

2.1 Magnetischer Fluss und Streufluss

Um die magnetischen Wirkungen physikalisch und messtechnisch besser beschreiben zu können, hat man die **Kraft-** oder **Feldlinien** eingeführt. Zur Erklärung der anziehenden oder abstoßenden Wirkung der Magnetpole denkt man sich die Feldlinien „in sich geschlossen“. Sie treten aus dem Nordpol des Magneten heraus, durchqueren den Luftraum, treten am Südpol wieder ein und schließen sich im Innern des Magneten („**Magnetischer Fluss**“).

Es ist daraus ersichtlich, dass nicht nur unmittelbar von den Polen des Magneten Kraftwirkungen ausgehen, sondern dass die magnetischen Kräfte auch den gesamten Raum in der Nähe des Magneten ausfüllen. Dieser Raum in der Umgebung eines Magneten wird „**Magnetisches Feld**“ genannt (Abb. 2.1) [2.1]. Je größer die Entfernung vom Magneten ist, umso geringer ist zwangsläufig die Kraftwirkung auf die Eisenspäne und umso unregelmäßiger sind sie verstreut. Dabei bleibt ihre Anzahl konstant, d.h. es können keine Kraftlinien hinzukommen oder verloren gehen. Je höher die Feldliniendichte (d.h. je größer ihre Anzahl pro cm^2 Querschnittsfläche) ist, umso größer ist die Kraftwirkung bzw. die „**Magnetische Feldstärke**“ **H**.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Darstellung des magnetischen Feldes mit einem geradlinigen Leiter (Abb. 2.2).

Die Überlegungen über die Feldverhältnisse gewinnen an Anschaulichkeit, wenn die magnetischen Kraftlinien nicht nur zur Charakterisierung des Feldverlaufes, sondern auch zur Beurteilung der Induktion herangezogen werden. Bei der Leiterschleife zum Beispiel treten sämtliche Kraftlinien durch die Schleife hindurch und schließen sich im Außenraum (Abb. 2.3). Im Inneren der Schleife drängen sich die Kraftlinien zusammen. Dort ist auch das Feld am stärksten. Es wird jedoch mit der Entfernung von der Schleifenebene sehr schnell schwächer. Bei gleich bleibendem Strom sinkt die Induktion mit wachsendem Durchmesser der Schleife.

Abb. 2.1 Feldlinien für einen Magneten [2.3]

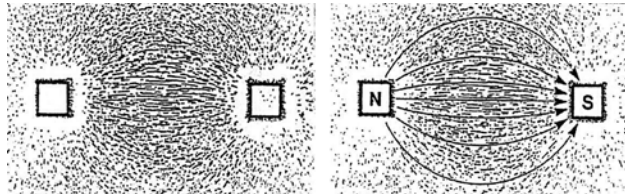


Abb. 2.2 Feldlinien für einen geraden Leiter [2.3]

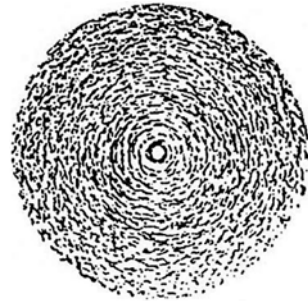
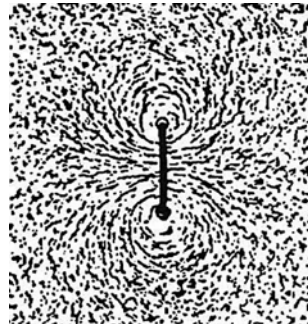


Abb. 2.3 Feldlinien für eine Leiterschleife [2.1]



Werden mehrere Leiterschleifen zu einer Spule nebeneinander angeordnet und lässt man durch jede einzelne Windung denselben Strom fließen, dann überlagern sich die Felder der einzelnen Windungen. In der nächsten Umgebung der Schleifen sind zwar auch Kraftlinien vorhanden, die die einzelne Schleife umschließen, die Mehrzahl umfasst jedoch alle Schleifen der Spule (Abb. 2.4).

