

Optimale Parameterwahl bei der Magnetpulverprüfung und ihre Auswirkungen auf die Fehlererkennbarkeit

Volker Schuster, Karl Deutsch Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal

1 Einleitung

Die Magnetpulver-Rissprüfung (MT) ist das empfindlichste Verfahren zum Nachweis von Oberflächenrissen in ferromagnetischem Material ([1], [2]). Diese Prüfung kann sowohl mit mobilen Geräten als auch mit einer stationären Prüfbank durchgeführt werden [3]. Wird das Bauteil magnetisiert, dann entsteht über dem Riss ein sogenannter Streufluss mit Nord- und Südpol an den Rissflanken. Zur Anzeige von Rissen werden kleine, staubkorngroße ferromagnetische Teilchen genutzt, die von diesem Streufluss angezogen und festgehalten werden. Die ferromagnetischen Teilchen sind ein Eisenoxidpulver, welches meistens mit einer hell fluoreszierenden Farbe versehen ist.

Obwohl es sich bei dieser Prüfmethode um ein recht einfaches Verfahren handelt, dessen Handhabung in kurzer Zeit erlernt werden kann, gibt es doch viele Parameter und Umstände, die berücksichtigt werden müssen, um ein gutes bzw. optimales Prüfergebnis zu erzielen. Zum Teil helfen Normen bei der richtigen Wahl der Prüfbedingungen, vieles bleibt jedoch offen und muss von einem geübten und erfahrenen Prüfer festgelegt werden. Dieser Artikel beleuchtet die wichtigsten Prüfparameter und zeigt, wie der Einfluss auf das Prüfergebnis ist. Dieses Wissen ist insofern wichtig, da zwei Prüfer an dem gleichen Bauteil eine normgerechte Rissprüfung durchführen können und zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Dies tritt immer wieder auf und liegt darin begründet, dass beide Prüfer unterschiedliche Prüfparameter gewählt haben.

2 Grundlagen der Magnetpulver-Rissprüfung

Wird ein rissbehaftetes Werkstück magnetisiert, s. Bild 1, so erkennt man bei genauerem Hinsehen im Feilspanbild oberhalb des Risses einen bogenförmigen Verlauf einiger Feldlinien: Sie müssen den durch den Riss hervorgerufenen Luftspalt überbrücken und treten wegen der wesentlich geringeren magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität) der Luft bereits links vom Riss aus und rechts des Risses wieder in das Werkstück ein, s. Bild 1. Somit entsteht links des Risses ein magnetischer Nordpol, rechts davon ein magnetischer Südpol. Infolge der nun wirksamen Anziehungskräfte dieses sog. "Streuflusses" können hier allerfeinste ferromagnetische Teilchen ("Magnetpulver") angezogen werden und somit den Riss besser sichtbar machen. 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. Hierdurch ergibt sich eine gute Erkennbarkeit bereits mit bloßem Auge. Dies ist das Prinzip der Magnetpulver-Rissprüfung.

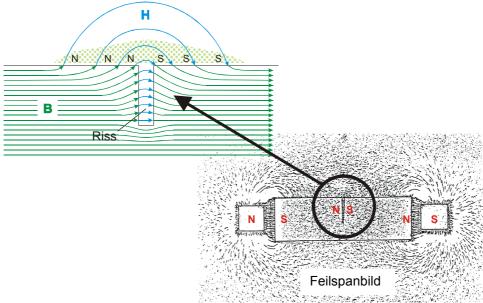


Bild 1: Das Prinzip der Magnetpulver-Rissprüfung: Streufluss am Riss

Hier stellt sich bereits die Frage nach dem ersten Prüfparameter, der Stärke der Magnetisierung. Die europäische Norm [3] schreibt eine Mindestflussdichte von B = 1 T (Tesla) vor. Dieser Wert hat aber



keine sonderliche praktische Relevanz, da es kein einfaches Messgerät gibt, mit dem man diesen Parameter kontrollieren kann. Daher gibt die Norm auch den Hinweis, dass dieser Wert bei den meisten Stahlsorten bei einer Tangentialfeldstärke von H = 2 kA/m erzielt wird, s. Bild 2. Hier ist wichtig zu wissen, dass für einige Stahlsorten (mit einem kleinen Permeabilitätswert μ) auch bei einer Feldstärke von $H \ge 2$ kA/m der Grenzwert (B = 1 T) nicht erreicht wird.

