein resultierendes Magnetfeld vorhanden ist. Erst durch Anlegen eines externen Magnetfeldes kann die Magnetisierungsrichtung einheitlich ausgerichtet werden (Abbildung 1), wodurch ein nach außen messbares Magnetfeld entsteht [37]. Diese magnetische Ausrichtung bleibt nach dem Entfernen des äußeren Feldes erhalten.

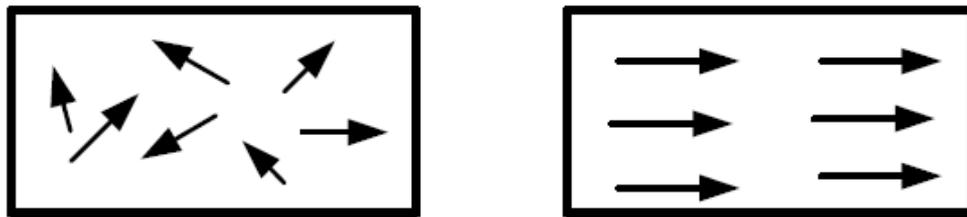


Abbildung 1 Ferromagnetisches Material vor (links) und nach (rechts) Ausrichtung durch ein externes Magnetfeld [47]

Permanentmagnete weisen ferromagnetisches Verhalten auf und sind charakterisiert durch breite Hystereseschleifen und hohe Koerzitivfeldstärken [6]. Für die Darstellung des Hysteresegraphen sind zwei Darstellungsarten gebräuchlich:

1. BH-Darstellung

Auf der Abszisse wird die magnetische Feldstärke (H , [A/m]) und auf der Ordinate die magnetische Flussdichte (B , [T]) aufgetragen.

2. JH-Darstellung

Auf der Abszisse wird die magnetische Feldstärke und auf der Ordinate die Polarisierung (J , [T]) aufgetragen.

Im Vakuum lässt sich der Zusammenhang zwischen Flussdichte und Feldstärke durch die magnetische Induktionskonstante (μ_0 , [Vs/Am]) beschreiben (Formel 1).

$$B = \mu_0 * H \quad (\text{Formel 1})$$

In einem externen Feld, in welchem sich zusätzlich ein magnetischer Werkstoff befindet, setzt sich die Flussdichte aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen aus der, der Feldstärke des äußeren Magnetfeldes proportionalen Flussdichte und zum anderen der Flussdichte des Materials, auch Polarisierung genannt [26]. Die Magnetisierung (M , [A/m]) des ferromagnetischen Materials entspricht der Polarisierung dividiert durch die magnetische Induktionskonstante (Formel 2).

$$B = \mu_0 * H + J = \mu_0 * (H + M) \quad (\text{Formel 2})$$

Hysteresegraph

Abbildung 2 zeigt den Hysteresegraph eines ferromagnetischen Materials, wobei sowohl die BH- als auch die JH-Kurve abgebildet sind. Die Unterteilung erfolgt in vier Quadranten, allerdings sind für die Beschreibung der wichtigsten magnetischen Eigenschaften bereits der erste und zweite ausreichend.

Im ersten Quadranten, der auch Magnetisierungskurve genannt wird, ist die sogenannte Neukurve abgebildet. Bei der Fertigung von Permanentmagneten werden diese am Ende des Herstellungsprozesses einer thermischen Behandlung - in der Regel handelt es sich um einen Sinterprozess - unterzogen. Danach weisen die magnetischen Werkstoffe keine remanente Magnetisierung auf, sie sind demnach thermisch entmagnetisiert. Bei Anlegen eines externen Magnetfeldes steigen die Polarisation und damit auch die Neukurve sehr schnell an. Bei weiterer Erhöhung nimmt die Steigung der Kurve jedoch ab und flacht schließlich gänzlich ab. Die magnetische Sättigung, oder auch Sättigungspolarisation (J_s , [T]) des ferromagnetischen Materials ist erreicht, wenn eine Erhöhung der Feldstärke zu keiner weiteren Zunahme der Polarisation führt.

Nach dem Entfernen des äußeren Magnetfeldes kehrt die Magnetisierung des Magneten nicht mehr auf den Anfangswert zurück, sondern es bleibt eine material- und magnetisierungsabhängige Restmagnetisierung. Diese wird als Remanenz (B_r , [T]) oder auch remanente Flussdichte bezeichnet und entspricht demnach der verbleibenden Magnetisierung nach dem Entfernen des externen angelegten Feldes.

Der zweite Quadrant des Hysteresegraphen wird auch als Entmagnetisierungskurve oder Entmagnetisierungskennlinie bezeichnet. Wie bereits erwähnt, lassen sich hier die wichtigsten Eigenschaften magnetischer Werkstoffe ermitteln.

Remanenz, remanente Flussdichte (B_r , [T])

Die remanente Flussdichte entspricht der bleibenden Magnetisierung des Permanentmagneten nach dem Entfernen des äußeren Magnetfeldes in einem streufreien geschlossenen Kreis [37]. Im Hysteresegraph entspricht die Remanenz dem Schnittpunkt der BH- oder JH-Kurve mit der Ordinate.

Koerzitivfeldstärke, bezogen auf die magnetische Flussdichte (H_{CB} , [A/m])

Wird der magnetische Werkstoff einem entgegen gerichteten äußeren Magnetfeld ausgesetzt, welches der Koerzitivfeldstärke des Magneten entspricht, verschwindet die Flussdichte im Inneren des Magneten. Nach Entfernen des äußeren Feldes ist der Magnet aber immer noch magnetisiert. Die Koerzitivfeldstärke entspricht demnach der Feldstärke, die aufgebracht werden muss, um die Flussdichte in einem magnetischen Material auf null zu bringen [37]. Im Hysteresegraph kann die Koerzitivfeldstärke grafisch durch den Schnittpunkt der BH-Kurve mit der Abszisse bei $B = 0$ ermittelt werden.

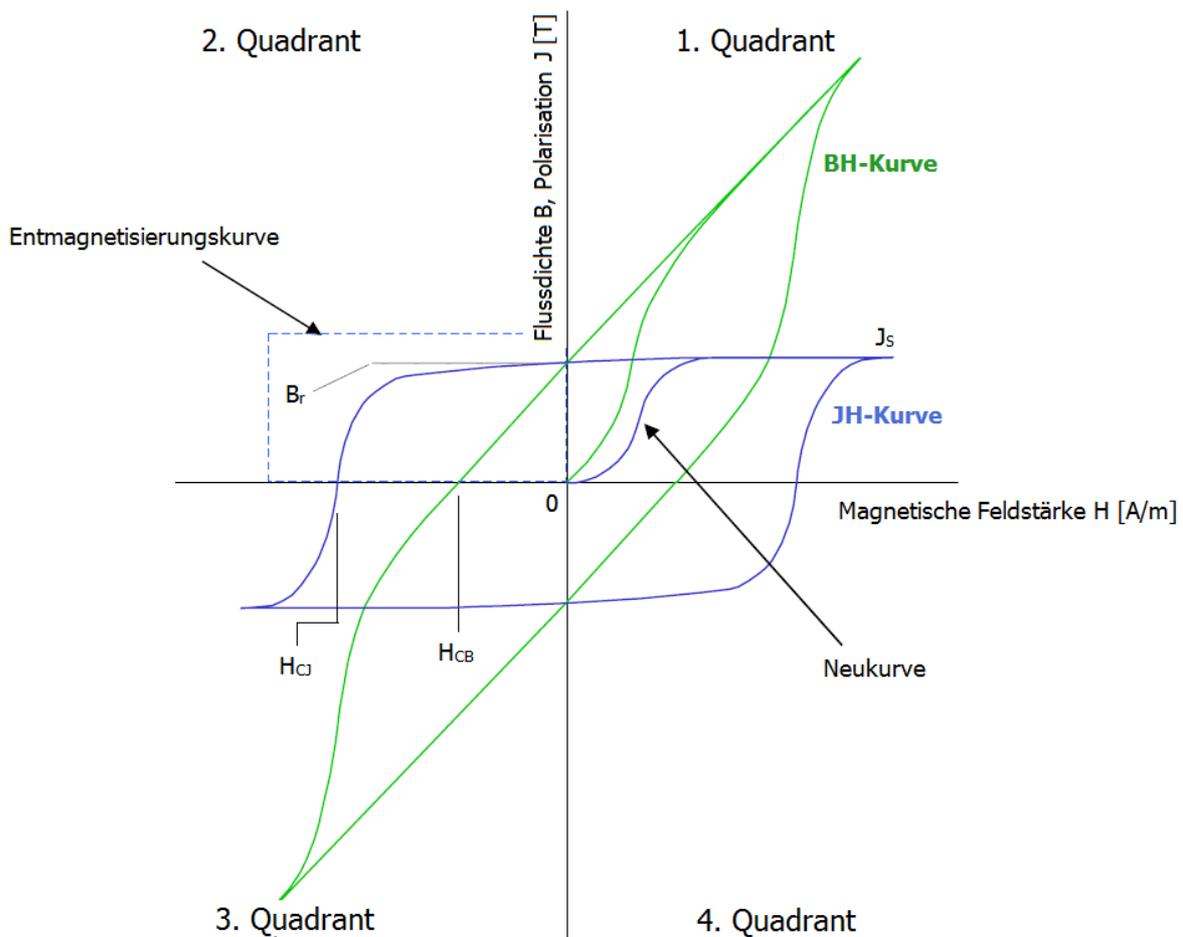


Abbildung 2 Darstellung des Hysteresegraphen einschließlich der wichtigsten magnetischen Kennwerte (in Anlehnung an [10])

Polarisationskoerzitivfeldstärke, bezogen auf die magnetische Polarisation (H_{CJ} , [A/m])

Ist jene Feldstärke, die aufgewendet werden muss, um den Permanentmagneten vollständig zu entmagnetisieren. Die Magnetisierung im Inneren des Magneten ist null [37]. Im Hysteresegraph kann die Polarisationsfeldstärke grafisch durch den Schnittpunkt mit der Abszisse bei $J = 0$ ermittelt werden.

Maximales Energieprodukt ($(BH)_{max}$, [kJ/m³])

Das maximale Energieprodukt ist ein Maß für die magnetostatische Energie pro Volumen [31] die im Magnet gespeichert ist und entspricht dem Maximalwert des Produktes aus zusammengehörigen Werten von Flussdichte und Feldstärke auf der Entmagnetisierungskurve. In Abbildung 3 ist die Hystereseschleife eines ferromagnetischen Stoffes dargestellt. Während die rechteckige Fläche im zweiten Quadranten das maximale Energieprodukt darstellt, ist im ersten Quadranten der Verlauf des Energieproduktes entlang der Ordinate ersichtlich. Für die Ermittlung des maximalen Energieproduktes gibt es mehrere Methoden [36]:

- Auswertung durch direktes Ablesen oder Interpolation von einer Kurvenfamilie mit $B * H = \text{konstant}$.
- Berechnung des Produktes $B * H$ für mehrere Punkte auf der Entmagnetisierungskurve, wobei das Maximum erfasst werden muss.
- Computerunterstützte Auswertung durch Multiplikation und Aufzeichnung des Produktes als Funktion von Flussdichte und Feldstärke.

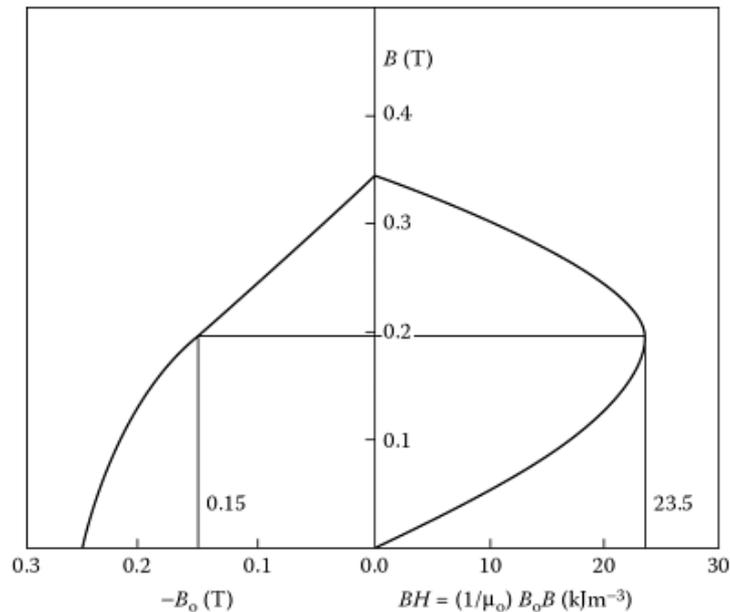


Abbildung 3 Zweiter Quadrant des Hysteresegraphen eines Ferrit Magneten und Darstellung des Energieproduktes in Abhängigkeit der Flussdichte [26]

Permanente Permeabilität (μ_r , [1])

Die permanente Permeabilität entspricht der Steigung der Entmagnetisierungsgeraden [37], also dem Verhältnis von Flussdichte zu Feldstärke (Formel 3).

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} * \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (\text{Formel 3}) [35]$$

Sie ist jedoch nicht nur im linearen Bereich gültig, sondern kann auch bestimmt werden, wenn eine gekrümmte Entmagnetisierungskurve auftritt, die dann abhängig von der Feldstärke ist.

Magnetisierung (M , [A/m])

Die Magnetisierung entspricht dem magnetischen Moment bezogen auf das Volumen [26].

Temperaturkoeffizient der Flussdichte (α , [%/°C])

Eine Erhöhung der Temperatur führt bei allen magnetischen Werkstoffen zu einer Abnahme der Flussdichte, weshalb der Temperaturkoeffizient immer negativ ist. Der Gültigkeitsbereich wird meist in den Datenblättern der Hersteller angegeben.

Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke (β , [%/°C])

Der Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke ist ebenso bei fast allen magnetischen Werkstoffen – mit Ausnahme der Ferrite - negativ.

Curie-Temperatur (T_C , [°C])

Die Curie-Temperatur ist jene Temperatur, bei welcher die magnetische Ordnung des Magneten aufgelöst wird, wobei bei Abkühlung unter diese in einer spontanen Magnetisierung resultiert [31]. Wie bereits beschrieben, erfolgt eine gewisse Abnahme der magnetischen Eigenschaften bereits bei geringeren Temperaturen. Grundsätzlich kann man drei Arten von Temperatureffekten unterscheiden [7]:

- Reversibel: Je nach Änderung der Temperatur kommt es zu einer Zu- oder Abnahme der magnetischen Eigenschaften. Beim Abkühlen auf die Ausgangstemperatur erlangt der Magnet seine magnetischen Eigenschaften wieder zurück. Die maximale Einsatztemperatur (T_w , [°C]) darf dabei nicht überschritten werden.
- Irreversibel und wiederherstellbar: Wenn die maximale Einsatztemperatur des Magneten überschritten wird, kommt es zur Abnahme von Flussdichte und der Polarisationsfeldstärke. Diese Reduktion bleibt auch bei Rückkehr auf das ursprüngliche Temperaturniveau erhalten. Wird der Magnet jedoch erneut einem externen Magnetfeld ausgesetzt, können seine magnetischen Eigenschaften reproduziert werden.
- Irreversibel und nicht wiederherstellbar: Änderungen in der Struktur des Magneten durch Korrosion aufgrund von extremen Temperaturen führen zu Verlusten von Polarisation und Koerzivität, die nicht wiederherstellbar sind.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten magnetischen Eigenschaften ersichtlich. Tatsächlich gibt es noch andere nennenswerte Eigenschaften, die jedoch hier nicht angeführt werden.

Tabelle 1 Eigenschaften und Kennwerte zur Beschreibung magnetischer Werkstoffe

Eigenschaft	Abkürzung	Einheit
Remanenz	B_r	[T]
Koerzitivfeldstärke	H_{CB}	[A/m]
Polarisationsfeldstärke	H_{CJ}	[A/m]
Maximales Energieprodukt	$(BH)_{max}$	[kJ/m ³]
Permanente Permeabilität	μ_r	[1]
Temperaturkoeffizient der Flussdichte	α	[%/°C]
Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke	β	[%/°C]
Curie-Temperatur	T_C	[°C]
Maximale Einsatztemperatur	T_W	[°C]

Nomenklatur von hartmagnetischen Materialien

In [36] wird folgende Nomenklatur zur differenzierten Beschreibung von hartmagnetischen Materialien vorgeschlagen:

- Kurze Bezeichnung: Chemische Symbole zur Beschreibung der Hauptbestandteile
- Zahl vor dem Schrägstrich: Entspricht dem maximalen Energieprodukt
- Zahl nach dem Schrägstrich: Entspricht einem Zehntel der Polarisationsfeldstärke

Beispiel:

SmCo₅ 140/120

Hauptbestandteile: Samarium, Kobalt

$(BH)_{max}$ 140 kJ/m³

H_{CJ} 1.200 kA/m

5 ARTEN VON PERMANENTMAGNETEN

In der Industrie werden derzeit hauptsächlich vier Arten von Permanentmagneten verwendet. Es handelt sich dabei um Aluminium-Nickel-Kobalt, Ferrite und die beiden Seltene Erden Permanentmagnete (SEPM) Neodym-Eisen-Bor und Samarium-Kobalt. Diese magnetischen Werkstoffe werden überwiegend über einen Sinterprozess hergestellt. Von derzeit noch geringerer, gleichwohl aber wachsender Bedeutung sind kunststoffgebundene Magnete, deren Herstellung über einen Spritzguss- oder Pressvorgang erfolgt. Alle vier genannten Werkstoffarten können prinzipiell auf beide Arten erzeugt werden.

5.1 ALUMINIUM-NICKEL-KOBALT

Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo) Legierungen werden seit ca. 1930 hergestellt. Sie weisen neben einer hohen Curie-Temperatur auch niedrige Temperaturkoeffizienten auf. Zudem sind sie sehr korrosionsbeständig, hart und spröde. Der Masseanteil an Kobalt schwankt meist zwischen 20 und 40 Masseprozent [47], wodurch sie im Vergleich zu Ferriten teurer sind. Neben Aluminium, Nickel und Kobalt werden aber auch Kupfer, Titan, Niob, Silizium und Eisen in geringeren Mengen zugesetzt. In Tabelle 2 ist der Schwankungsbereich der einzelnen Legierungselemente ersichtlich.

Tabelle 2 Chemische Zusammensetzung von AlNiCo Legierungen [36]

Element	[m%]
Al	8-13
Ni	13-28
Co	5-42
Cu	2-6
Ti	0-9
Nb	0-3
Si	0-0,8
Fe	Rest

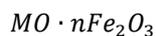
AlNiCo Magnete werden entweder über einen Gieß- oder einen Sinterprozess hergestellt, wobei bei Massenanfertigungen kleiner Stückmassen überwiegend die Sintertechnik zum Einsatz kommt [7]. Magnetische Eigenschaften von unterschiedlichen AlNiCo Legierungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Charakteristisch sind die hohen Werte der Remanenz, während die Koerzitivfeldstärken sehr niedrig sind, was den Vorteil hat, dass diese Magnete leicht zu magnetisieren sind. Im Gegenzug führt dies jedoch zu dem Nachteil, wonach bereits kleine Gegenfelder für deren Entmagnetisierung ausreichen. Aufgrund der hohen Temperaturstabilität der AlNiCo Magnete kann erwartet werden, dass sie auch in Zukunft bei Hochtemperaturanwendungen zum Einsatz kommen.

Tabelle 3 Eigenschaften und Kennwerte von AlNiCo Legierungen [36]

Eigenschaft		Bereich
$(BH)_{\max}$	[kJ/m ³]	26-72
B_r	[mT]	650-1.300
H_{CB}	[kA/m]	47-140
H_{CJ}	[kA/m]	48-150
α	[%/°C]	-0,02
β	[%/°C]	-(0,03-0,07)
T_c	[°C]	800-850
Dichte	[g/cm ³]	7,1-7,3

5.2 FERRITE

Ferrit Permanentmagnete wurden ca. 1950 entwickelt und gehören der Gruppe der keramischen Werkstoffe an. Für die Herstellung werden oxidierte Metalle verwendet, welche bei der Stahlherstellung als Nebenprodukt anfallen. Der große Vorteil der Ferrite ist der sehr niedrige Preis, weshalb sie heute den mengenmäßig dominierenden magnetischen Werkstoff darstellen. Die chemische Zusammensetzung von Ferriten kann durch Formel 4 beschrieben werden, wobei n zwischen 4,5 und 6,5 liegt und M den Elementen Barium oder Strontium entspricht [36]. In geringen Mengen werden auch Kupfer, Aluminium oder Kobalt verwendet, um die magnetischen Eigenschaften zu verbessern.



(Formel 4) [36]

Ferrite werden pulvermetallurgisch hergestellt, wobei das monokristalline Pulver während des Formpressens einem Magnetfeld ausgesetzt wird, um einen anisotropen Magneten zu erhalten. Im Anschluss wird der Pressling gesintert und nach dem Abkühlen erfolgt die letzte Magnetisierung. In Tabelle 4 sind Eigenschaften ausgewählter Ferrit Güten dargestellt. Im Vergleich zu den AlNiCo Legierungen besitzen diese bei kleinerer Remanenz höhere Polarisationsfeldstärken und können dadurch höheren Gegenfeldern ausgesetzt werden.

Tabelle 4 Eigenschaften und Kennwerte von Ferriten [36]

Bezeichnung	Herstellung	$(BH)_{\max}$	B_r	H_{CB}	H_{CJ}	μ_r	Dichte
		[kJ/m ³]	[mT]	[kA/m]	[kA/m]	[1]	[g/cm ³]
Ferrit 20/19	Sinter	20	320	170	190	1,1	4,8
Ferrit 26/26	Sinter	26	370	230	260	1,1	4,7
Ferrit 33/38	Sinter	33	420	300	380	1,1	5,0

Das Temperaturverhalten ist bei allen Ferritmagneten sehr ähnlich. Die Curie-Temperatur liegt bei ca. 450 °C [36], Temperaturstabilität ist bis zu 250 °C gewährleistet [7]. Der Temperaturkoeffizient der Flussdichte liegt bei ca. -0,2 %/°C. Eine Besonderheit stellt der Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke dar, welcher positiv ist und ca. 0,4 %/°C entspricht [7]. Das heißt, dass diese Gruppe den einzigen magnetischen Werkstoff darstellt, bei welchem eine Erhöhung der Polarisationsfeldstärke mit steigender Temperatur einhergeht.

5.3 SELTENE ERDEN PERMANENTMAGNETE

Die ersten Seltene Erden Permanentmagnete (SEPM) wurden 1970 entwickelt und erlebten seither einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung. Sie bestehen aus einem Übergangsmetall und einem Seltene Erden Element (SEE). Die SEE weisen ein hohes magnetisches Moment aufgrund der nicht aufgefüllten 4f-Schale auf, wohingegen die Übergangsmetalle eine nicht abgeschlossene 3d-Schale besitzen [12]. Daraus resultieren sehr hohe Koerzitivfeldstärken, Polarisationsfeldstärken und remanente Flussdichten, was auch zu einem hohen Energieprodukt führt. Obwohl SEPM im Vergleich zu Ferrit Magneten teurer sind, werden sie in der Industrie angewendet, da aufgrund höherer magnetischer Flussdichten die Größe des Magneten, und damit auch die Größe des Gesamtsystems reduziert werden kann, was zu Kosteneinsparungen führt [12]. In der Industrie verwendete SEPM sind Samarium-Kobalt und Neodym-Eisen-Bor Legierungen.

5.3.1 SAMARIUM-KOBALT LEGIERUNGEN

Die fachgemäße Bezeichnung dieser Gruppe magnetischer Legierungen lautet RECo (Rare Earth-Kobalt), jedoch ist Samarium (Sm) das vorwiegend verwendete SEE. In geringerem Ausmaß kann es durch Cer (Ce) oder Praseodym (Pr) ersetzt werden. Bei Samarium-Kobalt (SmCo) wird zwischen den beiden Legierungszusammensetzungen SmCo_5 und $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ unterschieden, deren chemische Zusammensetzungen sind in Tabelle 5 ersichtlich. Ein nennenswerter Vorteil ist die hohe chemische und korrosive Beständigkeit.

Tabelle 5 Chemische Zusammensetzung von SmCo Legierungen [36]

Legierung	Sm	Fe	Cu	Sonstige (z.B. Zr, Ti)	Co
	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]
SmCo_5	33-36	0	0	0	Rest
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	24-26	10-20	4,5-12	0-3	Rest

Industriell werden SmCo Magnete meist pulvermetallurgisch über einen Sinterprozess hergestellt. Die Verfahrensschritte sind dabei Legierungsherstellung, Pressen im Magnetfeld, Sintern, Wärmebehandlung, mechanisches Bearbeiten und Aufmagnetisieren (Abbildung 4). Das Pressen erfolgt in Matrizen oder durch heißisostatisches Pressen bei Drücken von 200 bis 1.000 MPa. Dabei

wird das Pulver einem Magnetfeld von 5.000-10.000 kA/m ausgesetzt, um möglichst hohe Werte zu erzielen [39]. Das nachfolgende Sintern erfolgt im Vakuum oder unter inerter Atmosphäre.

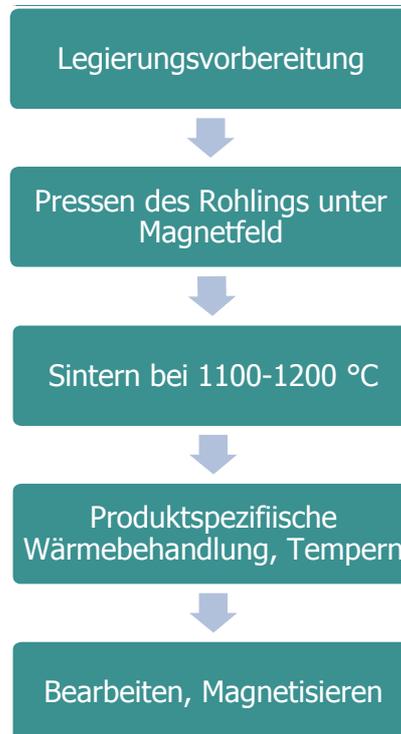


Abbildung 4 Herstellungsverfahren von SEPM mittels Sinterprozess (in Anlehnung an [7])

Magnetische Werkstoffe, die nach diesem Herstellungsverfahren produziert werden, sind vorzugsgerichtet und daher anisotrop. In Tabelle 6 sind typische Eigenschaften von RECo Magneten dargestellt. Im Vergleich zu den bereits beschriebenen magnetischen Werkstoffen besitzen diese zugleich hohe Werte der Remanenz und der Polarisationsfeldstärken, weshalb sie auch schwer magnetisierbar sind.

Tabelle 6 Eigenschaften und Kennwerte von RECo Magneten [36]

Bezeichnung	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³]	B_r [mT]	H_{CB} [kA/m]	H_C [kA/m]	μ_r [1]	Dichte [g/cm ³]
RECo ₅ 140/120	140	860	600	1.200	1,05	8,3-8,5
RECo ₅ 170/70	170	930	600	700	1,05	8,3-8,5
RE ₂ Co ₁₇ 140/100	140	900	620	1.000	1,10	8,3-8,4
RE ₂ Co ₁₇ 200/150	200	1.050	700	1.500	1,10	8,3-8,4

In Tabelle 7 wird das Temperaturverhalten der RECo Legierungen verglichen. Beide verfügen über hohe Curie-Temperaturen und maximale Einsatztemperaturen. Während der Temperaturkoeffizient der Flussdichte noch sehr gering ist, kann die Polarisationsfeldstärke durch Erhöhung der Temperatur beträchtlich verringert werden.