Der Verlauf der Feldlinien ändert sich entscheidend, sobald ein ferromagnetisches Prüfstück in das Magnetfeld gebracht wird (Abb. 2.5). Offensichtlich werden die Kraftlinien aus der Luft vom ferromagnetischen Gegenstand gewissermaßen aufgesogen. Die Leitfähigkeit des ferromagnetischen Materials für magnetische Kraftlinien ist bedeutend höher als die der Luft oder anderer nicht ferromagnetischer Werkstoffe. Die Anzahl der Feldlinien pro cm^2 im ferromagnetischen Werkstoff, physikalisch „**Magnetische Induktion**“ **B** genannt, ist um den Faktor der besseren Leitfähigkeit μ größer als die Feldstärke **H** in der Luft.

Abb. 2.4 Feldlinien für eine Spule [2.1]

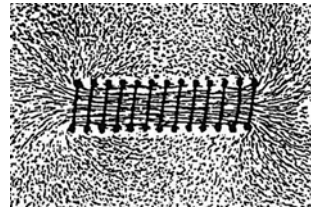
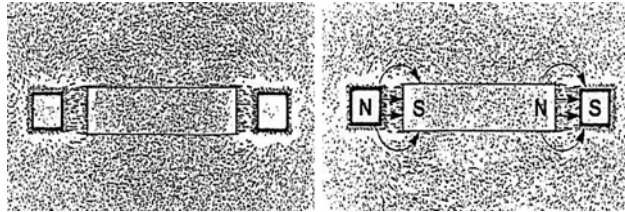


Abb. 2.5 Feldlinien für einen Magneten mit ferromagnetischem Werkstück [2.1]



Aus Abb. 2.5 geht auch die Bildung der Magnetpole deutlich hervor. Gemäß Definition treten die Feldlinien aus dem Nordpol des Magneten aus, überbrücken den Luftspalt und treten dann sofort wieder in den ferromagnetischen Gegenstand ein. Hier entsteht definitionsgemäß ein magnetischer Südpol. Nach Durchlaufen dieses Gegenstandes treten sie am anderen Ende wieder aus – es entsteht hier ein Nordpol – überbrücken den Luftspalt, treten am Südpol wieder in diesen ein und schließen sich im Innerem des Magneten.

Der Gegenstand ist nunmehr durch den Einfluss des Magnetfeldes selbst zu einem Magneten geworden, er ist **magnetisiert**. Aus diesem Verlaufsschema der Feld- oder Kraftlinien folgt zwangsläufig für einen ferromagnetischen Gegenstand, dass bei dessen Magnetisierung stets der dem Magnetpol entgegengesetzte (ungleichnamige) Pol entsteht und somit immer eine Anziehungskraft.

Eine weitere Erklärung für die Veränderungen im magnetischen Feld bei Anwesenheit von ferromagnetischem Material beruht auf der Wirkung des in der Spule erzeugten magnetischen Feldes auf die atomaren Kreisströme, die durch die ständige Elektronenbewegung in den Atomen gegeben ist. Im unmagnetischen Zustand liegen die Kreisströme völlig ungeordnet vor, so dass sich die atomaren Felder in ihrer Wirkung nach außen aufheben. Unter dem Einfluss des Spulenfeldes richten sie sich aber aus, es kommt zu einer Überlagerung des von der Gesamtheit der Kreisströme stammenden Magnetfeldes mit dem erregenden Spulenfeld (Abb. 2.6). Das von den ausgerichteten Kreisströmen entstehende Feld (a) überlagert sich mit dem homogenen Feld der Spule zum resultierenden Feld (b).

2.1.1 Streuflussnachweis in Abhängigkeit von der Feldrichtung

Wird ein rissbehaftetes Werkstück magnetisiert (Abb. 2.7), so ändert sich an dem grundsätzlichen Verlauf des Magnetfeldes nichts.