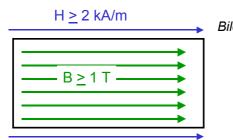
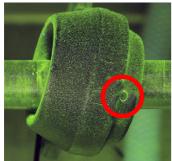


Bild 2: Gemäß der DIN EN 9934-1 ist das Bauteil ausreichend magnetisiert, wenn eine Tangentialfeldstärke von H > 2 kA/m gemessen werden kann.

Hinsichtlich eines oberen Grenzwertes macht diese Norm jedoch keine Aussage. Trotzdem muss die Stärke der Magnetisierung nach oben beschränkt werden, da bei zu hoher Magnetisierung bereits an der Rauigkeit der Bauteiloberfläche ein Streufluss entsteht und sich Magnetpulver an der gesamten Oberfläche ansammelt. Ergebnis ist ein so schlechter Kontrast, dass Rissanzeigen übersehen werden können, s. Bild 3. Die Praxis hat gezeigt, dass eine maximale Magnetisierung mit einer Tangentialfeldstärke von ca. 6 kA/m bei den meisten Bauteilen einen noch ausreichend guten Kontrast hervorbringt.



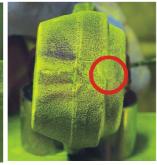


Bild 3: Guter Kontrast bei richtiger Magnetisierung (links) und schlechter Kontrast bei Übermagnetisierung (rechts).

Die optimale Rissanzeige ergibt sich bei senkrechtem Verlauf zwischen Magnetfeld- und Rissrichtung, während bei parallelem Verlauf keine Anzeige entsteht. Liegen Riss- und Feldrichtung schräg zueinander, so lässt sich das Magnetfeld als Vektor zerlegen in eine Komponente senkrecht zum Riss (= $B_{\text{senkr.}}$) - diese liefert einen Beitrag zur Rissanzeige - und in eine andere Komponente parallel zum Riss (= B_{par}), die wirkungslos bleibt, s. Bild 4. Bei einem Winkel von 30° zwischen Riss und Feldverlauf ist immerhin noch der halbe Induktionswert zum Rissnachweis wirksam, s. Bild 4. Hieraus kann die Faustregel abgeleitet werden, dass alle Risse erkennbar sind, deren Richtung um 30° oder mehr von der Richtung der Feldlinien abweicht.

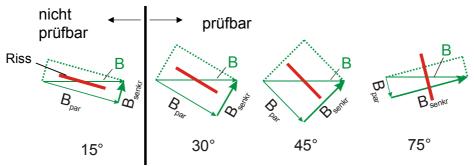


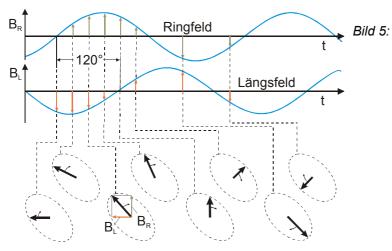
Bild 4: Risse gelten als nachweisbar, wenn deren Richtung um wenigstens 30° von der Feldrichtung abweicht.

3 Magnetisiergeräte

Aus dem vorigen Abschnitt geht hervor, dass zum Nachweis von Rissen aller Richtungen zwei Magnetisierungen notwendig sind, s. Bild 4. Moderne Magnetisiergeräte (stationäre Prüfbänke) führen diese Magnetisierung in einem Takt durch, allerdings muss hierfür wenigstens ein Wechsel- mit einem

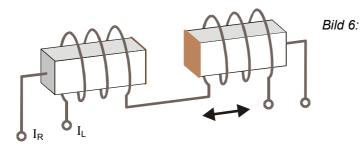


Gleichfeld oder üblicherweise zwei phasenverschobene Wechselfelder kombiniert werden, s. Bild 5. Gleichfelder bzw. phasengleiche Wechselfelder führen nicht zum Ziel.



