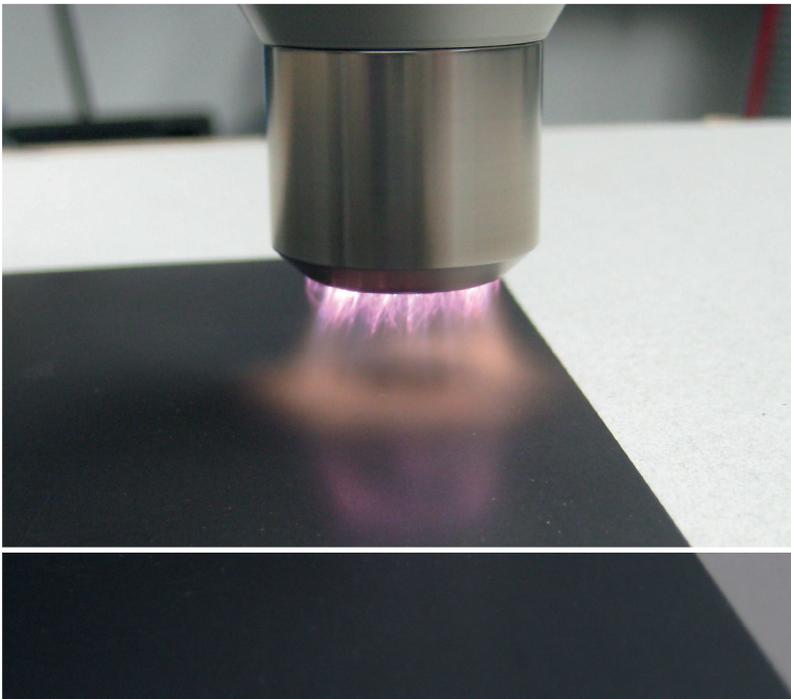


Georg Krüger

Kunststoffgebundene und metallische Magnete in lösbaren Verbindungen



HANSER

Krüger
**Kunststoffgebundene und metallische Magnete
in lösbaren Verbindungen**



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

- **Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!
- **Richtungweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!
- **Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe*.DE**

Immer einen Click voraus!

Georg Krüger

Kunststoffgebundene und metallische Magnete in lösbaren Verbindungen

1. Auflage

HANSER

Der Autor:

Dr. Georg Krüger, Am Schlossberg 27, 76889 Pleisweiler-Oberhofen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Hubert & Co GmbH, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44349-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-44389-1

Inhalt

Vorwort	3
Einführung	3
1.1 Grundprinzip und Physik des Magnetismus	5
1.2 Charakteristische Begriffe und Kennwerte für Dauermagnete	8
1.2.1 Magnetische Flussdichte	9
1.2.2 Magnetische Feldstärke und Koerzitivfeldstärke	14
1.2.3 Energieprodukt	16
1.2.4 Permeabilität	17
1.2.5 Curie-Temperatur	19
1.2.6 Thermische Stabilität	19
2 Legierungen	21
2.1 Hartferrite	22
2.1.1 Strontiumferrite	25
2.1.2 Bariumferrite	25
2.2 Neodym-Eisen-Bor-Legierung	26
3 Thermoplastische Kunststoffe und Elastomere	33
3.1 Bindemittel für Haftmagnete	35
3.2 Schutzschichten	37
4 Herstellung und Verarbeitung	39
4.1 Kennzeichnung	39
4.2 Sintertechnik und Gießen	42
4.3 Kunststoffgebundene Dauermagnete	43
4.3.1 Kalandrieren	44
4.3.2 Spritzgießen und Extrusion	46
4.3.3 Pressen	50