Abb. 2.6 Veränderungen der Feldlinien einer Spule durch ein ferromagnetisches Werkstück [2.3]

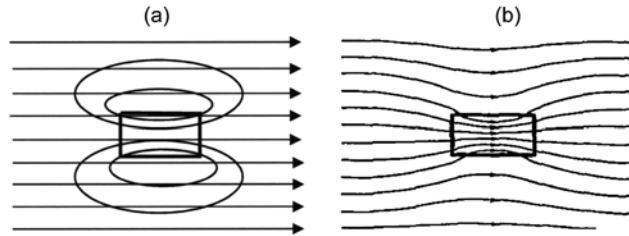


Abb. 2.7 Feldlinien für einen Magneten mit rissbehaftetem ferromagnetischen Werkstück [2.1]

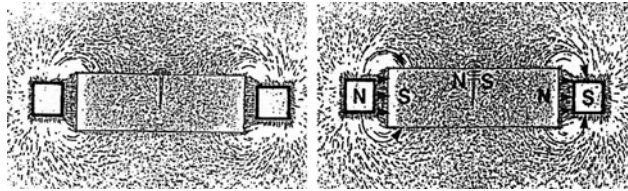
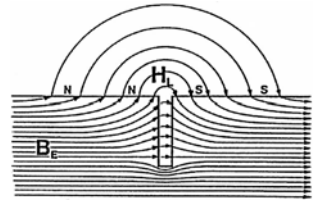


Abb. 2.8 Entstehung des Streuflusses über einem Riss (schematisch). H_L = Feldstärke in Luft, B_E = Induktion im Eisen, N = Nordpol, S = Südpol [2.10]



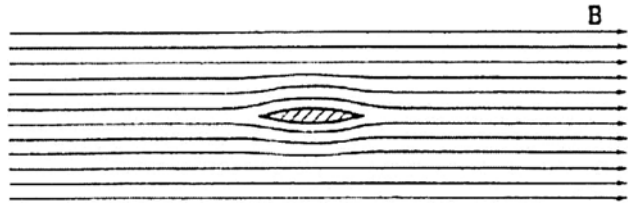
Bei genauerem Hinsehen erkennt man jedoch oberhalb des Risses einen bogenförmigen Verlauf einiger Feldlinien. Sie müssen den durch den Riss hervorgerufenen Luftspalt überbrücken und treten wegen der wesentlich geringeren Leitfähigkeit (Permeabilität) der Luft bereits links vom Riss aus und rechts des Risses wieder in das Werkstück ein (Abb. 2.8).

Somit entsteht links des Risses ein magnetischer Nordpol, rechts davon ein magnetischer Südpol. Infolge der nun wirksamen Anziehungskräfte dieses „**Streuflusses**“ können hier allerfeinste ferromagnetische Teilchen („**Magnetpulver**“) angezogen werden und

Abb. 2.9 Streuflussanzeige von einem Riss an einem Kettenglied [2.10]



Abb. 2.10 Fehlende Streuflussbildung an einem parallel zum magnetischen Feld liegenden Fehler [2.10]



somit den Riss besser sichtbar machen (Beispiel in Abb. 2.9). Hinzu kommt die Tatsache, dass die wirksame Breite dieses Streuflusses stets größer ist als die des Risses selbst und somit auch die Breite der sich ansammelnden Magnetpulverraupe. Daraus ergibt sich das Prinzip der Magnetpulverprüfung.

Liegt die Trennung zwar senkrecht zur magnetischen Feldrichtung, aber in einem bestimmten Abstand unterhalb der Prüfstückoberfläche, so wird nur ein sehr geringer Streufluss entstehen und der Fehler kommt kaum zur Anzeige.

Es leuchtet ein, dass an einem Riss **kein** magnetischer Streufluss entstehen kann, wenn die Richtungen von Magnetfeld und Riss **parallel** verlaufen (Abb. 2.10). In diesem Falle ist es für die magnetischen Feldlinien wesentlich einfacher, entlang des Risses zu laufen anstatt ihn durch die Luft zu überbrücken.

Die optimale Rissanzeige ergibt sich also bei senkrechtem Verlauf zwischen Magnetfeld- und Rissrichtung (optimaler Fehlernachweis siehe Abb. 2.11), während bei parallelem Verlauf keine Anzeige entsteht.

Liegen Riss und Feldrichtung schräg zueinander, so lassen sich Fehler dennoch nachweisen, wenn der Winkel zwischen der Feldrichtung und der Fehlerrichtung mindestens 30° beträgt (Abb. 2.12).