Die Kombination zweier um 120° phasenverschobener Wechselfelder führt zu einem auf einer Ellipse umlaufenden Magnetisierungsvektor zum Nachweis von Rissen aller Richtungen.

Zur Realisierung derartiger Magnetisiergeräte gibt es unterschiedliche Konzepte. Vorteilhaft ist hier das offene Joch, da es preiswert und gewichtsparend ist, s. Bild 6. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei diesem Konzept die Feldlinien durch die Luft geschlossen werden, s. Bild 7. Dies führt bei langen Bauteilen dazu, dass die Magnetisierung zur Mitte hin abnimmt, so dass bei langen Bauteilen insbesondere in der Mitte auf ausreichende Magnetisierung zu achten ist. Dieses Gerätekonzept wird auf dem Markt bis zu einer maximalen Einspannlänge von 900 mm angeboten, s. Bild 8. Größere Einspannlängen sind für das offene Joch, aufgrund des beschriebenen Effektes nicht sinnvoll.



Gerätekonzept: offenes Joch; Zur Felddurchflutung werden 2 Jochstücke mit einer Spule umwickelt, während für die Stromdurchflutung der Strom über die Joche durch das Bauteil geleitet wird. In Kombination (Feld- und Stromdurchflutung) können Risse aller Richtungen nachgewiesen werden.

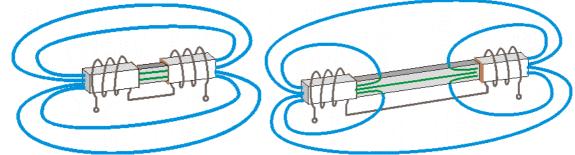


Bild 7: Das Schließen der Feldlinien durch die Luft (links) führt bei langen Bauteilen zu einer Reduzierung der Magnetisierung in dessen Mitte (rechts).







Bild 8: DEUTROFLUX-Geräte mit offenem Joch und Einspannlängen bis 600 mm (UWE 600, links) und bis 350 mm (UWE 350, rechts)

4 Prüfmittel

4.1 Farbe der Prüfmittel

Aufgrund der chemischen Neutralität bestehen die heutigen Prüfmittel aus oxidiertem Eisenpulver (Rost). Abhängig von der Oxidationsstufe sind diese Pulver von Natur aus rostrot oder schwarz. Um einen ausreichenden Kontrast zum Bauteil zu erzielen, ist es in vielen Prüfsituationen notwendig das Bauteil vor der Prüfung mit weißer Untergrundfarbe zu versehen. Hierbei ist darauf zu achten, dass diese Farbschicht nicht dicker als 50 µm ist, da bei dickeren Farbschichten die Nachweiswahrscheinlichkeit deutlich geringer wird. Ohne Untergrundfarbe kommen dagegen fluoreszierende Magnetpulver aus. Hierbei werden die oxidierten Eisenteilchen mit einem Fluoreszenzfarbstoff versehen. In abgedunkelten Räumen unter ultraviolettem Licht leuchten die Rissanzeigen dann meistens gelblich-grün und bilden so einen deutlich höheren Kontrast als die schwarzen oder rostroten Magnetpulver, die unter Tageslicht genutzt werden. Der Vorteil der Tageslichtpulver ist deren höhere Empfindlichkeit, der jedoch durch die Notwendigkeit einer Untergrundfarbe wieder reduziert wird. Insbesondere der gute Kontrast und die damit verbundene hohen Nachweiswahrscheinlichkeit haben dafür gesorgt, dass heute fast ausschließlich fluoreszierende Magnetpulver Verwendung finden.

