



Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Eindringprüfung

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Eindringprüfung

Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Eindringprüfung

Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung
und Prüfpraxis

1. Auflage
mit 122 Bildern und 35 Tabellen

 Springer Vieweg

Autor

Prof. Dr.-Ing. **Karlheinz Schiebold**

Vormals Gründer und Gesellschafter der
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Mülheim an der Ruhr,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Magdeburg,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Bremen,
LVQ-WP Prüflabor GmbH, Magdeburg,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH & Co.KG, Magdeburg.

ISBN 978-3-662-43808-4

ISBN 978-3-662-43809-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-43809-1

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 2014

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.springer-vieweg.de



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

Vorwort

Die Fachliteratur für die Eindringprüfung weist nach dem grundlegenden Werk von Mc Master [1.1] gegenwärtig noch kein explizites Lehrbuch auf. Deutsch und Wagner [1.2] haben 1999 die Prüfung auf Oberflächenrisse nach dem Eindringverfahren in komprimierter Form beschrieben und weiterhin wird die Eindringprüfung 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 Eindringprüfung 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 der Autor dieses Buches 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 und später als Abteilungsleiter für die Zerstörungsfreie (ZfP) und Zerstörende (ZP) Werkstoffprüfung. Aufgrund der im SKET doch außerordentlich umfassend vorhandenen Metallurgie mit einem Stahlwerk, 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 Be-

deutung 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 Metallurgie.

Aus diesen Erfahrungswerten konnte er nach der Wende in seinem zweiten Arbeitsleben im aus der Lehr- und Versuchsgesellschaft für Qualität (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 und in der ZP in 9 Prüfverfahren entstanden und 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 Eindringprüfung, ergänzt durch ausgewählte Inhalte von Beiträgen auf den Jahrestagungen der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, bildete 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 Eindringprüfung sein kann.

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

Allen am Entstehen des Buches Beteiligten sei an dieser Stelle gedankt. Besonderer Dank gilt meiner lieben Frau Angelika 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, Sommer 2014

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schiebold



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 Das Prinzip der Eindringprüfung	3
1.2 Eindringfähigkeit	5
1.2.1 Oberflächenspannung	5
1.2.2 Benetzungsfähigkeit	5
1.2.3 Kapillarwirkung	7
1.3 Eindringgeschwindigkeit	9
1.3.1 Viskosität als innere Reibung	10
1.3.2 Viskosität und Zusammensetzung des Eindringmittels	11
1.3.3 Viskosität und Temperatur	12
1.3.4 Viskosität und Flammpunkt	13
1.3.5 Dimensionsabhängige Viskosität	13
1.3.6 Dampfdruck	13
1.3.7 Beständigkeit	14
1.4 Theorie des Emulgierens	14
1.4.1 Lösemittel	14
1.4.2 Emulsion und Lösung	15
2 Verfahrensablauf	19
2.1 Vorreinigung	19
2.1.1 Oberflächenvorbereitung	19
2.1.2 Methoden der Vorreinigung	20
2.1.2.1 Mechanische Vorreinigung	20
2.1.2.2 Chemisch-physikalische Vorreinigung	21
2.2 Eindringvorgang	24
2.3 Zwischenreinigung	25
2.4 Entwicklung	28
2.4.1 Wirkung des Entwicklers	28
2.4.2 Trocknung vor dem Aufbringen des Entwicklers	29

2.4.3	Aufbringen von Entwickler	30
2.4.4	Trockenentwickler	30
2.4.5	Nassentwickler	31
2.4.6	Entwicklungsdauer	31
2.5	Auswertung	31
2.5.1	Zeitpunkt der Auswertung	31
2.5.2	Auswertungsbedingungen	33
2.5.3	Anforderungen an den Prüfer	34
2.6	Endreinigung	35
3	Prüfmittelsysteme	39
3.1	Prüfmittel	39
3.1.1	Eindringmittel	39
3.1.2	Reiniger	44
3.1.3	Emulgatoren	46
3.1.4	Entwickler	46
3.2	Auswahl der Prüfmittelsysteme	47
3.2.1	Werkstoff und Erzeugnisform	47
3.2.2	Anzahl der Prüfstücke und Arbeitsplätze	49
3.2.3	Ungänzennachweis	49
4	Prüfgeräte und Zubehör	51
4.1	Stationäre Prüfanlagen	51
4.2	Mobile-Prüfeinrichtungen	56
4.3	Zubehör	57
5	Prüfsystem- und Verfahrenskontrollen	61
5.1	Prüfsystemkontrollen	61
5.1.1	Chemische Zusammensetzung der Prüfmittel	61
5.1.2	Kontrollkörper	65
5.1.2.1	Kontrollkörper nach DIN 54152-3	65
5.1.2.2	Kontrollkörper nach DIN EN 571	67
5.1.2.3	Kontrollkörper nach DIN EN ISO 3452-3	69
5.1.2.4	Kontrollkörper nach JIS Z 2343	70
5.2	Verfahrenskontrollen	72
5.2.1	Vergleichsmuster aus der Fertigung	72
5.2.2	Kontrollkörper zur Untersuchung der Prüftemperatur nach ASME-Code	72
5.2.3	Kontrolle der Auswertungsbedingungen	74

