

Erst kürzlich wurde ein Rißtiefenmeßgerät nach dem Potentialsondenverfahren vorgestellt, mit dem die Ausdehnung des Risses im Werkstück längs seines natürlichen Verlaufes gemessen wird. Wenn die Risse sehr schräg zur Oberfläche verlaufen, kann dieser Wert zu einer Fehleinschätzung über das erforderliche Ausmaß der Nacharbeit führen. Aus diesem Grund wurde das Gerät mit einer zusätzlichen Meßfunktion zur Feststellung schräg verlaufender Risse und zur Bestimmung des Neigungswinkels des Risses gegenüber der Werkstoffoberfläche ausgestattet.



Rißtiefenmeßgerät in Taschenformat mit Sonde, Kalibrierstab und Anschlußmöglichkeit an einen PC

Philipp Ettel,
Volker Deutsch,
Michael Platte, Wuppertal

Bestimmung der Schräglage von Rissen bei der Rißtiefenmessung

Determination of Crack Inclination for Depth Measurement. A pocket size digital crack depth gage based on the potential drop method was presented earlier, which monitors the crack size along its growth direction. This value may yield overestimation of necessary repair in case of crack orientations not perpendicular to the surface.

Therefore, an additional function was introduced to the new version of this equipment to determine the angle of inclination of the crack relative to the surface.

This function allows to measure the projection of the crack depth perpendicular to the surface.

Stand der Technik bei der Rißtiefenmessung

Geräte zur Rißtiefenmessung nach dem Potentialsondenverfahren werden schon lange als Ergänzung zur Magnetpulverrißprüfung an ferromagnetischen Werkstoffen eingesetzt [1, 2]. Durch Feststellung der Rißtiefe soll entschieden werden, ob eine Nacharbeit technisch möglich und – wenn ja – wirtschaftlich sinnvoll ist. Gemessen wird dabei der von der Rißtiefe abhängige Spannungsabfall über dem Riß, wenn die Umgebung des Risses senkrecht zu seiner Orientierung mit einem konstanten Strom durchflutet wird. Entweder werden dazu Vierpolsonden eingesetzt, deren beiden äußeren Pole den Strom in das Werkstück leiten, während die an den beiden mittleren Polen abfallende Spannung gemessen wird (Bild 1). Oder aber der Strom wird über externe Strompole – etwa zwei Haftmagneten, die in größeren Abständen (10 cm oder mehr) links und rechts des Risses

plaziert werden – zugeführt und die Spannung mit einer zweipoligen Sonde über dem Riß abgegriffen.

Unterschieden werden Gleichstrom- und Wechselstromgeräte, je nachdem ob sie als Meßstrom Gleich- oder Wechselstrom verwenden. Gleichstrom hat den Vorteil, daß neben der Länge des Strompfades lediglich die elektrische Leitfähigkeit des Werkstücks das Meßergebnis bestimmt. Es muß jedoch mit sehr hohen Stromstärken gearbeitet werden. Diese sind erforderlich, um eine so hinreichend hohe Meßspannung zu erhalten, daß eine stabile Messung und zuverlässige Auswertung ermöglicht werden. Insbesondere bei sehr gut leitfähigen Nichteisenmetallen (beispielsweise Cu, Al, Messing) wird der benötigte Strom nahezu unpraktikabel hoch. Außerdem läuft man Gefahr, das Werkstück bei zu hoher Stromdichte lokal zu erwärmen, was eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit zur Folge hat und zu Fehlmessungen führt. Wegen des entsprechend hohen Stromverbrauchs sind solche

Geräte entweder nur am Netz zu betreiben oder fallen bei etwaiger Auslegung für einen Batteriebetrieb sehr voluminös aus.