4.2 Trägermedium

Das Magnetpulver lässt sich trocken, meistens durch aufblasen oder nass mit einem flüssigen Trägermedium aufbringen. Da aus gesundheitlichen und praktischen Gründen für die trockenen Pulver nur recht grobkörniges und somit nur für grobe Risse ausreichend empfindliches Pulver zur Verfügung steht, liegt der Schwerpunkt auf der Nassprüfung. Als Trägermedium kommen hier Öle oder Wasser zum Einsatz. Öle zeigen eine gute Benetzbarkeit des Bauteils und zwar unabhängig davon, ob das Bauteil trocken, nass oder ölig / fettig ist. Sind die Prüfungsstücke jedoch weder ölig noch fettig, dann kann auch Wasser als Trägermedium dienen. Für Wasser fordert die Norm [3] jedoch den Zusatz von Entspannungsmittel, damit die Benetzung des gesamten Bauteils gewährleistet werden kann. Entspannungsmittel sind z.B. Tenside, die zum Schäumen neigen, so dass sich der Zusatz von Antischaummitteln ebenfalls empfiehlt. Die Hersteller fügen meistens noch ein Rostschutzmittel hinzu, so dass die abgestimmte Rezeptur als Konzentrat zu kaufen ist.

Auf die Fehlererkennbarkeit hat das Trägermedium keinen Einfluss. Öle sind jedoch viskoser als Wasser und haben somit eine deutlich längere Abtropfzeit (das ist die Zeit, die die Flüssigkeit benötigt, bis sie nicht mehr abläuft). Dies führt zu einer deutlich längeren Prüfzeit. Bei der Serienprüfung kann dies jedoch ein K.O.-Kriterium sein. Zudem erhöht sich auch die Gefahr des Überwaschens (wegwaschen der Rissanzeige durch ablaufendes Prüfmittel), wenn während das Prüfmittel noch abläuft die Magnetisierung bereits beendet wird. Außerdem ist bei Öl darauf zu achten, dass dieses keine Eigenfluoreszenz hat, da diese zu einer Kontrastverschlechterung führt.



4.3 Prüfmittelkontrolle im Prüfmittelkreislauf

Anhaftendes Prüfmittel an jedem Bauteil, Verschmutzung durch Schmutzreste an den Prüfteilen und mechanische Zerstörung durch das Rührwerk im Prüfmittelbehälter führen zu einer stetigen Verschlechterung der Prüfmittelanzeigefähigkeit in stationären Anlagen. Zur Kontrolle dieser Prüfmittel haben sich Vergleichskörper bewährt. Verglichen wird immer die Anzeigefähigkeit bekannter Risse oder die Anzeigenlänge an einem künstlichen Riss auf dessen Länge die Magnetisierungsstärke langsam abnimmt von einem frischen Ansatz mit dem im Gebrauch befindlichen Prüfmittel. Eine absolute Messmethode gibt es hierbei nicht. Vor allem hängt diese Vergleichsmethode wesentlich von menschlichen Einflussfaktoren ab, so dass dieser Vergleich stets von der gleichen Person mit dem gleichen Vergleichskörper durchzuführen ist. Objektivieren lässt sich diese Methode mit der neuen Auswerteeinheit "FLUXA-Control", s. Bild 9 und Bild 10 [5], [8]. Hierbei wird die Anzeigefähigkeit von 2 künstlichen Rissen mit Hilfe einer UV-Leuchtdiode und einer Photodiode gemessen. Das Messergebnis wird am Bedienteil angezeigt und kann auch direkt zur Unterbrechung der Prüfung genutzt werden.

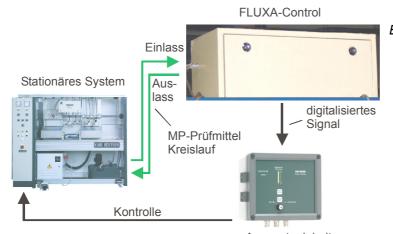


Bild 9: Prinzip der automatischen Prüfmittelüberwachung: FLUXA-Control.