6	Ungängen im Fertigungsprozess und bei der Betriebsbeanspruchung	77
6.1	Ungängen beim Gießen	77
6.1.1	Gießen als Herstellungsverfahren	77
6.1.2	Technische Gießverfahren	80
6.1.2.1	Blockguss	80
6.1.2.2	Strangguss	81
6.1.2.3	Sandguss	81
6.1.2.4	Schleuderguss	81
6.1.3	Gussfehler	82
6.1.3.1	Lunker	82
6.1.3.2	Warmrisse	84
6.1.3.3	Poren	85
6.1.3.4	Sand- und Schlackeneinschlüsse	85
6.1.3.5	Kernstützen	85
6.2	Ungängen beim Umformen	86
6.2.1	Ungängen beim Walzen	86
6.2.2	Ungängen beim Schmieden	87
6.3	Ungängen in plattierten Bauteilen	90
6.4	Ungängen bei der Wärmebehandlung	92
6.5	Ungängen beim Schweißen	94
6.5.1	Schweißverfahren	94
6.5.1.1	Lichtbogenhandschweißen	94
6.5.1.2	Unterpulverschweißen	95
6.5.1.3	Metallschutzgasschweißen (MIG/MAG)	96
6.5.1.4	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	96
6.5.2	Stoß- und Fugenformen	97
6.5.3	Der Aufbau von Schweißnähten	98
6.5.4	Schweißnahtfehler	103
6.5.4.1	Flächenhafte Fehler	103
6.5.4.2	Volumenhafte Fehler	104
6.6	Ungängen bei der mechanischen Bearbeitung	105
6.7	Ungängen durch Betriebsbeanspruchung	105
7	Durchführung von Eindringprüfungen	107
7.1	Verfahrensübersichten	107
7.1.1	Einteilung der Prüfmittelsysteme nach DIN EN ISO 3452-1	107
7.1.2	Einteilung der Prüfmittelsysteme nach ASME-Code, Sect.V, Artikel 6	108
7.2	Verfahrensauswahl	109
7.2.1	Auswahl nach dem Regelwerk	109
7.2.2	Auswahl nach dem Prüfstück	109
7.2.3	Auswahl nach dem Prüfort	110