Bei Wechselstrom wird der Strom durch den Skin-Effekt bekanntlich an die Werkstückoberfläche gedrängt, und zwar um so mehr, je höher die Frequenz, der spezifische elektrische Widerstand und die relative Permeabilität des Werkstücks sind. Tabelle 1 zeigt die Skin-Eindringtiefe (Tiefe, nach der die Stromdichte auf 36% des maximalen Wertes an der Oberfläche abgesunken ist) für verschiedene Werkstoffe bei einer für die Rißtiefenmessung typischen Frequenz von 1500 Hz und in einer universellen auf die Frequenz normierten Form. Durch Wirkung des Skin-Effektes steigt einerseits der spezifische Oberflächenwiderstand, andererseits wird gleichzeitig auch der effektive Strompfad gegenüber Gleichstrom verlängert, da der an die Oberfläche gedrängte Strom jetzt mehr dem Rißverlauf folgt. Daher stellen sich schon bei geringen Stromstärken hinreichend hohe Meßspannungen über den Rissen ein, so daß kleine mikroprozessorgestützte und batteriebetriebene Lösungen grundsätzlich möglich werden.

Erst kürzlich wurde ein batteriebetriebenes, handliches Kleingerät zur Rißtiefenmessung mit gepulstem Wechselstrom von der Firma Karl Deutsch, Wuppertal, vorgestellt (Titelbild), das durch verbesserte Meßtechnik, neuentwickelte Sonden und komfortable Kalibrierfunktionen eine erheblich höhere Meßgenauigkeit als bisher besitzt [3]. Ferner bietet die intelligente Auswertung weitgehenden Schutz vor Fehlmessungen.

Grundsätzlich wird mit dem Potentialsondenverfahren mit vierpoligen Sonden bei schräg verlaufenden Rissen nicht die von der Oberfläche aus vertikal nach unten gemessene Projektion des Risses ermittelt, sondern die *Rißtiefe*. Damit ist die Ausdehnung des Risses im Werkstück längs seines natürlichen Verlaufs gemeint. In der Praxis treten verschiedene Rißarten auf. Zum einen die meist nahe-

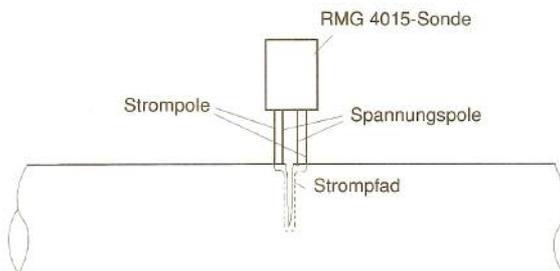


Bild 2. Prinzip der Rißtiefenmessung nach dem Potentialsondenverfahren

zu senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Risse, bei denen Rißtiefe und Projektion der Rißtiefe senkrecht zur Werkstückoberfläche praktisch identisch sind. Zum anderen treten insbesondere bei der Herstellung von Gußteilen durchaus auch Risse auf, die gegenüber der senkrechten Lage bis zu 70° geneigt sind. Den Extremfall bilden sogenannte Schalenrisse mit einer Neigung von 80° und mehr bis hin zum nahezu oberflächenparallelen Verlauf. Solche Risse entstehen zum Beispiel an Walzen unter Last. Bei sehr schräg verlaufenden Rissen kann die ermittelte Rißtiefe ohne Kenntnis des Neigungswinkels in der Überlegung, ob eine Nacharbeit technisch möglich und vom Aufwand her wirtschaftlich sinnvoll ist, zu einer völligen Fehleinschätzung führen. Daher wurde das Gerät in der jüngsten Entwicklung mit einer zusätzlichen Meßfunktion zur Feststellung schräg verlaufender Risse ausgestattet, die eine genaue Bestimmung des Neigungswinkels des Risses gegenüber der Werkstoffoberfläche ermöglicht.

