



Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Magnetpulverprüfung

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Magnetpulverprüfung

Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Magnetpulverprüfung

Karlheinz Schiebold
Mülheim
Mülheim a.d.R., Deutschland

ISBN 978-3-662-43970-8 ISBN 978-3-662-43971-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-43971-5

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)



Dem Andenken meines Vaters
Prof. Dr.-phil. ERNST SCHIEBOLD
(1894 – 1963)
In dankbarer Verehrung gewidmet
Karlheinz Schiebold

Vorwort

In der Magnetpulverprüfung ist das Lehrbuch von Deutsch, Morgner, Vogt [1.1] gegenwärtig die Fachliteratur für Fachleute, Studenten und Teilnehmer an Weiterbildungsmaßnahmen und weiterhin wird die Magnetpulverprüfung im Zusammenhang mit anderen zerstörungsfreien Verfahren in der Literatur und insbesondere in den Normen und Regelwerken angeführt. Da sich in der Zwischenzeit in der Technik viele neue Anwendungsgebiete erschlossen haben, erscheint es dem Autor doch zweckmäßig, die Magnetpulverprüfung in einem Lehr- und Arbeitsbuch in komplexer Form darzustellen.

Das Buch soll insbesondere seinem Vater, Prof. Dr.-phil. Ernst Schiebold gewidmet sein, einem Pionier der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, dessen Aktivitäten zur Entwicklung der Werkstofftechnik Anfang der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals an die Öffentlichkeit kamen und der aus seiner Zeit in der damaligen Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft auch zur Entstehung der Gesellschaft zur Förderung Zerstörungsfreier Prüfverfahren und damit zur Gründung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) beigetragen hat. Später war er als Direktor des Amtes für Material- und Warenprüfung (DAMW) in Magdeburg tätig.

Von 1953 bis 1963 hat Prof. Ernst Schiebold als ordentlicher Professor und Direktor des Instituts für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung an der Technischen Hochschule Magdeburg (heute Otto-von-Guericke Universität) in kurzer Zeit eine über die Landesgrenzen hinaus bekannte wissenschaftliche Schule mit dem Schwerpunkt Zerstörungsfreie Prüfung aufgebaut. Aus ihr ging auch sein Sohn Karlheinz hervor, der 1963 sein Studium der Werkstoffkunde und -prüfung abgeschlossen hat. Da zum damaligen Zeitpunkt keine Planstelle am Institut frei war, ging er in die Industrie und begann sein erstes Arbeitsleben im damaligen VEB Schwermaschinenbau Kombinat Ernst Thälmann Magdeburg (später SKET SMS GmbH), wo er in der komplexen Werkstoffprüfung über 28 Jahre tätig war.

Dort begann die Laufbahn von Karlheinz Schiebold als Gruppenleiter für Ultraschallprüfung und später als Abteilungsleiter für die Zerstörungsfreie (ZfP) und Zerstörende (ZP) Werkstoffprüfung sowie die Spektrometrie. Aufgrund der im SKET doch außerordentlich umfassend vorhandenen Metallurgie mit zwei Stahlwerken, drei Eisengießereien, zwei Stahlgießereien, einer Großschmiede, zwei Stahlbaubetrieben und zahlreichen Maschinenbaubetrieben war ein umfangreiches Betätigungsfeld gegeben. Die Werkstoffprüfung gewann über die Jahre eine immer größere Bedeutung für die Untersuchung

metallurgischer Produkte und vermittelte für ihn dadurch unschätzbare Erfahrungswerte. Schiebold war insgesamt 25 Jahre mit seinen Prüfern in den Betrieben unterwegs und bearbeitete zudem Forschungs- und Entwicklungsthemen für die Betriebe der Metallurgie.

Aus diesen Erfahrungswerten konnte er nach der Wende in seinem zweiten Arbeitsleben im aus der LVQ GmbH in Mülheim ausgegründeten eigenen Unternehmen LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH und im Magdeburger von der Treuhand erworbenen Unternehmen LVQ-WP Prüflabor GmbH schöpfen und manchmal unter großem Zeitdruck Unterrichtsmaterialien, wie Skripte, Übungen, Wissensteste und teilweise auch Prüfungen verfassen. Durch die Anerkennung der Firma LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH als Ausbildungsstätte der DGZfP sind solche Unterlagen in der ZfP in sechs Prüfverfahren und 3 Qualifikationsstufen entstanden und in der ZP in 9 Prüfverfahren über fast zwanzig Jahre erfolgreich zur Weiterbildung von Werkstoffprüfern verwendet worden. Das so verfasste Skript der Stufe 3 nach DIN EN 473 und jetzt nach DIN EN ISO 9712 zur Magnetpulverprüfung, ergänzt durch ausgewählte Inhalte von Beiträgen auf den Jahrestagungen der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, bilden eine wesentliche Grundlage für dieses Buch, das somit auch eine willkommene Hilfe bei der Ausbildung von Werkstoffprüfern der Stufen 2 und 3 auf dem Gebiet der Magnetpulverprüfung sein kann.

Leider ist es in einem solchen Fachbuch nicht möglich, sämtliche Techniken und Anwendungen der Magnetpulverprüfung zu beschreiben. So wird auf theoretische Ableitungen, mathematische Methoden, Modellierungen und bruchmechanische Bewertungen verzichtet. Die Magnetpulverprüfung im Bauwesen und im Eisenbahnwesen ist nach Ansicht des Autors für sich ein Fachbuch wert. Analoge Überlegungen gelten für die Beschreibung von speziellen Untersuchungen mit dem Magnetismus an dauerbeanspruchten Werkstücken, für die Risstiefenbestimmung oder zur automatischen Bildbearbeitung von Magnetpulveranzeigen.