7.2.4	Auswahl nach den Prüfkosten	111
7.3	Prüfablauf	111
7.3.1	Prüfung nach internationalen Normen und Regelwerken	111
7.3.1.1	Prüfung von Schmiedestücken nach DIN EN 10228-2	111
7.3.1.2	Prüfung von Gussstücken nach DIN EN 1371	114
7.3.1.3	Prüfung von Schweißverbindungen nach DIN EN ISO 23277	114
7.3.1.4	Prüfung von Rohren nach DIN EN ISO 10893-4	116
7.3.2	Prüfung nach ASME-Code	118
7.3.2.1	Einbindung der Eindringprüfung im ASME-Code	118
7.3.2.2	Prüftechnische Besonderheiten des ASME-Codes	118
8	Anzeigenbewertung	127
8.1	Klassifizierung der Anzeigen	127
8.2	Beurteilung der Anzeigen	131
8.2.1	Beurteilung der Anzeigen auf nominalem Niveau	131
8.2.2	Beurteilung der Anzeigen auf ordinalem Niveau	131
8.2.3	Beurteilung der Anzeigen auf metrischem Niveau	135
9	Grenzen der Eindringprüfung	139
9.1	Grenzen der Anzeigefähigkeit	140
9.1.1	Einfluss der Prüftemperatur	140
9.1.2	Einfluss von Oberflächenzustand und -behandlung	141
9.1.3	Einfluss des Kontaktwinkelverhältnisses	143
9.2	Verfahrensbedingte Grenzen	143
9.2.1	Vor- und Nachteile der Eindringmittelprüfung	143
9.2.2	Prüfung von Glas und Kunststoffen	144
9.2.3	Prüfung von Keramik	144
10	Normen, Regelwerke, Verfahrensbeschreibungen, Prüfanweisungen, Protokollierung und Dokumentation	147
10.1	Normen, Regelwerke	147
10.2	Verfahrensbeschreibungen	150
10.3	Prüfanweisungen, Spezifikationen	157
10.4	Protokollierung	162
10.4.1	Erläuterung protokollpflichtiger Angaben	162
10.4.2	Prüfprotokolle	162
10.4.3	Beurteilung und Entscheidungsfindung	163
10.5	Dokumentation	163
10.5.1	Visuelle Auswertung	164
10.5.2	Bildverarbeitung	167
10.5.3	Fixierung am Prüfobjekt	168

10.5.4	Fotographische Aufnahme	168
10.5.5	Abdruckverfahren	169
11	Arbeits- und Umweltschutz	171
11.1	Anforderungen an die Arbeitsplätze	171
11.1.1	Gesetze und Verordnungen	171
11.1.2	Schutzmaßnahmen	171
11.1.2.1	Vorreinigung	174
11.1.2.2	Eindringvorgang	174
11.1.2.3	Zwischenreinigung	175
11.1.2.4	Entwicklungsvorgang	176
11.1.2.5	Inspektion	176
11.1.3	Verantwortung des Anwenders	176
11.2	Anforderungen an die Prüfmittel	177
11.2.1	Allgemeine technische Angaben	177
11.2.2	Sicherheitsdatenblätter	178
11.2.3	Lagerung	178
11.2.4	Entsorgung	178
12	Sachwortverzeichnis	183

Einführung

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

- Radiografische Prüfung RT (Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlen)
- Akustische Prüfung UT (Ultraschall, Schall, Stoß, Schwingung)
- Magnetische und elektrische Prüfung MT (magnetischer Streufluss, Haftkraft, elektrisches Potenzial)
- Sichtprüfung VT (visuelle Prüfung, optische Prüfung, Endoskopie)
- Wirbelstromprüfung ET (Elektromagnetische Prüfung)

Als *zerstörungsfreies* Prüfverfahren (ZfP, Nondestructive Testing NDT) wird hier in Anlehnung an DIN EN ISO 17025 nach [0.1] definiert:

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, auch ohne detaillierte Lektüre der Normen diese in ihrer täglichen Arbeit umsetzen zu können. Deshalb sind entsprechende Erläuterungen zu den Texten, Tabellen und Bildern in den zitierten 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

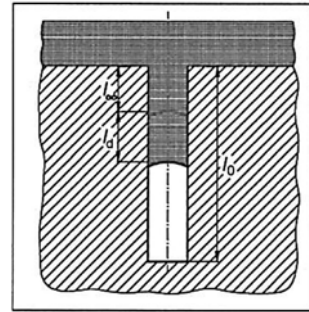
1.1 Das Prinzip der Eindringprüfung

Der Nachweis von Oberflächenfehlern gehört zu den ältesten zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zunächst kannte man die Kalkmilchprobe. Dabei werden die zu prüfenden Werkstücke etwa 30 Minuten lang in Öl gekocht und anschließend schnell und gründlich getrocknet. Danach taucht man die Werkstücke in eine Aufschlämmung von Schlammkreide in Spiritus oder von Talkum in Tetrachlorkohlenstoff. Nach dem Herausnehmen verdunsteten die Flüssigkeiten schnell, während auf der Oberfläche eine gleichmäßig dünne weiße Schicht haften bleibt. Nach kurzer Zeit tritt das in die Oberflächenöffnungen eingedrungene Öl heraus und färbt die weiße Schicht braun. Die Methode wird heute wegen ihrer Umständlichkeit nicht mehr angewendet. Das erste Patent über die Eindringprüfung wurde bereits 1933 im Gründungsjahr der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung DGZfP veröffentlicht [1.1].