4.3.4	Gießharze	51
4.3.4.1	Isolierte Nanopartikel in Polymeren	52
4.4	Magnetisierung	52
4.5	Konfektionieren	56
4.5.1	Selbstklebende Ausrüstung	57
4.5.1.1	Vorbehandlung	59
4.5.1.2	Klebstoffe	62
4.6	Sicherheitsaspekte	66
5	Prüfmethoden	67
5.1	Magnetische Haltekraft	68
5.1.1	Haltekräfte, Stirnabreißkräfte	68
5.1.2	Magnetische Scherkräfte	73
5.1.2.1	Druckscherversuch	74
5.1.2.2	Zugscherversuch	77
5.2	Flussdichte und Feldstärke	82
5.3	Haftung und Festigkeit selbstklebender Magnetfolien	84
5.3.1	Zugscherfestigkeit	84
5.3.2	Schälversuche	92
5.3.2.1	180°- und 90°-Winkelschälversuch	92
5.3.3	T-Peel-Test	95
5.4	Zugfestigkeit	97
5.4.1	Dichte	100
6	Einflüsse auf die Tragfähigkeit	103
6.1	Temperatur	105
6.2	Magnetisierung	109
6.3	Probenabmessungen	109
6.4	Prüfgeschwindigkeit	111
6.5	Geometrieeffekte	112
6.6	Reibungsverhalten	113
7	Anwendungsbeispiele	117
7.1	Industriebereiche	117
7.2	PKW-Industrie	121
7.3	Bürobedarf, Informationsbereich	122
7.4	Konsumbereich	123
Index	129

Vorwort

Schnell und mehrfach lösbare Verbindungen werden im privaten, aber auch im industriellen Bereich in den verschiedensten Formen eingesetzt. So gehören Klett- oder Haftklebebänder, und Schnappverbindungen wie selbstverständlich zum privaten oder beruflichen Alltag. Zu einer weiteren Gruppe der mehrfach lösbaren Verbindungen gehören die Verbindungen mit dauermagnetischen Werkstoffen. Die Dauermagnete, auch als Permanentmagnete bezeichnet, werden vielfach sehr unauffällig zu Verschlüssen verarbeitet und deshalb wenig wahrgenommen. Außerdem erfordert das Arbeiten mit magnetischen Materialien und Bauteilen eine besondere Aufmerksamkeit und Arbeitsplatzgestaltung. Unabhängig davon wird das Interesse an solchen Verbindungen steigen, da die Dauermagnete mehrere Vorteile besitzen:

- Sie erreichen auf kleinstem Raum große Haltekraft.
- Es können die unterschiedlichsten Bauteile und Geometrien hergestellt werden, nachdem es zunehmend gelingt, mit dem Metallpulver-Spritzgießverfahren kostengünstig Rohteile (Grünlinge) herzustellen, die dann gesintert werden.
- Im Spritzguss verarbeitete kunststoffgebundene Dauermagnete erweitern die Designmöglichkeiten lösbarer Verbindungen.
- Die höhere Wärmeleitfähigkeit der magnetisch gefüllten Kunststoffe verringert die Abkühlzeit und verkürzt den Spritzzyklus.
- Die thermische Belastbarkeit ist größer im Vergleich mit Klettverbindungen und Haftklebebändern.
- Die Magnetverbindungen lassen sich vollständig rückstandsfrei trennen.
- Die Qualitätsprüfung beschränkt sich auf wenige Methoden, sodass keine besonderen Aufwendungen für Geräte und das Personal erforderlich sind.
- Durch selbstklebende Ausrüstungen sind viele neue Verbindungslösungen möglich.
- Durch verschiedene Magnetisierungsverfahren ergeben sich isotrope, anisotrope, mehrpolige oder streifenförmige Magnetisierungen, die dann genau den Anforderungen entsprechen.

Trotz der Vorteile stehen die Dauermagnete in mehrfach lösbaren Verbindungen im Wettbewerb mit anderen schnell lösbaren Verfahren.