Frischer Ansatz des Prüfmittels Kalibriermodus Prüfmodus

Bild 10: Vorgehen zur automatischen Prüfmittelkontrolle in stationären Prüfanlagen mit "FLUXAControl".

4.4 Betrachtungsbedingungen

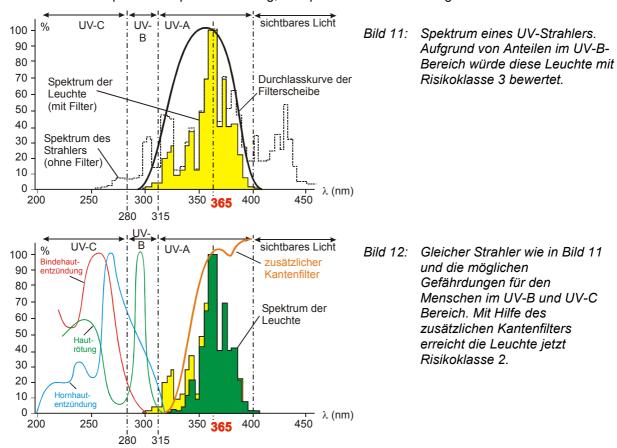
Da die Intensität der meisten UV-Strahler im Gegensatz zu Glühbirnen im Laufe der Zeit kontinuierlich abnimmt, ist eine regelmäßige Überwachung notwendig, um sicherzustellen, dass die von der Norm geforderte minimale Strahlungsintensität von 10 W/m² nicht unterschritten wird [6]. Die Messung sollte immer an der Stelle erfolgen, wo normalerweise das zu betrachtende Prüfobjekt sich befindet. Da sichtbares Licht bei der UV-Betrachtung stört, soll nur ein geringer Anteil sichtbaren Lichtes vorhanden sein. Gemäß der geltenden Norm DIN EN ISO 3059 darf die Beleuchtungsstärke durch das sichtbare Licht einen festgelegten Grenzwert von 20 lux nicht überschreiten [6]. Die ZfP Norm DIN EN ISO 9934-1 weicht diesen Wert jedoch wieder auf, indem sie einen proportional höheren Wert zulässt, wenn der UV-Strahler den Wert der 10 W/m² ebenfalls überschreitet [3]. Hierbei gilt natürlich: Je heller der UV-Strahler und dunkler das Fremdlicht ist, desto größer ist der Kontrast und somit die Fehlererkennbarkeit. Eine analoge Aussage gilt natürlich auch für die Tageslichtprüfung. Hierbei wird



zwar eine minimale Beleuchtungsstärke von 500 lux gefordert es gilt jedoch (soweit der Prüfer nicht geblendet wird) je heller, desto besser [6].

5 Ultraviolette Strahler für die Magnetpulver-Rissprüfung

Im Abschnitt 4.4 wurde erläutert, welche minimale Ultraviolette Strahlungsintensität zum Rissnachweis gefordert wird. Dem gegenüber steht der Schutz des Betrachters vor dieser Strahlung. Die Berufsgenossenschaft arbeitet noch an einer Unfallverhütungsvorschrift, ist jedoch noch nicht über die Entwurfsphase hinaus. Die DGZfP (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung) hat in Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft eine Richtlinie veröffentlicht [7], in der die Hersteller aufgefordert werden ihre UV-Strahler in eine Risikoklasse von 0 bis 4 einzuordnen. Aus dieser Richtlinie geht dann hervor, welche Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz notwendig sind. Die Klassen 0 und 1 kommen für die Magnetpulver-Rissprüfung nicht in Betracht. Solche Leuchten würden keine ausreichende Bestrahlungsstärke für die Magnetpulver-Rissprüfung erreichen. Minimal erreichbar ist daher die Risikoklasse 2. Für diese Klasse reicht es aus, wenn das Prüfpersonal körperbedeckende Arbeitskleidung sowie Handschuhe trägt und gewährleistet ist, dass der Prüfer nicht direkt in den Strahler hineinsehen kann (bei stationären Leuchten sollte sich die Leuchtenunterkante unterhalb der Augenhöhe befinden) [7]. Die Risikoklasse 2 kann für viele UV-Strahler dadurch erreicht werden, dass neben der üblichen Filterscheibe noch ein zusätzlicher "Kantenfilter" (eine zweite Filterscheibe) angebracht wird, s. Bild 11 und Bild 12. Hierdurch reduziert sich zwar auch die Bestrahlungsstärke des Strahlers, es dient aber dem Schutz des Prüfers. Bei der Bestimmung der Risikoklasse handelt es sich um eine komplexe UV-Spektralmessung, die speziell kalibrierte Messgeräte fordert.