Das Eindringverfahren gilt in der Anwendung als sehr einfach. Die Fachleute sind sich jedoch im Klaren, dass es sich bei diesem Verfahren um komplexe physikalische Vorgänge handelt und dass die zuverlässige Prüfung in vielen Fällen ein hohes Maß an Kenntnis der Zusammenhänge und Sorgfalt bei der Durchführung verlangt [1.2].

Das Verfahren beruht auf der Kapillarwirkung, d.h. auf dem Ansaugen von Flüssigkeiten in Körpern, die enge Hohlräume enthalten. Man kann diese Wirkung selbst beobachten, wenn man einen Trinkhalm in ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß taucht. Der Flüssigkeitsspiegel steigt im Trinkhalm ein ganzes Stück höher als im Glasgefäß. So ist auch die „aufsaugende“ Wirkung von Löschpapier oder Lampendochten auf die Kapillarwirkung zurückzuführen. Der Füllvorgang kann unterschieden werden durch die Kapillarfüllung und die Diffusionsfüllung. Bei der Kapillarfüllung erfolgt die Füllung durch die Kapillarkräfte. Die Luft wird im Inneren der Kapillare zusammengepresst und bis zur Tiefe l_{∞} gefüllt (Abb. 1.1).

Der Kapillarendruck p_c entspricht dem atmosphärischen Druck p_a . Aus diesen Beziehungen lassen sich Formeln zur Berechnung von l_{∞} ableiten. Man unterscheidet parallele,

Abb. 1.1 Kapillarenfüllung [1.2]

zylindrische und nichtparallele Kapillarwände. Für eine zylindrische Kapillarwand gilt beispielsweise $l_\infty = l_0 \times \Psi$ [1.2], mit

$$\Psi = p_c / (p_a + p_c), p_c = 2 \sigma (\cos \Theta) / R, \sigma = \text{Oberflächenspannung}$$

$$\Theta = \text{Benetzungswinkel, } R \text{ und } l = \text{Radius und Länge der Kapillare.}$$

Bei der Diffusionsfüllung löst sich das in der Kapillare eingeschlossene Gas in der Flüssigkeit und diffundiert nach außen, so dass die Flüssigkeitssäule ansteigt. Die zeitabhängige Fülltiefe wird nach folgender Gleichung berechnet [1.1]:

$$L_d = \frac{2 \Psi \times k_h \sqrt{DRT}}{M \sqrt{\pi}} \times \sqrt{t} \quad \text{mit}$$

M = Mol, h = Henry'sche Lösungskonstante, R = universelle Gaskonstante
 T = Zeit, D = Diffusionskoeffizient: Gas/Flüssigkeit.

Die Eindringprüfung ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem sich Ungenzen sichtbar machen lassen, die zur Bauteiloberfläche hin geöffnet sind. Geeignete flüssige Stoffe (Eindringflüssigkeiten) haben die Eigenschaft, entsprechend gereinigte Oberflächen zu benetzen (Abb. 1.2A) und in enge Spalten einzudringen (Abb. 1.2B).

Diesen Eindringflüssigkeiten werden gut sichtbare Farben oder fluoreszierende Stoffe beigemischt. Entfernt man das überschüssige Mittel so von der Oberfläche (Zwischenreinigung – Abb. 1.2C), dass diese sauber ist, das Mittel aber in den Öffnungen verbleibt, so kann man im folgenden Verfahrensschritt der Entwicklung (Abb. 1.2D) das Mittel durch eine kreideähnliche Substanz mittels Löschblatteffekt wieder herausholen. Eine anschließende Auswertung (Abb. 1.2E) mit dem bloßen Auge des Betrachters lässt eine zweidimensionale, vergrößerte Abbildung der Öffnung des engen Spaltes im meist weißen Entwickler erkennen. Zum Abschluss wird die Bauteiloberfläche gereinigt (Abb. 1.2F).

1.2 Eindringfähigkeit

Die Eindringfähigkeit eines Eindringmittels kann im Wesentlichen auf zwei physikalische Eigenschaften zurückgeführt werden: die Kohäsion und die Adhäsion. Als messbare Größen werden diesen zugeordnet die Oberflächenspannung und die Benetzungsfähigkeit bzw. der Kontaktwinkel.