Allen am Entstehen des Buches Beteiligten sei an dieser Stelle gedankt. Besonderer Dank gilt meiner lieben Frau Angelika und meinem Freund Prof. Dr.-Ing. Volker Deutsch und natürlich auch allen Firmen und Personen, von denen ich bei der Vorbereitung und Ausgestaltung dieses Buches Unterstützung erhielt, und insbesondere den Sponsoren, die zum Entstehen und Gelingen des Werkes beigetragen haben.

Dem Springer-Verlag danke ich für die bei der Herausgabe des Buches stets gute Zusammenarbeit.

Mülheim an der Ruhr, Frühjahr 2014

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schiebold



Benutzungshinweise

Abbildungen, Tabellen, Gleichungen und Literaturzitate werden jeweils *innerhalb eines Kapitels* fortlaufend gezählt, z.B. Abb. 3.10 = 10. Abb. im Kapitel 3; oder [7.5] = Literaturzitat zu Kapitel 7 im Literaturverzeichnis am Ende des Kapitels.

In diesem Buch werden die *Maßeinheiten* des Internationalen Einheitensystems (SI) einschließlich der daraus abgeleiteten dezimalen Vielfachen und Teile wie Milli, Mega usw. verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Physikalische Grundlagen	3
1.1 Kraftwirkung im magnetischen Feld	3
1.2 Wechselwirkung mit dem elektrischen Strom	5
1.2.1 Ohmsches Gesetz	5
1.2.2 Spezifische Leitfähigkeit eines Leiters	6
1.2.3 Elektrische Leistung	7
1.3 Magnetfeld in der Umgebung stromführender Leiter	7
1.3.1 Gerader Leiter	7
1.3.2 Leiterschleifen	9
1.3.3 Spulen	10
1.4 Wechselwirkung zwischen magnetischem Feld und Werkstoff	11
1.4.1 Modell der Magnetisierung	11
1.4.2 Die Magnetisierungskurve	12
1.4.3 Gleich- und Wechselfeldmagnetisierung	21
2 Prinzip der Magnetpulverprüfung	25
2.1 Magnetischer Fluss und Streufluss	25
2.1.1 Streuflussnachweis in Abhängigkeit von der Feldrichtung	27
2.1.2 Streuflussnachweis in Abhängigkeit von der Stromrichtung	33
2.1.3 Einfluss der Strom- und Feldart	34
2.2 Fehlernachweis	38
2.2.1 Offene Fehler	38
2.2.2 Verdeckte Fehler	39
2.3 Verfahren zum Nachweis des Streufeldes	39
2.3.1 Magnetpulververfahren	39
2.3.2 Abtastung mit magnetempfindliche Sonden	40
2.3.3 Verfahren mit Zwischenspeicherung	40

3	Magnetisierungsverfahren	43
3.1	Felddurchflutung	43
3.1.1	Jochmagnetisierung	44
3.1.2	Spulenmagnetisierung	45
3.2	Stromdurchflutung	49
3.2.1	Selbstdurchflutung	49
3.2.2	Aufsetzelektroden	50
3.3	Hilfsleiterdurchflutung	52
3.4	Induktionsdurchflutung	56
3.5	Kombinierte Magnetisierung	56
4	Entmagnetisierung	67
4.1	Störungen und Schäden durch Restmagnetismus	67
4.1.1	Erdfeldeinfluss	67
4.1.2	Störungen an Anlagen und Maschinenbauteilen	68
4.1.3	Störungen beim Schweißen	70
4.2	Entmagnetisierungsverfahren	70
4.2.1	Ausschalten des Erdmagnetismus	71
4.2.2	Gleichstromentmagnetisierung	72
4.2.3	Wechselstromentmagnetisierung	72
4.2.4	Entmagnetisierung mit dem Handjoch	75
4.2.5	Entmagnetisierung mit Prüfbänken	75
4.2.6	Erhitzung über den Curiepunkt	75
4.3	Messung des Restmagnetismus	76
5	Prüfmittel	79
5.1	Magnetpulver	80
5.1.1	Rohstoffe	80
5.1.2	Korngröße	80
5.1.3	Magnetische Eigenschaften	82
5.1.4	Optische Eigenschaften	83
5.2	Trägermedien	85
5.2.1	Flüssige Träger	85
5.2.2	Gasförmige Träger	87
5.3	Techniken der Prüfmittelanwendungen	87
5.3.1	Trockenprüfung	87
5.3.2	Nassprüfung	88
5.4	Betriebsbeständigkeit von Prüfmitteln	88