Neben den Permanentmagneten gibt es auch die Elektromagnete, die die Magnetwirkung in Kombination mit einem Stromfluss erreichen. Dadurch kann der magnetische Fluss zu- und abgeschaltet werden. Zu den bekannten Anwendungen der Elektromagnete gehören die Transportanlagen in Kombination mit Elektromagneten zum Blechhandling ferromagnetischer Stähle und die Abtrennung von Eisen aus Stoffgemischen, wie sie zum Beispiel beim Recycling von Autos oder Großgeräten vorkommen. Außerdem gibt es in der Medizin, der Elektrotechnik und im Maschinenbau viele Anwendungen, bei denen Permanentmagnete eingesetzt werden, die aber nicht mehrfach lösbar sein müssen. Solche Anwendungen wie in Antriebsmaschinen, in Sensoren oder in Röntgengeräten werden in diesem Buch nicht behandelt. Das gleiche gilt auch für die Anwendung von Elektromagneten. Schwerpunkte dieses Buches sind die Anwendungen in metallischen und nicht metallischen Verbindungslösungen ohne besondere Zusatzgeräte oder Zusatzmaterialien. Für solche Verbindungen werden Neodym-Eisen-Bor-Legierungen und die Hartferrite auf Basis von Bariumoxid und Strontiumoxid eingesetzt. Andere Legierungen aus Aluminium, Nickel und Kobalt oder aus Samarium und Kobalt mit ihren besonderen Eigenschaften sind für industrielle Anwendungen zwar interessant, eignen sich aber aufgrund der Sprödigkeit und hohen Kosten nicht für mehrfach lösbare Verbindungen und werden deshalb nur in Einzelfällen bei vergleichenden Darstellungen erwähnt.

In der Europäischen Union werden seit 2010 zur Beschreibung der Produktqualitäten von Magneten einheitlich die Dimensionen des SI-Systems vorgeschrieben. Die älteren, aber in der Praxis noch sehr gebräuchlichen Kenngrößen, und die damit verbundenen Dimensionen können entweder in Klammern den neueren Angaben hinzugefügt oder gesondert ausgewiesen werden. In diesem Buch werden für die physikalischen Größen und Produktbeschreibungen vorrangig die Dimensionen des SI-Systems berücksichtigt, in Einzelfällen werden auch die Kennzahlen und älteren Dimensionen verwendet.

Bücher entstehen immer dann ohne besondere Anstrengungen, wenn die Zusammenarbeit von Verlag und Autor gut gelingt. Das ist bei diesem Buch geglückt. Dafür gilt der besondere Dank Frau Wittmann und Herrn Strohbach vom Lektorat Kunststoffe beim Hanser Verlag.

Herr Johannsen von der Fa. Fixum Creative Technology in Neuwied hat mehrere Materialien für eigene Untersuchungen bereitgestellt. Dafür gilt ihm mein besonderer Dank.