1.2.1 Oberflächenspannung

Jede Flüssigkeit besteht aus kleinen Teilchen (Molekülen), welche Anziehungskräfte aufeinander ausüben. Durch diese gegenseitig aufeinander ausgeübten Kräfte bekommt die Flüssigkeit einen begrenzten Zusammenhalt („Kohäsionskräfte“). An der Flüssigkeitsoberfläche können diese Anziehungskräfte nur nach innen wirken; d.h. die an dieser Grenzfläche z.B. frei zur Luft liegenden Teilchen werden von den anderen nach innen gezogen, während die Luftteilchen selbst praktisch keine Anziehungskräfte auf die Flüssigkeitsteilchen im Oberflächenbereich ausüben (Abb. 1.3). Will man also Flüssigkeitsteilchen in die Oberflächenschicht bringen, z.B. durch Vergrößerung der Oberfläche, so muss Arbeit verrichtet werden.

Auf dem unterschiedlichen Stärkeverhältnis zwischen Kohäsion und Adhäsion beruhen also die in engen Flüssigkeitsröhren beobachteten Kapillarerscheinungen, wie Kapillaratraktion und -depression. Bringt man zum Beispiel einen Metallring auf eine Wasseroberfläche und zieht ihn ganz vorsichtig in die Höhe, so bleibt das Wasser zunächst wulstartig an ihm hängen und man verspürt eine geringe, aber doch messbare Kraftwirkung (Abb. 1.4). Zieht man ihn weiter in die Höhe, so zerreißt der Wulst in kleine Tröpfchen.

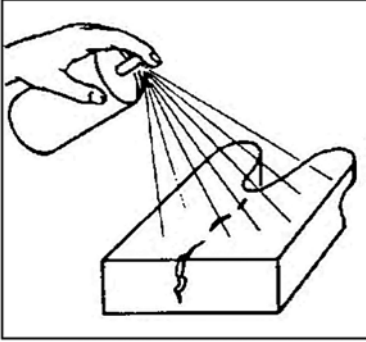
Die spezifische Kraft, die am Bügel wirkt, bevor der Flüssigkeitsfilm zerreißt, nennt man Oberflächenspannung. Die Bildung kleiner Tröpfchen nach dem Zerreißen des Films erklärt sich dadurch, dass der inneren Kraftwirkung keine äußere mehr entgegengesetzt ist; die Flüssigkeit also ihre Oberfläche so klein wie möglich zu halten versucht (Kugeloberfläche).

1.2.2 Benetzungsfähigkeit

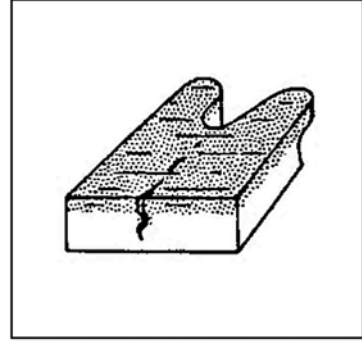
Bei der Eindringprüfung spielt aber nicht nur die Grenzfläche Flüssigkeit/Luft eine Rolle, sondern vor allem die Grenzfläche Feststoff (Metall)/Flüssigkeit (Eindringmittel). **So wird die Benetzung beeinflusst durch die Oberflächenspannung des Eindringmittels und der Prüfstückoberfläche sowie durch die Grenzflächenspannung zwischen beiden.**

Ein Feststoff kann von der Flüssigkeit mehr oder minder gut benetzt werden. Wenn die Flüssigkeit gut benetzt wird, so bildet sie einen dünnen Film auf der Oberfläche des Feststoffes. Bei schlechter Benetzung hingegen sammelt sich die Flüssigkeit in Form von