6	Prüfgeräte und Zusatzeinrichtungen	91
6.1	Mobile Prüfgeräte	91
6.1.1	Handmagnete	91
6.1.2	Hochstromerzeuger	93
6.2	Stationäre Prüfgeräte	97
6.3	Automatisierung der Magnetpulverprüfung	100
7	Prüfsystem- und Verfahrenskontrollen	113
7.1	Prüfsystemkontrollen	113
7.1.1	Kontrolle der Magnetisierungsbedingungen	113
7.1.2	Prüfmittelkontrolle	117
7.1.3	Kontrolle der Sichtbedingungen	120
7.2	Verfahrenskontrollen	123
7.2.1	Vergleichsmuster aus der Fertigung	124
7.2.2	Nuten-Testkörper	124
7.2.3	Ketosring	125
7.2.4	Kontrolle auf Restmagnetismus	125
8	Ungänzen im Fertigungsprozess und bei der Betriebsbeanspruchung	129
8.1	Ungänzen beim Gießen	129
8.1.1	Gießen als Herstellungsverfahren	129
8.1.2	Technische Gießverfahren	131
8.1.2.1	Blockguss	132
8.1.2.2	Strangguss	133
8.1.2.3	Sandguss	133
8.1.2.4	Schleuderguss	133
8.1.3	Gussfehler	134
8.1.3.1	Lunker	134
8.1.3.2	Warmrisse	136
8.1.3.3	Poren	137
8.1.3.4	Sand- und Schlackeneinschlüsse	137
8.1.3.5	Kernstützen	138
8.2	Ungänzen beim Umformen	138
8.2.1	Ungänzen beim Walzen	138
8.2.2	Ungänzen beim Schmieden	139
8.3	Ungänzen in plattierten Bauteilen	143
8.4	Ungänzen bei der Wärmebehandlung	145
8.5	Ungänzen beim Schweißen	147
8.5.1	Schweißverfahren	147
8.5.1.1	Lichtbogenhandschweißen	147
8.5.1.2	Unterpulverschweißen (UP)	149
8.5.1.3	Metallschutzgasschweißen (MIG/MAG)	150

8.5.1.4	Wolfram inertgasschweißen (WIG)	150
8.5.2	Stoß- und Fugenformen	151
8.5.3	Der Aufbau von Schweißnähten	154
8.5.4	Schweißnahtfehler	155
8.5.4.1	Flächenhafte Fehler	155
8.5.4.2	Volumenhafte Fehler	156
8.6	Ungänzen bei der mechanischen Bearbeitung	157
8.7	Ungänzen durch Betriebsbeanspruchung	159
9	Durchführung von Magnetpulverprüfungen	161
9.1	Einleitung	161
9.2	Verfahrensauswahl	164
9.2.1	Auswahl nach dem Regelwerk	164
9.2.2	Auswahl nach dem Prüfstück	164
9.2.3	Auswahl nach dem Prüfmittel	164
9.2.4	Auswahl nach den Prüfgeräten	165
9.2.5	Auswahl nach dem Prüfort	165
9.2.6	Auswahl nach den Prüfkosten	166
9.3	Prüfablauf	166
9.3.1	Kontrolle der Sichtbedingungen	166
9.3.2	Vorbereitung der Prüffläche	166
9.3.3	Visuelle Prüfung	168
9.3.4	Kontrolle des Prüfmittels	168
9.3.5	Einteilung der Prüfabschnitte	168
9.3.6	Magnetisierung	170
9.3.7	Kontrolle der Magnetisierung	171
9.3.8	Auswertung	174
9.3.9	Entmagnetisierung	175
9.3.10	Dokumentation	176
9.3.11	Endreinigung	176
9.4	Prüfung nach Normen und Regelwerken	177
9.4.1	Prüfung nach europäischen Normen und Regelwerken	178
9.4.1.1	Prüfung von Schmiedestücken nach DIN EN 10228-1 ...	178
9.4.1.2	Prüfung von Gussstücken nach DIN EN 1369	179
9.4.1.3	Prüfung von Schweißverbindungen nach DIN EN 23278 .	181
9.4.1.4	Prüfung von Rohren nach DIN EN 10893-5	184
9.4.2	Prüfung nach ASME-Code	186
9.4.2.1	Einführung in den ASME-Code 2013	186
9.4.2.2	Einbindung der Magnetpulverprüfung im ASME-Code ...	187
9.4.2.3	Prüftechnische Besonderheiten des ASME-Codes	187

10 Anzeigenbewertung	193
10.1 Klassifizierung der Anzeigen	193
10.2 Beurteilung der Anzeigen	196
10.2.1 Beurteilung der Anzeigen auf nominalem Niveau	196
10.2.2 Beurteilung der Anzeigen auf ordinalem Niveau	198
10.2.3 Beurteilung der Anzeigen auf metrischem Niveau	199
11 Normen, Regelwerke, Verfahrensbeschreibungen, Prüfanweisungen	201
11.1 Normen und Regelwerke	201
11.2 Verfahrensbeschreibungen	204
11.3 Prüfanweisungen, Spezifikationen	211
12 Protokollierung und Dokumentation	217
12.1 Protokollierung	217
12.1.1 Erläuterung protokollpflichtiger Angaben	217
12.1.2 Prüfprotokolle	217
12.1.3 Beurteilung und Entscheidungsfindung	218
12.2 Dokumentation	219
12.2.1 Visuelle Auswertung	219
12.2.2 Fotografische Aufnahme	220
12.2.3 Fixierung am Prüfobjekt	221
12.2.4 Abdruckverfahren	221
12.2.5 Magfoil-Methode	221
12.2.6 Bildverarbeitung	222
13 Grenzen der Magnetpulverprüfung	225
13.1 Grenzen der Anzeigefähigkeit	225
13.1.1 Tiefenabhängige Nachweisgrenze	225
13.1.2 Apparative Einflüsse	226
13.1.3 Subjektive Einflüsse	228
13.2 Verfahrensbedingte Grenzen	229
13.2.1 Einfluss des Werkstoffes (Permeabilität)	229
13.2.2 Einfluss von Oberflächenzustand und -behandlung	230
13.2.3 Einfluss der Ungänzenart und -form	231
13.2.4 Einfluss der Prüftemperatur	231
13.2.5 Schein-, Geometrie- und Formanzeigen	232
13.2.6 Stör- und Streufelder	233
13.3 Ergänzung durch andere ZfP-Verfahren	233
13.4 Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse im Sinne der Produkthaftung	234