Abb. 2.11 Feldverlauf und optimal nachweisbare Rissrichtungen beim Handmagneten [2.10]

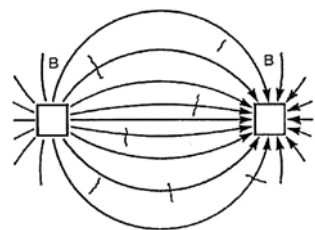
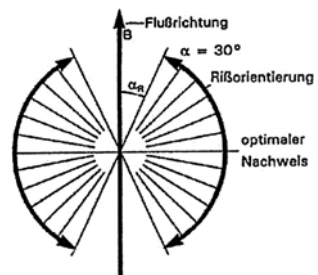


Abb. 2.12 Nachweisbare Rissrichtungen in Abhängigkeit von der Richtung des Magnetflusses [2.10]



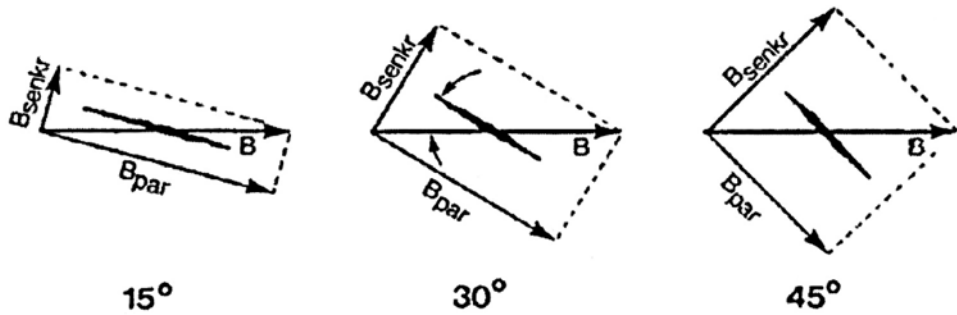


Abb. 2.13 Schräglage von Rissen (Vektordarstellung) [2.10]

Das lässt sich nachweisen, wenn das Magnetfeld als Vektor in eine Komponente senkrecht zum Riss (B_{senkr}), die einen Beitrag zur Rissanzeige liefert und in eine andere Komponente parallel zum Riss (B_{par}), die wirkungslos bleibt, zerlegt wird. Abb. 2.13 zeigt einige Beispiele dazu.

Es ist eindeutig erkennbar, dass die Komponente, die einen Beitrag zur Rissanzeige liefert, bei abnehmendem Winkel zwischen Feld- und Fehlerrichtung, zunehmend kleiner wird. In der Praxis ist dieses Problem allerdings nicht so kritisch, wie man zunächst vermuten könnte. Es hat sich gezeigt, dass man die Stärke der Magnetisierung über weite Bereiche variieren kann, ohne dass sich an der Qualität der Rissanzeige Wesentliches ändert.

Es ist offensichtlich, dass das Verfahren der Magnetpulverprüfung umso besser funktioniert, je größer die Permeabilität μ des Prüfgegenstandes ist. Diese ist, wie schon erläutert, nicht konstant, sondern weist irgendwo ein Maximum auf und wird dann mit zunehmender Sättigung wieder geringer. Die für die Magnetpulverprüfung wichtige absolute Permeabilität lässt sich bezogen auf Abb. 1.22 als Verbindungsgerade zwischen Nullpunkt und dem betrachteten Kurvenpunkt darstellen, wobei der Steigungswinkel α der Permeabilität μ entspricht. Die Permeabilität hat also an der Stelle gemäß Abb. 2.14 ihr Maximum. Dies ist mithin die Stelle der für die Magnetpulverprüfung optimal geeigneten Feldstärke H .