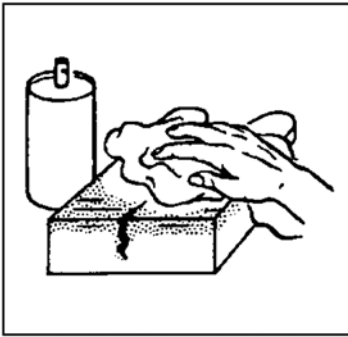
A **Aufbringen des
Eindringmittels**



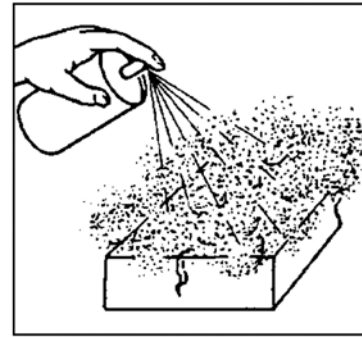
B **Eindringvorgang**



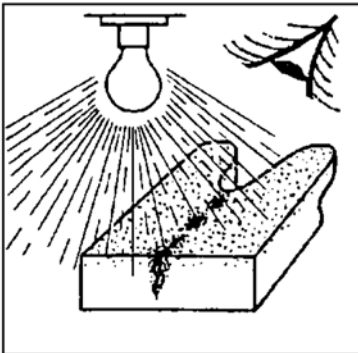
C **Zwischenreinigung**



D **Aufbringen des
Entwicklers**



E **Auswertung**



F **Endreinigung**

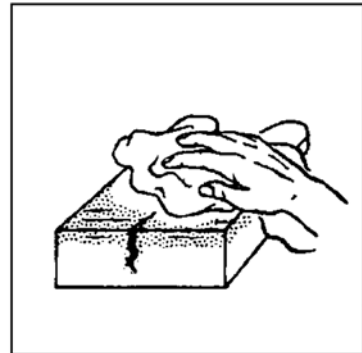


Abb. 1.2 Prinzipieller Verfahrensablauf bei der Eindringprüfung [1.1]

Abb. 1.3 Anziehungskräfte für Teilchen im Innern und an der Oberfläche einer Flüssigkeit [1.12]

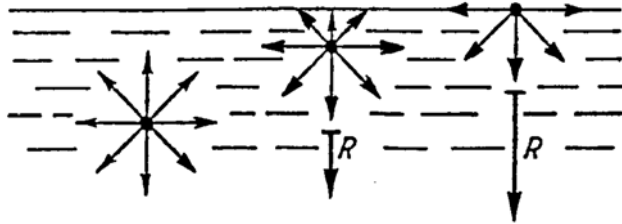
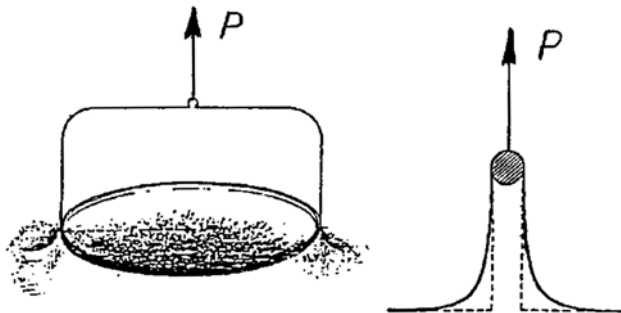


Abb. 1.4 Messung der Oberflächenspannung mittels Metallbügel auf einer Wasseroberfläche [1.12]



Tropfen auf der Oberfläche. Dies hängt aber davon ab, wie stark die Flüssigkeit von der Feststoffoberfläche angezogen wird (Adhäsionskraft), d.h. ob die Teilchen der Feststoffoberfläche auf die Flüssigkeitsteilchen (Adhäsion) oder die Flüssigkeitsteilchen untereinander (Kohäsion) stärkere Kräfte aufeinander ausüben. Schlecht benetzende Flüssigkeiten haben einen großen „Kontakt-Winkel“ (Abb. 1.5) mit der jeweiligen Feststoffoberfläche, bilden also Tropfen. Gut benetzende Flüssigkeiten haben einen kleinen „Kontakt-Winkel“ mit der Flüssigkeit, bilden demnach einen Film. Ein gutes Benetzungsvermögen ist eine wichtige Voraussetzung für die Eindringprüfung. Wenn nämlich das Eindringmittel auf das Prüfstück aufgetragen wird, so muss es einen Film bilden, um alle zu prüfenden Stellen der Oberfläche sicher zu erreichen.

1.2.3 Kapillarwirkung

Das Eindringvermögen in enge Spalten (z.B. Risse) wird in der Physik am besten durch die **Kapillarwirkung** beschrieben. Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür zeigt Abb. 1.6. Eine Kapillare ist ein Röhrchen mit sehr geringem Durchmesser (z.B. 1 mm oder kleiner).

Abb. 1.5 Darstellung des Kontaktwinkels bei der Benetzung [1.12]