Tabelle 7 Vergleich des Temperaturverhaltens beider RECo Legierungen [36]

Parameter		RECo ₅	RE ₂ Co ₁₇
T _C	[°C]	720	820
T _W	[°C]	250	350
α	[%/°C]	-0,04	-0,03
β	[%/°C]	-0,30	-0,25

5.3.2 NEODYM-EISEN-BOR LEGIERUNGEN

Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) Permanentmagnete wurden zwischen 1980 und 1990 entwickelt und stellen heute die Dauermagnetwerkstoffe mit den höchsten Energiedichten dar. Die korrekte Bezeichnung (REFeB) dieser Gruppe von hartmagnetischen Werkstoffen wird aufgrund der vorherrschenden Verwendung von Neodym meist nicht angewendet. Die Legierungen basieren auf der Zusammensetzung RE₂Fe₁₄B, wobei Neodym durch andere SEE substituiert werden kann [36].

Praseodym (Pr)

Wird aufgrund des geringeren Preises zur Substitution von Neodym verwendet. Da dies zu einer Minderung der magnetischen Eigenschaften führt, kann Praseodym nur in geringen Mengen verwendet werden.

Dysprosium (Dy)

Der Einsatz von Dysprosium beeinflusst die magnetischen Eigenschaften besonders stark, weshalb es verwendet wird, wenn der Magnet in seiner Anwendung hohen Temperaturen, wie zum Beispiel in Motoren, ausgesetzt wird, da die Temperaturstabilität enorm verbessert wird. So korreliert ein Ansteigen des Dysprosium Gehaltes mit der Polarisationsfeldstärke, der Curie-Temperatur und der maximalen Einsatztemperatur. Nachteilig führt dies jedoch neben Abnahme der Remanenz und Sättigungspolarisation zu erhöhten Kosten, da Dysprosium im Vergleich zu Neodym teurer ist.

Terbium (Tb)

Wird nur in geringsten Mengen eingesetzt und erhöht die Polarisationsfeldstärke und den Widerstand gegen Entmagnetisieren.

Um die magnetischen Eigenschaften zu verbessern, kann Eisen auch durch Kobalt substituiert werden, was aber wiederum zu einem Anstieg der Kosten führt. Die benötigten Rohstoffe sind im Vergleich zu den SmCo Magneten leichter verfügbar und billiger.

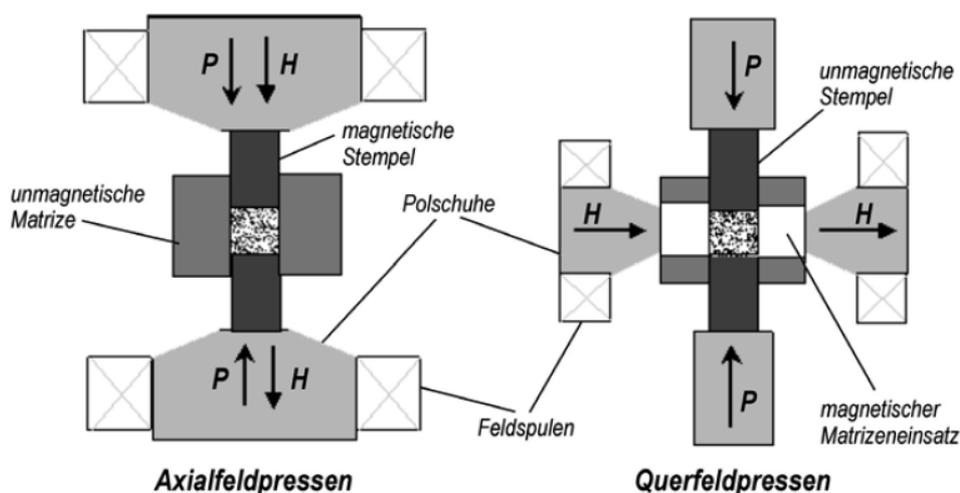
In Tabelle 8 ist der Bereich der chemischen Zusammensetzung von REFeB Legierungen dargestellt.

Tabelle 8 Chemische Zusammensetzung von REFeB Legierungen [36]

	Total RE	Co	B	Dy, Tb, Pr,...	Sonstige Elemente (z.B. V, Nb, Al, Ga)	Fe
	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]
REFeB	28-35	0-15	0,85-1,2	0-10	0-1	Rest

Bei NdFeB Magneten werden zwei pulvermetallurgische Hauptherstellungsverfahren unterschieden. Zum einen kann dies über einen Sinterprozess, ähnlich dem der RECo Legierung, zum anderen über die Erzeugung von nanokristallinem Pulver, welches durch Heißpressen und anschließendem Heißumformen hergestellt wird, erfolgen. Die weitere Herstellungsbeschreibung erfolgt, sofern nicht anders angegeben, nach [39]:

Bei der Herstellung mittels Sinterprozess wird das kristalline Pulver unter hohen Drücken von bis zu 1.000 MPa in eine Form gepresst. Während des Pressvorganges ist ein äußeres Magnetfeld angelegt, wodurch sich eine magnetische Vorzugsrichtung ausbildet, welche auch nach dem Sintern erhalten bleibt. Je nach Anordnung des äußeren Feldes wird zwischen Axial- und Quersfeldpressen (Abbildung 5) unterschieden, wobei die Feldstärke in Abhängigkeit von Geometrie und von Pulvereigenschaften bis zu 5.000 kA/m betragen kann. Das Sintern erfolgt bei einer Temperatur von ca. 1.100 °C und dauert ca. eine Stunde. Je nach chemischer Zusammensetzung muss die Sintertemperatur angepasst werden. Die anschließende Wärmebehandlung, welche zur Erzielung hoher Polarisationsfeldstärken eine günstige Ausrichtung des Gefüges bewirken soll, erfolgt bei etwa 900 °C.


Abbildung 5 Anordnung des Pressvorganges für Axial- und Quersfeldanordnung [39]

Bei nanokristallinen NdFeB Magneten handelt es sich um die jüngeren Entwicklungen im Magnetbereich. Sie sind im Vergleich zu den gesinterten NdFeB Magneten temperaturstabiler und korrosionsresistenter. Das Herstellungsverfahren wird auch als „melt-spinning“ Methode bezeichnet.

Der erste Schritt ist die Rascherstarrung der voreingestellten Legierung auf einer rotierenden gekühlten Kupferwalze. Die Legierung wird dabei aufgespritzt, wobei NdFeB in Form von schuppenartigen Blättchen anfällt, welche in der Größenordnung von 30 μm liegen. Danach erfolgt ein Anlassschritt, wobei sich in den Blättchen ein nanokristallines Gefüge bildet (ca. 20-50 nm). Nach dem Abkühlen erfolgen zuerst das Kalt- und anschließend das Heißpressen des Pulvers, wodurch ein isotroper Pressling entsteht. Dieser wird schließlich als Ausgangsmaterial für die weitere Verarbeitung zu einem anisotropen Werkstoff verwendet.

Der bedeutendste Vorteil der NdFeB Magnete ist die hohe Energiedichte bzw. das hohe Energieprodukt, jedoch sind sie auch sehr korrosionsanfällig, weshalb meist eine Beschichtung erforderlich ist. Die Beschichtungen bestehen größtenteils aus Nickelschichten, welche auch in Kombination mit Kupfer aus mehreren Lagen bestehen können. Zweitrangig werden auch Beschichtungen durch Phosphatieren, Verzinken, Aluminieren oder Epoxidharze verwendet [7].

In Tabelle 9 sind magnetische Kennwerte von REFeB Legierungen dargestellt.

Tabelle 9 Eigenschaften und Kennwerte von REFeB Legierungen [36]

Bezeichnung	$(BH)_{\text{max}}$ [kJ/m ³]	B_r [mT]	H_{CB} [kA/m]	H_{CJ} [kA/m]	μ_r [1]	Dichte [g/cm ³]
REFeB 170/190	170	980	700	1.900	1,05	7,5-7,7
REFeB 250/120	250	1.130	840	1.200	1,05	7,5-7,7
REFeB 310/130	310	1.300	900	1.300	1,05	7,5-7,7
REFeB 380/100	380	1.420	990	1.000	1,05	7,5-7,7

Neben den Kosten und der schlechten Korrosionsbeständigkeit haben NdFeB Magnete den Nachteil, dass sie sehr temperaturempfindlich sind. Die Curie-Temperatur, die maximale Einsatztemperatur und beide Temperaturkoeffizienten sind in Tabelle 11 ersichtlich. Es handelt sich hierbei allerdings nur um Richtwerte, da diese von der chemischen Zusammensetzung abhängig sind.

Tabelle 10 Temperaturverhalten von NdFeB Legierungen [36]

Parameter		
T_c	310	[°C]
T_w	200	[°C]
α	-(0,10-0,12)	[%/°C]
β	-(0,45-0,60)	[%/°C]

Bei den NdFeB Legierungen hat sich aufgrund der Dominanz die chinesische Nomenklatur auch weitgehend in Europa durchgesetzt. Diese setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Buchstabe vor Zahl: Für NdFeB Magnete wird der Buchstabe „N“ verwendet
- Zahl: Bezeichnet das maximale Energieprodukt in MGOe (1 MGOe = 7,96 kJ/m³)
- Buchstaben nach Zahl: Beschreibt die Güteklasse des Magneten (in Reihenfolge M, H, SH, EH, UH, AH), wobei mit der Klasse auch Polarisationsfeldstärke und Temperaturstabilität steigen

Beispiel:

N40M	
N	NdFeB
40	$(BH)_{\max} = 40 \text{ MGOe} \approx 322 \text{ kJ/m}^3$
M	Maximale Einsatztemperatur 100 °C

In Tabelle 11 sind Kennwerte ausgewählter NdFeB Legierungen dargestellt. Wie bereits erwähnt, steigen mit der Güteklasse die Polarisationsfeldstärke und auch die maximale Einsatztemperatur.

Tabelle 11 Eigenschaften und Kennwerte ausgewählter NdFeB Legierungen nach Einteilung in Güteklassen [1]

Bezeichnung	B_r	$H_{CB,\min}$	$H_{CJ,\min}$	$(BH)_{\max}$	α	β	T_w
	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]	[%/°C]	[%/°C]	[°C]
N33	1,150	836	955	259	-0,12	-0,750	80
N35M	1,210	868	1.114	283	-0,12	-0,675	100
N38H	1,260	899	1.353	307	-0,12	-0,605	120
N40SH	1,285	939	1.592	322	-0,12	-0,535	150
N30UH	1,125	812	1.990	243	-0,12	-0,465	180
N33EH	1,165	820	2.388	267	-0,12	-0,420	200
N33AH	1,140	812	2.706	231	-0,12	-0,393	220

5.4 KUNSTSTOFFGEBUNDENE MAGNETE

Kunststoffgebundene Permanentmagnete sind Verbundstoffe und bestehen aus magnetischem Pulver, das in einer Matrix aus Kunststoff eingebettet ist. Die Kunststoffkomponente bestimmt dabei zum größten Teil die mechanischen Eigenschaften, während das Magnetpulver für die magnetischen Eigenschaften verantwortlich ist [36]. Die als Magnetpulver einsetzbaren Werkstoffe sind AlNiCo, SmCo₅, Sm₂Co₁₇, NdFeB und Ferrite. Die magnetischen Eigenschaften werden durch die Art des Magnetpulvers und des Matrixmaterials sowie den Füllfaktor beeinflusst, sind jedoch im Vergleich zu den gesinterten magnetischen Werkstoffen deutlich geringer (Tabelle 12).

REFeN ist eine weitere hartmagnetische Legierung, die nur bei kunststoffgebundenen magnetischen Materialien eingesetzt wird. Als SEE wird hauptsächlich Samarium verwendet, die Summenformel lautet $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$. Die chemische Zusammensetzung dieser Legierung besteht aus 22-27 m% Samarium, 3-4 m% Nickel und der Rest ist Eisen [36].

Im Gegensatz zu den gesinterten magnetischen Werkstoffen sind kunststoffgebundene Magnete kostengünstig zu produzieren, da auf einen thermischen Prozess verzichtet werden kann. Bei der Herstellung wird der Magnetwerkstoff pulverisiert und mit dem Kunststoff vermischt. Die gewünschte Formgebung wird mittels Spritzgießen, Warmpressen oder Extrudieren erreicht. Aufgrund dieser Herstellungsverfahren kann für die Magnete eine große Formgebungsvielfalt erzielt werden, was als weiterer Vorteil gegenüber gesinterten magnetischen Werkstoffen angeführt wird. Aufgrund der Matrix aus Kunststoff weisen diese Magnete ergänzend hohe mechanische und korrosive Beständigkeit auf [7].

Tabelle 12 Eigenschaften und Kennwerte von kunststoffgebundenen Magneten [36]

Bezeichnung	Herstellung	$(\text{BH})_{\text{max}}$ [kJ/m ³]	B_r [mT]	H_{CB} [kA/m]	H_{CJ} [kA/m]	Dichte [g/cm ³]
AlNiCo	Spritzguss	3,1-7,0	280-340	37-72	46-84	5,3-5,5
SmCo ₅	Spritzguss/Pressen	52-68	570-620	330-380	520-600	5,6-5,7
Sm ₂ Co ₁₇	Spritzguss/Pressen	20-110	350-780	200-480	600-750	5,3-6,8
NdFeB	Spritzguss/Pressen	26-82	400-700	270-500	560-1.000	4,2-6,2
Ferrit	Spritzguss/Pressen	0,8-15	70-280	50-190	160-240	2,3-3,8
REFeN	Spritzguss	75-100	640-760	430-470	630-700	4,2-4,7

5.5 VERGLEICH DER HARTMAGNETISCHEN WERKSTOFFE

5.5.1 ENTMAGNETISIERUNGSKURVE

In Abbildung 6 sind typische Entmagnetisierungskennlinien der vier überwiegend verwendeten hartmagnetischen Werkstoffe abgebildet. Charakteristisch ist der annähernd lineare Verlauf der beiden SEPM, während die Entmagnetisierungskennlinie von Hartferriten und AlNiCo Legierungen nicht gerade verläuft. Dies führt zu einem weiteren Vorteil der SEPM, da der Arbeitsbereich des Magneten entlang einer Geraden verläuft. Erkennbar sind auch die hohen Koerzitivfeldstärken der SEPM im Vergleich zu AlNiCo und Ferriten.

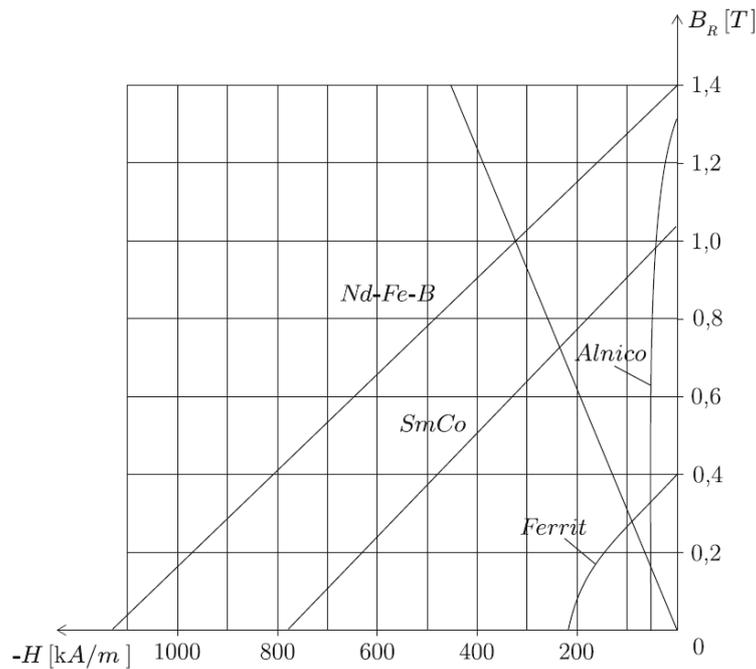


Abbildung 6 Vergleichende Darstellung der Entmagnetisierungskennlinien der gebräuchlichsten hartmagnetischen Werkstoffe [29]

5.5.2 MAXIMALES ENERGIEPRODUKT

In Abbildung 7 ist die Entwicklung des Energieproduktes von hartmagnetischen Werkstoffen im 20. Jahrhundert dargestellt. Wie bereits erwähnt werden AlNiCo Legierungen und Hartferrite bereits seit ca. 1930 verwendet, wohingegen die SEPM erst wesentlich später entwickelt wurden. Der Anstieg des Energieproduktes über die Zeit ist deutlich erkennbar, wobei ein weiteres Ansteigen in der Zukunft als nicht unwahrscheinlich gilt.

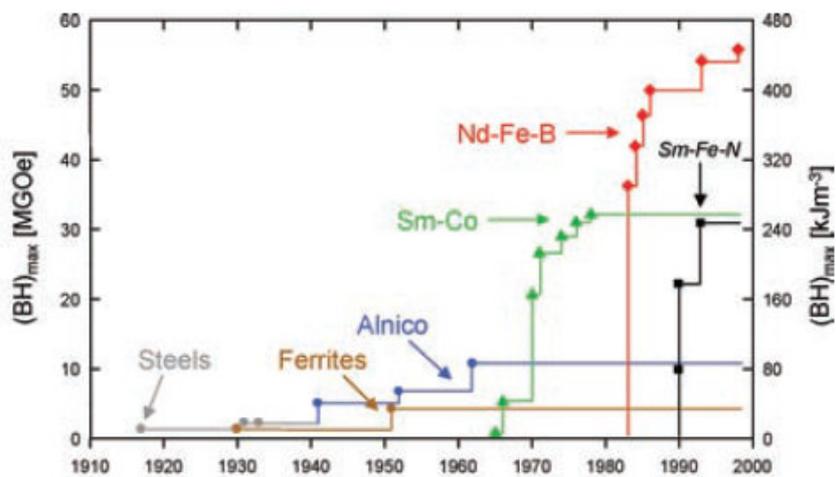


Abbildung 7 Entwicklung des Energieproduktes bei Raumtemperatur von hartmagnetischen Materialien im 20. Jahrhundert [19]

5.5.3 TEMPERATURVERHALTEN

Das Temperaturverhalten hartmagnetischer Werkstoffe hängt von der chemischen Zusammensetzung und der Güte des Herstellprozesses ab, in Tabelle 13 sind jedoch typische Richtwerte für Curie-Temperatur und reversible Temperaturkoeffizienten der bisher beschriebenen Materialien (ausgenommen REFeN) angeführt. Die Temperaturkoeffizienten der Flussdichte sind bei allen Materialien negativ, wobei diese mit Ausnahme von NdFeB auch sehr niedrig sind. Das heißt, dass die Flussdichte bei allen hartmagnetischen Materialien mit der Temperatur abnimmt. Die Polarisationsfeldstärke wird durch Erhöhen der Temperatur stärker beeinflusst, da deren Koeffizienten höher sind als jene der Flussdichte. Ferrite bilden hier die große Ausnahme, da der Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke positiv ist, was zu einer Erhöhung dieser mit der Temperatur führt. Die angeführten Kennwerte sind nach [24] im Bereich von 20-100 °C gültig, jedoch sind sie nicht konstant, sondern es handelt sich um Durchschnittswerte innerhalb dieses Temperaturbereiches.

Tabelle 13 Temperaturverhalten der gebräuchlichsten hartmagnetischen Werkstoffe [36]

Werkstoff	T_C	α	β
	[°C]	[%/°C]	[%/°C]
AlNiCo	800-850	-0,02	-(0,03-0,07)
Ferrit	450	-0,20	+0,40
SmCo ₅	720	-0,04	-0,30
Sm ₂ Co ₁₇	820	-0,03	-0,25
NdFeB	310	-(0,10-0,12)	-(0,45-0,60)

Bei negativen Werten beider Temperaturkoeffizienten führt dies auch zu einer Abnahme des Energieproduktes mit der Temperatur. In Tabelle 7 ist der Verlauf des maximalen Energieproduktes über der Temperatur der vier bedeutendsten magnetischen Werkstoffe im Bereich von 75±225 °C dargestellt. AlNiCo Legierungen weisen eine sehr ausgeprägte Temperaturstabilität auf, die Abnahme ist beinahe vernachlässigbar. Bei Ferriten führt eine Temperaturerhöhung trotz Zunahme der Polarisationsfeldstärke zu einer Abnahme des Energieproduktes. Besonders ausgeprägt ist die Minderung bei NdFeB Magneten.

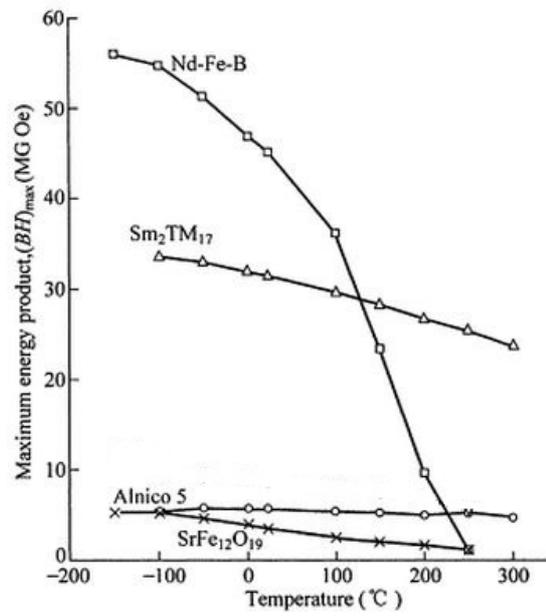


Abbildung 8 Temperaturabhängigkeit des maximalen Energieproduktes ausgewählter hartmagnetischer Werkstoffe (in Anlehnung an [41])

6 ENTMAGNETISIERUNGSKURVE

6.1 ENTMAGNETISIERUNGSFELD

Nach der bisherigen Beschreibung stellt sich nach dem Magnetisierungsvorgang im Magnet die remanente Flussdichte bei $H = 0$ ein. Tatsächlich würde dieser Zustand jedoch nur erreicht werden, wenn der Magnet in einem streufreien geschlossenen Kreis installiert wäre. In praktischen Anwendungen sind solche Magnetkreise jedoch selten anzufinden, da sie meist in offenen Kreisen mit Streufeld (z.B. Luftspalt eines Motors) verwendet werden.

Das Streufeld eines endlichen Magneten wird auch als Entmagnetisierungsfeld (H_N , [A/m]) bezeichnet und ist abhängig von dessen Geometrie und Material. Legt man ein äußeres Feld (H_0 , [A/m]) an, so wird es durch dieses geschwächt. Das Feld im Inneren des Magneten (H_i , [A/m]) setzt sich demnach aus äußerem und entmagnetisierendem Feld zusammen (Abbildung 9) [31].

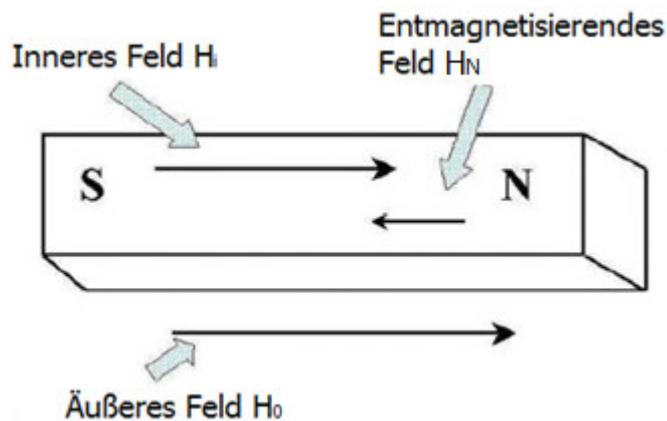


Abbildung 9 Entmagnetisierendes Feld einer endlichen Magnetprobe (in Anlehnung an [47])

Wie bereits erwähnt hängt, das Entmagnetisierungsfeld eines Magneten von dessen Geometrie ab. Zur Beschreibung wird der Entmagnetisierungsfaktor (N , [1]) verwendet, welcher zwischen 0 und 1 liegt. Eine ausführlichere Beschreibung des Entmagnetisierungsfaktors folgt in Abschnitt 6.2, grundsätzlich gilt jedoch, je kleiner das Verhältnis von Länge (in Richtung der Magnetisierung) zu Durchmesser des Magneten, desto größer ist dieser. Die Berechnung des inneren Feldes aus äußerem und entmagnetisierendem Feld erfolgt mit Formel 5, wobei J der Polarisation im Arbeitspunkt entspricht.

$$H_i = H_0 + H_N = H_0 - \frac{N * J}{\mu_0} \quad (\text{Formel 5}) [24]$$

Aufgrund des Entmagnetisierungsfeldes verschiebt sich der Arbeitspunkt des Magneten im zweiten Quadranten entlang der Entmagnetisierungskennlinie und arbeitet in einem Punkt zwischen der remanenten Flussdichte und der Koerzitivfeldstärke (Abbildung 10). Die vom Koordinatenursprung

durch den Arbeitspunkt gehende Gerade wird auch Arbeitslinie oder Arbeitsgerade bezeichnet und beschreibt den gescherten Zustand des Magneten. Bei $N = 0$ entspricht die Arbeitsgerade der Ordinate und bei $N = 1$ der Abszisse. Die zugehörigen Werte der Flussdichte (B_d , [T]) und Koerzitivfeldstärke (H_d , [A/m]) des Arbeitspunktes können grafisch ermittelt werden und damit das Energieprodukt durch Multiplikation der beiden Werte rechnerisch bestimmt werden.

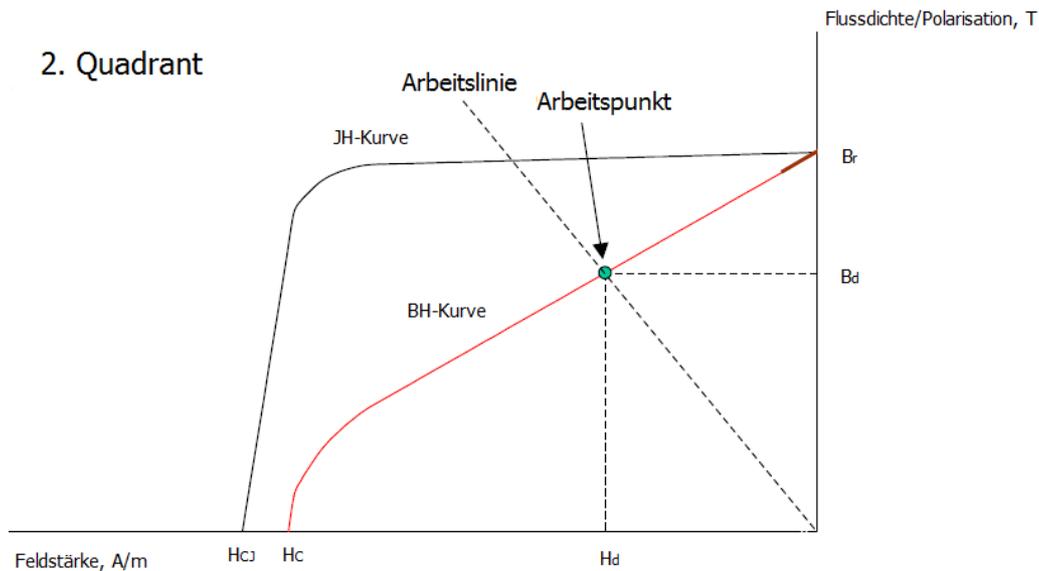


Abbildung 10 Grafische Darstellung des Arbeitspunktes (in Anlehnung an [10])

6.2 ERMITTLUNG DES ARBEITSPUNKTES

Bei der Darstellung der Arbeitsgerade handelt es sich um eine sehr vereinfachende Darstellung, da das Magnetfeld innerhalb eines Magneten nicht homogen ist. Bei komplizierteren Magnetisierungsarten und Geometrien ist eine genügend genaue Bestimmung nicht mehr möglich.