Pleisweiler-Oberhofen im November 2014

Georg Krüger

1

Einführung

Der Magnetismus ist ein physikalisches Phänomen, das alle Lebewesen und die gesamte Materie auf der Erde umgibt, ohne dass die Menschen dieses Phänomen in irgendeiner Weise wahrnehmen. Wer aber einen Kompass in der Hand hält, stellt fest, dass sich die Kompassnadel ohne äußere Einflüsse stets in eine Richtung, in Richtung des Nordpols, genauer gesagt des magnetischen Nordpols bewegt, wenn er sich auf der Nordhalbkugel befindet. Diese Bewegung einer Magnetnadel ist nur denkbar, wenn auf die Nadel ein Magnetfeld einwirkt. Beim Kompass ist schon das schwache Magnetfeld der Erde ausreichend, um die Orientierung in eine Vorzugsrichtung anzunehmen. Das uns ständig umgebende Magnetfeld der Erde mit einer Stärke von 24 bis 40 μT ist glücklicherweise so gering, dass konkrete Einflüsse auf den Lebensrhythmus nicht erkennbar sind. Andererseits ist der Kompass ein gutes Beispiel dafür, dass das schwache Magnetfeld tatsächlich existiert und schon früh zu einer nützlichen Anwendung geführt hat. Da es sich bei der Erde um einen „Dauermagneten“ handelt, besitzt die Erde wie alle Magnete auch einen physikalischen Nord- und Südpol. Diese Pole sind aber nicht deckungsgleich mit dem geografischen Nord- und Südpol. Wenn sich zum Beispiel der Nordpol einer Magnetnadel ausrichtet, dann muss in der angezeigten Richtung der Südpol des Erdmagneten liegen. Wenn sich ein Kompass in Richtung des geografischen Nordpols ausrichtet, dann handelt es sich um den Südpol der Magnetnadel, denn nur ungleiche Pole ziehen sich an. Entsprechend existiert am geografischen Südpol der physikalische Nordpol. Genau genommen richtet sich die Kompassnadel nicht zu dem Pol aus, der allgemein als Nordpol bezeichnet wird, sondern zu einem Punkt (Pol), der sich von Deutschland aus betrachtet 1600 km vom geografischen Nordpol entfernt befindet. Der Winkel zwischen geografischem und magnetischem Nordpol ist vom Standort auf der Nordhalbkugel abhängig. Den gleichen Effekt gibt es auch auf der Südhalbkugel.

Da das Magnetfeld der Erde von den Konzentrationen der magnetischen Elemente wie Eisen, Chrom, Nickel und anderen Metallen im Erdinneren und in der Erdkruste abhängt und die Verteilung dieser Elemente nicht überall gleich groß ist, schwanken auch die Magnetfelder auf der Erde. Das bedeutet, eine Kompassnadel wird mehr oder weniger schnell je nach Standort ausgerichtet.

Sobald der Magnetismus verstärkt wird, also ein künstlicher Magnetismus zum Beispiel durch die Anreicherung magnetischer oder magnetisierbarer Stoffe erzielt wird, ergeben sich Effekte, die im Maschinenbau, der Messgerätetechnik, der Transport- und Antriebstechnik, der Medizintechnik und vielen anderen Bereichen genutzt werden. Neben den vielen anderen Bereichen hat sich auch die Verbindungstechnik neue Anwendungsbereiche mit der Magnettechnik erschlossen. Ziel war es, entweder Bauteile dauerhaft zu verbinden oder wieder lösbare Verbindungen herzustellen. Am Anfang der Nutzung magnetischer Felder in Verbindungssystemen wurden vor allem magnetische Metalle und Metalllegierungen verwendet, später kamen die kunststoffgebundenen magnetischen Legierungen hinzu. In diesem Bereich war eine enge Zusammenarbeit zwischen den Werkstofffachleuten, Metallurgen, Maschinenbauern und Kunststofftechnikern erforderlich, um kunststoffgebundene Magnete oder magnetisierbare Bauteile herzustellen.

Die Kenntnisse über den Magnetismus waren eng verbunden mit der Entdeckung der chemischen Elemente und der Erforschung ihres Aufbaus in den vergangenen Jahrhunderten, denn ob ein chemisches Element magnetisch oder magnetisierbar ist oder wie stark und stabil die Magnete sind, lässt sich über den Aufbau der Elemente erklären. Die Grundlagen des Magnetismus werden in diesem Buch nur soweit behandelt, wie es für die Darstellung charakteristischer Anwendungen in lösbaren Verbindungen und für die Auswahl geeigneter Magnete erforderlich ist.

Da die Europäische Union vorschreibt, in Spezifikationen, Sicherheitsdatenblättern, Angeboten u. ä., für physikalische Größen die Dimensionen des SI-Systems zu verwenden, aber immer noch die Dimensionen des älteren CGS-Systems verwendet werden, enthält Tabelle 1.1 eine Gegenüberstellung wichtiger Dimensionen beider Systeme.