Meßverfahren zur Ermittlung schräger Risse

Die Bestimmung der Schräglage eines Risses (Winkel α) ist grundsätzlich durch eine zweifache Messung mit einer Spezialsonde möglich [1, 2]. Diese besitzt einen externen zweiten Strompol, mit dem der Strom in möglichst großer Ent-

fernung vom Riß in das Werkstück eingeleitet werden kann. Die zweite Messung unterscheidet sich von der ersten, indem die Anordnung Sonde/externer Strompol um 180° gedreht wird (Bild 3). Bei Gleichstrom folgt der Strom dem kürzest möglichen Weg s zwischen den Strompolen. Daher sind die Stromwege in den beiden Messungen A und B verschieden, so daß an den Spannungspolen unterschiedliche Spannungen U_A und U_B abgegriffen werden. Dasselbe gilt auch für Wechselstrom nicht zu hoher Frequenz, da die durch den Skin-Effekt bedingte Eindringtiefe δ nur mit $1/\sqrt{f}$ (f = Frequenz) abnimmt und bei nicht zu hohen Frequenzen noch im Bereich weniger Millimeter liegt.

Es soll nun zunächst untersucht werden, inwieweit bei fester Frequenz die Unterschiede der Meßspannungen als eindeutiges und genaues Maß zur Bestimmung des Winkels α herangezogen werden können. Zunächst wurden die relativen und auf U_A normierten Meßspannungen

$$U = (U_A - U_B)/U_A \quad (1)$$

bei 30°, 45°, 60° und 75° Schräglage der Risse auf den unterschiedlichen ferromagnetischen Materialien CK45, ST37, ST52 und Grauguß sowie auf unmagnetischem Stahl und Nichteisenmetallen gemessen. Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen der relativen Meßgröße U und dem Winkel α für diese Materialien bei ein und derselben Frequenz f_1 .

Die Meßkurven für magnetische Werkstoffe liegen so dicht zusammen, daß für sie der Zusammenhang innerhalb eines gewissen Toleranzbandes in guter Näherung als werkstoffunabhängig betrachtet werden kann. Bei Werkstoffen, die sich aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen elektrischen und magnetischen Eigenschaften in ihren Eindringtiefen δ deutlich voneinander unterscheiden, also bei nichtmagnetischem Edelstahl und bei Nichteisenmetallen (beispielsweise Aluminium), ändert sich der Verlauf der Meßkurven in charakteristischer Weise.

Tabelle 1. Skin-Eindringtiefen δ verschiedener Materialien bei 1500 Hz und universell durch Normierung auf die Frequenz f (Die bei der Frequenz f vorliegende Eindringtiefe in mm ergibt sich, indem der Tabellenwert durch \sqrt{f} dividiert wird, wobei f in Hertz einzusetzen ist.)

Material	Skin-Eindringtiefe δ [mm] (bei $f = 1500$ Hz)	Skin-Eindringtiefe δ [mm] $\cdot \sqrt{f$ [Hz]
Magnetisierbare Stähle, Guß	0.6 – 0.9	24.3 – 35.6
Nicht magnetisierbare Stähle	10.8 – 12.4	420 – 480
Edelstahl, rostfrei (1.4301)	11.1	430
Messing	2.9	112
Aluminium	3.4	133

Daher kann der Winkel α in einem mikroprozessorgestützten Gerät direkt über eine in Tabellenform abgespeicherte Kennlinie der entsprechenden Werkstoffgruppe ermittelt werden. Der Kosinus dieses Winkels entspricht dem Faktor, mit dem die absolute Rißtiefe multipliziert werden muß, um auf den vertikalen Projektionsabstand P (Bild 3) zu kommen.