6 Strom- bzw. Feldarten

Grundsätzlich werden zwei Strom- bzw. Feldarten unterschieden: das Gleichfeld und das Wechselfeld. Beim Wechselfeld tritt der Skin- oder Hauteffekt auf. Das bedeutet, dass das magnetische Feld im Bauteil sich an der Oberfläche konzentriert, während beim Gleichfeld der gesamte Bauteilquerschnitt magnetisiert wird. Hieraus ergeben sich einige Unterschiede in den Magnetisierungsarten, die sich auch auf die Fehlererkennbarkeit auswirken können.



6.1 Eindringtiefe

Die Eindringtiefe des Gleichfeldes erfasst den gesamten Querschnitt, so dass auch Fehlstellen tiefer unterhalb der Oberfläche nachgewiesen werden können. Diese Anzeigen sind jedoch breiter, undeutlicher und verwaschener als die aus Oberflächennähe. Es ist auch nicht möglich beliebig tief liegende Fehlstellen zu detektieren. Der Vorteil liegt in einer 2 bis 3 mal größeren Prüftiefe als bei einem Wechselfeld, jedoch in starker Abhängigkeit zur Geometrie der Fehlstelle, s. Bild 13. In den europäischen Normen wird das Magnetpulververfahren jedoch als ein Oberflächen- und nicht als Volumenprüfverfahren bezeichnet.

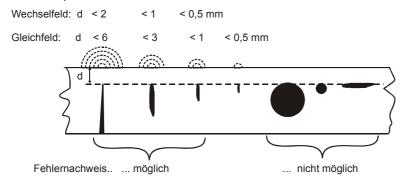
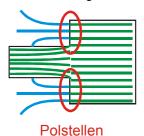


Bild 13: Fehlernachweis für verdeckte Fehlstellen bei Gleich- und Wechselfeld.

6.2 Querschnittsübergänge

An Querschnittsübergängen (z.B. abgesetzte Welle) kann es an den Stirnflächen bei Gleichfeldmagnetisierung zur Polbildung und somit zu Prüfmittelansammlungen kommen, s. Bild 14. Hierdurch wird der Kontrast an den Stirnflächen verschlechtert. Dieser Effekt ist bei Wechselfeldmagnetisierung deutlich geringer.

Gleichfeldmagnetisierung Wechselfeldmagnetisierung



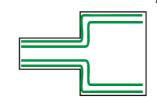
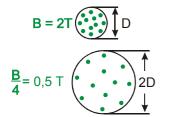


Bild 14: Feldlinien an einem wechselnden Querschnitt bei Gleichfeld- (links) und Wechselfeldmagnetisierung (rechts).

Darüber hinaus ist das Wechselfeld bei Querschnittswechsel homogener als das Gleichfeld. Da sich die Feldlinien beim Gleichfeld über den gesamten Querschnitt verteilen, ändert sich die Magnetisierung mit ΔD^2 , wogegen bei einem Wechselfeld die Magnetisierung sich proportional zum Umfang und somit zu ΔD ändert. Das bedeutet, während für die Wechselfeldmagnetisierung der Durchmesserbereich einer abgesetzten Welle sich durchaus im empfohlenen Bereich von 2 kA/m bis 6 kA/m bewegen kann, ist dieser Durchmesserbereich für die Gleichfeldmagnetisierung möglicherweise zu groß, s. Bild 15.