Tabelle 1.1 Umrechnung magnetischer Größen

Physikalische Größe	Zeichen	SI-Einheit	CGS-Einheit	Umrechnung
Magnetische Flussdichte	B	T	G	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
Magnetische Polarisierung	J	T	G	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
Magnetische Feldstärke	H	A/m	Oe	$1 \text{ A/m} = 0,01257 \text{ Oe}$
Remanenz	B_r	T	G	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G} = 1 \text{ N}/(\text{A m})$
Magnetische Energiedichte	$(B \cdot H)_{\max}$	J/m ³	G · Oe	$1 \text{ kJ/m}^3 = 0,1257 \text{ MG} \cdot \text{Oe}$

T = Tesla, G = Gauß, A/m = Ampere/Meter, Oe = Oersted, MG · Oe = Megagauß · Oersted

Oersted (Oe) ist die Einheit der magnetischen Feldstärke im CGS-Einheitensystem und gilt seit 1970 nicht mehr als offizielle Einheit.

■ 1.1 Grundprinzip und Physik des Magnetismus

Die chemischen Elemente des Periodensystems bestehen aus verschiedenen Teilchen, so auch aus negativ oder positiv geladenen Teilchen (Elektronen und Protonen), aber auch aus den neutralen Neutronen. Die positiv geladenen Protonen und die Neutronen bilden den Atomkern. Die negativ geladenen Elektronen befinden sich auf verschiedenen Energieniveaus, sehr vereinfacht gesagt, auf verschiedenen „Schalen“, die sich bei der Anordnung der Elektronen um den Atomkern ergeben. Die Energiemenge nimmt dabei von innen nach außen zu, gleichzeitig steigt aber auch die Möglichkeit, dass die Elektronen bei bestimmten Randbedingungen ihre Energieniveaus verlassen, das heißt, es gibt chemische Elemente mit mehr oder weniger energetischer Stabilität. Gleichzeitig bestimmen die Energieniveaus und die Anzahl der Elektronen, besonders die Zahl der Außenelektronen, die physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Dichte, Schmelztemperatur, Härte, den Glanz, die elektrische Leitfähigkeit und den Aggregatzustand bei Raumtemperatur oder bei höheren und niedrigeren Temperaturen. Aus dem Aufbau der Elemente konnten viele Rückschlüsse auf das Reaktionsverhalten der Elemente getroffen werden. Gerade aufgrund der physikalischen Eigenschaften war es möglich, die Elemente in Gruppen zusammenzufassen, wenn sie sehr ähnliche oder vergleichbare charakteristische Eigenschaften besaßen. So gibt es zum Beispiel die Gruppe der reaktionsträgen Edelgase mit sieben Außenelektronen (mit Helium als Sonderfall), die Gruppe der Erdalkalimetalle mit einem Außenelektron, die Gruppe der Metalle oder auch die Gruppe der Seltenerdmetalle. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern war es notwendig geworden, auch eine Einteilung in Haupt- und Nebengruppen vorzunehmen, in denen wieder Elemente mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst wurden. Bei der systematischen Anordnung stellte man fest, dass zwischen der Elektronenanordnung (die immer auch ein bestimmtes Energieniveau bedeutet) und den Stoffeigenschaften ein direkter Zusammenhang besteht. Das gilt auch für das magnetische Verhalten der chemischen Elemente, wobei man zwischen dem permanenten magnetischen Verhalten und der Magnetisierbarkeit unterscheiden muss. Beide Erscheinungen lassen sich aber aus dem Elektronenaufbau und aus dem Verhalten der Elektronen aufgrund dieses Aufbaus erklären. Die eindeutige Erklärung des Magnetismus war erst möglich, als der Atomaufbau quantenmechanisch betrachtet wurde und sich herausstellte, dass es im Periodensystem Elemente gibt, die Energieniveaus besitzen, bei denen sich magnetische Momente mit Nord- und Südpol im Atom ergeben, die relativ stabil existieren. Diese für Magnete typischen Energieniveaus können auch durch äußere Anregung erreicht werden. Wenn sehr viele magnetische Momente eines Festkörpers in gleicher Weise ausgerichtet sind, ergibt sich eine makroskopisch messbare Größe, die