14 Arbeits- und Umweltschutz	237
14.1 Anforderungen an die Arbeitsplätze	237
14.1.1 Gesetze und Verordnungen	237
14.1.2 Schutzmaßnahmen	237
14.1.2.1 Vorreinigung	239
14.1.2.2 Magnetisieren	239
14.1.2.3 Auswertung	240
14.2 Verantwortung des Anwenders	241
14.3 Anforderungen an die Prüfmittel	242
14.3.1 Allgemeine technische Angaben	242
14.3.2 Sicherheitsdatenblätter	242
14.3.3 Lagerung	244
14.3.4 Entsorgung	244
15 Sachverzeichnis	247

Einführung

Die *Magnetpulverprüfung* (nach den international üblichen Abkürzungen für die verschiedenen Prüfverfahren mit MT bezeichnet) ist ein *zerstörungsfreies* Verfahren der Materialprüfung, welches sich vom Funktionsprinzip her als ein eigenständiges Verfahren in die Reihe der anderen etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren

- Radiografische Prüfung RT
- Akustische Prüfung UT
- Eindringprüfung PT
- Sichtprüfung VT
- Wirbelstromprüfung ET

einordnet, wobei als *zerstörungsfreies* Prüfverfahren (ZfP, engl. NDT/Nondestructive Testing) in Anlehnung an DIN EN ISO 17025 nach [0.1] definiert werden könnte:

Technischer Vorgang zur Bestimmung eines oder mehrerer vorgegebener Qualitätskennwerte eines Werkstoffes oder Erzeugnisses gemäß vorgeschriebener Verfahrensweise, wobei die dazu genutzte Energie (z.B. als Wellen- oder Teilchenstrahlung, elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld, mechanische Schwingungen oder Wellen, Licht, Wärmestrahlung u.a.) in Wechselwirkung mit dem Material tritt, ohne dass dadurch dessen Eigenschaften oder das vorgesehene Gebrauchsverhalten (Beanspruchungsart, -höhe und -dauer) unzumutbar beeinträchtigt werden.

Neben den o.g. werden oft auch solche Verfahren bzw. Untersuchungsmethoden den zerstörungsfreien Prüfverfahren zugeordnet, die traditionell bzw. nach der vorstehenden Begriffsdefinition nicht in diese Kategorie einzuordnen sind oder sich wissenschaftlich verselbstständigt haben, wie z.B. die Röntgen-Feinstrukturuntersuchung, die röntgenographische Spannungsmessung, die Spektralanalyse, die akustische Emission, Verformungsmessungen, Rauheitsmessung u.a. [0.2]

In diesem Fachbuch werden DIN EN ISO-Normen des gegenwärtigen Standes 2014 zitiert, um die Fachleute zu befähigen, ohne die Normen detailliert zu lesen, die Normen in

ihrer täglichen Arbeit umsetzen zu können. Deshalb sind entsprechende Erläuterungen zu den Texten, Tabellen und Abbildungen in den Normen eingearbeitet worden.

Der ASME-Code wird ausführlich behandelt, weil diese amerikanische Druckgeräte-Richtlinie nur in englischer Sprache angeboten wird und weil sich die Ausführungen in den für die Praxis wichtigen Kapiteln doch wesentlich von den DIN EN ISO-Normen unterscheiden. Vor allem Firmen, die ASME-Inspektionen für ihre Produkte bestehen müssen, können sich mit den Erläuterungen zum ASME-Code eventuell besser auf solche Inspektionen vorbereiten.

Literatur

[0.1] Mc Master, Nondestructive Testing Handbook, ASNT 1959

[0.2] DGZfP Kursprogramm 2013

1.1 Kraftwirkung im magnetischen Feld

Die Anwendung des Magnetismus für die Werkstoffprüfung begann um die Jahrhundertwende. Damals wurde z.B. in England ein Kompass verwendet, um Fehlstellen in Kanonenrohren aufzuspüren.

Jeder Magnet erzeugt in seiner Umgebung ein so genanntes **Kraftfeld**, das magnetisierbare Teilchen – z.B. Eisenfeilspäne – in eine bestimmte Richtung verschiebt. Die so gebildeten Linien nennt man **Kraft- oder Feldlinien**. In den Abbildungen 1.1 bis 1.4 ist die Kraftwirkung von verschiedenen Magneten auf Eisenfeilspäne dargestellt [1.1], [1.2], [1.11].

Es ist daraus eindeutig ersichtlich, dass nicht nur unmittelbar von den Enden (Polen) des Magneten Kraftwirkungen ausgehen, sondern dass die magnetischen Kräfte auch den ge-

Abb. 1.1 Feilspanbild eines Stabmagneten [1.11]

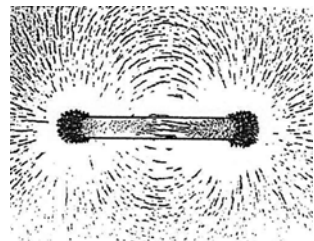


Abb. 1.2 Feilspanbild eines Hufeisenmagneten [1.11]

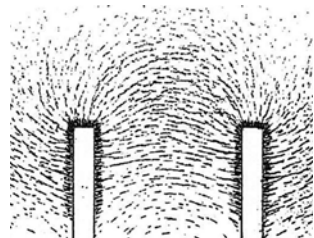


Abb. 1.3 Feldlinien beim Stabmagneten [1.11]