Aus dem Abb. 2.14 ist aber auch ersichtlich, dass die Feldstärke um den optimalen Punkt herum in weiten Bereichen ΔH geändert werden kann, ohne dass sich die Permea-

Abb. 2.14 Stelle der maximalen Permeabilität [2.10]

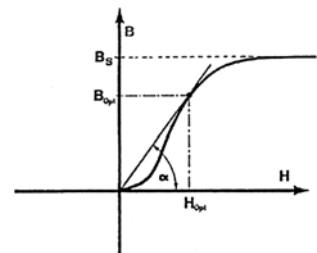
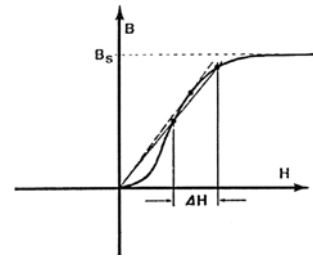


Abb. 2.15 Unkritischer Bereich zur Magnetisierung [2.10]



bilität, d.h. der Steigungswinkel α , wesentlich ändert (Abb. 2.15). Dies bedeutet in der Praxis, dass die optimale Feldstärke nicht unbedingt genau eingehalten werden muss, sondern ein relativ großer Spielraum gegeben ist. Diese Erfahrungen haben sich in der Praxis vielfach bestätigt.

Untersuchungen an Bau-, Kessel- und Vergütungsstählen ergaben bereits deutliche Rissanzeigen bei Feldstärken von ca. 1,6 kA/m, die sich bei Erhöhung auf ca. 2,4 kA/m verbessern ließen. Bei weiterer Steigerung auf ca. 8 kA/m blieb die Anzeige qualitativ praktisch gleich; bei über diesem Wert liegenden Feldstärken nahm die Anzeigequalität wieder ab, und zwar durch Kontrastminderung infolge von Streuflussbildung an der Oberflächenrauigkeit. Dies bedeutet, dass in der Praxis die Magnetisierungsfeldstärke in weiten Bereichen von über 1 : 3 geändert werden kann, ohne dass sich an der Qualität der Rissanzeige Wesentliches ändert und dass man andererseits die Feldstärke auch nicht zu hoch wählen sollte. Die bei den einzelnen Magnetisierverfahren angegebenen vereinfachten Formeln beziehen sich alle auf den relativ **unkritischen Bereich zwischen 2,4 und 8 kA/m**.

Unter Einbeziehung dieser Erfahrung und der Tatsache aus Abb. 2.13, dass bei 30° zwischen Riss und Feldverlauf immerhin noch der halbe Induktionswert vorhanden ist, da die Kräftezerlegung einem Sinusgesetz mit $\sin 30^\circ = 0,5$ folgt sowie aufgrund der erwähnten Erfahrungswerte folgt eben die Faustregel, dass alle Risse erkennbar sind, deren Richtung um 30° oder mehr von der Richtung der Feldlinien abweicht.

Dies bedeutet andererseits, dass man Risse sämtlicher (unbekannter) Richtungen stets sicher nachweisen kann, wenn zwei zumindest annähernd um 90° gedrehte Magnetisierungsrichtungen verwendet werden (Abb. 2.16).

Zwischen diesen Grenzen gibt es aber sicher noch Fehlerorientierungen zum magnetischen Fluss, die ebenfalls angezeigt werden. In Abb. 2.17 wird die Abhängigkeit der Anzeigeempfindlichkeit von Fehlerorientierungen am Beispiel einer Längsmagnetisierung gezeigt [2.3].

Wenn ein aus einem ferromagnetischen Werkstoff bestehendes Werkstück magnetisiert worden ist, so erfahren die magnetischen Feldlinien an der Grenzfläche zweier Stoffe mit unterschiedlicher Permeabilität, wie z.B. an Stellen mit Poren, Rissen oder Einschlüssen, analog zur Brechung des Lichtes beim Übergang von einem Medium in ein anderes mit einem anderen Brechungsindex, eine Richtungsänderung, die mit Hilfe des Brechungsgesetzes für magnetische Feldlinien berechnet werden kann [2.6]:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

Für die Magnetpulver-Materialprüfung ist der Übergang der magnetischen Feldlinien von Eisen in Luft oder umgekehrt bedeutsam. Da Luft die relative Permeabilität $\mu_L = 1$ hat, ergibt sich nach dem Brechungsgesetz ein Austrittswinkel α_L der Feldlinien in Luft zu

$$\tan \alpha_L = \frac{\tan \alpha_{Fe}}{\mu_{Fe}}$$

mit μ_{Fe} = relative Permeabilität des Eisens (ca. 100) und
 α_{Fe} = Austrittswinkel der Feldlinien aus dem Eisen (ca. 85°).