In der englischen Literatur wird zur Beschreibung des Arbeitspunktes meist der Permeanzkoeffizient (P_C , [1]) verwendet, dessen mathematischer Zusammenhang mit der Flussdichte und der Koerzitivfeldstärke im Arbeitspunkt sowie dem Entmagnetisierungsfaktor in Formel 6 ersichtlich ist.

$$P_C = \frac{B_d}{H_d * \mu_0} = \frac{1 - N}{N} \quad (\text{Formel 6}) [37]$$

Der Permeanzkoeffizient ist ein von Magnetherstellern und -anwendern gern verwendeter Parameter, da er Informationen bezüglich Flussdichte und Koerzitivfeldstärke bei gegebener Magnetgeometrie enthält.

Der Entmagnetisierungsfaktor wird, wie bereits erwähnt, hauptsächlich durch das Verhältnis von Länge (in Richtung der Magnetisierung) zu Durchmesser des Magneten beeinflusst, jedoch lässt er sich nur für Rotationsellipsoide exakt bestimmen. Für scheibenförmige bzw. zylindrische Magnete gibt

es bei Kenntnis von Länge und Durchmesser bereits mathematische Ansätze zur Ermittlung dessen, von welchen ausgewählte Methoden nun angeführt werden.

Gemäß [37] lässt sich der Permeanzkoeffizient nach Evershed mit Formel 7 berechnen, dabei entspricht D dem Durchmesser und L der Länge des Magneten in Magnetisierungsrichtung.

$$P_C = \frac{L * 4}{D^2} * \sqrt{\frac{D}{2} * \left(\frac{D}{2} + L\right)} \quad (\text{Formel 7})$$

Die zweite Methode – die Leitwertmethode – beinhaltet neben dem Durchmesser und der Länge des Magneten noch die Induktionskonstante und die permanente Permeabilität, wobei diese für die Berechnung den Wert $\mu_r = 1,05$ besitzt (Formel 8).

$$P_C = \mu_0 * \mu_r * 10^6 * \frac{6 * L * (2 * D + L)}{D * \pi * (2 * D + 3 * L)} \quad (\text{Formel 8}) [7]$$

Die dritte Möglichkeit zum Berechnen des Entmagnetisierungskoeffizienten ist in [30] angeführt. Demnach kann der Entmagnetisierungsfaktor für zylindrische Magnete hinreichend genau nach Formel 9 berechnet werden.

$$N = \frac{4}{4 + 9 * \left(\frac{L}{D}\right)} \quad (\text{Formel 9})$$

In Tabelle 14 sind die Permeanzkoeffizienten aller drei Berechnungsmethoden für zylindrische Magnete mit variierendem L/D Verhältnis berechnet, wobei die Unterschiede zwischen diesen deutlich erkennbar sind. Während bei sehr flachen Zylindermagneten die Permeanzkoeffizienten noch sehr eng beisammen liegen, nehmen die Differenzen zwischen diesen mit steigendem L/D Verhältnis zu. Die Berechnung nach [37] liefert dabei die höheren Koeffizienten, stellt also den Höchstwert der Flussdichte im Arbeitspunkt dar, wohingegen die Leitwertmethode mit niedrigeren Permeanzkoeffizienten die Maximalwerte der Koerzitivfeldstärke in selbigen repräsentiert.

Tabelle 14 Vergleich der Permeanzkoeffizienten bei unterschiedlichen L/D Verhältnissen

L	D	L/D	P _C [1]		
			Evershed	Leitwert	Meeker
[mm]	[mm]	[1]			
1	10	0,1	0,22	0,23	0,23
5	10	0,5	1,41	0,90	1,13
10	10	1,0	3,46	1,51	2,25
20	10	2,0	8,94	2,52	4,50
30	10	3,0	15,87	3,44	6,75

In Abbildung 11 ist die Arbeitsgerade bei einem L/D Verhältnis von 0,1 dargestellt. Die Bestimmung des Arbeitspunktes kann hier mit sehr hoher Genauigkeit durchgeführt werden.

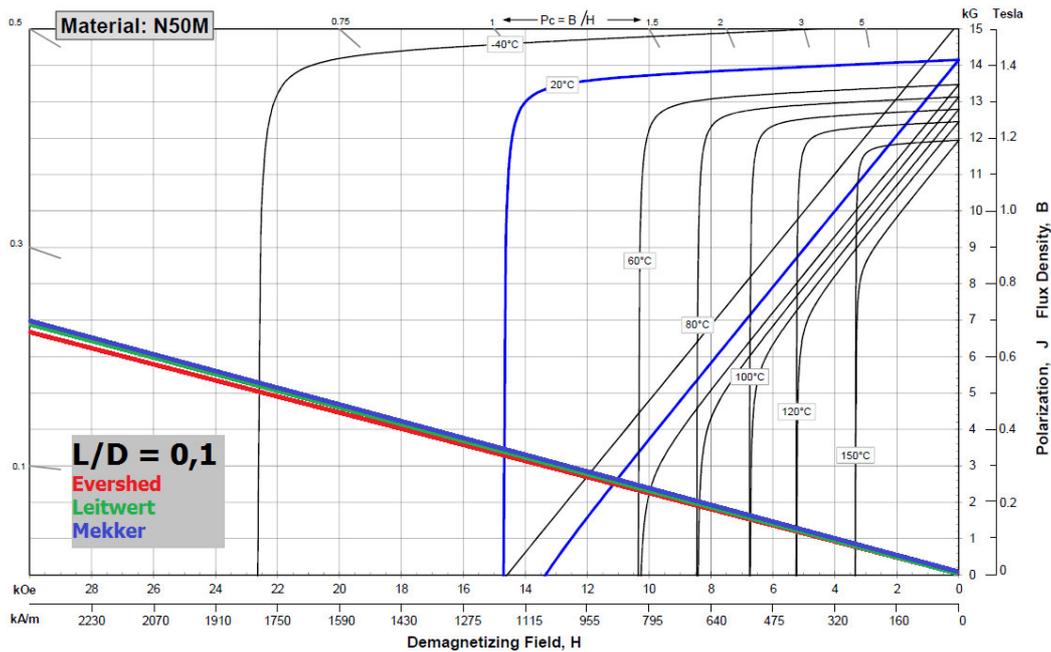


Abbildung 11 Vergleich der Arbeitsgeraden bei einem L/D Verhältnis von 0,1

Die in Abbildung 12 dargestellten Arbeitsgeraden bei einem L/D Verhältnis von 1,0 zeigen die Problematik der Arbeitspunktbestimmung deutlich auf. Diese bilden, wie in [7] beschrieben, einen Arbeitsfächer aus, in welchem sich jener schließlich befindet.

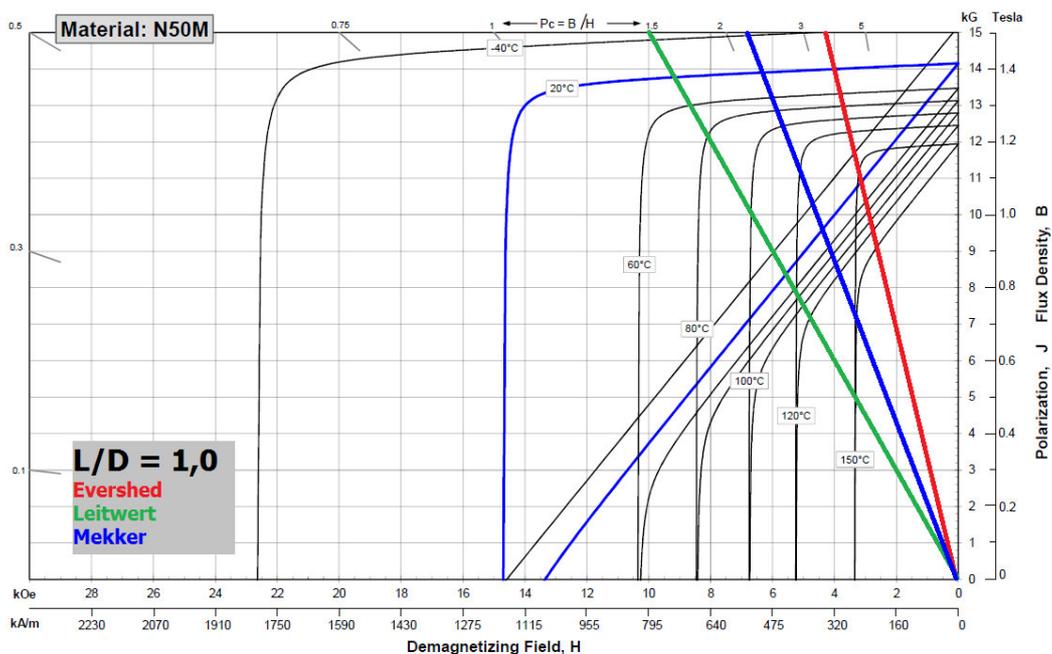


Abbildung 12 Vergleich der Arbeitsgeraden bei einem L/D Verhältnis von 1,0

Auch für quaderförmige Magnete ist die Berechnung des Permeanzkoeffizienten mit Formel 10 möglich, dabei entspricht L der Länge in Magnetisierungsrichtung, B der Breite und h der Höhe

dessen. Der Literatur können allerdings keine Vergleichswerte für diese oder ähnliche Geometrien entnommen werden. Berücksichtigt man die Differenzen der Koeffizienten der unterschiedlichen Methoden bei zylindrischen Magneten lässt sich daraus schließen, dass sich hierbei nur um einen Richtwert handelt und der tatsächliche doch deutlich davon abweichen kann.

$$P_C = 1,77 * \frac{L}{B * h} * \sqrt{2 * (B + h) + (B * h)} \quad \text{(Formel 10) [37]}$$

In [7] wird eine numerische Berechnung des Entmagnetisierungsfaktors für Quadermagnete angeführt, jedoch wird diese aus Gründen der Nichtigkeit für die weitere Arbeit nicht näher erläutert, sondern nur der Vollständigkeit wegen erwähnt.

6.3 RECHTWINKLIGKEITSFAKTOR

Ein weiterer wichtiger Kennwert zur Beurteilung der Magnetisierungsgüte bzw. des Magnetwerkstoffes bildet der Rechtwinkligkeitsfaktor (R_F , [1]). Mit diesem kann die magnetische Stabilität eines hartmagnetischen Werkstoffes bei beliebiger Temperatur beschrieben werden. Aufgrund der charakteristisch sehr ausgeprägten Rechtwinkligkeit von NdFeB Magneten wird er im Zusammenhang mit diesen oft verwendet. Nach Formel 11 entspricht dieser dem Verhältnis der Polarisationsfeldstärke bei 90 % der remanenten Polarisation (H_K , [A/m]). Die grafische Ermittlung ist beispielhaft in Abbildung 13 ersichtlich.

$$RF = \frac{\mu_0 * H_K}{\mu_0 * H_{CJ}} \quad \text{(Formel 11) [38]}$$

Der Rechtwinkligkeitsfaktor kann aber auch durch das Verhältnis von remanenter Magnetisierung (M_r , [A/m]) zur Sättigungsmagnetisierung (M_S , [A/m]) berechnet werden (Formel 12).

$$RF = \frac{M_r}{M_S} \quad \text{(Formel 12) [26]}$$

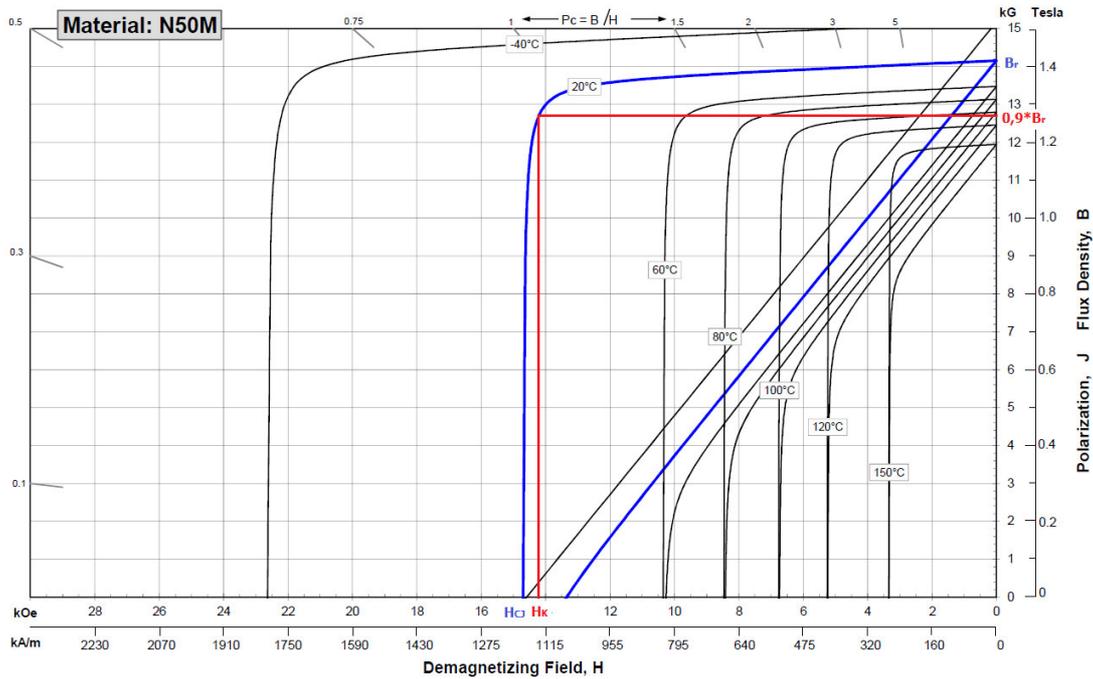


Abbildung 13 Grafische Ermittlung des Rechtwinkligkeitsfaktors (in Anlehnung an [1])

In Tabelle 15 ist die Berechnung des Rechtwinkligkeitsfaktors mit typischen Kennwerten zweier in [24] angeführten REFeB Legierungen ersichtlich. Dieser besitzt meist einen Wert von etwa 90 %, was auch den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen ist.

Tabelle 15 Berechnung des Rechtwinkligkeitsfaktors für ausgewählte Magnetgüten

Bezeichnung	M_r [kA/m]	M_s [kA/m]	R_F [1]
REFeB 360/90	1.074	1.194	0,90
REFeB 210/240	844	955	0,88

7 MAGNETISIEREN VON PERMANENTMAGNETEN

7.1 MAGNETISIERTECHNIK

Die Beschreibung der Magnetisieretechnik erfolgt - sofern nicht anders angegeben – nach [7].

Als Magnetisierprozesse werden Vorgänge bezeichnet, welche eine Änderung der Polarisation in einem magnetischen Werkstoff bewirken. Der Vorgang selbst erfolgt durch von außen auf die Magnete einwirkende Magnetfelder, wodurch es zu einer Ausrichtung der magnetischen Domänen kommt. Bei den heute im Einsatz befindlichen hartmagnetischen Werkstoffen sind für das Erreichen vollständiger Sättigung sehr hohe Feldstärken unerlässlich. Diese können oft nur stoßartig erreicht werden, weshalb meist Impulsmagnetisieranlagen, welche aus einer Spule und einem Magnetisiergerät bestehen, verwendet werden. Dabei liefert das Magnetisiergerät den Strom und erzeugt in der Spule ein Magnetfeld.

Zu Beginn ist es essentiell, Kenntnis über die erforderlichen Feldstärken zu haben. Diese sind für die unterschiedlichen magnetischen Werkstoffe in Abschnitt 7.2 angeführt.

Die Magnetisierungsenergie (W , [J]) muss gewährleisten, dass der Magnet über das gesamte Volumen (V , [m³]) magnetisch gesättigt wird. Sie ist abhängig von der angelegten Feldstärke und dem Volumen des Magneten (Formel 13). Dabei nimmt die benötigte Energie proportional mit dem Quadrat der Feldstärke zu. Aus diesem Grund wird für das Magnetisieren von SEPM viel mehr Energie benötigt, als für Ferrite oder AlNiCo Legierungen.

$$W = \frac{\mu_0 * H^2 * V}{2} \quad \text{(Formel 13) [7]}$$

Für das Magnetisieren von magnetischen Werkstoffen mit geringer Koerzitivfeldstärke (Ferrite, AlNiCo) sind bereits kleine Feldstärken ausreichend. Diese sind auch in mit Gleichstrom durchflossenen Spulen oder mit Elektromagneten erzeugbar. Dabei fließt der Strom entweder kontinuierlich oder kann für jeden Magnetisierungszyklus ein- und ausgeschaltet werden. Die für die Berechnung der Feldstärke (Formel 14) im Zentrum der Spule verwendeten Parameter sind „Windungszahl“ (n , [1]), „Stromstärke“ (I , [A]), „Länge der Spule“ (L , [m]), „Innenradius“ (r , [m]), und „Außenradius“ (R , [m]). Die Spulenachse verläuft dabei in z-Richtung.

$$H_z = \frac{n * I}{2 * (R - r)} * \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + L^2}}{r + \sqrt{r^2 + L^2}} \quad \text{(Formel 14) [7]}$$

Magnetische Werkstoffe können auch durch Permanentmagnete magnetisiert werden. Bei Raumtemperatur ist dies jedoch nur an Ferriten und AlNiCo Legierungen möglich, wohingegen diese Methode bei höheren Temperaturen auch an SEPM durchgeführt werden kann. In der Praxis wird die Methode des Aufmagnetisierens mit Permanentmagneten aber selten angewendet.

Die für das Magnetisieren von SEPM erforderlichen hohen Feldstärken lassen sich nur als kurzzeitige Impulse erzeugen. Die Impulsmagnetisierung wird aber auch bei niedrigkoerzitativen magnetischen Werkstoffen angewendet.

Bei Impulsmagnetisiergeräten führt die Entladung eines Kondensators in einem Schwingkreis zu sehr hohen Stromstärken. Die unterschiedlichen Schaltungsvarianten ermöglichen eine sinusförmige, aperiodische oder alternierende bzw. schwingende Entladung (Abbildung 14). Die beiden Erstgenannten werden für Magnetisierungs- und Letztgenannte für Entmagnetisierungsvorgänge verwendet.

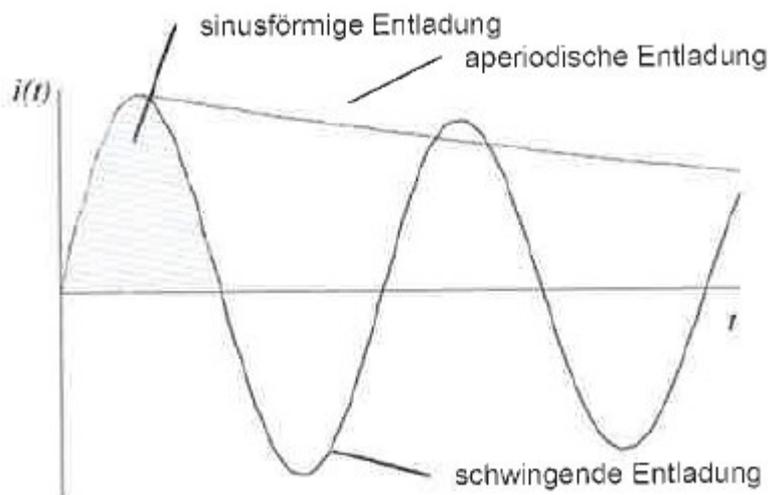


Abbildung 14 Stromverläufe bei unterschiedlichen Entladungsformen [7]

Um einen dauermagnetischen Werkstoff axial oder diametral zu magnetisieren, ist eine einfache Zylinderspule ausreichend, wohingegen für eine radiale Magnetisierung bereits zwei magnetisch gegeneinander geschaltete Spulen verwendet werden.

Besonders wichtig ist, dass die Magnetisierungsspulen gegen die von Stromimpulsen erzeugten mechanischen Erschütterungen geschützt sind, wofür die Drähte der Wicklungen – um eine Möglichkeit zu nennen – verklebt werden können. Nachteilig geht damit jedoch ein langsames Abkühlen der Wicklungen einher. Eine Kühlung der Spule, sei diese durch zum Beispiel Luft, Wasser oder Öl, sollte aus Sicherheitsgründen vorhanden sein.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der beim Magnetisieren und Entmagnetisieren beachtet werden muss, ist die Gegebenheit, wonach die Magnete in den Magnetisiererspulen starken Kräften ausgesetzt sind, weshalb diese, sofern Magnetfeld der Spule und magnetische Vorzugsrichtung des Magneten nicht parallel zueinander sind, in Rotation versetzt werden. Deshalb wird meist eine Konstruktion benötigt, die eine Bewegung des Magneten unterbindet. Eine solche beispielhafte Anordnung ist in Abbildung 15 ersichtlich, dabei wird der Magnet in der Magnetisiererspule durch einen oberen und einen unteren pneumatischen Zylinder fixiert und nach dem Magnetisieren durch den Unteren ausgestoßen.

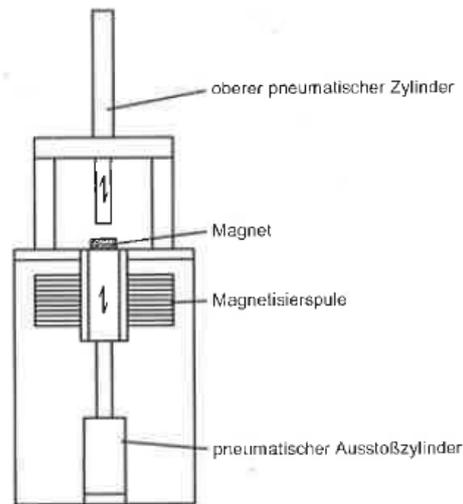


Abbildung 15 Magnetisierspule mit Zuführeinrichtung [7]

7.2 MAGNETISIERUNGSVERHALTEN

Bei der Fertigung der Magnete werden diese, wie bereits erwähnt, am Ende einer thermischen Behandlung – in der Regel handelt es sich um einen Sinterprozess – unterzogen. Danach weisen die magnetischen Werkstoffe keine remanente Magnetisierung auf, sie sind demnach thermisch entmagnetisiert.

Dauermagnetische Werkstoffe werden hinsichtlich ihres Magnetisierungsverhaltens in drei Gruppen unterteilt [24]:

- Keimbildungs-Typ
 - NdFeB, gesintert
 - Ferrite, gesintert
 - SmCo_5 , gesintert
- Pinning-Typ
 - Kohlenstoffstahl
 - $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, gesintert
- Ein-Domänen-Teilchen-Typ
 - NdFeB, kunststoffgebunden
 - AlNiCo, kunststoffgebunden

7.2.1 KEIMBILDUNGS-TYP

Die Neukurve eines gesinterten NdFeB Magneten ist in Abbildung 16 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der steile Anstieg der Polarisierung bei bereits geringer Feldstärke. Bei einer Magnetisierungsfeldstärke von etwa 200 kA/m entspricht diese bereits ca. 95 % der Sättigungspolarisation.

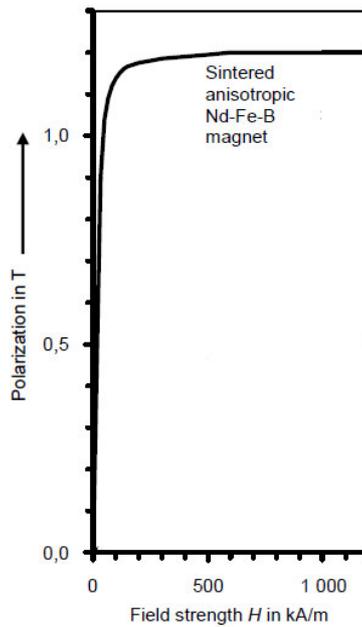


Abbildung 16 Neukurve eines gesinterten NdFeB Magneten nach dem letzten thermischen Behandlungsschritt [24]

Wird der Magnet jedoch mit zu geringer Magnetisierungsfeldstärke aufmagnetisiert, ist dies an der Hystereseschleife im Vergleich zur Magnetisierung bis zur Sättigungsmagnetisierung erkennbar (Abbildung 17). Der Magnet erreicht zwar beim Aufmagnetisieren hohe Polarisationswerte, nach dem Entfernen des externen Feldes verliert die äußere Hystereseschleife jedoch ihre stark ausgeprägte Rechtwinkligkeit. Dadurch sind auch die Werte von remanenter Flussdichte und Polarisationsfeldstärke geringer.

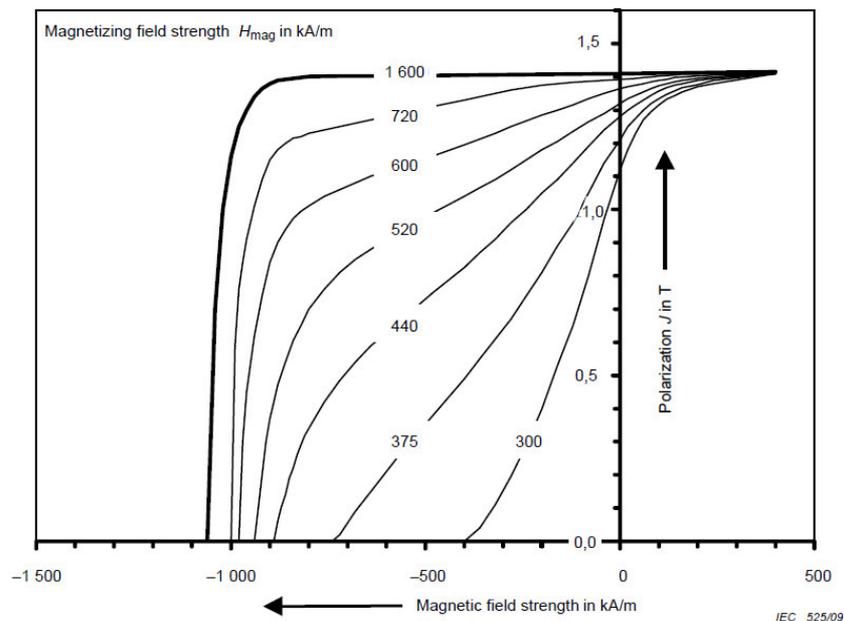


Abbildung 17 Magnetisierungsverhalten gesinterner NdFeB Magnete [24]

Um anisotrope Magnete des Keimbildungs-Typs ausgehend vom thermisch entmagnetisierten Zustand vollständig zu magnetisieren, sollte die Magnetisierungsfeldstärke (H_{mag} , [A/m]) zumindest zweimal der Sättigungspolarisation dividiert durch die Induktionskonstante (Formel 15) entsprechen.

$$H_{mag} = 2 * \frac{J_s}{\mu_0} \quad \text{(Formel 15) [24]}$$

Allerdings hat auch die Magnetgüte einen Einfluss auf die benötigte Magnetisierungsfeldstärke. So steigt diese nach [24] mit abnehmender Polarisationsfeldstärke und zunehmender remanenter Flussdichte. In Abbildung 18 ist der Verlauf der Magnetisierungsfeldstärke bis zur Sättigung für unterschiedliche NdFeB Magnetgüten dargestellt. Auffällig ist, dass die benötigte Feldstärke für vollständige Sättigung bei Magneten niedrigerer Polarisationsfeldstärke höher ist als bei jenen mit hoher. Außerdem ist zu erwähnen, dass niedrig koerzitive Magnete eine Magnetisierungsfeldstärke benötigen, die ein Vielfaches von deren Polarisationsfeldstärke ist, während bei hoch koerzitiven die Polarisationsfeldstärke nicht erreicht werden muss, um diese magnetisch zu sättigen.