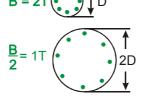


Bild 15: Homogeneres Magnetfeld bei einem Querschnittswechsel für das Wechselfeld (rechts); Gleichfeld (links).

6.3 Induktionsdurchflutung

Für Bauteile mit einem Loch (z.B. Ringe, Rohrabschnitte) besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer berührungslosen Magnetisierung. Eine dieser berührungslosen Magnetisierungen ist die Induktionsdurchflutung, s. Bild 16. Über einen durch das Loch gesteckten magnetischen Leiter (Dorn) wird in dem Bauteil ein starker Kreisstrom induziert (Transformatorprinzip), welcher wiederum das Bauteil magnetisiert. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es berührungsfrei einen Strom induziert (keine Brandstellen), die Prüfung an allen Bauteiloberflächen erfolgt und diese Magnetisierung keine

Prüfen in der Schweißtechnik



Polstellen hervorbringt. Allerdings kann die Induktionsdurchflutung nur mit einem Wechselfeld erfolgen. Bei dem Einsatz von Gleichfeldern kann diese vorteilhafte Magnetisierung nicht durchgeführt werden. Auch die kombinierte Prüfung mit zwei Feldrichtungen ist bei Verwendung von Wechselfeldern anwendbar.

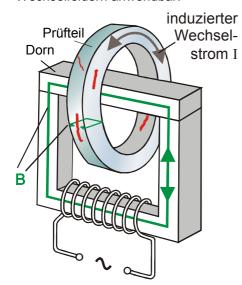


Bild 16: Bei der Induktionsdurchflutung wird ein magnetischer Leiter (Dorn) durch die Öffnung im Bauteil gesteckt. Das durch diesen Dorn geleitete magnetische Wechselfeld induziert nach dem Transformatorprinzip einen starken Strom im Bauteil und dieser wiederum magnetisiert das Bauteil auf.

7 Literatur

- [1] V. Deutsch, M. Vogt, M. Platte, V. Schuster: ZfP Kompakt und Verständlich Band 3: Die Magnetpulver-Rissprüfung, Castell Verlag, Wuppertal, 1999.
- [2] V. Deutsch, W. Morgner, M. Vogt: Magnetpulver-Rissprüfung Grundlagen und Praxis, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [3] DIN EN ISO 9934-1: Zerstörungsfreie Prüfung Magnetpulverprüfung Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Deutsches Institut für Normung, 2002.
- [4] DIN EN ISO 9934-2: Zerstörungsfreie Prüfung Magnetpulverprüfung Teil 2: Prüfmittel, Deutsches Institut für Normung, 2003.
- [5] Deutsches Patent Nr. 100 39 725, Verfahren und Vorrichtung zur automatischen Prüfmittel-Kontrolle bei der Magnetpulver-Rissprüfung, September 2005.
- [6] DIN EN ISO 3059: "Zerstörungsfreie Prüfung: Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung, Betrachtungsbedingungen", 2002
- [7] DGZfP-Richtlinie EM 6: "Merkblatt über Betrachtungsplätze für die fluoreszierende Prüfung mit dem Magnetpulver- und Eindringverfahren Ausrüstung und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten mit UV-Strahlung", 2002
- [8] V. Schuster, F. Bartholomai, P. Müller, W. A. K. Deutsch: "Automatische Überwachung der Anzeigefähigkeit des Magnetpulver-Prüfmittels mit FLUXA-Control", DGZfP Jahrestagung 2007 vom 14.5. bis 16.5.2007 in Fürth
- [9] W. Weber, W. A. K. Deutsch, V. Schuster, F. Bartholomai: "Konzepte zur Reduzierung der Taktzeit bei der Magnetpulver-Rissprüfung", Vortrag auf der Zwick Messe, Oktober 2004
- [10] W. A. K. Deutsch, R. Wagner: "Zeitgemäßer Umgang mit MT und PT Prüfmitteln Auswahl und Anwendungstechnik", 2004