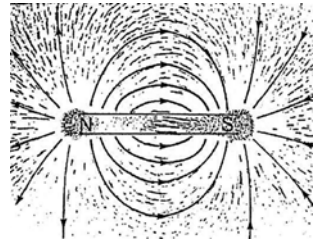
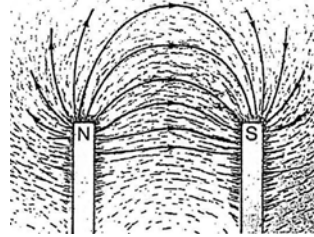


Abb. 1.4 Feldlinien beim Hufeisenmagneten [1.11]



samten Raum in der Nähe des Magneten erfüllen. Dieser Raum in der Umgebung eines Magneten wird „**Magnetisches Feld**“ genannt. Je größer die Entfernung vom Magneten ist, umso geringer ist zwangsläufig die Kraftwirkung auf die Eisenspäne und umso unregelmäßiger sind sie verstreut.

Man kann aber auch feststellen, dass die Eisenfeilspäne bevorzugt an den Enden der Magneten angezogen werden, die man als **magnetische Pole** bezeichnet. An diesen Polen sind demnach die magnetischen Kräfte am stärksten. Sie sind **Orte größter Feldstärke**.

Die Stoffe, die angezogen werden, zeichnen sich dadurch aus, dass sie selbst magnetisierbar sind, d.h. zu Magneten werden können. Solche Stoffe nennt man **ferromagnetisch**. Zu ihnen gehören **Eisen, Nickel, Kobalt** und einige Legierungen. Magnete, die ohne äußere Einwirkung solche Stoffe anziehen oder festhalten können, bezeichnet man als Dauer- oder Permanentmagnete, weil ihre magnetische Feldwirkung immer vorhanden ist. Nach ihrer geometrischen Form unterscheidet man dabei Stab- oder Hufeisenmagnete [1.1].

Sämtliche anderen Stoffe wie Nichteisenmetalle, Mineralien, Kunststoffe, Holz usw. reagieren nicht auf einen Magneten. Die Erscheinung, dass z.B. ein mit einem Wollappen geriebener Kunststoffstab kleine Papierschnitzel anzieht oder beim Kämmen mit einem Kunststoffkamm manchmal die Haare zu Berge stehen, ist auf statische Elektrizität und nicht auf Magnetismus zurückzuführen.

Allgemein bekannt ist auch die **Kompassnadel**, d.h. ein drehbarer und praktisch reibungsfrei gelagerter Stabmagnet, der sich annähernd in Nord-/Südrichtung einstellt. Interessant dabei ist, dass er sich nicht um 180° drehen lässt, sondern dass es stets das gleiche Ende ist, welches nach Norden zeigt. Offensichtlich verhalten sich also die beiden Pole eines Magneten unterschiedlich. Es handelt sich nicht nur um anziehende, sondern auch um abstoßende Kräfte. Dies macht ein Versuch deutlich: bringt man zwei Kompass ein-

ander sehr nahe, so sind es stets die gleichnamigen Pole (d.h. zwei Nord- oder zwei Südpole), die sich abstoßen und die ungleichnamigen Pole der Magnete (d.h. Nord- und Südpol bzw. Süd- und Nordpol), die sich gegenseitig anziehen.

1.2 Wechselwirkung mit dem elektrischen Strom

Die zweite wichtige Eigenschaft des Magnetismus ist seine Wechselwirkung mit dem elektrischen Strom. **Mit Hilfe des elektrischen Stromes kann man Magnetismus erzeugen und umgekehrt mit Hilfe des Magnetismus auch elektrischen Strom** [1.1]. Als Beispiele seien genannt:

- Magnetismus durch Strom: Elektromotoren, Lasthebemagnete, Magnetspannplatten sowie auch Magnetisiergeräte für die Magnetpulverprüfung. Solche Magnete heißen auch Elektromagnete; ihr großer Vorteil ist, dass sie sich über den Strom ein- und ausschalten lassen.
- Stromerzeugung durch Magnetismus: Dynamo, Generator, Transformator und auch bestimmte Verfahren der Magnetpulverprüfung.

Der enge Zusammenhang des Magnetismus mit dem elektrischen Strom ist auch der Grund dafür, dass die Maßeinheiten für magnetische Größen auf (einfach zu messende) elektrische Einheiten zurückzuführen sind.

1.2.1 Ohmsches Gesetz

Ein Körper ist unelektrisch, wenn sich seine positiven (Atomkern) und negativen (Elektronenhülle) Ladungen aus dem Atomverband gerade aufheben bzw. gleiche Anzahl aufweisen. Der elektrische Strom ist die Anzahl der Ladungsträger, die sich von einem Pol mit Elektronenüberschuss zu einem Pol mit Elektronenmangel bewegt. Ursache für das Fließen eines elektrischen Stromes ist der Ausgleich der ungleichnamigen Ladungen zwischen den Polen [1.4].

Die in einer bestimmten Zeit bewegte Anzahl an Ladungsträgern wird als **elektrische Stromstärke I mit der Einheit (A = Ampere)** bezeichnet.

Das Bestreben, die Ladungen an den Polen auszugleichen, wird als **elektrische Spannung U mit der Einheit (V = Volt)** definiert.

Ein Strom kann nur in einem Werkstoff fließen, der eine gute Leitfähigkeit, d.h. viele freie Elektronen in den Atomhüllen besitzt. Ein guter elektrischer Leiter hat also einen geringen Widerstand gegenüber dem Fließen des elektrischen Stromes. Gute Leiter sind z.B. Metalle, Kohle, Säuren, Laugen oder Salzlösungen. Schlechte Leiter oder Nichtleiter sind Porzellan, Holz, Hartgummi, Glas, Öl, Luft u. a. m. Der **elektrische Widerstand R hat die Einheit Ohm (Ω)**.