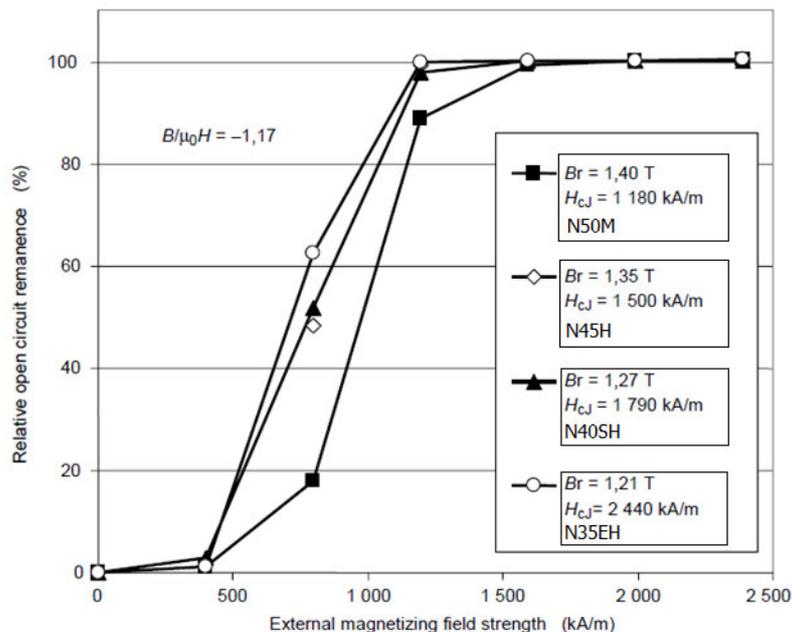


Abbildung 18 Magnetisierungsverhalten gesinterter NdFeB Magnete unterschiedlicher Güten (in Anlehnung an [24])

Nach Expertenmeinung [20] ist die These, wonach die für ein vollständiges Magnetisieren benötigte Feldstärke mit steigender Polarisationsfeldstärke abnimmt, nicht richtig. Tatsächlich sollte mit der Polarisationsfeldstärke auch die erforderliche Magnetisierungsfeldstärke zunehmen, da bei thermisch entmagnetisierten NdFeB Magneten viele leicht bewegliche Domänenwände vorhanden sind, welche jedoch vollständig ausgetrieben werden müssen, um die rechteckige Form der Hystereseschleife auszubilden. Für dieses restlose Austreiben sind Feldstärken notwendig, die zumindest größer sind als die Polarisationsfeldstärke des magnetischen Materials.

In Tabelle 16 sind die nach [24] angeführten magnetischen Eigenschaften ausgewählter Magnetmaterialien sowie deren empfohlene magnetische Feldstärken, die für vollständige Sättigung benötigt werden, angeführt. Diese beziehen sich auf das Magnetisieren im Anschluss an die letzte thermische Behandlung nach der Fertigung.

Um einen bereits magnetisierten Magneten erneut bis zur Sättigung zu magnetisieren, ist eine höhere Feldstärke aufgrund des entmagnetisierenden Feldes notwendig.

Tabelle 16 Kennwerte und Magnetisierungsfeldstärken von magnetischen Werkstoffen des Keimbildungs Typs [24]

Bezeichnung		REFeB 360/90	REFeB 210/240	Ferrit 32/25	RECo ₅ 120-160
$(BH)_{max}$	[kJ/m ³]	360	210	32	120
B_r	[mT]	1.350	1.060	410	800
H_{CB}	[kA/m]	800	760	240	620
H_{CJ}	[kA/m]	960	2.600	320	4.000
J_s	[mT]	1.500	1.200	450	1.000
H_{mag}	[kA/m]	2.400	1.920	720	1.600
H_{mag}/H_{CJ}	[1]	2,5	0,7	2,3	0,4

7.2.2 PINNING-TYP

Die dem Pinning Typ angehörigen magnetischen Werkstoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass die Domänenwände an Phasengrenzen oder Kristalldefekte gebunden sind. Vertreter dieses Typs sind Kohlenstoffstähle und Sm₂Co₁₇ Legierungen, wobei nur Letztere beschrieben wird.

Eine sehr hohe Feldstärke ist notwendig, um Sm₂Co₁₇ Magnete ausgehend vom thermisch entmagnetisierten Zustand zu sättigen. Als Richtwert wird eine Feldstärke von 2.000 kA/m oder mindestens die zweifache Polarisationsfeldstärke vorgeschlagen. Aufgrund des großen Schwankungsbereiches der Polarisationsfeldstärke von Sm₂Co₁₇ Magneten kann die erforderliche Feldstärke zwischen 2.000 und 4.000 kA/m liegen [24].

Abbildung 19 zeigt das Magnetisierungsverhalten eines gesinterten Sm₂Co₁₇ Magneten mit einer Polarisationsfeldstärke von ca. 800 kA/m. Um diesen Magnet vollständig zu magnetisieren wird ein Feld benötigt, welches stark genug ist, um die Pinning Kräfte zu überwinden. Im Vergleich zum Keimbildungs-Typ nimmt die Polarisierung bei Erhöhen der Feldstärke vorerst nur gering zu, sobald die Pinning Kräfte überwunden sind, steigt sie jedoch schneller an. Im Bereich der magnetischen Sättigung flacht die Kurve dann wieder ab.

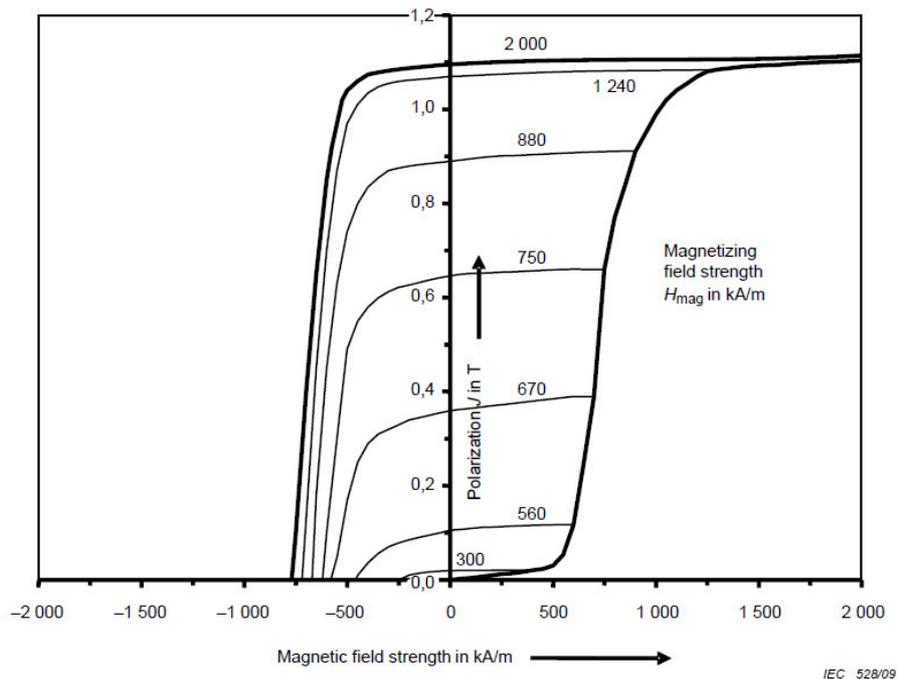


Abbildung 19 Magnetisierungsverhalten eines gesinterten $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ Magneten
($H_{CJ} \approx 800 \text{ kA/m}$) [24]

7.2.3 EIN-DOMÄNEN-TEILCHEN-TYP

Ein-Domän-Teilchen sind Partikel, welche nicht in unterschiedlich magnetisierte Bereiche unterteilt werden können, sie verhalten sich demnach wie Elementarmagnete und es existieren keine Blochwände. Sobald ein angelegtes kritisches Feld, für welches der Durchmesser des Partikels ausschlaggebend ist, erreicht ist, springt die Magnetisierung des Partikels in die Ausrichtung des Feldes [37].

Vertreter dieses Typs sind kunststoffgebundene NdFeB Magnete und AlNiCo Legierungen. In magnetischen Werkstoffen des Ein-Domänen-Teilchen-Typs müssen alle Partikel in Magnetisierungsrichtung ausgerichtet sein, wofür sehr hohe Feldstärken aufgewendet werden müssen. Zudem ist der Anstieg der Polarisation mit der Feldstärke sukzessiv. Als Empfehlung wird eine Magnetisierungsfeldstärke vorgeschlagen, die der drei- bis fünffachen Polarisationsfeldstärke entspricht [24].

In Abbildung 20 ist das unterschiedliche Magnetisierungsverhalten des Keimbildungs- und des Ein-Domänen-Teilchen-Typs anhand von NdFeB Magneten ersichtlich. Deutlich erkennbar sind das langsamere Ansteigen der Polarisation mit der Feldstärke des kunststoffgebundenen Magneten sowie die höhere Magnetisierungsfeldstärke bei gleicher Polarisationsfeldstärke.

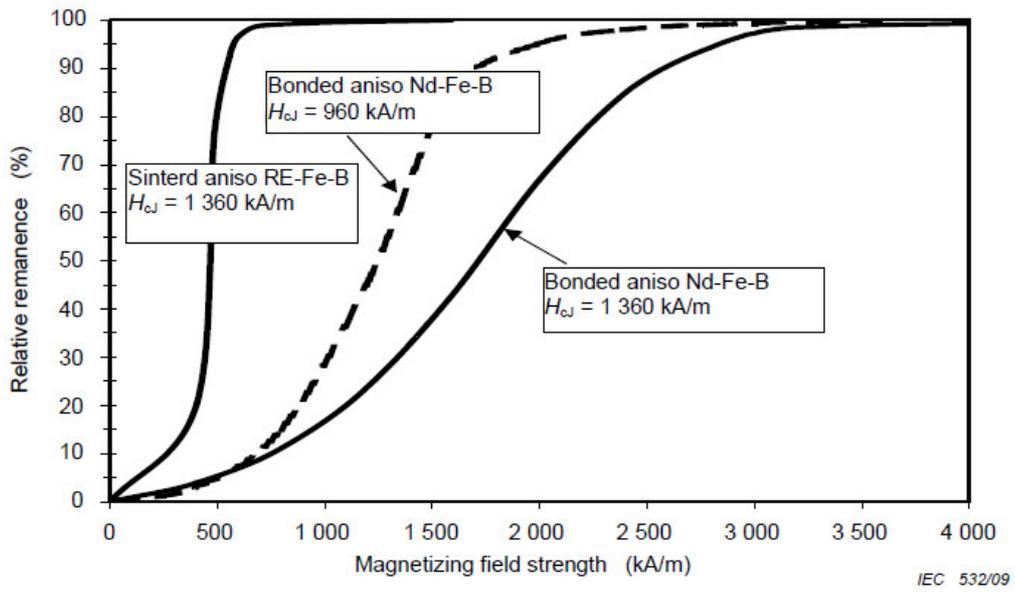


Abbildung 20 Vergleich des Magnetisierungsverhaltens von kunststoffgebundenen und gesinterten NdFeB Magneten [24]

8 ENTMAGNETISIEREN VON PERMANENTMAGNETEN

In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten des Entmagnetisierens von hartmagnetischen Werkstoffen erläutert. Beispielhafte Erklärungen erfolgen an gesinterten NdFeB Magneten (Keimbildungs-Typ), da an diesen in Abschnitt 10 und 11 Versuche zu deren Entmagnetisierung behandelt werden.

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten, um magnetische Werkstoffe zu Entmagnetisieren.

1. Thermisches Entmagnetisieren
2. Entmagnetisieren mit Wechselstromspule
3. Mechanisches Entmagnetisieren

8.1 THERMISCHES ENTMAGNETISIEREN

Als vollständige thermische Entmagnetisierung bezeichnet man das Erhitzen des Permanentmagneten über dessen Curie-Temperatur. Dieser verliert seine magnetischen Eigenschaften aufgrund der Auflösung der magnetischen Ordnung und kühlt dann im feldfreien Raum ab, damit er beim Abkühlen nicht wieder aufmagnetisiert. Durch die Abkühlung bildet sich dennoch ein resultierendes Moment, welches auch als spontane Magnetisierung bezeichnet wird und werkstoffabhängig ist.

Obwohl die Curie-Temperatur von NdFeB Werkstoffen bei ungefähr 310 °C liegt und die maximale Einsatztemperatur laut Datenblättern zumindest 80 °C aufweisen sollte, treten bereits Verluste der magnetischen Eigenschaften auf, wenn der Magnet über Raumtemperatur erhitzt wird.

Eine Erhöhung der Temperatur unterhalb der maximalen Einsatztemperatur führt zur Abnahme der magnetischen Eigenschaften (H_{Cj} , B_r), welche durch Verwendung der Temperaturkoeffizienten berechnet werden können. Während des Abkühlens erlangt der Magnet diese aber wieder zurück. In Tabelle 17 sind die maximalen Einsatztemperaturen der jeweiligen Güteklassen von NdFeB Magneten angeführt. Die Abnahme von Flussdichte bzw. Polarisationsfeldstärke kann in diesem Temperaturbereich im aufgeheizten Zustand durch Verwendung der Temperaturkoeffizienten angenähert berechnet werden, wobei diese nicht linear über diesen Bereich sind, sondern es sich um Durchschnittswerte handelt.

Tabelle 17 Maximale Einsatztemperaturen von gesinterten NdFeB Magneten

Güteklasse	N	M	H	SH	UH	EH	AH
T_w [°C]	80	100	120	150	180	200	220

Die Art des Temperatureffektes wird jedoch nicht nur durch das Temperaturniveau festgelegt, sondern hängt auch von der Geometrie des Magneten ab, genauer gesagt von dessen Entmagnetisierungsfeld. Eine Temperaturänderung kann auch irreversibel sein, wenn aufgrund dieser

der Arbeitspunkt unter den Knickpunkt der BH-Kurve wandert, bei welchem es sich um jenen Punkt handelt, an dem der lineare Verlauf der Entmagnetisierungskennlinie endet und in einen Kurvenzug übergeht. In Abbildung 21 sind zwei Arbeitsgeraden mit unterschiedlichen Permeance Koeffizienten des Werkstoffes N50M dargestellt.

$P_C = 1$: Bei Raumtemperatur liegt der Arbeitspunkt deutlich über dem Knickpunkt und dieser wird erst ab einer Temperatur von etwa 100 °C überschritten. Das heißt, die irreversible Temperaturänderung resultiert hier aufgrund des Überschreitens der maximalen Einsatztemperatur.

$P_C = 0,1$: Bei Raumtemperatur liegt der Arbeitspunkt ebenfalls über dem Knickpunkt, jedoch wird dieser bereits bei 60 °C überschritten. In diesem Fall handelt es sich bereits um eine irreversible Temperaturänderung, ohne dass die maximale Einsatztemperatur erreicht wird.

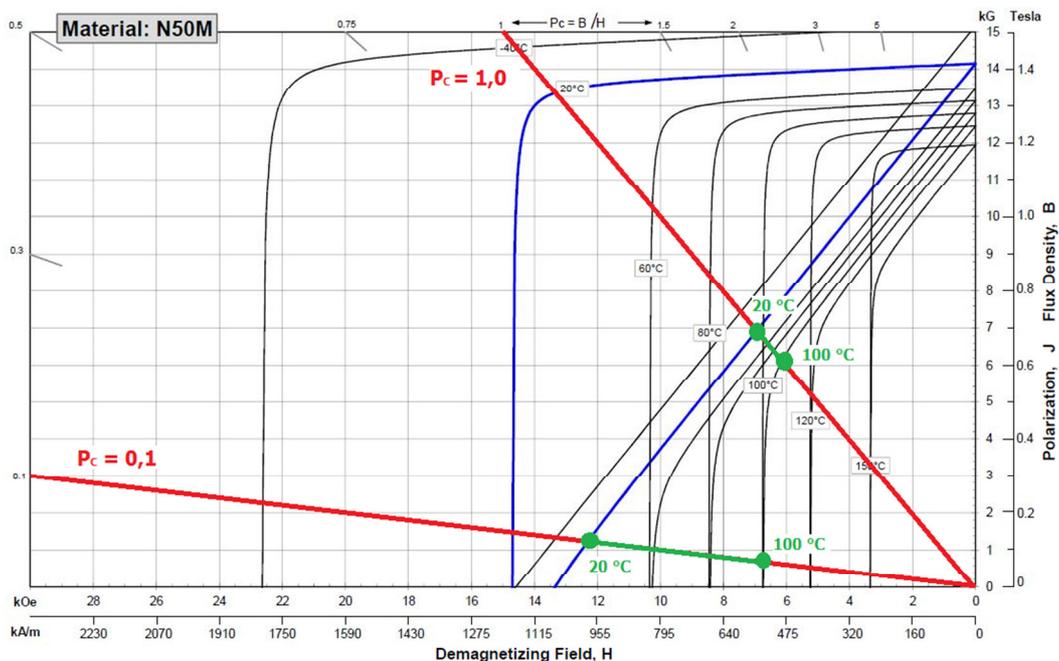


Abbildung 21 Verschiebung des Arbeitspunktes aufgrund thermischer Beanspruchung

Es ist also ersichtlich, dass das L/D Verhältnis maßgeblichen Einfluss auf die maximale Einsatztemperatur hat. Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, handelt es sich bei der Bestimmung der Arbeitsgerade um eine Methode, die eben unter anderem aufgrund inhomogener Magnetfelder innerhalb des Magneten als sehr ungenau bezeichnet werden kann und deshalb meist ein Arbeitsfächer zwischen minimaler und maximaler Arbeitsgerade gebildet wird. Berücksichtigt man diesen Aspekt, wird auch die Ermittlung, ob es sich bei einer definierten Temperaturbeanspruchung um eine reversible oder irreversible Änderung handelt, als - bei Vorhandensein mehrerer Magnete unterschiedlicher Geometrien und Werkstoffarten - sehr problematisch erachtet.

8.1.1 TEMPERATURVERHALTEN VON NDFEB MAGNETEN

Wie bereits beschrieben, weisen NdFeB Magnete eine geringe Temperaturstabilität auf. Neben den niedrigen Werten der maximalen Einsatztemperaturen sind auch hohe negative Werte der Temperaturkoeffizienten kennzeichnend. In Tabelle 18 sind für die jeweiligen Güteklassen Temperaturkoeffizienten der Flussdichte und der Polarisationsfeldstärke ausgewählter Hersteller angeführt. Aus diesen Angaben werden mittlere Temperaturkoeffizienten berechnet, welche für die weitere Arbeit verwendet werden.

Tabelle 18 Vergleich der Temperaturkoeffizienten von NdFeB Magneten [1, 13, 16, 32]

Güte	Arnold Magnetics Technologies		Dexter Magnetic Technologies		MMC		e-Magnets UK		Mittelwert	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]	[%/°C]
N	-0,120	-0,750	-0,120	-0,630	-0,120	-0,600	-0,120	-0,600	-0,120	-0,645
M	-0,120	-0,675	-0,110	-0,610	-0,120	-0,590	-0,120	-0,580	-0,118	-0,614
H	-0,120	-0,605	-0,110	-0,600	-0,110	-0,580	-0,110	-0,580	-0,113	-0,591
SH	-0,120	-0,535	-0,110	-0,580	-0,110	-0,550	-0,100	-0,550	-0,110	-0,554
UH	-0,120	-0,465	-0,100	-0,550	-0,110	-0,510	-0,090	-0,520	-0,105	-0,511
EH	-0,120	-0,420	-0,080	-0,550	-0,110	-0,510	-0,085	-0,500	-0,099	-0,495
AH	-0,120	-0,393	-0,090	-0,450	-0,110	-0,510	-0,080	-0,450	-0,100	-0,451

Die Angaben des Temperaturkoeffizienten der Flussdichte weichen zwischen den Herstellern nur gering ab und auch jene der Polarisationsfeldstärke bzw. deren Verlauf über die Güteklassen sind mit Ausnahme von [1] sehr ähnlich (Abbildung 22).

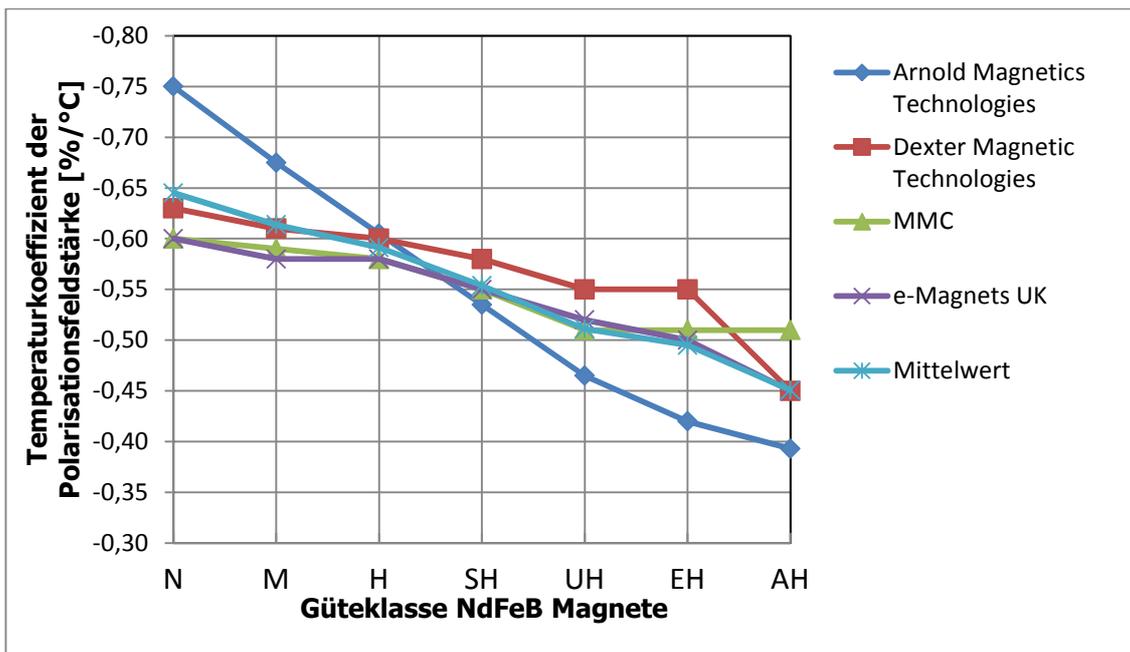


Abbildung 22 Vergleich des Temperaturkoeffizienten der Polarisationsfeldstärke ausgewählter Hersteller

8.2 ENTMAGNETISIEREN MIT WECHSELSTROM

Hartmagnetische Werkstoffe können durch ein magnetisches Feld mit alternierender abnehmender Feldstärke entmagnetisiert werden. Dabei muss das erste Strommaximum ausreichen, um das Material in die magnetische Sättigung zu treiben [7, 40]. Das Wechselfeld erzeugt Hystereseschleifen, die sich Null nähern und den magnetischen Werkstoff entmagnetisieren (Abbildung 23).

Für diesen Vorgang können Luftspulen verwendet werden, wobei es nicht unbedingt notwendig ist, dass die Feldrichtung parallel zur Achse der Magnetisierung ist. Die Abnahme der Amplitude der Stromstärke muss genügend langsam erfolgen, um Restmagnetismus zu verhindern. Ein vollständiges Entmagnetisieren ist meist nicht möglich, die Magnetisierung kann nur auf einen Wert nahe Null reduziert werden. Nach [31] sollte die Abnahme der Feldstärke je Vorzeichenwechsel ca. 5-10 % der Koerzitivfeldstärke entsprechen.

In Abbildung 18 sind bereits benötigte Sättigungsfeldstärken für das Magnetisieren aus dem entmagnetisierten Zustand angeführt. Um einen bereits magnetisierten Magneten zu sättigen oder um dessen Magnetisierung umzukehren, sind jedoch höhere Feldstärken erforderlich. Nach [24] sind für eine vollständig gesättigte Magnetisierungsumkehrung bei gesinterten NdFeB Magneten Feldstärken notwendig, die der zwei- bis zweieinhalbfachen Polarisationsfeldstärke entsprechen.

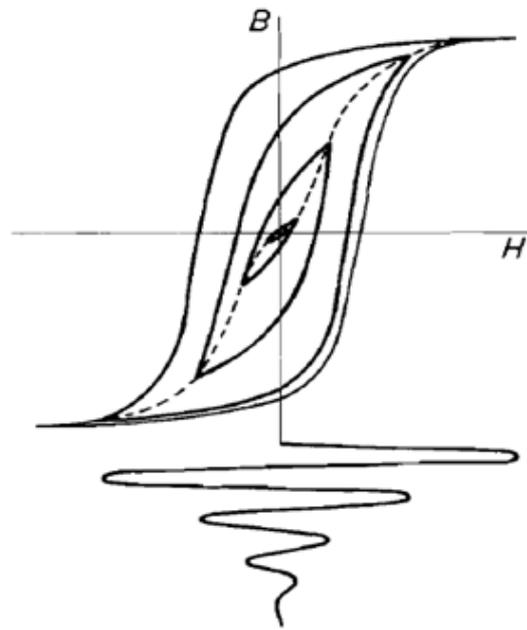


Abbildung 23 Hystereseschleife mit periodischer Abnahme der Feldstärke [27]

Allerdings muss zudem das Entmagnetisierungsfeld des Magneten, also auch der Arbeitspunkt, berücksichtigt werden. Die Entmagnetisierungsfeldstärke (H_D , [A/m]) muss demnach um die Feldstärke des entmagnetisierenden Feldes erweitert werden (Formel 16). Dabei entspricht J der Polarisierung im Arbeitspunkt.

$$H_D = H_{mag} + N * \frac{J}{\mu_0} \quad (\text{Formel 16}) [7]$$

Da jedoch, wie bereits in Abschnitt 7.2.1 diskutiert, der für die Entmagnetisierung relevante Parameter die Polarisationsfeldstärke und nicht die Polarisierung ist, kann der Term $\frac{J}{\mu_0}$ durch H_{CJ} ersetzt werden (Formel 17), wodurch das Entmagnetisierungsfeld des Magneten sicher berücksichtigt wird [20].

$$H_D = H_{mag} + N * H_{CJ} \quad (\text{Formel 17})$$

8.3 MECHANISCHES ENTMAGNETISIEREN

Magnetische Werkstoffe können - wenn auch nicht vollständig - zumindest bis zu einem bestimmten Anteil durch Prall oder Schlag entmagnetisiert werden. Es kommt dabei zu einer randomisierenden Umordnung der Weiß'schen Bezirke in den Magneten. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden keine Versuchsdaten oder -ergebnisse zur Entmagnetisierung von hartmagnetischen Materialien durch Prall oder Schlag eruiert.

Nach Expertenmeinung [20] ist es jedoch nicht möglich, die bisher angeführten hartmagnetischen Werkstoffe durch Prall- oder Schlagbeanspruchung zu entmagnetisieren.