man als Magnetkraft bezeichnet hat. Mit zunehmender Erforschung des Atomaufbaus konnte man festlegen, welche Elemente dauerhaft magnetisch oder durch andere Magnete magnetisierbar sind. In jedem Fall handelt es sich immer um die Beeinflussung der magnetischen Momente in Atomen, die sich unter Normalbedingungen in Kristallstrukturen relativ geordnet zu Festkörpern aufbauen und die dann als Metalle zur Verfügung stehen. Da es nur wenige Metalle gibt, die die quantenmechanischen Voraussetzungen für magnetische Dipole besitzen, gibt es nur eine begrenzte Anzahl von intrinsisch magnetischen Metallen oder Metallen, die extern magnetisierbar sind. Wenn die magnetischen Momente der Atome einen Nord- und Südpol haben, also einen Dipolcharakter besitzen, entstehen beim Trennen eines Dauermagneten immer zwei kleinere Dauermagnete, da auch in jedem neuen Magneten die Ausrichtung der Dipole erhalten bleibt.

Bei der Systematisierung der chemischen Elemente mit metallischem Charakter oder der Legierungen, die daraus hergestellt wurden, ergab sich unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften sehr früh eine Einteilung in magnetische und nicht magnetische Stoffe, obwohl der Magnetismus noch nicht erklärt werden konnte. Die magnetischen Stoffe wurden dann weiter unterteilt in weich- und hartmagnetische Materialien. Die Einteilung war anfangs willkürlich. Als hartmagnetisch wurden dabei Metalle bezeichnet, die nur aus „harten“ Mineralien gewonnen werden konnten. Später zeigte sich, dass die hartmagnetischen Metalle oder Legierungen auch mechanisch sehr hart und die weichmagnetischen vergleichsweise weich waren, also eine Beziehung zwischen der mechanischen Härte und dem hartmagnetischen Verhalten besteht. Inzwischen werden als hartmagnetische Werkstoffe solche eingestuft, die vergleichsweise höhere und stabilere Magnetkräfte besitzen, das heißt, die Bezugsbasis ist nicht mehr die Materialhärte (zum Beispiel Mohs'sche Härte, Vickershärte, Brinellhärte), sondern die hohe und stabile Magnetisierbarkeit. Außerdem stellte man fest, dass die thermische Stabilität der hohen Magnetkräfte der Hartmagnete bei höheren und niederen Temperaturen besonders groß war. Die Entwicklungen innerhalb der Metallurgie haben inzwischen aber dazu geführt, dass die Weichmagnete mit geringer magnetischer Kraft auch mechanisch sehr hart sind, sodass sich die Einteilung in Hart- und Weichmagnete nur noch auf den magnetischen Zustand bezieht.

Eine weitere Einteilung der Werkstoffe ergab sich durch die Beobachtung, dass es nicht magnetische und magnetisierbare Werkstoffe gibt, wobei die magnetisierbaren Werkstoffe als ferromagnetische Stoffe bezeichnet wurden. Typisch für die nicht magnetischen Werkstoffe ist, dass sie auch in Gegenwart äußerer und selbst starker Magnetfelder nicht magnetisch werden, die ferromagnetischen Werkstoffe dagegen in Gegenwart äußerer Magnetfelder selbst zu Magneten werden. Ferromagnetische Werkstoffe sind Eisen (Fe), Nickel (Ni) und Chrom (Cr) aus der 3. Hauptgruppe des Periodensystems. Da bei den ferromagnetischen Werkstoffen keine Vorzugsrichtungen in Nord- und Südpol existieren, die auch als Plus- und Minuspol