Der Zusammenhang zwischen elektrischem Strom, Spannung und Widerstand wird über das Ohmsche Gesetz definiert:

$$R = \frac{U}{I},$$

d.h. ein Leiter hat den Widerstand 1 Ohm, wenn eine Spannung von 1 Volt in ihm einen Strom von 1 Ampere verursacht.

1.2.2 Spezifische Leitfähigkeit eines Leiters

Bei der Magnetpulverprüfung braucht man gute elektrische Leiter, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der Erzeugung des magnetischen Flusses zu erreichen. Solche Leiter müssen demzufolge eine gute spezifische Leitfähigkeit und damit einen geringen spezifischen Widerstand aufweisen, die wiederum vom Werkstoff, vom Leiterquerschnitt und von seiner Länge abhängig sind. Je geringer der spezifische Widerstand (ρ) eines Leiters ist, desto besser kann er den elektrischen Strom leiten. Deshalb wird die elektrische Leitfähigkeit eines Leiters (κ) als Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes angegeben [1.8].

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \text{ [m}/\Omega\text{mm}^2\text{]}.$$

Sowohl der spezifische Widerstand als auch die elektrische Leitfähigkeit sind werkstoff- und temperaturabhängig. Bei metallischen Leitern sinkt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur. Tabelle 1.1 zeigt Beispiele für die spezifische Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe.

Tab. 1.1 Beispiele für die spezifische Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe [1.1], [1.8]

Werkstoff des Leiters	Spezifische Leitfähigkeit [m/Ω mm ²]
Silber	62
Kupfer	57
Aluminium	35
Aluminiumlegierungen	18 - 34
Messing	12 - 24
Wolfram	18
Zink	16
Eisen und Stahl	8
Austenitischer Stahl	0,5 - 2

1.2.3 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung (P) eines Leiters, z.B. eines Stromkabels, hängt proportional von der Spannung und der Stromstärke ab:

$$P = U \times I \text{ [Watt]}.$$

Man muss dafür sorgen, dass die Leistungsverluste im elektrischen Leiter möglichst gering gehalten werden, d.h. ein ausreichender Querschnitt den fließenden Strom nicht behindern darf, weil die Leistungsverluste in Wärme umgewandelt werden. Das könnte bei der relativ hohen Stromstärke, die Hochstromerzeuger hervorbringen, zu unangenehmen Erwärmungen der Prüfkabel führen. Da die Magnetisierungsgeräte jedoch nur kurzzeitig für die Magnetisier- und Bespülphase eingeschaltet werden und die Prüfkabel vom Hersteller auf die Geräte abgestimmt sind, ist mit Überhitzungen diesbezüglich kaum zu rechnen.

1.3 Magnetfeld in der Umgebung stromführender Leiter

Neben Magneten erzeugen auch elektrische Ströme in ihrer Umgebung ein Magnetfeld. Man kann dies erkennen, wenn man eine Magnetnadel in die Nähe eines stromführenden Leiters bringt. Beim Fließen des Stromes wird die Nadel aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Fließt kein Strom, so wird die Nadel nicht beeinflusst.

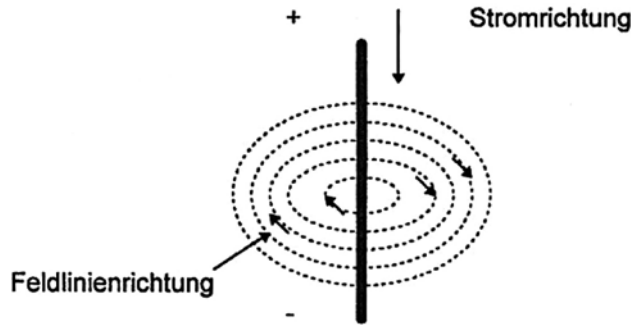
1.3.1 Gerader Leiter

In der Umgebung eines geraden, stromdurchflossenen Leiters, wie z.B. eines Kupferdrahtes, bilden die Feldlinien im Abstand R Kreise mit dem Umfang = $2\pi R$ um den Draht als Mittelpunkt (Abb. 1.5).

Die Feldstärke entlang dieser Feldlinien ist stets gleich und abhängig vom Strom, der durch den Leiter fließt. **Wird der Strom I größer, steigt die Feldstärke H an. Eine größere Feldstärke ist auch zu messen, wenn man in kürzerem Abstand R vom Leitermittelpunkt misst.** In einem Werkstück mit kleinerem Durchmesser wird demnach die größere Feldstärke festzustellen sein als im Werkstück mit größerem Durchmesser bei sonst gleichen Bedingungen. Andererseits kann man auch bei erhöhter Stromstärke die gleiche Feldstärke in größerem Abstand bestimmen. Es gilt der Zusammenhang [1.1], [1.4]

$$H = \frac{I}{2\pi R} \text{ [kA/m]}.$$

Abb. 1.5 Feld in der Umgebung eines geraden stromdurchflossenen Leiters [1.8]



Der Strom kann auch durch das Prüfstück selbst fließen, indem entweder der ganze Querschnitt vom Strom durchflossen wird oder über spezielle Strompole nur Teilabschnitte des Werkstücks vom Strom erfasst werden.