9 ANWENDUNGSGEBIETE VON NDFEB MAGNETEN

Die Anwendungsgebiete von NdFeB Magneten sind sehr vielfältig. Die Magnete liegen dabei in sehr verschiedenen Größen und Stückgewichten vor. Die mengenmäßige Verteilung wurde von mehreren Autoren [8, 15, 42] analysiert und ist in den drei folgenden Abbildungen dargestellt.

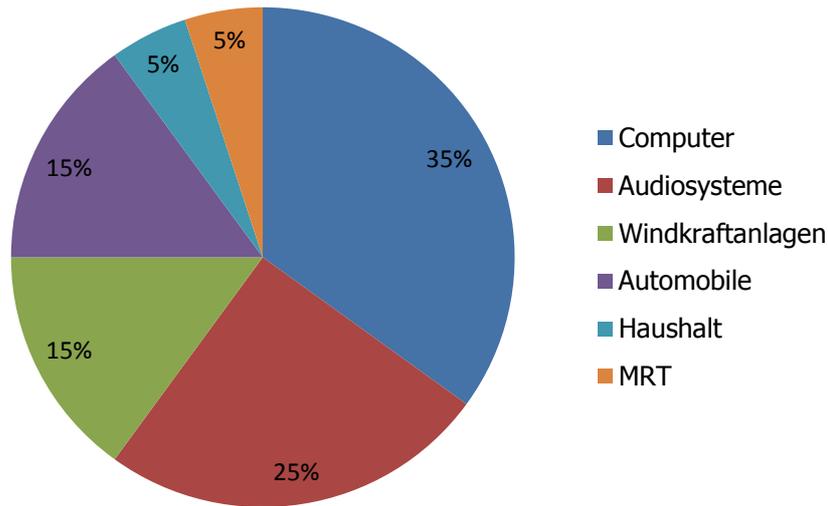


Abbildung 24 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [15]

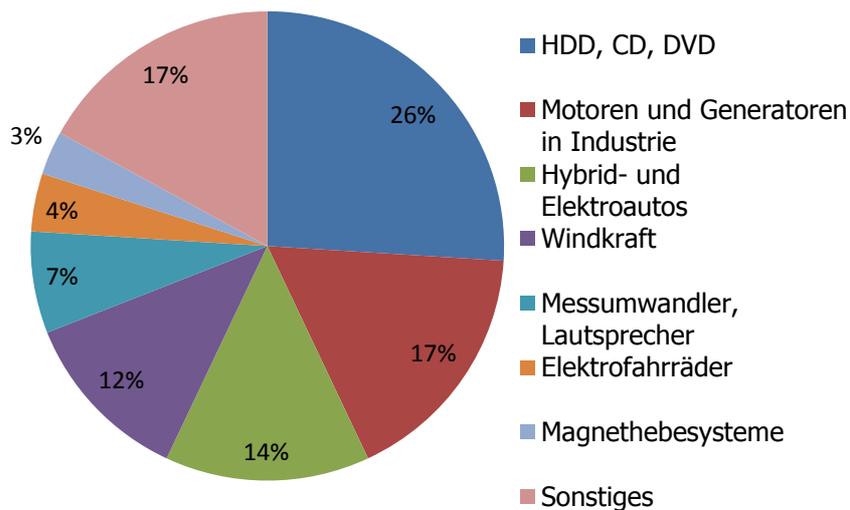


Abbildung 25 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [8]

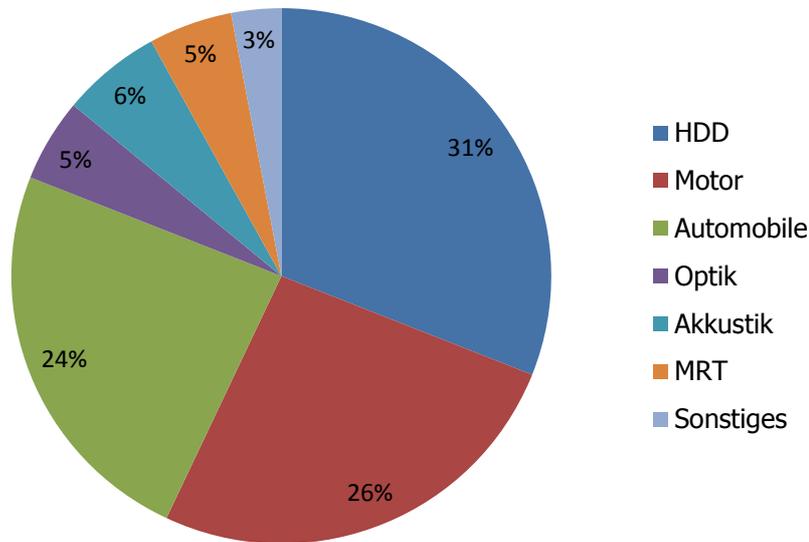


Abbildung 26 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [42]

Wie zu erkennen ist, weichen die Angaben doch deutlich voneinander ab. Es können jedoch Hauptanwendungen abgeleitet werden: Festplatten, Computer, Audiosysteme, Motoren, Generatoren, Elektrofahrzeuge und Windkraftanlagen. Die Zuordnung dieser Anwendungen erfolgt nach [5], wonach für die Anwendungsgebiete von NdFeB Magneten die Hauptgruppen „Kommunikations- und Unterhaltungselektronik“, „Fahrzeugbereich“, „Windkraftanlagen“ und „Industrieanlagen“ vorgeschlagen werden.

- Kommunikations- und Unterhaltungselektronik: Die NdFeB Magnete finden hier in optischen Laufwerken, Vibrationsalarmen und vor allem in Festplatten als kleine Motoren Anwendung. Zudem sind die Magnete in Lautsprechern eingebaut.
- Fahrzeugbereich: Hier werden NdFeB Magnete in mehreren Einzelanwendungen eingesetzt. Beispielhaft werden Lautsprecher, Servolenkungen, Sensoren und Motoren angeführt. Dieser Bereich wird als besonders aussichtsreich deklariert, da NdFeB Magnete in den Motoren von Hybrid- und Elektroautos sowie in Elektrofahrrädern eingebaut sind.
- Windkraftanlagen: In diesem Bereich werden NdFeB Magnete für Synchrongeneratoren mit Permanentmagneten eingesetzt. Auch dieser Bereich gilt als sehr aussichtsreich, da der Einsatz dieser Generatoren in Windkraftanlagen im Wachsen begriffen ist und hier die größten NdFeB Magnete eingesetzt werden.
- Industrieanlagen: In Industrieanlagen werden NdFeB Magnete in Elektromotoren und Generatoren sowie in Magnethebesystemen verwendet.

- Sonstige Anwendungsgebiete: NdFeB Magnete werden noch in zahlreichen anderen Anwendungen eingesetzt. Zu erwähnen sind beispielhaft Waschmaschinen, Magnetresonanztomografie, Klimaanlage, Heizpumpen und militärische Anwendungen.

9.1 KOMMUNIKATIONS- UND UNTERHALTUNGSELEKTRONIK

In der Hauptgruppe „Kommunikations- und Unterhaltungselektronik“ befinden sich NdFeB Magneten vor allem in Computern, Notebooks und Mobiltelefonen. Die durchschnittlichen Lebensdauern der jeweiligen Anwendungen sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19 Lebensdauern in der Gruppe Kommunikations- und Unterhaltungselektronik

Gerät	Lebensdauer [a]	Literaturquelle
Computer	6,6	[25]
Computer	10,0	[15]
Notebook	5,6	[25]
Handy	3,5±0,5	[4]

9.1.1 DESKTOPCOMPUTER

In Desktopcomputern ist standardgemäß eine 3,5 Zoll HDD Festplatte eingebaut, die den mengenmäßig größten Anteil an NdFeB ausmacht. Des Weiteren befinden sich noch Magnete in Lautsprechern, optischen Laufwerken, Lüftern und Diskettenlaufwerken. In Tabelle 20 sind die durchschnittlichen Gehalte und Massen der Neodym führenden Bauteile eines Desktopcomputers dargestellt [49]. Die Masse an NdFeB wird auf Basis der Annahme berechnet, wonach der Neodym Gehalt in den Magneten circa 30,0 % beträgt.

Demnach befinden sich mehr als 70,0 % an NdFeB in der Festplatte und die Gesamtmenge dieser hartmagnetischen Legierung im Desktopcomputer beträgt 16,8 g. Nach [50] wird die Masse in 3,5 Zoll Festplatten mit 14,0 g beziffert, berücksichtigt in Computern aber die übrigen Komponenten (z.B. Lüfter) nicht. Auf Basis der Annahme, dass ein handelsüblicher Desktopcomputer eine maximale Masse von 10,0 kg und eine 3,5 Zoll Festplatte durchschnittlich 550,0 g hat, führt dies zu einem NdFeB Gehalt von 0,2 % im Computer und 2,2 % in der Festplatte.

Tabelle 20 Menge an NdFeB in Desktopcomputern [49]

Bauteil	Neodym	NdFeB	NdFeB
	[mg]	[g]	[%]
Festplatte	3.621,0	12,07	72,0
Lautsprecher	310,0	1,03	6,2
CD Laufwerk	977,0	3,26	19,4
Mainboard Lüfter	4,5	0,02	0,1
Netzteil Lüfter	3,8	0,01	0,1
Diskettenlaufwerk	116,0	0,39	2,3
Gesamt	5.032,3	16,77	100,0

9.1.2 NOTEBOOK

In Notebooks befinden sich ebenfalls NdFeB Magnete in Festplatten, Lautsprechern, Laufwerken und Lüftern, allerdings wird hier standardgemäß eine 2,5 Zoll HDD Festplatte verwendet, weshalb die Massen im Vergleich zu Desktopcomputern geringer sind. Die in Tabelle 21 dargestellten durchschnittlichen Neodym Gehalte der Bauteile werden der Literatur entnommen [4, 49] und die Masse an NdFeB wird wie in Abschnitt 9.1.1 berechnet. Ein weiterer Vergleichswert ist in [50] angeführt, demnach wird die Menge der magnetischen Legierung in 2,5 Zoll Festplatten mit 2,5 g beziffert.

Tabelle 21 Menge an NdFeB in Notebooks

[49]				[4]			
Bauteil	Neodym	NdFeB	NdFeB	Bauteil	Neodym	NdFeB	NdFeB
	[mg]	[g]	[%]		[mg]	[g]	[%]
Festplatte	1.121,0	3,74	29,3	Festplatte	1.044,0	3,48	48,5
Lautsprecher	626,0	2,09	16,4	Optisches Laufwerk	464,0	1,55	21,5
CD-Laufwerk	927,0	3,09	24,3	Lautsprecher	646,0	2,15	30,0
Lüfter	2,4	0,01	0,1	Gesamt	2.154,0	7,18	100,0
Diskettenlaufwerk	1.144,0	3,81	29,9				
Gesamt	3.820,4	12,73	100,0				

Basierend auf der Annahme, dass ein Notebook eine durchschnittliche Masse von 2,0 kg hat, führt dies nach [49] zu einem NdFeB-Gehalt von ca. 0,6 % und nach [4] von 0,4 %. Daraus folgt, dass Notebooks, obgleich geringerer Magnetmassen, einen höheren NdFeB Gehalt aufweisen.

Da in Österreich keine Aufstellungen über Verkaufszahlen von Desktopcomputern und Notebooks vorhanden sind, stellt es sich als äußerst schwierig dar, qualitative Schätzungen über die im Umlauf befindliche Menge an NdFeB Magneten in Österreich zu machen. Nach [18] wird die in Festplatten

(Desktopcomputer und Notebook) umlaufende Menge an NdFeB Magneten auf $37,0 \pm 2,7$ t und der bereits stattfindende jährliche Rückfluss auf 4,6 t geschätzt.

9.1.3 MOBILTELEFON

In Mobiltelefonen sind NdFeB Magnete vor allem in Lautsprechern eingebaut. Der Literatur entnommene Schätzungen bezüglich der Massen an verbauten NdFeB Magneten in diesen sind in Tabelle 22 dargestellt. Im Vergleich zu [49] und [4] scheint der Wert von [50] als zu hoch angesetzt, wodurch sich auch die unterschiedliche Abschätzung des Potentials der Autoren herleiten lässt.

Nach [28] kann das derzeitige in Österreich befindliche Lager an NdFeB Magneten in Mobiltelefonen zu 380,0 kg angegeben werden und es besteht bereits ein jährlich konstanter Rückfluss von 165,0 kg. Der Begriff „Lager“ soll dabei den derzeitigen Bestand eines Stoffes beschreiben. Als besonders kritisch - und deshalb wird das Potential derzeit niedrig eingeschätzt - wird in dieser Anwendungsgruppe angeführt, dass die Mobiltelefone am Ende ihrer Nutzungsdauer nicht den etwaigen Sammelstellen zugeführt, sondern meist zuhause aufbewahrt oder einfach im Restmüll entsorgt werden.

Tabelle 22 Menge an NdFeB in Mobiltelefonen

[49]		[4]		[50]
Neodym	NdFeB	Neodym	NdFeB	NdFeB
[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]
62,0	206,0	60,0	200,0	1.100,0

9.2 FAHRZEUGBEREICH

9.2.1 ELEKTROFAHRZEUGE

Als Elektroautos bezeichnet man Fahrzeuge, die zur Fortbewegung ausschließlich über einen elektrischen Motor verfügen, wohingegen Hybridautos zusätzlich einen vom Grad der Hybridisierung abhängigen Verbrennungsmotor besitzen, der unterschiedliche Aufgaben erfüllen kann. Elektro- und Hybridautos werden hier als Elektrofahrzeuge zusammengefasst.

Der Elektromotor in Elektrofahrzeugen ist meist als Permanentmagnet Synchronmaschine ausgeführt, weshalb sich hier der Großteil an NdFeB im Fahrzeug befindet. Zusätzlich zum Elektromotor befinden sich aber noch andere potentielle Quellen wie Lautsprecher, Sensoren oder Kleinmotoren in diesen Autos, die von den Autoren aber meist nicht berücksichtigt werden. In Tabelle 23 sind der Literatur entnommene Mengen an Neodym bzw. NdFeB in Elektrofahrzeugen dargestellt. Die Lebensdauer von Elektrofahrzeugen wird auf 10 [3] bzw. 14 [15] Jahre geschätzt. Nimmt man wiederum in NdFeB Magneten einen Neodym Gehalt von 30,0 % an, so führt dies in Elektroautos zu einer Magnetmasse von 0,6 kg und bei Hybridautos zu $2,3 \pm 1,0$ kg, was eine qualitative Abschätzung wiederum sehr schwierig gestaltet. Da Toyota mit dem Hybrid Modell Prius unangefochtener Marktführer in der

Kategorie Elektrofahrzeuge ist, wird der relative NdFeB Gehalt bezogen auf die Leerlast eines Toyota Prius, die ca. 1.400 kg [48] beträgt, berechnet.

Tabelle 23 Menge an NdFeB in Motoren von Elektrofahrzeugen

	Neodym	NdFeB	Fahrzeug	NdFeB relativ
Literaturquelle	[kg]	[kg]		[%]
[19]		1,3	Hybrid	0,09
[48]	1,0		Hybrid	0,24
[28]	0,2		Elektro	0,05
[28]	0,9		Hybrid	0,21
[22]		2,4	Hybrid + Elektro	0,17
[23]		3,0	Hybrid	0,21

In Österreich lag der Fahrzeugbestand 2013 an Elektroautos bei 3.386 und an Hybridautos bei 12.823 Stück [44], allerdings stieg die Zahl der Erstanmeldungen im Jahr 2014 bei Elektroautos um fast 100 % auf 1.281 an, während die Anzahl an Neuanmeldungen bei Hybridautos mit 2.360 Stück fast konstant blieb [45]. Aus diesen Zahlen ergibt sich im Bereich Elektrofahrzeuge in Österreich ein Lager von $23,2 \pm 55,6$ t und einen Zuwachs von $7,8 \pm 3,9$ t im Jahr 2014.

9.2.2 ELEKTROFAHRRÄDER

Auch in Elektrofahrrädern, deren Verkaufszahlen aufgrund zunehmender Beliebtheit in den letzten Jahren stark anstiegen, befinden sich im Elektromotor NdFeB Permanentmagnete. Offizielle Verkaufszahlen sowie durchschnittliche Lebensdauern von Elektrofahrrädern in Österreich sind nicht vorhanden, in [28] wird das Lager Ende 2011 auf 78.500 Stück geschätzt. In Tabelle 24 sind die der Literatur entnommenen Mengen an NdFeB in Elektrofahrrädern dargestellt. Schließt man die Angabe nach [50] von 160 g NdFeB pro Fahrrad aus, sind die Masseangaben der anderen Literaturquellen zwischen 300 und 450 g pro Fahrrad sehr einheitlich angeführt. Ausgehend von einer durchschnittlichen Masse eines Elektrofahrrades von 20 kg führt dies zu einem durchschnittlichen NdFeB Gehalte von circa 2,0 %. Das Lager an NdFeB Magneten in Elektrofahrrädern in Österreich kann so auf etwa 30 t geschätzt werden. Da erst seit wenigen Jahren nennenswerte Mengen verkauft wurden und die Lebensdauer auf über 10 Jahre geschätzt wird, fällt vermutlich erst ab 2020 nutzbares Potential in diesem Einsatzgebiet an [50].

Tabelle 24 Menge an NdFeB in Elektrofahrrädern

Literaturquelle	NdFeB [g]	NdFeB [%]
[22]	325±25	1,6±0,1
[28]	400±50	2,0±0,3
[8]	325±25	1,6±0,1
[50]	160	0,8

9.3 INDUSTRIEANLAGEN

Nach [5] stellt die Anwendung von NdFeB Magneten in permanentmagneterregten Elektromotoren den mengenmäßig wichtigsten Anteil dar. Besonders interessant ist dieser Bereich, da diese aufgrund geforderter Temperaturstabilität einen hohen Dysprosium Gehalt aufweisen. Die Magnete werden in einigen Gleichstrommotoren und Synchronmaschinen, wie zum Beispiel synchrone Servomotoren eingesetzt, da elektrische Maschinen mit permanentmagnetischer Feldanregung aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades, ihrer hohen Drehmomentdichte und der Zuverlässigkeit in kleinen bis mittleren Leistungsbereichen etabliert sind. Diese Maschinen seit einigen Jahren auch in höheren Leistungsbereichen bis zu 200 kW eingesetzt [2].

In Abhängigkeit von mehreren Faktoren wie „Betriebsstunden“, „Betriebslast“, „Temperatur“ und „Verschleiß“, werden in [11] die durchschnittlichen Lebensdauern in Abhängigkeit vom Leistungsbereich angegeben (Tabelle 25). Dabei ist bereits berücksichtigt, dass Motoren im industriellen Einsatz im Durchschnitt zweimal einer Reparatur unterzogen werden. Die Entsorgung von Elektromotoren erfolgt zurzeit entweder über Recyclingbetriebe oder die Maschinen werden zum Zwecke einer Zweitnutzung außerhalb der europäischen Union verkauft [5]. Als derzeitiges Problem wird angeführt, dass Maschinen, die SEPM enthalten, keine besondere Kennzeichnung auf deren Inhalt vorweisen. Dies führt einerseits dazu, dass die SEPM während des Recyclingprozesses verloren gehen und andererseits eine quantitative Abschätzung der Menge an NdFeB Magneten in Elektromotoren- und generatoren sehr schwer möglich ist.

Tabelle 25 Durchschnittliche Lebensdauer von Elektromotoren [11]

Leistungsbereich [kW]	Durchschnittliche Lebensdauer [a]
1,0-7,5	12
7,5-75	15
75-250	20

Im Rahmen der Literaturrecherche konnten keine Daten über NdFeB führende Elektromotoren oder Elektrogeneratoren in Österreich ermittelt werden. Nach [5] wurden 2012 in Deutschland

ca. 750.000-1.000.000 Servomotoren mit NdFeB Magneten hergestellt, Tendenz steigend (Abbildung 27). Das durchschnittliche Magnetgewicht pro Motor wird dabei mit einer Masse von 175 g angegeben. Das Lager an NdFeB Magneten in der Industrie wird in Deutschland auf circa 1.000 t geschätzt, der jährliche Verbrauch liegt bei $87,5 \pm 2,5$ t [5].

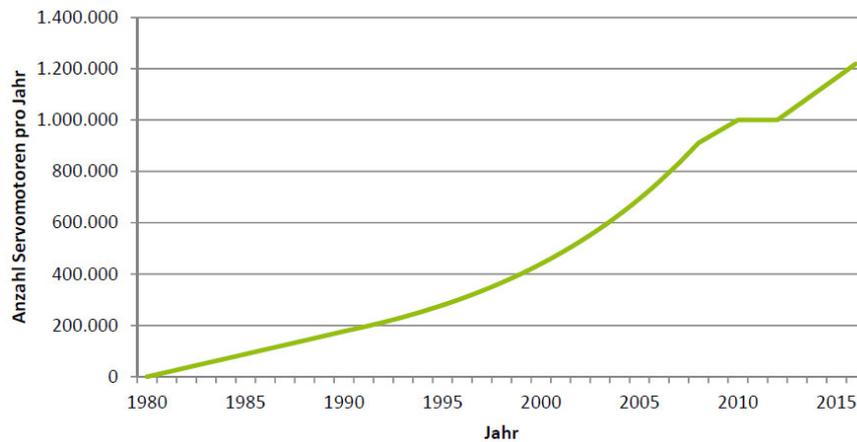


Abbildung 27 Produktion synchroner Servomotoren in Deutschland [5]

9.4 WINDKRAFTANLAGEN

In Windkraftanlagen werden die größten Stückmassen an NdFeB Magneten eingesetzt. Sie werden dabei seit einigen Jahren in getriebelosen Windkraftanlagen mit permanentmagneterregten Synchrongeneratoren eingesetzt. Eine prozentuale Angabe, wie viel der im Einsatz befindlichen Windkraftanlagen NdFeB Magnete enthalten, lässt sich schwer abschätzen, da oft keine Angaben über den Einbau von diesen vorhanden sind. Eine Wiederverwertung findet zurzeit noch sehr wenig Anwendung, was vor allem daran liegt, dass die Magnete in diesem Bereich erst seit wenigen Jahren eingesetzt werden und die Lebensdauer bei etwa 20 Jahren [15] liegt. Ein weiteres Problem ist außerdem, dass die Magnete aufgrund ihrer Stärke direkt vor Ort noch vor der Demontage entmagnetisiert werden müssten, wofür derzeit aber noch keine Methode entwickelt wurde. Experten schätzen, dass der Marktanteil an getriebelosen Windkraftanlagen bei bis zu 12 % [28] bzw. ca. 14 % [33] liegt. Der durchschnittliche der Literatur entnommene Bedarf an Neodym bzw. NdFeB im Bezug auf die Leistung pro Megawatt ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26 Menge an Neodym und NdFeB in Windkraftanlagen

Literaturquelle	Neodym [kg/MW]	NdFeB [kg/MW]
[5]		550±50
[28]	225±75	
[22]	180	
[50]	165	

In Abbildung 28 ist die Entwicklung der österreichischen Windkraft dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die steigende Tendenz, die auch für die Zukunft prognostiziert wird. Dabei geht man in den Jahren 2015-2020 von einem Zuwachs von 1.642 MW aus [17].

Das Lager an NdFeB Magneten in Windkraftanlagen wird in Österreich auf ca. 145 t geschätzt [18].

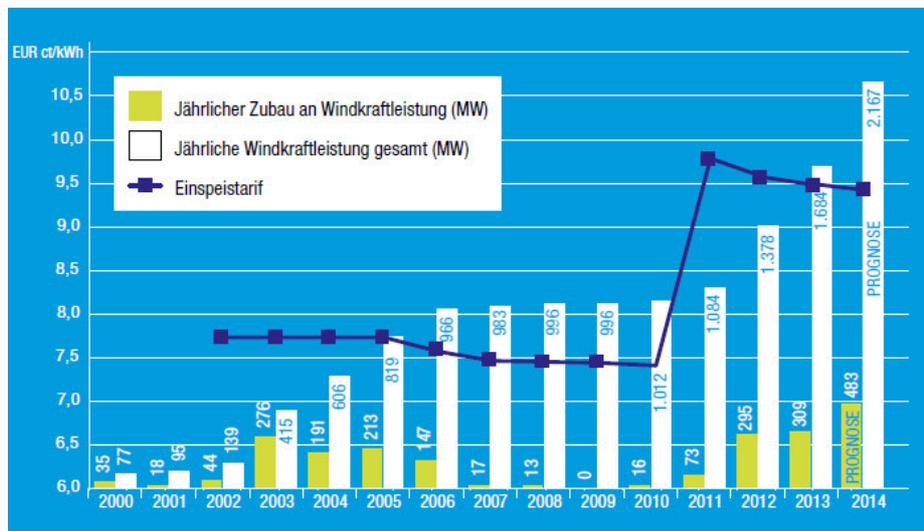


Abbildung 28 Entwicklung der Windkraft von Österreich [17]

9.5 ZUSAMMENFASSUNG

In Tabelle 27 sind die Ergebnisse der Literaturrecherche für die Hauptgruppen „Kommunikations- und Unterhaltungselektronik“, „Fahrzeugbereich“, „Industrieanlagen“ und „Windkraftanlagen“ dargestellt, wobei für jede Hauptgruppe die jeweiligen „Anwendungen“, „durchschnittlichen Lebensdauer“, „Magnetmassen“, „umlaufende Mengen“ und „jährlicher Input Fluss an NdFeB Magneten in Österreich“ angeführt sind. Bei dieser tabellarischen Aufstellung handelt es sich um Werte aus der Literatur oder um Schätzungen, die auf eigenen Annahmen beruhen und nicht empirisch ermittelt wurden.

Tabelle 27 Zusammenfassung der Anwendungen von NdFeB mit Mengenabschätzung

	Anwendung	Lebensdauer	Masse NdFeB pro Einheit	Lager NdFeB in Österreich	Input Fluss
		[a]	[g]	[t]	[t/a]
Kommunikations- und Unterhaltungselektronik	Desktopcomputer	6,6-10,0	16,8	37,0±2,7	4,6
	3,5 Zoll Festplatte		13,0±1,0		
	Notebook	5,6	10,0±2,8		
	2,5 Zoll Festplatte		3,1±0,6		
	Mobiltelefon	3,0-4,0	0,2		
Industrieanlagen	Elektromotoren und -generatoren	12-20	125,0±75,0	1.000,0 (Deutschland)	87,5±2,5 (Deutschland)
		[a]	[kg]	[t]	[t/a]
Fahrzeubereich	Hybridautos	10-14	2,3±1,0	37,7±15,2	6,2±5,4
	Elektroautos		0,6		
	Elektrofahrräder	>10	0,38±0,08	30,0	Ab 2020 erwartet
Windkraftanlagen	Permanentmagneterregte Synchrongeneratoren	20	750±250 [kg/MW]	145,0	Ab 2020 erwartet

9.6 VERWENDUNG NACH GÜTEKLASSE

Die unterschiedlichen Anwendungen von NdFeB Magneten sind in den Abschnitten 9.1 bis 9.4 erläutert. In weiterer Folge erscheint es nun auch sinnvoll, den spezifischen Anwendungen Güteklassen zuzuordnen. Es sollen also für den jeweiligen Verwendungszweck Aussagen möglich sein, welche Magnetgüten vorhanden sind, also in welchem Bereich die wichtigsten magnetischen Kennwerte liegen.