Daraus folgt, dass die Feldlinien aus der Oberfläche des Eisens fast immer annähernd senkrecht austreten (unter einem Winkel von rund 3°). Ändert sich der von magnetischen Feldlinien durchsetzte Querschnitt beispielsweise an einem von der Oberfläche ausgehenden Riss, so verlaufen die Feldlinien in unmittelbarer Umgebung des Risses wegen des wesentlich größeren magnetischen Widerstandes der Luft nicht mehr auf ihrem ursprünglichen Weg (Abb. 2.18), sondern umgehen zum Teil den Riss und nehmen den Umweg

Abb. 2.16 Nachweis sämtlicher Rissrichtungen mit 2 um 90° versetzten Magnetisierungsrichtungen [2.10]

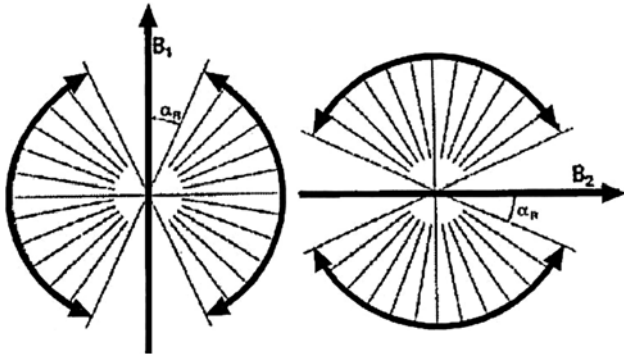
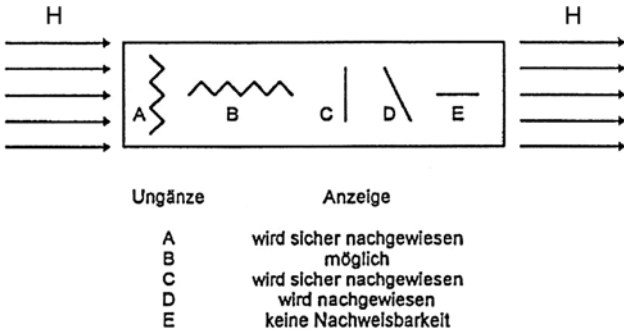


Abb. 2.17 Abhängigkeit der Anzeigeempfindlichkeit von der Fehlerorientierung [2.3]



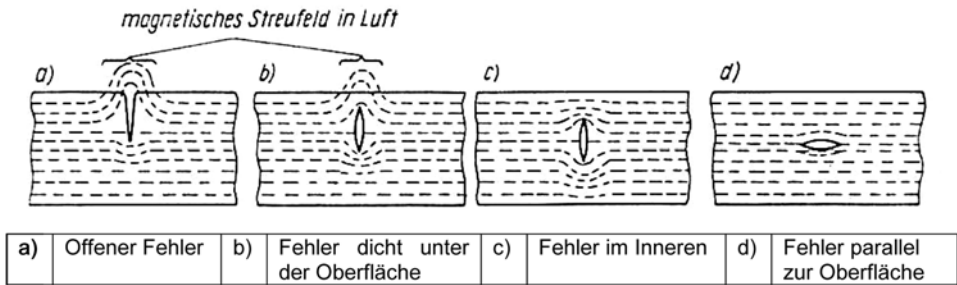


Abb. 2.18 Verlauf der magnetischen Feldlinien in der Nähe von Rissen [2.6]

über den Restquerschnitt. Ein weiterer Teil der Feldlinien setzt seinen ursprünglichen Weg auch durch den Riss hindurch fort, während ein meist sehr geringer Rest bereits in einiger Entfernung vom Riss fast senkrecht aus der Werkstückoberfläche in die Luft aus- und erst hinter dem Riss wieder in das Werkstück eintritt. Das sich dabei bildende magnetische Feld bezeichnet man als magnetischen Streufluss [2.6].