Das kreisförmig um den Leiter angeordnete Magnetfeld kann wieder mit Eisenfeilspänen sichtbar gemacht und die Richtung des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der Richtung des elektrischen Stromes mit einer Kompassnadel festgestellt werden (Abb. 1.6) [1.1]. Fließt der Strom in die Zeichenebene hinein (das Kreuz symbolisiert die Rückansicht eines Pfeiles), so läuft das Magnetfeld in Uhrzeigerichtung um den Leiter herum. Links entsteht ein Südpol (Feldeintritt) und rechts ein Nordpol (Feldaustritt). Wird der Strom umgekehrt (der Punkt entspricht einer Pfeilspitze), so kehrt sich auch die Richtung des Magnetfeldes um (Abb. 1.7) [1.11].

Abb. 1.6 Magnetisches Feld um den Stromleiter [1.11]

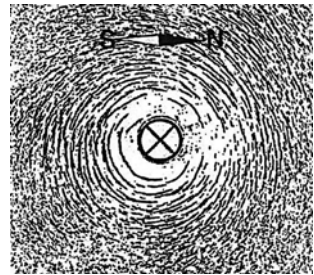


Abb. 1.7 Umkehrung der Stromrichtung [1.11]

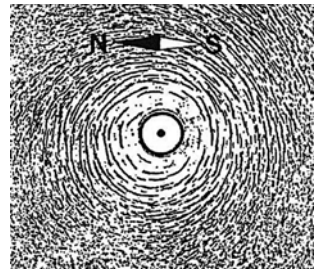
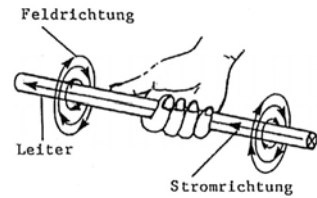


Abb. 1.8 Darstellung der Rechtehandregel [1.4], [1.7], [1.11]



Dieser Zusammenhang zwischen Strom- und Feldrichtung wird „**Rechtehandregel**“, auch „**Korkenzieherregel**“ genannt. Hält man den gestreckten Daumen der rechten Hand in Richtung des fließenden Stromes (technische Stromrichtung), so zeigen die gekrümmten Finger in Richtung des Magnetfeldes (Abb. 1.8).

1.3.2 Leiterschleifen

Führt man den elektrischen Stromleiter durch die Zeichenebene hindurch, biegt ihn dahinter um und führt ihn wieder zurück, so ergibt sich bei Stromfluss der in Abb. 1.9 gezeigte Verlauf des Magnetfeldes. Aus der konsequenten Anwendung der Rechtehandregel sind Feld- und Stromrichtung (Abb. 1.10) sowie Feld- und Stromstärke (Abb. 1.11) bei der Leiterschleife abzuleiten [1.8].

Abb. 1.9 Magnetfeld einer Leiterschleife [1.11]

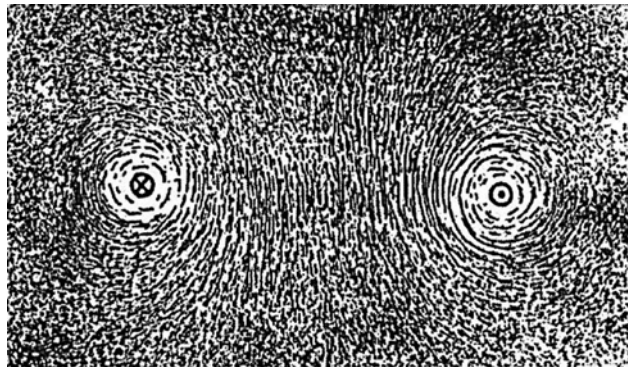


Abb. 1.10 Feld- und Stromrichtung [1.11]

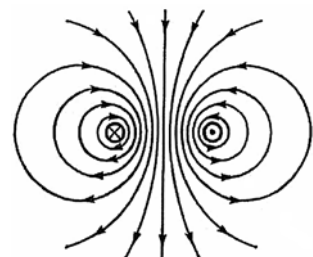
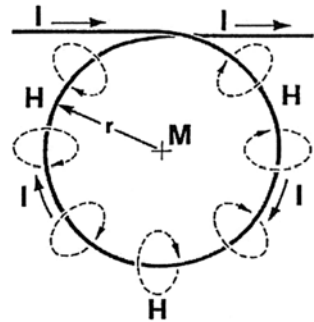


Abb. 1.11 Feld- u. Stromstärke [1.11]



Bei einer kreisförmigen Leiterschleife, Abb. 1.11, berechnet sich die Stärke des Magnetfeldes im Kreismittelpunkt M zu:

$$H = \frac{I}{2 \times r} = \frac{I}{d}.$$

Dabei ist r der Radius und d der Durchmesser der Leiterschleife.

1.3.3 Spulen

Grundsätzlich kann man sich eine Spule als Leiterschleife mit mehreren Windungen vorstellen (Abbildungen 1.12 und 1.13). Jede hinzukommende Windung verstärkt die magnetische Wirkung entsprechend, so dass in erster Linie das Produkt aus Stromstärke (I) und Anzahl der Windungen (n), die so genannte „**Amperewindungszahl**“ für die magnetische Feldstärke (H) maßgeblich ist

$$H \sim I \times n.$$

Damit ergibt sich dieselbe Feldstärke bei einer Spule mit gleichen Abmessungen (Länge ℓ und Durchmesser d) mit 10 Windungen, die mit 100 A betrieben wird, wie mit einer Spule von 1000 Windungen bei 1 A Spulenstrom.