Die Einteilung der NdFeB Magnete in Güteklassen erfolgt nach deren Dysprosium Gehalt, also auch nach maximaler Einsatztemperatur. In Abbildung 29 sind die Polarisationsfeldstärke und die remanente Flussdichte als Funktion des Dysprosium Gehaltes aufgetragen. Zudem sind auch die Bereiche der entsprechenden Güteklassen ersichtlich. Man kann demnach erkennen, dass mit dem Dysprosium Gehalt eine Zunahme der Polarisationsfeldstärke und eine Abnahme der remanenten Flussdichte einhergeht. Der Verlauf des maximalen Energieproduktes ist in Abbildung 29 zwar nicht dargestellt, jedoch nimmt dieses mit dem Dysprosium Gehalt ab.

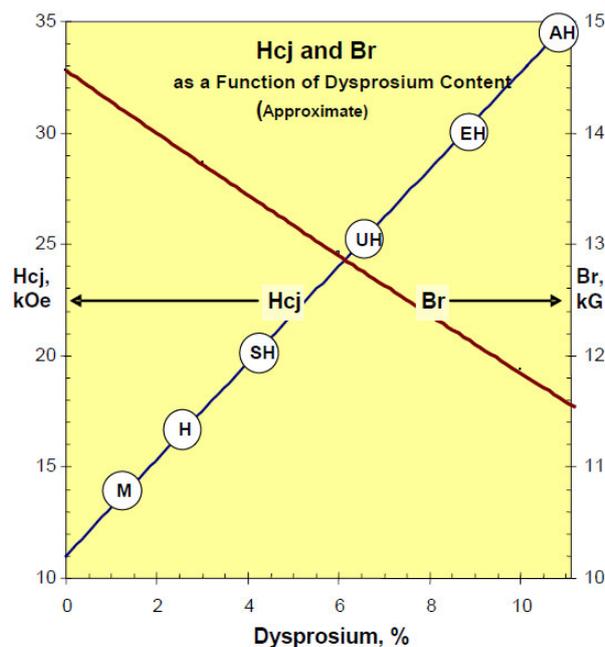


Abbildung 29 Einfluss des Dysprosium Gehaltes auf die magnetischen Eigenschaften [43]

Die maximalen Einsatztemperaturen der Güteklassen sind bereits in Tabelle 17 ersichtlich. Auch diese steigen mit dem Dysprosium Gehalt, jedoch führt dies auch zu erhöhten Materialkosten, da es im Vergleich zu Neodym kostenintensiver ist. Das Hauptentscheidungskriterium ist die Temperaturbeanspruchung, welcher der Magnet im Betriebszustand der jeweiligen Anwendung ausgesetzt ist. Es wird aber ergänzend versucht, die Magnetgüte nicht zu hoch zu wählen, da ansonsten die für die Anwendung geforderte Flussdichte zu gering sein könnte und deshalb ein Magnet größeren Volumens benötigt wird.

In Tabelle 28 sind ausgewählten Anwendungen von NdFeB Magneten typische Dysprosium Gehalte zugeordnet und die entsprechenden Güteklassen angegeben.

In der Hauptgruppe „Kommunikations- und Unterhaltungselektronik“ werden NdFeB Magnete der Güte „N“ und „M“ verwendet. Die Temperaturbeanspruchung ist in diesen Anwendungen nicht sehr hoch, weshalb kostengünstige Magnete mit hoher Flussdichte verwendet werden. Die maximale Einsatztemperatur liegt demzufolge bei 100 °C.

Bei der Hauptgruppe „Fahrzeugbereich“ muss zwischen den jeweiligen Anwendungsspezifikationen der Magnete differenziert werden. Die Magnete der Motoren in Hybrid- und Elektroautos müssen sehr temperaturbeständig sein, weshalb die Klassen „EH“ und „AH“ verwendet werden. Für die übrigen Anwendungen in Kraftfahrzeugen (Lautsprecher, Sensoren, kleinere Motoren, Magnetbremse, etc.) werden die Klassen „M“, „H“ und „SH“ eingesetzt.

Tabelle 28 Typische Dysprosium Gehalte ausgewählter Anwendungen von NdFeB Magneten

Anwendung	Güteklasse	Dysprosium Gehalt [%]	Quelle
HDD, CD, DVD	M	1,0	[22]
Industriemotoren	H, SH	3,0	
Lautsprecher, Akustik	N, M	0,5	
HDD, CD, DVD	M	1,4	[9]
Lautsprecher, Messumwandler	M	1,4	
MRT	M	1,4	
Sensoren	M	1,4	
Magnetscheider	H	2,8	
Windkraftanlagen	SH	4,2	
Motoren (Industrie, Haushalt, Auto, etc.)	SH	4,2	
Elektrofahrräder	SH	4,2	
Magnetische Bremse	SH	4,2	
Generator	UH	6,5	
Undulator, Wiggler	UH	6,5	
Motoren und Generatoren für Hochtemperaturanwendungen	EH, AH	8,5-11,0	
Hybrid und Elektro Fahrantriebe	EH, AH	8,5-11,0	

Selbiges gilt auch für die Hauptgruppe „Industrieanlagen“. Auch hier müssen die Generatoren und Motoren für Hochtemperaturanwendungen separat betrachtet werden, wobei es sich in dieser Hauptgruppe zumindest um Magnete der Klasse „H“ handelt.

In Abbildung 30 werden den jeweiligen Hauptgruppen Kennwerte für minimale Polarisationsfeldstärke, maximale Einsatztemperatur und beide Temperaturkoeffizienten zugeordnet. In Kombination mit Tabelle 28 ist eine rasche Erstbeurteilung bezüglich dieser Kennwerte für eine ausgewählte Anwendung möglich.

	Klasse	$H_{CJ,min}$ [kA/m]	T_w [°C]	α [%/°C]	β [%/°C]	
Kommunikations- und Unterhaltungselektronik	N	955	80	-0,120	-0,645	Fahrzeug- bereich
	M	1114	100	-0,118	-0,614	
Windkraftanlagen	H	1353	120	-0,113	-0,591	
	SH	1592	150	-0,110	-0,554	
	UH	1990	180	-0,105	-0,511	
	EH	2388	200	-0,099	-0,495	
	AH	2706	220	-0,100	-0,451	
Industrieanlagen						Hochtemperatur- anwendungen

Abbildung 30 Zuordnung magnetischer Kennwerte nach Einsatzgebieten

10 VERSUCHE ZUM ENTMAGNETISIEREN VON NDFEB MAGNETEN

10.1 ENTMAGNETISIEREN DURCH MECHANISCHE BEANSPRUCHUNG

10.1.1 AUFGABENSTELLUNG

Wie im Rahmen der Literaturrecherche ermittelt wurde, können ferromagnetische Werkstoffe durch Ausüben einer mechanischen Beanspruchung, wie zum Beispiel durch Prall oder Schlag, teilentmagnetisiert werden. In experimentellen Untersuchungen sollte daher durch Fallbewegung eines Stahlzylinders aus definierter Höhe getestet werden, ob es zu Entmagnetisierungserscheinungen ausgewählter Quadermagnete kommt.

10.1.2 PROBENBESCHREIBUNG

Bei dem verwendeten Material handelte es sich um NdFeB Quader mit den Abmessungen 5x5x3 mm. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 29 ersichtlich.

Tabelle 29 Probenbeschreibung Quader [46]

Bezeichnung	Q-05-05-03-N52N	
Güteklasse	N52	
Beschichtung	Ni-Cu-Ni	
T_C	310	[°C]
T_W	80	[°C]
B_r	1,42-1,47	[T]
H_{CB}	860-995	[kA/m]

10.1.3 VERSUCHSBESCHREIBUNG UND –DURCHFÜHRUNG

Mit einer transversalen Hallsonde und einem Teslameter FH 54 der Firma Magnet-Physik wurde die Flussdichte an der Oberfläche gemessen, indem diese über beide Polflächen bewegt und der angezeigte Maximalwert notiert wurde.

Für die Durchführung wurde eine Versuchsanordnung des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung verwendet (Abbildung 31). Dabei wurde ein Stahlzylinder samt Führungsstange mit einer Masse von 1,7 kg aus definierter Höhe auf die Magnete fallen gelassen (Tabelle 30).

Anschließend wurde wiederum die Flussdichte an der Oberfläche gemessen und der Entmagnetisierungserfolg bestimmt.

Tabelle 30 Versuchsprogramm zum mechanischen Entmagnetisieren

Test		1	2	3	4	5	6	7
Fallhöhe	[cm]	10	20	30	40	50	60	70

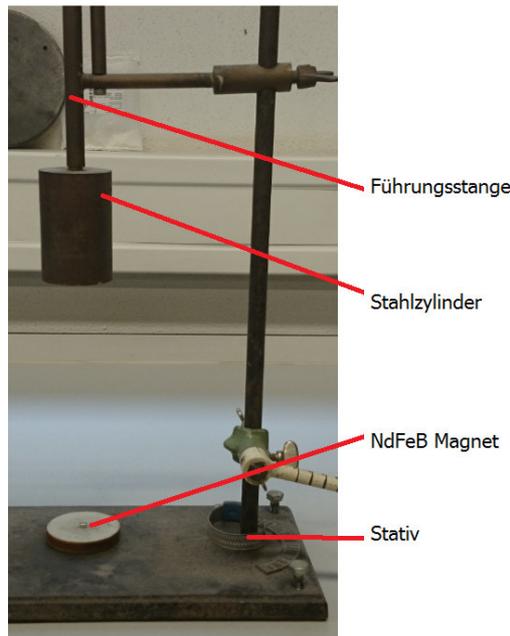


Abbildung 31 Versuchsaufbau zum mechanischen Entmagnetisieren

10.1.4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Oberflächenflussdichte wurde an zehn Magneten bestimmt und der errechnete Mittelwert betrug 0,413 T. Nach Durchführung der Versuche konnte keine Änderung festgestellt werden. Ab einer Fallhöhe von 60-70 cm kam es zur Splitterung bzw. Zerstörung der Magnete.

Als Fazit lässt sich demnach festhalten, dass NdFeB Magnete durch mechanische Beanspruchung nicht entmagnetisiert werden können. Sie zersplittern, ehe eine Minderung der Flussdichte an der Oberfläche eintritt, weshalb sich diese Methode als wirkungslos erwiesen hat.

10.2 ENTMAGNETISIEREN DURCH THERMISCHE BEANSPRUCHUNG

10.2.1 AUFGABENSTELLUNG

Zur Bestimmung des Entmagnetisierungsverhaltens von NdFeB Magneten sollten diese thermisch entmagnetisiert werden. In dieser Testreihe wurden die Parameter „Temperatur“ und „Zeitdauer der Temperaturbeanspruchung“ variiert, um deren Einflüsse aufzuzeigen.

10.2.2 PROBENBESCHREIBUNG

Siehe Abschnitt 10.1.2.

10.2.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND -BESCHREIBUNG

Die Bestimmung der Oberflächenflussdichte an den Magneten erfolgte mit einer transversalen Hallsonde und einem Teslameter FH 54 der Firma Magnet-Physik. Die Messung wurde dabei wie in Abschnitt 10.2 durchgeführt.

Im Anschluss daran wurden die Magnete in einem Muffelofen P330 der Marke Nabertherm für die gewählte Zeitdauer und Temperaturstufe erhitzt. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 31 ersichtlich.

Tabelle 31 Versuchsprogramm zum thermischen Entmagnetisieren

Zeit [min]	Temperatur			
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
5	95	105	115	125
15				
30				
60				

Die Magnete identer Temperaturbeanspruchung (Zeitdauer und Temperaturniveau) wurden gleichzeitig erhitzt, wobei jeder Magnet in eine Porzellanschüssel gelegt wurde und diese hintereinander im Muffelofen angeordnet wurden (Abbildung 32). Der Ofen hatte bereits vor Versuchsbeginn das erforderliche Temperaturniveau.



Abbildung 32 Anordnung der Proben im Muffelofen

Für die Bestimmung des Entmagnetisierungserfolges wurde nach Herausnehmen und Abkühlen der Magnete wiederum die Flussdichte an der Oberfläche gemessen.

10.2.4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Der Mittelwert der Oberflächenflussdichte der in dieser Versuchsreihe getesteten NdFeB Magnete betrug bei Raumtemperatur 0,412 T.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde die prozentuelle Abnahme der Flussdichte an der Oberfläche berechnet und grafisch dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 und Abbildung 33 ersichtlich.

Tabelle 32: Ergebnisse zum thermischen Entmagnetisieren

	T=95 [°C]		T=105 [°C]		T=115 [°C]		T=125 [°C]		T=200 [°C]	
Zeit	B		B		B		B		B	
[min]	[T]	[%]	[T]	[%]	[T]	[%]	[T]	[%]	[T]	[%]
0	0,413	100,0	0,413	100,0	0,413	100,0	0,413	100,0	0,413	100,0
5	0,173	41,9	0,163	39,4	0,144	34,8	0,128	30,9	0,052	12,7
15	0,157	37,9	0,139	33,7	0,120	29,0	0,100	24,1	0,045	10,8
30	0,155	37,4	0,133	32,1	0,122	29,5	0,097	23,4	0,042	10,1
60	0,151	36,6	0,131	31,8	0,111	26,8	0,096	23,2	0,044	10,6

Die Quadermagnete wiesen bereits bei einer thermischen Beanspruchung von 95 °C deutliche Minderungen der Flussdichte auf. Bei allen Temperaturstufen verzeichneten die Magnete schon nach 5 Minuten den größten Anteil des Flussdichteverlustes, wohingegen nach 30 bzw. 60 Minuten nur noch geringfügige Änderungen auftraten.

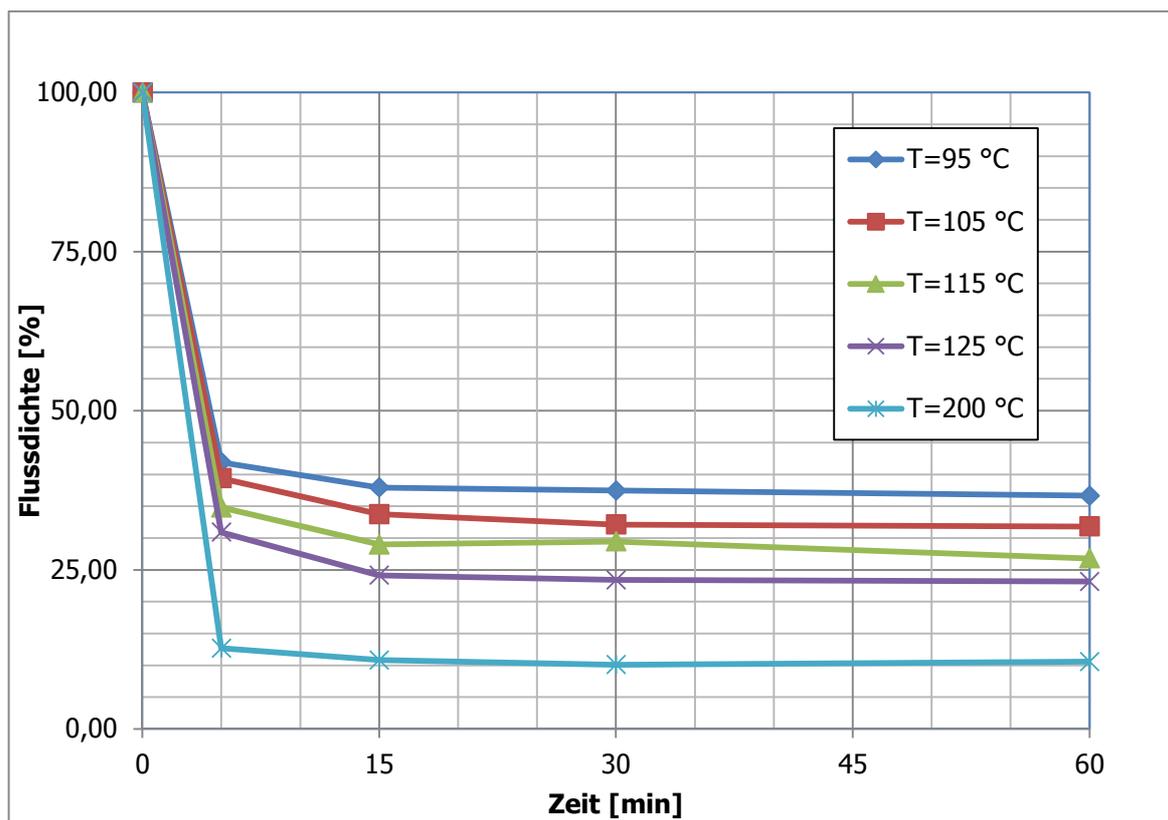


Abbildung 33: Abnahme der Oberflächenflussdichte bei Variation von Temperatur und Zeitdauer

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Zeitdauer nur geringen Einfluss auf die Abnahme der magnetischen Eigenschaften hat. Es muss lediglich die vollständige Erwärmung auf das erforderliche Temperaturniveau im Inneren der Magnete gewährleistet werden. In der durchgeführten

Versuchsreihe scheint diese Forderung bereits nach 15 Minuten erreicht zu sein, da der Verlust danach noch maximal 3 % betrug.

Der Knickpunkt auf der Arbeitsgerade der Magnet Quader scheint aufgrund gleichartiger Differenzen der Oberflächenflussdichten zwischen 95 und 125 °C bereits bei niedrigster Temperaturstufe überschritten zu sein.

Allerdings muss angemerkt werden, dass für die Bestimmung des Entmagnetisierungserfolges die Messung mit der Hallsonde nicht ausreichend ist. Der Messwert an der Oberfläche beinhaltet keine Informationen bezüglich verbleibender Remanenz oder sonstiger Kennwerte. Für eine rasche Erstbeurteilung ist dieses Verfahren aber durchaus gerechtfertigt, zumal zu diesem Zeitpunkt kein anderes Messsystem vorhanden war.

10.3 ENTMAGNETISIEREN DURCH WECHSELSTROM ODER IN KOMBINATION MIT THERMISCHER BEANSPRUCHUNG

10.3.1 AUFGABENSTELLUNG

Auf Basis der im Rahmen der Literaturstudie ermittelten Kennwerte und Formeln zum Entmagnetisieren von NdFeB Magneten wurden Versuche zur Wechselstromentmagnetisierung durchgeführt. Ergänzend sollte der Einfluss einer vorab durchgeführten thermischen Beanspruchung aufgezeigt werden.

Der Entmagnetisierungserfolg wurde durch Messen der Polarisierung im Arbeitspunkt (J_{AP} , [T]) mit einer Helmholtzspule vor und nach dem Entmagnetisieren festgestellt.

10.3.2 PROBENBESCHREIBUNG

Für die Versuche wurden NdFeB Magnetzylinder der Firma HKCM Engineering verwendet. Die wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 33 ersichtlich, die Entmagnetisierungskurve ist in Abbildung 34 dargestellt.

Eine Angabe des Temperaturkoeffizienten der Polarisationsfeldstärke war nicht vorhanden, weshalb der ermittelte Durchschnittswert aus Abschnitt 8.1.1 (-0,614 %/°C) verwendet wird.

Tabelle 33 Probenbeschreibung Zylinder [21]

Bezeichnung	Magnet-Zylinder Z06x06Cr-50M
Güte	N50M
Länge bzw. Durchmesser	6 mm
Oberfläche	Verchromt
Magnetisierung	Axial
T_W	100 °C
B_r	1,419 T
H_{CB}	1.045 kA/m
H_{CJ}	1.138 kA/m
α	0,110 %/°C

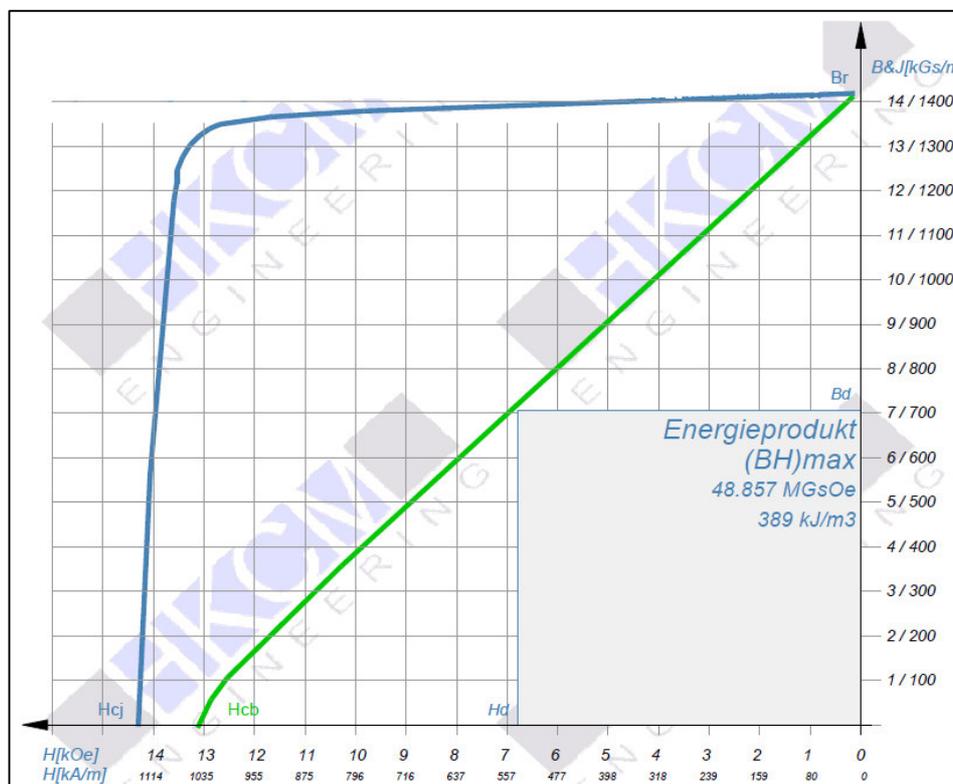


Abbildung 34 Hysteresegraph der Güte N50M [21]

10.3.3 VERSUCHPROGRAMM UND -DURCHFÜHRUNG

Zur Vorbereitung wurde mit einer Transversalhallsonde in Kombination mit einem Teslameter FH 54 der Firma Magnet-Physik die Flussdichte an der Oberfläche im Mittelpunkt beider Polflächen gemessen. Anschließend wurden diese entweder nicht oder für 30 Minuten bei den Temperaturstufen 120, 150 oder 160 °C erhitzt, wobei dies mit einem Muffelofen P330 der Marke Nabertherm erfolgte. Nach dem Abkühlen wurde wiederum die Flussdichte an der Oberfläche gemessen. Die Messung mit

der Hallsonde erfolgte lediglich zu Kontrollzwecken der Magnetqualität und wurde für weitere Berechnungen oder Auswertungen nicht verwendet.

Vor der Entmagnetisierung der Magnete erfolgte die Berechnung der Polarisierung im Arbeitspunkt (Formel 18) durch Messen des magnetischen Dipolmomentes (j , [Vs*cm]) mit dem Drehverfahren, welches in [34] erläutert wird. Hierfür wurde eine Helmholtzspule MS 75 in Kombination mit einem Fluxmeter EF 5 der Firma Magnet-Physik verwendet. Die Messkonstante (k , [cm]) des Fluxmeters beträgt 0,0078 cm. Für die Berechnung des Magnetvolumens wurde nach [21] eine minimale Dicke der Beschichtung von 0,01 mm vorausgesetzt.

$$J_{AP} = \frac{j}{V} \quad \text{(Formel 18) [34]}$$

Das Entmagnetisieren wurde mit einer Spule MF-AsA durchgeführt, welche einen Innendurchmesser von 45 mm und eine Länge von 90 mm hat. Für die Stromzufuhr wurde ein Impulsmagnetisiergerät K-Serie der Firma Magnet-Physik verwendet. Die Entmagnetisierungsfeldstärke hängt von der Vorbehandlung der Magnete ab, befand sich jedoch im Bereich 800 bis 4.000 kA/m ($\approx 1 - 5$ T).

Die für das Entmagnetisieren geforderte Anfangsfeldstärke des ersten Strommaximums wurde mit Formel 17 berechnet, dabei wurde der Entmagnetisierungsfaktor mit $N = 1$ festgelegt, wodurch die maximal benötigte Feldstärke erreicht sein sollte. Sie entsprach demnach dem 3,5-fachen Wert der Polarisierungsfeldstärke, welche mittels Temperaturkoeffizient bei definierter Temperatur nach Formel 19 ermittelt wurde.

$$H_{CJ,T} = H_{CJ} * \left(1 - \frac{\beta * \Delta T}{100}\right) \quad \text{(Formel 19)}$$

Die Magnetzylinder wurden für die Durchführung des Entmagnetisierungsvorganges axial mit dem Südpol nach oben im Zentrum der Spule positioniert. Dabei wurde ein Gummipfropfen als Abstandhalter und ein zweiter zur Fixierung des Magneten verwendet.

Um den Entmagnetisierungserfolg zu ermitteln, wurde anschließend wiederum das magnetische Dipolmoment gemessen und daraus die Polarisierung im Arbeitspunkt berechnet.

10.3.4 ERGEBNISSE

10.3.4.1 THERMISCHE VORBEHANDLUNG

In Tabelle 34 sind die Ergebnisse der vorab durchgeführten Flussdichtemessung an der Oberfläche ersichtlich, wobei es sich um die Maximalwerte handelt, welche beim Bewegen über die Polfläche durch das Teslameter gespeichert wurden.

Tabelle 34 Ergebnisse der Messungen der Flussdichte an der Oberfläche

Nummer	B (20 °C)	B (120 °C)	B (150 °C)	B (160 °C)
	[T]	[T]	[T]	[T]
1	0,490	0,466	0,441	0,402
2	0,503	0,459	0,445	0,393
3	0,498	0,483	0,440	0,371
4	0,504	0,474	0,402	-
5	0,498	0,483	0,397	-
6	0,517	0,480	0,417	-
7	0,503	0,474	0,396	-
8	0,496	0,474	0,367	-
9	0,506	0,467	0,383	-
MW	0,502	0,473	0,410	0,389

10.3.4.2 ENTMAGNETISIEREN OHNE THERMISCHE VORBEHANDLUNG

Für die Messung des magnetischen Dipolmomentes wurden neun Messungen durchgeführt, wobei der Mittelwert $22,4 \cdot 10^{-6}$ Vs*cm betrug. Die durchschnittliche Polarisierung im Arbeitspunkt konnte daher mit 1,332 T berechnet werden. Dieser Wert scheint durchaus plausibel, da er vermutlich aufgrund der Legierungsdicke, welche nicht exakt bekannt ist, noch um wenige Millitesla höher liegt und damit nahe an den Sollwert des Datenblattes (ca. 1,370 T) herankommt.

Das Entmagnetisieren wurde an drei Magneten bei einer Flussdichte von 5 T (= 3.979 kA/m) durchgeführt, der Mittelwert der anschließenden Messung mit der Helmholtzspule ergab sich zu $6,3 \cdot 10^{-6}$ Vs*cm. Demnach betrug die Polarisierung im Arbeitspunkt 0,375 T, was etwa 30 % der Anfangspolarisation entspricht (Tabelle 35).

Tabelle 35 Ergebnisse zum Entmagnetisieren ohne Temperaturbeanspruchung

	j	J
	[10^{-6} Vs*cm]	[T]
Vor Entmagnetisieren	22,4	1,332
Nach Entmagnetisieren	6,3	0,375

10.3.4.3 ENTMAGNETISIEREN MIT THERMISCHER VORBEHANDLUNG BEI 120 °C

Aufgrund der thermischen Vorbehandlung der Magnete nahmen Polarisationsfeldstärke und Remanenz bereits deutlich ab. Die Ergebnisse der Flussdichtemessung an der Oberfläche sind in Tabelle 34 ersichtlich.