2.1.2 Streuflussnachweis in Abhängigkeit von der Stromrichtung

Ferromagnetische Werkstücke werden nicht nur durch das Einbringen in ein magnetisches Feld magnetisiert, sondern auch dann, wenn sie selbst mit Strom durchflutet werden oder in das Feld einer stromdurchflossenen Spule gebracht werden. Der Stromfluss erfolgt in diesen Fällen ähnlich dem Feldverlauf mit der größten Stromstärke auf der direkten Verbindungslinie der Kontaktstellen und nach außen hin allmählich abnehmend.

Die Kraftlinien des Magnetfeldes verlaufen in sich geschlossen senkrecht zu den Stromlinien (Abb. 2.19) und somit ist die **Richtung der optimal nachweisbaren Risse parallel zum Stromverlauf** (Abb. 2.20) [2.6].

Abb. 2.19 Feldlinienverlauf bei Strommagnetisierung [2.10]

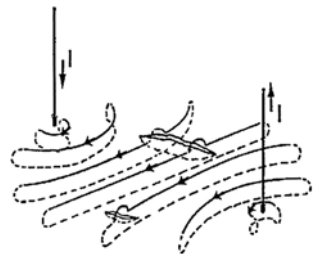
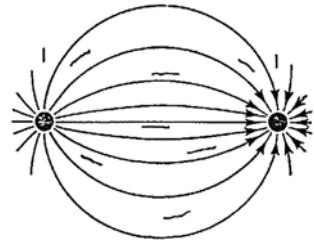


Abb. 2.20 Stromlinienverlauf und optimal nachweisbare Rissrichtungen bei Strommagnetisierung [2.10]



2.1.3 Einfluss der Strom- und Feldart

Allgemein sind die an der Werkstückoberfläche erreichbaren Magnetfeldstärken abhängig von der Stromstärke, jedoch unabhängig von der Stromart. Der Einfluss der Stromart wird mit wachsender Tiefe im Werkstück bemerkbar. Grundsätzlich sind folgende Stromarten für die Magnetpulverprüfung von Bedeutung (Abb. 2.21) [2.1], [2.3], [2.4], [2.6], [2.7], [2.9]:

1. Gleichstrom

Gleichstrom (direct current-DC) erhält man aus Batterien auf chemischem Wege. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Spannung und Strom zeitlich nicht verändern. Für die Magnetpulverprüfung ist Batteriestrom aufgrund der geringen Leistung meist nicht anwendbar. Der bei der Prüfung mit Gleichstrom zur Anwendung kommende Strom wird über nachfolgend aufgeführte Methoden der Gleichrichtung aus Wechselstrom hergestellt.

2. Wechselstrom

Aus der Steckdose erhalten wir normalerweise den Wechselstrom (alternating current-AC), dessen Spannung und Strom sich zeitlich ständig ändern. Der Strom verläuft zeitlich wie eine Schwingung und ändert Richtung und Größe in einem Zyklus, der sich in der Sekunde 50-mal wiederholt. Diese 50 Schwingungen pro Sekunde entsprechen einer Frequenz von 50 Hz.

3. Halbwellengleichgerichteter Wechselstrom

Durch Gleichrichter wird verhindert, dass sich beim halbwellengleichgerichteten Wechselstrom (half-wave rectified alternating current – HWAC) die Richtung des Stromes ändert, so dass nur eine Halbwelle erhalten bleibt (Einweggleichgerichteter Wechselstrom von 50-60 Hz). Wird in der Praxis mit Halbwellenstrom gearbeitet und ein Gleichstromamperemeter verwendet, müssen die gemessenen Stromwerte mit dem **Faktor 2** multipliziert werden. Das Verfahren ist besonders zur Prüfung in Remanenz geeignet.

4. Vollwellengleichgerichteter Wechselstrom

Bei diesem Wechselstrom (full-wave rectified alternating current-FWAC) bleibt die obere Halbwelle erhalten und die untere wird nach oben geklappt (Doppelweggleichgerichteter Wechselstrom von 50-60 Hz). Mit dreiphasigem Drehstrom schließlich ge-

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung -

Magnetpulverprüfung

Schiebold, K.

2015, XVI, 249 S. 256 Abb., 26 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-662-43970-8