Die Spulenabmessungen haben jedoch ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die magnetische Feldstärke im Inneren der Spule. Die allgemein gültige Beziehung lautet [1.3]:

$$H = \frac{l \times n}{\sqrt{d^2 + \ell^2}}$$

Bei der kurzen Spule ist der Spulendurchmesser d vergleichsweise größer als die Länge l, so dass deren Einfluss vernachlässigt werden kann. Damit vereinfacht sich die o. a. Formel zu [1.3]:

$$H = \frac{1 \times n}{\sqrt{d^2}} = \frac{1 \times n}{d}.$$

Diese Beziehung ist identisch mit der Formel für eine Leiterschleife mit n Windungen.

Bei der langen Spule ist die Länge ℓ maßgebend, so dass hier der Durchmesser vernachlässigbar erscheint. Die Berechnungsformel lautet entsprechend [1.3]:

$$H = \frac{1 \times n}{\sqrt{\ell^2}} = \frac{1 \times n}{\ell}.$$

Dass die Größen d bzw. ℓ im Nenner stehen, ist einleuchtend. Hat man z.B. eine Spule von 10 Windungen und speist sie mit einer Stromstärke von 100 A, so ist die Feldstärke im Inneren sicherlich höher, wenn diese 10 Windungen dicht nebeneinander liegen, als wenn man diese Windungen z.B. auf 1 m Länge auseinander zieht. Ähnlich verhält es sich mit dem Durchmesser. Vergrößert man d , so wächst zwar auch die Drahtlänge entsprechend linear, aber die von Kraftlinien erfüllte Fläche wächst quadratisch.

1.4 Wechselwirkung zwischen magnetischem Feld und Werkstoff

1.4.1 Modell der Magnetisierung

Wie kann unmagnetisiertes ferromagnetisches Material magnetisch werden?

Jedes magnetisierbare Material besteht aus sehr kleinen Elementarmagneten. Die Verteilung dieser Elementarmagnete ist im unmagnetischen Stoff so regellos, dass sich nach außen keine Magnetpole ausbilden und damit kein Magnetismus wirksam werden kann (Abb. 1.14a).

Abb. 1.12 Magnetfeld einer Spule [1.11]

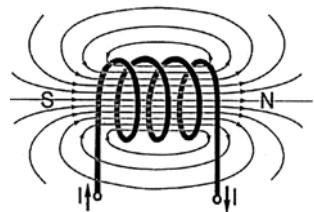


Abb. 1.13 Kurze (links) und lange Spule (rechts) [1.11]

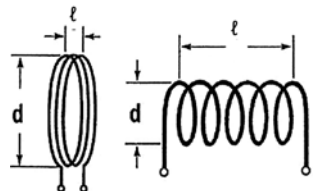
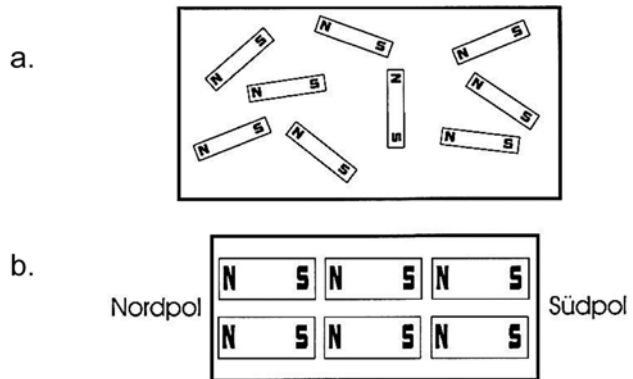


Abb. 1.14 Modell der Elementarmagnete: a. ungerichtet, b. gerichtet [1.1]



Bringt man ein äußeres magnetisches Feld in die Nähe des unmagnetisierten ferromagnetischen Stoffes, so richten sich dessen Elementarmagnete aus (Abb. 1.14b) und der Werkstoff wirkt nach außen magnetisch. Je stärker das äußere Feld ist, desto besser ist die Ausrichtung. **Sind schließlich alle Elementarmagnete gleich ausgerichtet, wird ein Zustand der Sättigung erreicht**, so dass eine weitere Erhöhung der Magnetisierungsfeldstärke keine Wirkung mehr hat.

Im kohlenstoffarmen Weicheisen (Armcoeisen) lassen sich die Elementarmagnete sehr leicht ausrichten, verlieren aber sofort wieder ihre Ordnung, wenn die magnetisierende Kraft weggenommen wird.

In gehärtetem Stahl (z.B. mit 1% Kohlenstoff) behindern dagegen die vielen Kohlenstoffeinschlüsse das Ausrichten der Elementarmagnete. Dies erschwert die Magnetisierung zwar, lässt aber die einmal erzwungene Ordnung mindestens teilweise bestehen bleiben. Die Eigenschaft, dass Magnetismus zurückbleibt, nennt man Remanenz. Magnetische Werkstoffe, die generell und unabhängig von einem äußeren Feld Magnetismus aufweisen, bezeichnet man als Dauer- oder Permanentmagnete.

1.4.2 Die Magnetisierungskurve

Bringt man ein metallisches Prüfstück in den Wirkungsbereich eines Magnetfeldes, so wird in ihm ein **magnetischer Fluss** (Φ) erzeugt, dessen **Dichte (B) mit der Einheit Tesla** von der **Feldstärke (H) mit der Einheit kA/m** und der werkstoffspezifischen Eigenschaft „Permeabilität“ (μ : lateinisch permeare = durchdringen) abhängen. Die **Permeabilität hat die Einheit Vs/Am** und charakterisiert die **Leitfähigkeit** für den magnetischen Fluss [1.1], [1.4], [1.7]. Die genannten Größen folgen der Beziehung

$$B = \mu \times H.$$