Das magnetische Dipolmoment wurde vor dem Entmagnetisieren an sechs Zylindern gemessen. Der Mittelwert betrug $21,5 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot \text{cm}$ und die Polarisation im Arbeitspunkt 1,277 T.

Da die Zylindermagnete bei 120 °C erhitzt wurden, wiesen diese eine Polarisationsfeldstärke von etwa 440 kA/m auf. Für das Entmagnetisieren mit der Wechselstromspule bei einer Flussdichte von 2 T (= 1.592 kA/m) wurden vier Magnete verwendet. Die anschließende Dipolmomentmessung ergab sich zu $0,28 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot \text{cm}$ und die berechnete Polarisation von 0,017 T betrug also nur mehr 2 % der Anfangspolarisation vor dem Entmagnetisieren (Tabelle 36).

Tabelle 36 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 120 °C

	j	J
	[$10^{-6} \text{ Vs} \cdot \text{cm}$]	[T]
Vor Entmagnetisieren	21,50	1,277
Nach Entmagnetisieren	0,28	0,017

10.3.4.4 ENTMAGNETISIEREN MIT THERMISCHER VORBEHANDLUNG BEI 150 °C

Die Ergebnisse der Flussdichtemessung an der Oberfläche bei einer thermischen Vorbehandlung von 150 °C sind in Tabelle 34 ersichtlich.

Die Messung des Dipolmomentes erfolgte an neun Zylindern und betrug $19,9 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot \text{cm}$, wodurch sich eine Polarisation von 1,186 T berechnen ließ (Tabelle 37).

Nach Formel 19 ergab sich aufgrund des Erhitzens eine Polarisationsfeldstärke von etwa 230 kA/m, weshalb die Flussdichte des Entmagnetisierens mit 1 T (= 796 kA/m) festgelegt wurde. Für die Durchführung wurden drei Zylindermagnete verwendet, deren Ergebnisse sind in Tabelle 37 ersichtlich. Die Polarisation betrug danach noch 0,999 T, weshalb die Flussdichte in der Entmagnetisierungsspule auf 1,5 T (= 1.194 kA/m) erhöht wurde und drei weitere Magnete entmagnetisiert wurden. Auch nach dieser Feldstärke ergab sich die Polarisation zu 0,316 T und war damit nach wie vor höher als bei thermischer Vorbehandlung mit 120 °C und Entmagnetisierung bei 2 T. Infolgedessen wurden wiederum drei weitere mit 150 °C vorbehandelte Magnete bei einer Flussdichte von 2 T entmagnetisiert. Die Polarisation wurde im Anschluss zu 0,040 T ermittelt (Tabelle 37).

Tabelle 37 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 150 °C

	j	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[T]
Vor Entmagnetisieren	19,90	1,186
Nach Entmagnetisieren, B = 1 T	16,77	0,999
Nach Entmagnetisieren, B = 1,5 T	5,30	0,316
Nach Entmagnetisieren, B = 2 T	0,67	0,040

10.3.4.5 ENTMAGNETISIEREN MIT THERMISCHER VORBEHANDLUNG BEI 160 °C

Die Messergebnisse der Flussdichte an der Oberfläche sind in Tabelle 34 ersichtlich.

Das magnetische Dipolmoment wurde an drei Magneten bestimmt und betrug $15,3 \cdot 10^{-6}$ Vs*cm und die Polarisation im Arbeitspunkt 0,927 T (Tabelle 38).

Die verbleibende Polarisationsfeldstärke des Magneten konnte mit 160 kA/m beziffert werden, weshalb sich eine Entmagnetisierungsflussdichte von 0,7 T (= 560 kA/m) ergeben hätte. Aufgrund des unzureichenden Entmagnetisierungserfolges bei mit berechneter Feldstärke durchgeführter Entmagnetisierung mit thermischer Vorbehandlung bei 150 °C wurde die Flussdichte auf 2 T festgelegt.

Das gemessene Dipolmoment bzw. die ermittelte Polarisation ergaben sich zu $0,36 \cdot 10^{-6}$ Vs*cm bzw. 0,022 T (Tabelle 38).

Tabelle 38 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 160 °C

	j	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[T]
Vor Entmagnetisieren	15,33	0,927
Nach Entmagnetisieren	0,36	0,022

10.3.5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Versuche ohne voriges Erhitzen lieferten die zu erwartenden Ergebnisse, wonach die Polarisation durch Wechselstromentmagnetisierung nur auf 20-30 % [14] der Anfangspolarisation reduziert werden kann.

Bei den bereits thermisch teilentmagnetisierten Magneten konnten jedoch deutliche Entmagnetisierungserfolge mit der Wechselstromspule festgestellt werden. Bei den Temperaturstufen 120, 150, und 160 °C konnte bei einer Entmagnetisierungsfeldstärke von 1.592 kA/m (= 2 T) die Polarisation auf maximal 3 % vermindert werden, was einer beinahe vollständigen Entmagnetisierung entspricht. Auffällig ist dabei, dass die nach Formel 17 berechnete erforderliche Feldstärke bei

Vorbehandlung mit 150 °C nicht ausreichend war, um den Magnet zu entmagnetisieren, sondern diese für den gewünschten Entmagnetisierungserfolg verdoppelt werden musste. Diese Tatsache lässt sich durch das Schrifttum nicht erklären, es wird angenommen, dass trotz vorigem Erhitzen und Entmagnetisieren bei 3,5-facher Polarisationsfeldstärke eine materialabhängige minimale Feldstärke überschritten werden muss.

Es ist also sichtlich erkennbar, dass eine vorab durchgeführte thermische Beanspruchung das weitere Wechselstromentmagnetisieren begünstigt. Den Ergebnissen zufolge scheint ein Temperaturniveau von 120 °C für Magnete der Güteklasse „M“ auszureichen, obwohl bei dieser Geometrie der Knickpunkt der Entmagnetisierungslinie noch nicht überschritten sein sollte.

11 ENTMAGNETISIEREN VON NDFEB IM VERBUNDSTOFF

11.1 AUFGABENSTELLUNG

Da bei den Entmagnetisierungsversuchen mit einzelnen NdFeB Magneten in Abschnitt 10.3 sehr gute Erfolge verzeichnet wurden, sollten anschließend solche des Schreib- und Lesekopfes in Festplatten im eingebauten Zustand entmagnetisiert werden.

Es wurde wiederum alleinige Wechselstromentmagnetisierung oder eine Kombination mit thermischer Vorbehandlung getestet.

11.2 PROBENBESCHREIBUNG

Bei dem verwendeten Probematerial handelte es sich um marktgerechte, dem Recycling zugeführte Festplatten, allerdings wurden diese bereits durch eine Bohrung zerstört, was aber auf die Versuche keinen Einfluss hat. Die verwendeten Modelle sind in Tabelle 39 ersichtlich.

Tabelle 39 Spezifikationen der eingesetzten Festplatten

Marke	Modell	Speicher [GB]
hp	BF0728A4CB	72,8
hp	BD3008A4C6	300,0

Im Rahmen der Literaturstudie (vgl. Abschnitt 9.6) konnten den in Festplatten verwendeten NdFeB Magneten bereits magnetisch relevante Kennwerte (Tabelle 40) zugeordnet werden, auf Basis deren die weitere Versuchsdurchführung aufbaut.

Tabelle 40 Magnetische Kennwerte für die Berechnung der Entmagnetisierungsfeldstärke

Eigenschaft	Kennwert	
$H_{CJ,max}$	1353	[kA/m]
α	-0,118	[%/°C]
β	-0,614	[%/°C]
T_w	100	[°C]

Die zu entmagnetisierenden NdFeB Magnete befinden sich im Schreib- und Lesekopf (Abbildung 35), sowie im Schwingspulenmotor der Festplatten, wobei Letztgenannte für die Ermittlung des Entmagnetisierungserfolges nicht verwendet wurden, da es nicht möglich ist, diese zerstörungsfrei zu entfernen.

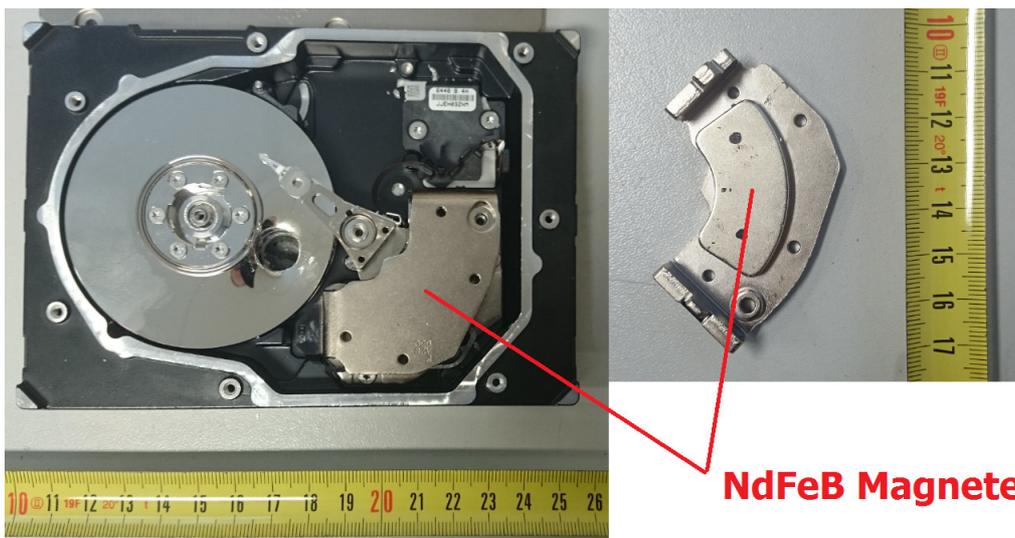


Abbildung 35 NdFeB Magnete des Schreib- und Lesekopfes (Modell BF0728A4CB) eingebaut (links) und ausgebaut zur Messung (rechts)

11.3 VERSUCHSPROGRAMM UND -DURCHFÜHRUNG

Die Festplatten des Typs „hp BF0728A4CB“ wurden als Vorbereitung für die Entmagnetisierungsversuche nicht aufgeheizt, wohingegen jene des Modells „hp BD3008A4C6“ in einem Muffelofen P330 der Marke Nabertherm für 60 Minuten bei 120 °C erhitzt wurden.

Anschließend wurden diese aufgeschraubt und die obere Komponente des Eisenjoches entfernt. Die Oberflächenflussdichte wurde mit einer Axialsonde und einem Teslameter FH 54 der Firma Magnet-Physik an zwei gekennzeichneten Messpunkten beider Magnete bestimmt und die Festplatte wieder zusammengefügt. Diese Messmethode wurde, obwohl sie über die Magnetisierung im Magnet wenig Informationen enthält angewendet, da eine Messung des magnetischen Dipolmomentes aufgrund des geschlossenen Magnetkreises keine brauchbaren Ergebnisse liefert (Abbildung 36).

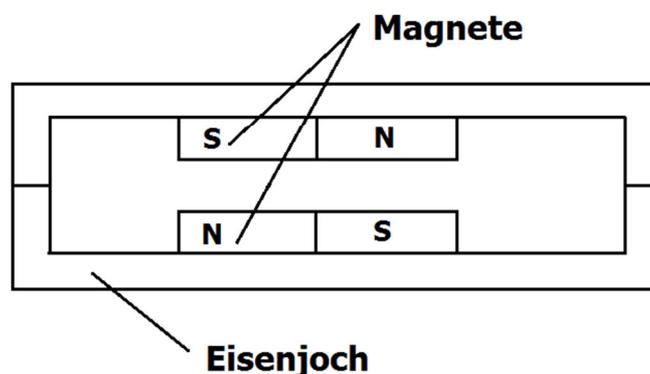


Abbildung 36 Anordnung der NdFeB Magnete mit dem Eisenjoch in den Festplatten

Für die nicht aufgeheizten Magnete wurde die benötigte Entmagnetisierungsfeldstärke zu 4.736 kA/m (= 6,0 T) berechnet und nach Formel 19 ergab sich für die bei 120 °C erhitzten Magnete eine verbleibende Polarisationsfeldstärke von 522 kA/m, wodurch für die Entmagnetisierung 1.830 kA/m (= 2,3 T) erforderlich gewesen wären.

Der Vorgang der Entmagnetisierung erfolgte mit einer Spule (D = 225 mm, L = 145 mm) und einem Impulsmagnetisiergerät der X-Serie der Firma Magnet Physik.

Die maximale Entmagnetisierungsfeldstärke betrug 1.194 kA/m (= 1,5 T), da diese aufgrund der Geometrie der Spule bzw. des Energieeintrages begrenzt war, weshalb die Tests bei dieser Feldstärke durchgeführt wurden, obwohl diese laut der bisherigen Recherche nicht ausreichend sein sollte. Wie in Abschnitt 10.3 wurden die Festplatten mittels zweier Gummipfropfen im Zentrum positioniert, die für die notwendige Fixierung sorgen.

Nach dem Entmagnetisieren wurden die Festplatten wieder geöffnet und die Oberflächenflussdichte an gleichen Punkten gemessen.

11.4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Tabelle 41 sind die Ergebnisse der Entmagnetisierungsversuche ersichtlich. Wie bereits in Abschnitt 10.3 aufgezeigt werden konnte, wirkt sich auch für das Entmagnetisieren der Magnete im Verbund eine vorab durchgeführte thermische Beanspruchung positiv auf das Resultat aus. Bei Erhitzen mit 120 °C konnte die Flussdichte an der Oberfläche (mit Ausnahme Nummer 4) auf unter 10 % des Anfangswertes reduziert werden.

Tabelle 41 Ergebnisse zum Entmagnetisieren von NdFeB Magneten im Verbund

Nummer	Temperatur	Magnet	Messpunkt 1 vor Entmag.	Messpunkt 2 vor Entmag.	Messpunkt 1 nach Entmag.	Messpunkt 2 nach Entmag.
	[°C]		[mT]	[mT]	[mT]	[mT]
1	Raumtemperatur	Oben	426	422	234	128
		Unten	413	408	101	169
2	120	Oben	289	288	27	13
		Unten	360	359	13	30
3	120	Oben	293	300	10	16
		Unten	364	361	27	11
4	120	Oben	288	292	25	44
		Unten	354	355	18	33

Die ohne thermische Behandlung entmagnetisierten Magnete wiesen auch danach noch hohe Werte der Oberflächenflussdichte auf. Dieser Umstand könnte auf zwei Tatsachen beruhen, wonach zum einen die Entmagnetisierungsfeldstärke zu gering war und zum anderen das Entmagnetisieren aus

dem nicht vorab erhitzten Zustand nur unzureichende Erfolge liefert. Allerdings kann diese Behauptung nicht bewiesen werden.

Bei den vorab teilentmagnetisierten magnetischen Werkstoffen lassen sich gute Ergebnisse feststellen. Demnach war die eingesetzte Feldstärke ausreichend, was sich damit begründen lässt, dass die berechnete erforderliche Entmagnetisierungsfeldstärke aufgrund der Verwendung der 3,5-fachen Polarisationsfeldstärke und der Berücksichtigung des gesamten Entmagnetisierungsfeldes zu hoch angesetzt wurde. Zudem stellte der Ausgangswert für die Berechnung die minimale Polarisationsfeldstärke der nächst höheren Güteklasse dar.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Entmagnetisieren von NdFeB Magneten im Verbund möglich ist und sich eine vorab durchgeführte thermische Beanspruchung über deren maximaler Einsatztemperatur für die Wechselstromentmagnetisierung positiv auswirkt. Die benötigte Entmagnetisierungsfeldstärke lässt sich jedoch nicht genügend genau berechnen. Es können jedoch Maximalwerte definiert werden, wie dies auch hier aufgezeigt wurde.

12 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Die Ergebnisse der Literaturrecherche führten zu umfangreichen Erkenntnissen. Zu Beginn wurde eruiert, welche Magnete in der Industrie eingesetzt werden, wobei neben den SEPM NdFeB und SmCo noch Ferrite und AlNiCo als solche identifiziert wurden. Obwohl Ferritmagnete zwar mengenmäßig den größten Anteil darstellen, sind NdFeB Magnete aufgrund der hohen Preise der Einsatzstoffe im Hinblick auf erzielbare Erlöse beim stofflichen Recycling interessanter.

Als wichtige Information stellte sich heraus, dass die Verteilung der Verwendung von NdFeB Magneten, die von mehreren Autoren geschätzt wird, nur in einem bestimmten Maß als Referenz verwendet werden kann. Deutlich zeigten sich Abweichungen in den angegebenen Werten aus der Literatur. Als Gemeinsamkeit konnte jedoch festgestellt werden, dass das Potential für das stoffliche Recycling von NdFeB Magneten für bestimmte Bereiche/Produkte als sehr hoch eingestuft wird und auf diese daher besonderes Augenmerk gelegt wurde. Die Einteilung der Verwendung von NdFeB erfolgte in vier Hauptgruppen („Kommunikations- und Unterhaltungselektronik“, „Fahrzeugbereich“, „Industrieanlagen“ und „Windkraftanlagen“), für welche den eingesetzten Magneten typische Kennwerte und Magnetgüten zugeordnet werden konnten.

Als herausfordernd stellte sich die Ermittlung der benötigten Feldstärken zum Magnetisieren von Permanentmagneten heraus, da sowohl Werkstoffart als auch chemische Zusammensetzung einen erheblichen Einfluss ausüben. Selbst innerhalb der Gruppe der gesinterten NdFeB Magnete weist die benötigte Feldstärke einen breiten Schwankungsbereich auf, als maximaler Wert konnte die 2,5-fache Polarisationsfeldstärke eruiert werden. Um selbige Gruppe magnetischer Werkstoffe mit Wechselstrom zu entmagnetisieren sind höhere Feldstärken notwendig, da das entmagnetisierende Feld berücksichtigt werden muss. Die Determination des Arbeitspunktes stellte sich aber bereits für einfache Geometrien als nicht eindeutig durchführbar dar, weshalb die erforderliche Entmagnetisierungsfeldstärke als 3,5-fache Polarisationsfeldstärke definiert wurde, um das Entmagnetisierungsfeld in jedem Fall zu berücksichtigen.

Auf Basis der Literaturstudie können für die dem Recycling von Elektroschrott zugeführten NdFeB Magnete magnetische Kennwerte bestimmt werden, wodurch sich die Abnahme der Polarisationsfeldstärke und Remanenz mit steigender Temperatur überschlagsmäßig berechnen lassen. Die in den Verbundstoffen vorhandenen Kunststoffe halten jedoch davon ab, die Magnete über deren Curie-Temperatur zu beanspruchen, weshalb insbesondere eine thermische Teilentmagnetisierung mit anschließender vollständiger Wechselstromentmagnetisierung getestet wurde.

Die Möglichkeit des Entmagnetisierens von Permanentmagneten mittels Prall- oder Schlagbeanspruchung konnte - wie bereits vermutet - durch praktische Versuche sehr schnell verworfen werden.

Die Versuche mit alleiniger thermischer Beanspruchung bei unterschiedlichen Zeit- und Temperaturstufen zeigten eindrucksvoll die schlechte Temperaturbeständigkeit der NdFeB Magnete, allerdings konnte aufgrund des unzulänglichen Messverfahrens keine Aussage über die verbleibende Magnetisierung in diesen gemacht werden. Es lässt sich einzig feststellen, dass die Zeitdauer des Erhitzens geringen Einfluss hat, es muss lediglich die vollständige Erwärmung innerhalb des Magneten gewährleistet werden.

An den Testreihen mit einzelnen NdFeB Magneten wurden eindrucksvolle Entmagnetisierungserfolge festgestellt. Während die Polarisation im Arbeitspunkt bei den thermisch unbehandelten Proben nur auf den erwarteten Wert von ca. 30 % des Anfangswertes reduziert werden konnte, verminderte sich diese bei den vorab Erhitzten auf unter 5 %. Besonders auffällig stellte sich die Tatsache heraus, dass die berechnete Entmagnetisierungsfeldstärke für 150 °C nicht ausreichte und deshalb erhöht werden musste, allerdings wurde die Polarisation im Vergleich zu 120 °C nicht weiter reduziert. Es scheint demnach für die verwendeten Magnete der Güteklasse „M“ eine Temperaturbeanspruchung von 120 °C und eine Entmagnetisierungsfeldstärke von 2 T ausreichend, was sich jedoch bei variierenden Geometrien noch ändern kann.

Ähnliches Verhalten konnte bei den Entmagnetisierungsversuchen an den in Festplatten eingebauten NdFeB Magneten bemerkt werden. Auch hier führte ein vorab durchgeführtes Erhitzen zu deutlichen Erfolgen. Da die Magnete in einem Eisenjoch fixiert sind, kann der Entmagnetisierungserfolg nur durch Messen mit einer Axialhallsonde an definierten Punkten detektiert werden. Die Flussdichte konnte bis auf eine Ausnahme auf unter 10 % des Anfangswertes reduziert werden.

Demnach war die eingesetzte Feldstärke ausreichend, was sich damit begründen lässt, dass die berechnete erforderliche Entmagnetisierungsfeldstärke aufgrund der Verwendung der 3,5-fachen Polarisationsfeldstärke und der Berücksichtigung des gesamten Entmagnetisierungsfeldes zu hoch angesetzt wurde. Zudem stellte der Ausgangswert für die Berechnung die minimale Polarisationsfeldstärke der nächst höheren Güteklasse dar.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Entmagnetisieren von NdFeB Magneten im Verbund möglich ist und sich eine vorab durchgeführte thermische Beanspruchung über deren maximaler Einsatztemperatur für die Wechselstrommagnetisierung positiv auswirkt. Die benötigte Entmagnetisierungsfeldstärke lässt sich jedoch nicht genügend genau berechnen, es können jedoch Maximalwerte definiert werden, wie dies auch hier aufgezeigt werden konnte.

13 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
$(BH)_{\max}$	Maximales Energieprodukt	[kJ/m ³]
μ_0	Magnetische Induktionskonstante	[N/A ²]
μ_r	Permanente Permeabilität	[1]
AlNiCo	Aluminium-Nickel-Kobalt	
B	Breite	[m]
B	Magnetische Feldstärke	[T]
B_d	Flussdichte im Arbeitspunkt	[T]
B_r	Remanenz bzw. remanente Flussdichte	[T]
D	Durchmesser	[m]
h	Höhe	[m]
H	Magnetische Feldstärke	[A/m]
H_0	Äußeres Feld	[A/m]
H_{CB}	Koerzitivfeldstärke	[A/m]
H_{CJ}	Polarisationskoerzitivfeldstärke	[A/m]
H_D	Entmagnetisierungsfeldstärke	[A/m]
H_d	Koerzitivfeldstärke im Arbeitspunkt	[A/m]
H_i	Inneres Feld	[A/m]
H_K	Polarisationsfeldstärke bei 90 % der Remanenz	[A/m]
H_{mag}	Magnetisierungsfeldstärke	[A/m]
H_N	Entmagnetisierungsfeld	[A/m]
I	Stromstärke	[A]
j	Magnetisches Dipolmoment	[Vs*cm]
J	Polarisation	[T]
J_{AP}	Polarisation im Arbeitspunkt	[T]
J_S	Sättigungspolarisation	[T]
k	Messkonstante Fluxmeter	[cm]
L	Länge	[m]
M	Magnetisierung	[A/m]
M_r	Remanente Magnetisierung	[A/m]
M_S	Sättigungsmagnetisierung	[A/m]
n	Windungszahl	[1]
N	Entmagnetisierungsfaktor	[1]
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor	
P_C	Permeanzkoeffizient	[1]
R	Außenradius Spule	[m]
r	Innenradius Spule	[m]

RECo	Rare Earth-Kobalt	
REFeB	Rare Earth-Eisen-Bor	
REFeN	Rare Earth-Eisen-Nickel	
R_F	Rechtwinkligkeitsfaktor	[1]
SEE	Seltene Erden Element	
SEPM	Seltene Erden Permanentmagnete	
SmCo	Samarium-Kobalt	
T	Temperatur	[°C]
T_C	Curie-Temperatur	[°C]
T_w	Maximale Einsatztemperatur	[°C]
V	Volumen	[m ³]
W	Magnetisierungsenergie	[J]
α	Temperaturkoeffizient der Flussdichte	[%/°C]
β	Temperaturkoeffizient der Polarisationsfeldstärke	[%/°C]

14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Ferromagnetisches Material vor (links) und nach (rechts) Ausrichtung durch ein externes Magnetfeld [47]	4
Abbildung 2 Darstellung des Hysteresegraphen einschließlich der wichtigsten magnetischen Kennwerte (in Anlehnung an [10])	6
Abbildung 3 Zweiter Quadrant des Hysteresegraphen eines Ferrit Magneten und Darstellung des Energieproduktes in Abhängigkeit der Flussdichte [26]	7
Abbildung 4 Herstellungsverfahren von SEPM mittels Sinterprozess (in Anlehnung an [7])	13
Abbildung 5 Anordnung des Pressvorganges für Axial- und Quersfeldanordnung [39]	15
Abbildung 6 Vergleichende Darstellung der Entmagnetisierungskennlinien der gebräuchlichsten hartmagnetischen Werkstoffe [29]	19
Abbildung 7 Entwicklung des Energieproduktes bei Raumtemperatur von hartmagnetischen Materialien im 20. Jahrhundert [19].....	19
Abbildung 8 Temperaturabhängigkeit des maximalen Energieproduktes ausgewählter hartmagnetischer Werkstoffe (in Anlehnung an [41])	21
Abbildung 9 Entmagnetisierendes Feld einer endlichen Magnetprobe (in Anlehnung an [47])	22
Abbildung 10 Grafische Darstellung des Arbeitspunktes (in Anlehnung an [10])	23
Abbildung 11 Vergleich der Arbeitsgeraden bei einem L/D Verhältnis von 0,1	25
Abbildung 12 Vergleich der Arbeitsgeraden bei einem L/D Verhältnis von 1,0	25
Abbildung 13 Grafische Ermittlung des Rechtwinkligkeitsfaktors (in Anlehnung an [1])	27
Abbildung 14 Stromverläufe bei unterschiedlichen Entladungsformen [7].....	29
Abbildung 15 Magnetisierspule mit Zuführeinrichtung [7].....	30
Abbildung 16 Neukurve eines gesinterten NdFeB Magneten nach dem letzten thermischen Behandlungsschritt [24].....	31
Abbildung 17 Magnetisierungsverhalten gesintertter NdFeB Magnete [24].....	31
Abbildung 18 Magnetisierungsverhalten gesintertter NdFeB Magnete unterschiedlicher Güten (in Anlehnung an [24])	32
Abbildung 19 Magnetisierungsverhalten eines gesinterten $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ Magneten ($H_{CJ} \approx 800 \text{ kA/m}$) [24]	34
Abbildung 20 Vergleich des Magnetisierungsverhaltens von kunststoffgebundenen und gesinterten NdFeB Magneten [24].....	35
Abbildung 21 Verschiebung des Arbeitspunktes aufgrund thermischer Beanspruchung	37
Abbildung 22 Vergleich des Temperaturkoeffizienten der Polarisationsfeldstärke ausgewählter Hersteller	39
Abbildung 23 Hystereseschleife mit periodischer Abnahme der Feldstärke [27]	40
Abbildung 24 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [15].....	41
Abbildung 25 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [8].....	41

Abbildung 26 Abschätzung der Verwendung von NdFeB Magneten nach [42]	42
Abbildung 27 Produktion synchroner Servomotoren in Deutschland [5].....	48
Abbildung 28 Entwicklung der Windkraft von Österreich [17]	49
Abbildung 29 Einfluss des Dysprosium Gehaltes auf die magnetischen Eigenschaften [43]	51
Abbildung 30 Zuordnung magnetischer Kennwerte nach Einsatzgebieten	53
Abbildung 31 Versuchsaufbau zum mechanischen Entmagnetisieren.....	55
Abbildung 32 Anordnung der Proben im Muffelofen	56
Abbildung 33: Abnahme der Oberflächenflussdichte bei Variation von Temperatur und Zeitdauer.....	57
Abbildung 34 Hysteresegraph der Güte N50M [21]	59
Abbildung 35 NdFeB Magnete des Schreib- und Lesekopfes (Modell BF0728A4CB) eingebaut (links) und ausgebaut zur Messung (rechts)	66
Abbildung 36 Anordnung der NdFeB Magnete mit dem Eisenjoch in den Festplatten.....	66

15 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Eigenschaften und Kennwerte zur Beschreibung magnetischer Werkstoffe	9
Tabelle 2 Chemische Zusammensetzung von AlNiCo Legierungen [36].....	10
Tabelle 3 Eigenschaften und Kennwerte von AlNiCo Legierungen [36]	11
Tabelle 4 Eigenschaften und Kennwerte von Ferriten [36]	11
Tabelle 5 Chemische Zusammensetzung von SmCo Legierungen [36].....	12
Tabelle 6 Eigenschaften und Kennwerte von RECo Magneten [36].....	13
Tabelle 7 Vergleich des Temperaturverhaltens beider RECo Legierungen [36].....	14
Tabelle 8 Chemische Zusammensetzung von REFeB Legierungen [36].....	15
Tabelle 9 Eigenschaften und Kennwerte von REFeB Legierungen [36]	16
Tabelle 10 Temperaturverhalten von NdFeB Legierungen [36]	16
Tabelle 11 Eigenschaften und Kennwerte ausgewählter NdFeB Legierungen nach Einteilung in Güteklassen [1].....	17
Tabelle 12 Eigenschaften und Kennwerte von kunststoffgebundenen Magneten [36].....	18
Tabelle 13 Temperaturverhalten der gebräuchlichsten hartmagnetischen Werkstoffe [36]	20
Tabelle 14 Vergleich der Permeanzkoeffizienten bei unterschiedlichen L/D Verhältnissen	24
Tabelle 15 Berechnung des Rechtwinkligkeitsfaktors für ausgewählte Magnetgüten.....	27
Tabelle 16 Kennwerte und Magnetisierungsfeldstärken von magnetischen Werkstoffen des Keimbildungs Typs [24]	33
Tabelle 17 Maximale Einsatztemperaturen von gesinterten NdFeB Magneten	36
Tabelle 18 Vergleich der Temperaturkoeffizienten von NdFeB Magneten [1, 13, 16, 32]	38
Tabelle 19 Lebensdauern in der Gruppe Kommunikations- und Unterhaltungselektronik.....	43
Tabelle 20 Menge an NdFeB in Desktopcomputern [49]	44
Tabelle 21 Menge an NdFeB in Notebooks	44

Tabelle 22 Menge an NdFeB in Mobiltelefonen	45
Tabelle 23 Menge an NdFeB in Motoren von Elektrofahrzeugen.....	46
Tabelle 24 Menge an NdFeB in Elektrofahrrädern	47
Tabelle 25 Durchschnittliche Lebensdauer von Elektromotoren [11]	47
Tabelle 26 Menge an Neodym und NdFeB in Windkraftanlagen	49
Tabelle 27 Zusammenfassung der Anwendungen von NdFeB mit Mengenabschätzung	50
Tabelle 28 Typische Dysprosium Gehalte ausgewählter Anwendungen von NdFeB Magneten	52
Tabelle 29 Probenbeschreibung Quader [46].....	54
Tabelle 30 Versuchsprogramm zum mechanischen Entmagnetisieren.....	54
Tabelle 31 Versuchsprogramm zum thermischen Entmagnetisieren	56
Tabelle 32: Ergebnisse zum thermischen Entmagnetisieren.....	57
Tabelle 33 Probenbeschreibung Zylinder [21].....	59
Tabelle 34 Ergebnisse der Messungen der Flussdichte an der Oberfläche.....	61
Tabelle 35 Ergebnisse zum Entmagnetisieren ohne Temperaturbeanspruchung.....	61
Tabelle 36 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 120 °C.....	62
Tabelle 37 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 150 °C.....	63
Tabelle 38 Ergebnisse zum Entmagnetisieren mit thermischer Vorbehandlung bei 160 °C.....	63
Tabelle 39 Spezifikationen der eingesetzten Festplatten.....	65
Tabelle 40 Magnetische Kennwerte für die Berechnung der Entmagnetisierungsfeldstärke	65
Tabelle 41 Ergebnisse zum Entmagnetisieren von NdFeB Magneten im Verbund	67

16 FORMELVERZEICHNIS

Formel 1	4
Formel 2	4
Formel 3 [35].....	7
Formel 4 [36].....	11
Formel 5 [24].....	22
Formel 6 [37].....	23
Formel 7	24
Formel 8 [7].....	24
Formel 9	24
Formel 10 [37]	26
Formel 11 [38]	26
Formel 12 [26]	26
Formel 13 [7].....	28
Formel 14 [7].....	28
Formel 15 [24].....	32

Formel 16 [7].....	40
Formel 17	40
Formel 18 [34].....	60
Formel 19	60

17 QUELLENVERZEICHNIS

1. Arnold Magnetic Technologies (2015) Neodymium-Iron-Boron Magnet Grades. Summary Product List & Reference Guide. www.arnoldmagnetics.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
2. Bolte E (2012) Elektrische Maschinen. Grundlagen Magnetfelder, Wicklungen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen. Springer, Berlin
3. Buchert M, Dittrich S (2012) Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. In: Thomé-Kozmiensky KJ (Hrsg) Recycling und Rohstoffe, Band 5. TK-Verl., Neuruppin, S 665–678
4. Buchert M, Manhart A, Bleher D, Pingel D (2012) Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38, Recklinghause
5. Buchert M, Manhart A, Sutter J (2014) Untersuchung zu Seltenen Erden. Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Freiburg
6. Buschow KHJ (1998) Permanent-magnet materials and their applications. Materials science foundations, Bd 5. Trans Tech Publ, Ueticon-Zürich
7. Cassing W, Kuntze K, Ross G (2015) Dauermagnete. Mess- und Magnetisieretechnik, 2. Aufl. Kontakt & Studium, Bd 672. expert-Verl., Renningen
8. Constantinides S (2010) The Magnetic Material Challenge. www.arnoldmagnetics.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
9. Constantinides S (2012) The Important Role of Dysprosium in Modern Permanent Magnets. www.arnoldmagnetics.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
10. Constantinides S, Gulick D. (2004) NdFeB for High Temperature Motor Applications. www.arnoldmagnetics.com. Zugegriffen: 04. Dezember 2015
11. de Almeida AT, Ferreira FJTE, Fong J, Fonseca P (2008) EUP Lot 11 Motors. Final Report
12. Dent PC (2012) Rare earth elements and permanent magnets (invited). J. Appl. Phys. 111(7):07A721. doi:10.1063/1.3676616
13. Dexter Magnetic Technologies Nd-Fe-B. Data Sheet. www.dextermag.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
14. Doninger G (2015) Anfrage zu Entmagnetisierungsversuchen bei Firma Magnet Physik. Telefonat
15. Du X, Graedel TE (2011) Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. Journal of Industrial Ecology 15(6):836–843. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00362.x

16. E-Magnets UK NdFeB/Neodymium Data Sheet. www.ndfeb-info.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
17. Energiewerkstatt (2014) Das realisierbare Windpotential Österreichs für 2020 und 2030
18. Gattringer CA (2012) Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich. Masterarbeit, TU Wien
19. Gutfleisch O, Willard MA, Brück E, Chen CH, Sankar SG, Liu JP (2011) Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Adv Mater Weinheim* 23(7):821–842. doi:10.1002/adma.201002180
20. Heiss S. (2015) Entmagnetisieren von NdFeB Magneten, Waidhofen a. d. Ybbs
21. HKCM Engineering (2015) Datenblatt. Magnet-Zylinder Z06x06Cr-50M. www.hkcm.de. Zugegriffen: 09. Dezember 2015
22. Hoenderdaal S, Tercero Espinoza L, Marscheider-Weidemann F, Graus W (2013) Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy* 49:344–355. doi:10.1016/j.energy.2012.10.043
23. Hörnig G (2015) Recycling von NdFeB-Magneten aus elektrischen Anlagen - das Projekt MORE. In: Thomé-Kozmiensky KJ (Hrsg) *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. TK-Verl., Neuruppin, S 219–231
24. International Electrotechnical Commission (2009) *Magnetizing behaviour of permanent magnets*, 1. Aufl 29.030(IEC TR 62517). IEC, Geneva, Schweiz
25. IVF Industrial Research and Development Corporation (2007) *European Commission DG TREN. Preparatory studies for Eco-design Requirements of EuPs. Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors*, Schweden
26. Jiles D (1998) *Introduction to magnetism and magnetic materials*, 2. Aufl. Chapman & Hall, London u.a
27. Lawver EJ, Hopstock DM (1985) *Electrostatic and Magnetic Separation*. In: Weiss NL (Hrsg) *SME mineral processing handbook*. s.n, New York, NY, S 6.1
28. Luidold S, Kozlik M, Raith JG, Flachberger H, Streicher C, Angerer T, Antrekowitsch H, Kaindl M, Poscher A, Stuhlpfarrer P, Lampert M, Pomberger R, Prommegger M, Sarc R, Hermann R, Gattringer C, Laner D, Rechberger H, Schlosser G, Mostbauer P, Salhofer S (2013) *Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich*, Wien
29. Marinescu M (2012) *Elektrische und magnetische Felder. Eine praxisorientierte Einführung*, 3. Aufl. Springer, Berlin

30. Meeker D. (2007) Circuit model of a uniformly magnetized cylindrical permanent magnet. www.femm.info. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
31. Michalowsky L (1995) Magnettechnik. Grundlagen und Anwendungen ; mit 88 Tab. und 13 Tafeln, 2. Aufl. Fachbuchverl., Leipzig
32. MMC Magnetics Sintered NdFeB Magnets. www.mmcmagnetics.com. Zugegriffen: 06. Dezember 2015
33. Moss RL, Tzimas E, Kara H, Willis P, Kooroshy J (2011) Critical metals in strategic energy technologies. Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies. EUR. Scientific and technical research series, Bd 24884. Publications Office, Luxembourg
34. ÖVE/ÖNORM (2003) Verfahren zur Messung des magnetischen Dipolmomentes einer Probe aus ferromagnetischem Werkstoff mit dem Abzieh- oder Drehverfahren 29.030(ÖVE/ÖNORM EN 60404-14). ÖVE, Wien
35. ÖVE/ÖNORM (2008) Dauermagnetwerkstoffe (hartmagnetische Werkstoffe) - Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften 29.030(ÖVE/ÖNORM EN 60404-5), Wien
36. ÖVE/ÖNORM (2014) Specifications for individual materials - Magnetically hard materials 29.030(ÖVE/ÖNORM EN 60404-8-1). Austrian Standards Institute, Wien
37. Parker RJ (1990) Advances in permanent magnetism. AWiley interscience publication. Wiley, New York
38. Perigo EA, Takiishi H, Motta CC, Faria RN (2009) On the Squareness Factor Behavior of RE-FeB (RE = Nd or Pr) Magnets Above Room Temperature. IEEE Trans. Magn. 45(10):4431–4434. doi:10.1109/TMAG.2009.2025190
39. Schatt W, Wieters K, Kieback B (2007) Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe, 1. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag, s.l.
40. Schüler K, Brinkmann K (1970) Dauermagnete. Werkstoffe und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin
41. Sellmyer DJ, Shindo D (2008) Handbook of Advanced Magnetic Materials. Developments in Hydrobiology. Springer, Dordrecht
42. Shin-Etsu Chemical (Hrsg) (2009) Nd Magnets and their Application
43. SME (Hrsg) (2011) Rare Earths: A Magnet Producer's Perspective
44. Statistik Austria Kfz-Bestand 2014. www.statistik.at. Zugegriffen: 06. Dezember 2015

45. Statistik Austria (2014) Kfz-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2014. www.statistik.at.
Zugegriffen: 06. Dezember 2015
46. Supermagnete (2015) Datenblatt Artikel Q-05-05-03-N52N. www.supermagnete.at. Zugegriffen:
09. Dezember 2015
47. Svoboda J (2004) Magnetic techniques for the treatment of materials. Kluwer Acad. Publ,
Dordrecht
48. Toyota (2015). www.toyota.at. Zugegriffen: 09. Dezember 2015
49. Westphal L, Kuchta K (2012) Recyclingverfahren gesucht. Recycling Magazin (13):30–33
50. Zepf V (2015) Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden. Quantitative Ergebnisse für
Neodym in Deutschland. In: Thomé-Kozmiensky KJ (Hrsg) Recycling und Rohstoffe, Band 8. TK-
Verl., Neuruppin, S 463–476

18 ANHANG

Ergebnisse mechanisches Entmagnetisieren

Nummer	B
	[T]
1	0,418
2	0,410
3	0,411
4	0,413
5	0,417
6	0,416
7	0,408
8	0,412
9	0,415
10	0,414
MW	0,413

Durch die Schlagbeanspruchung wurde keine Änderung der Flussdichte erreicht.

Ergebnisse thermisches Entmagnetisieren

Test	Zeit [min]	95 [°C]		105 [°C]		115 [°C]		125 [°C]		200 [°C]	
		B (T=20 °C) [T]	B(T=95°C) [T]	B (T=20 °C) [T]	B(T=105°C) [T]	B (T=20 °C) [T]	B(T=115°C) [T]	B (T=20 °C) [T]	B(T=125°C) [T]	B (T=20 °C) [T]	B(T=200°C) [T]
1	5	0,412	0,147	0,412	0,153	0,411	0,130	0,412	0,116	0,410	0,058
2		0,405	0,176	0,413	0,155	0,415	0,155	0,411	0,124	0,415	0,048
3		0,405	0,196	0,412	0,180	0,414	0,146	0,410	0,143	0,410	0,051
4	15	0,405	0,139	0,413	0,128	0,418	0,110	0,410	0,089	0,414	0,051
5		0,417	0,153	0,413	0,137	0,410	0,119	0,411	0,100	0,416	0,032
6		0,409	0,178	0,412	0,153	0,411	0,130	0,409	0,110	0,412	0,051
7	30	0,408	0,141	0,415	0,123	0,413	0,105	0,418	0,092	0,418	0,039
8		0,411	0,149	0,414	0,131	0,415	0,121	0,411	0,092	0,409	0,041
9		0,411	0,174	0,409	0,144	0,411	0,139	0,412	0,106	0,412	0,045
10	60	0,410	0,131	0,413	0,123	0,410	0,101	0,414	0,087	0,413	0,047
11		0,409	0,146	0,417	0,133	0,413	0,109	0,413	0,099	0,412	0,039
12		0,410	0,177	0,414	0,138	0,405	0,122	0,412	0,101	0,415	0,045
MW		0,409		0,413		0,412		0,412		0,413	

Ergebnisse Entmagnetisieren mit Wechselstrom

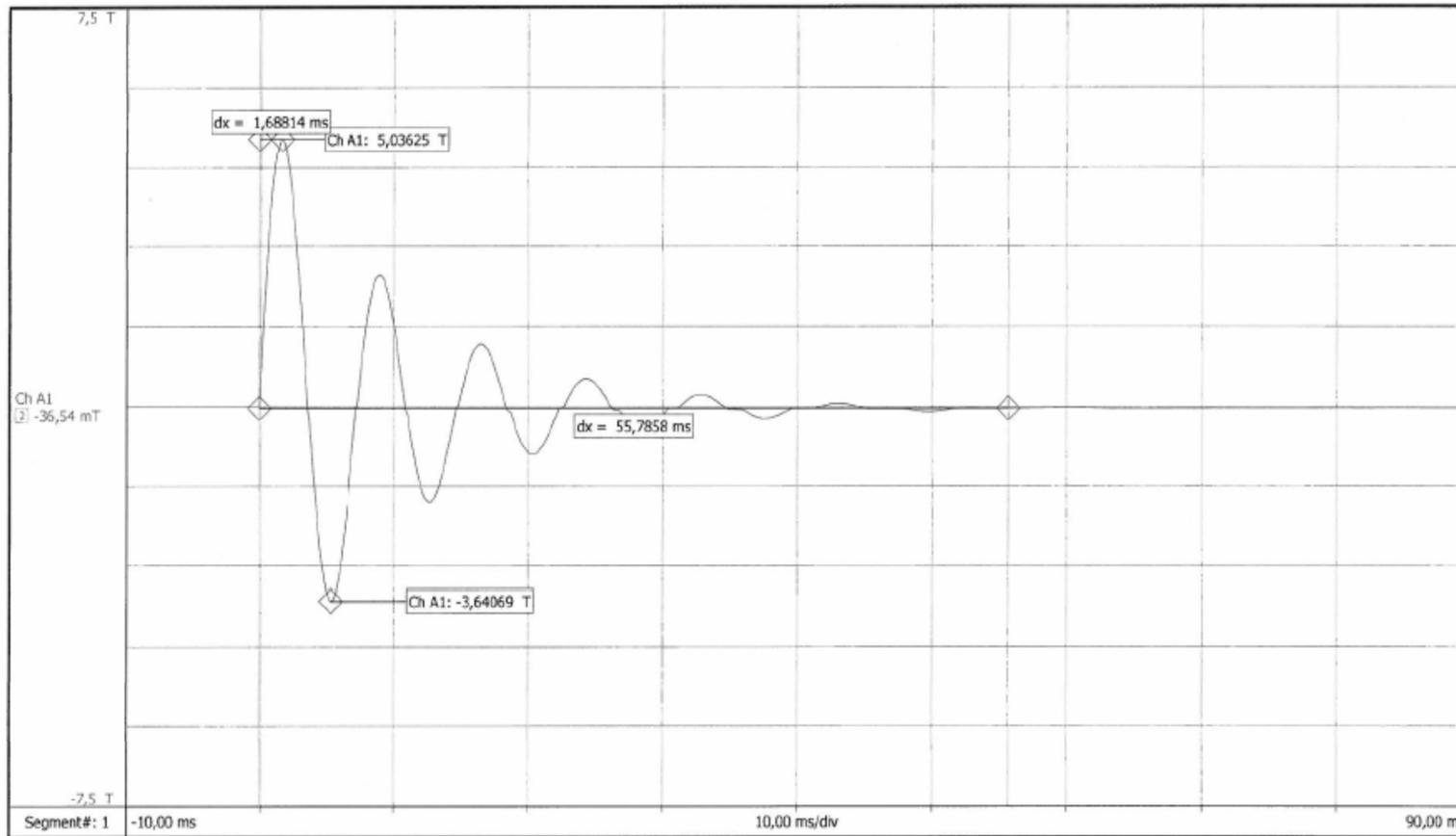
Polarisation im AP vor Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10^{-6} Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	22,3	1,68E-07	1,328
2	22,4	1,68E-07	1,334
3	22,4	1,68E-07	1,334
4	22,4	1,68E-07	1,334
5	22,4	1,68E-07	1,334
6	22,4	1,68E-07	1,334
7	22,3	1,68E-07	1,328
8	22,4	1,68E-07	1,334
9	22,4	1,68E-07	1,334
MW	22,4		1,332

Entmagnetisieren			
Nummer	Anordnung	H	B
		[kA/m]	[T]
1	axial, S oben	3.979	5
2	axial, S oben	3.979	5
3	axial, S oben	3.979	5

Polarisation im AP nach Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10^{-6} Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	6,4	1,68E-07	0,381
2	6,1	1,68E-07	0,363
3	6,4	1,68E-07	0,381
MW	6,3		0,375

Mittwoch, 16. Dezember 2015

1003210_119136_Feldmessung_004



Prüfmittel		
GENZI	10M Samples/sec	(0133)
	Filter	250kHz
Feldmessspule	100 cm ²	(0016)
Integrationsadapter	0,1s	(0038)

Versuchsaufbau	
IM-K-008020-AD--DT-	SN : 118912
Ladespannung	1400 V

Ergebnisse Entmagnetisieren mit Wechselstrom und thermischer Vorbehandlung bei 120 °C

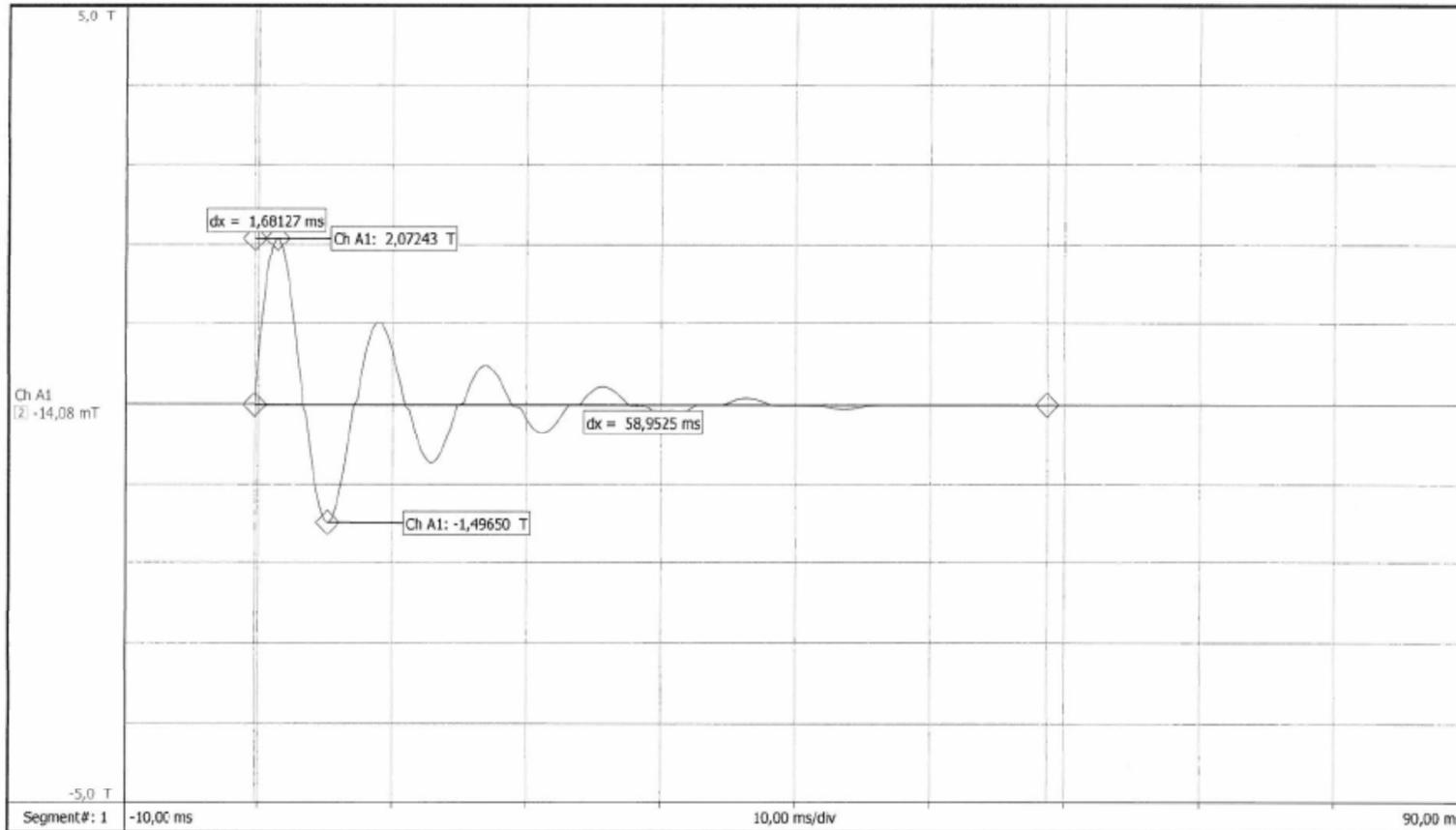
Polarisation im AP vor Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	21,7	1,68E-07	1,292
2	21,6	1,68E-07	1,286
3	21,5	1,68E-07	1,280
4	21,2	1,68E-07	1,262
5	21,4	1,68E-07	1,274
6	21,3	1,68E-07	1,268
MW	21,5		1,277

Entmagnetisieren			
Nummer	Anordnung	H	B
		[kA/m]	[T]
1	axial, S oben	1.592	2
2	axial, S oben	1.592	2
3	axial, S oben	1.592	2
4	axial, S oben	1.592	2

Polarisation im AP nach Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	0,73	1,68E-07	0,043
2	0,21	1,68E-07	0,013
3	0,11	1,68E-07	0,007
4	0,08	1,68E-07	0,005
MW	0,28		0,017

Mittwoch, 16. Dezember 2015

1003210_119136_Feldmessung_003



Prüfmittel		
GEN2i	10M Samples/sec	(0133)
	Filter	250kHz
Feldmessspule	100 cm ²	(0016)
Integrationsadapter	0,1s	(0038)

Versuchsaufbau	
IM-K-008020-AD--DT-	SN : 118912
Ladespannung	560 V

Ergebnisse Entmagnetisieren mit Wechselstrom und thermischer Vorbehandlung bei 150 °C

Polarisation im AP vor Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	19,6	1,68E-07	1,167
2	20,8	1,68E-07	1,238
3	20,2	1,68E-07	1,203
4	19,5	1,68E-07	1,161
5	19,3	1,68E-07	1,149
6	21,0	1,68E-07	1,250
7	20,7	1,68E-07	1,232
8	18,6	1,68E-07	1,107
9	19,5	1,68E-07	1,161
MW	19,9		1,186

Entmagnetisieren			
Nummer	Anordnung	H	B
		[kA/m]	[T]
1	axial, S oben	796	1
2	axial, S oben	796	1
3	axial, S oben	796	1
4	axial, S oben	1.194	1,5
5	axial, S oben	1.194	1,5
6	axial, S oben	1.194	1,5
7	axial, S oben	1.592	2
8	axial, S oben	1.592	2
9	axial, S oben	1.592	2

Polarisation im AP nach Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	17,23	1,68E-07	1,026
2	16,63	1,68E-07	0,990
3	16,46	1,68E-07	0,980
4	5,33	1,68E-07	0,317
5	5,47	1,68E-07	0,326
6	5,11	1,68E-07	0,304
7	0,58	1,68E-07	0,035
8	0,76	1,68E-07	0,045
9	0,68	1,68E-07	0,040

Ergebnisse Entmagnetisieren mit Wechselstrom und thermischer Vorbehandlung bei 160 °C

Polarisation im AP vor Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	16,7	1,68E-07	0,99
2	14,8	1,68E-07	0,88
3	14,5	1,68E-07	0,86

Entmagnetisieren			
Nummer	Anordnung	H	B
		[kA/m]	[T]
1	axial, S oben	1.592	2
2	axial, S oben	1.592	2
3	axial, S oben	1.592	2

Polarisation im AP nach Entmagnetisieren			
Nummer	j	V	J
	[10 ⁻⁶ Vs*cm]	[m ³]	[T]
1	0,61	1,68E-07	0,04
2	0,24	1,68E-07	0,01
3	0,22	1,68E-07	0,01