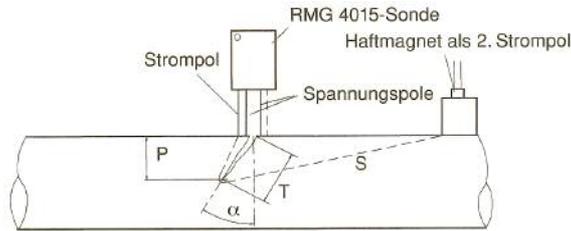
Dieses Verfahren unterliegt einer gewissen Meßunsicherheit. Sie setzt sich hauptsächlich aus zwei Anteilen zusammen:

- einer Abweichung vom angenommenen Verlauf der Kennlinie (Bild 4), wenn die tatsächlichen elektrischen und magnetischen Eigenschaften von denen des zugrundegelegten Materials abweichen.
- einer Streubreite durch natürliche Meßwertschwankungen aufgrund der manuellen Handhabung der Sonden beim Aufsetzen auf das Werkstück. Diese fallen hauptsächlich bei kleinen Winkeln ($\alpha < 45^\circ$) ins Gewicht, da dort die relative Meßgröße U gering ist (Bild 4). Um in einem möglichst großen Winkelbereich optimal auswertbare Meßwertunterschiede zu erhalten, darf die Frequenz des Stromes nur so hoch gewählt werden, daß durch Wirkung des Skin-Effektes einerseits zwar noch ein möglichst hoher Oberflächenwiderstand erreicht wird, andererseits aber die Eindringtiefe nicht so gering wird, daß der Effekt des unsymmetrischen Stromverlaufs in den Meßanordnungen A und B (Bild 3) verloren geht. Daher empfiehlt es sich, zur Messung der Rißschräglage mit einer niedrigeren Frequenz zu arbeiten als bei der Messung der Rißtiefe.

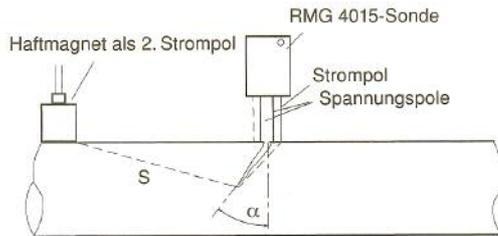
Untersuchungen bei einer für diese Messung optimierten Frequenz ergaben für die Bestimmung des Winkels α eine gute Reproduzierbarkeit mit einer maximalen Meßunsicherheit von $10\% \pm 5^\circ$ oberhalb 25° bei allen gängigen Werkstoffen. Aufgrund des geringeren Meßeffektes nimmt die Meßunsicherheit mit abnehmender Rißtiefe naturgemäß zu. Dasselbe gilt für kleine Winkel unterhalb von 25° . Hier spielt dies aber keine Rolle mehr, da sich aufgrund des flachen Verlaufes von $\cos \alpha$ Rißtiefe und Ausdehnung des Risses in das Werkstück unterhalb 25° um maximal 10% unterscheiden und daraus keine wesentliche Fehleinschätzung für das Ausmaß einer Nacharbeit resultieren kann.

Praktische Durchführung der Messung

Die Bestimmung des Winkels α und des Winkelfaktors ($\cos \alpha$) mit dem Rißtiefe-



A: Erste Messung U_A für die Bestimmung des Winkels α



B: Zweite Messung U_B für die Bestimmung des Winkels α

Bild 3. Messung mit externem Strompol zur Ermittlung schräger Risse

fenmeßgerät RMG 4015 erfolgt mit einer abgewinkelten vierpoligen Spezialsonde (Bild 5). Diese kann auch als normale vierpolige Sonde zur Ermittlung der Rißtiefe betrieben werden. Sie unterscheidet sich aber von der Standardsonde durch einen zusätzlichen Buchsenanschluß zum Anschluß eines externen Magnet-Strompols. Ist der externe Strompol angeschlossen, so wird automatisch der nicht markierte äußere Strompol der Sonde abgeschaltet, so daß bei aufgesetzter Sonde nunmehr der Strom zwischen dem Magnet-Strompol und dem markierten äußeren Strompol der Sonde verläuft. Außerdem wird automatisch die Frequenz des Stromes auf die für diesen Meßmodus optimierte Frequenz herabgesetzt.

Nach der Inbetriebnahme des Gerätes mit Kalibrierung und der automatischen Bestimmung der für den jeweiligen Werkstoff zutreffenden Materialkorrektur wird der Menüpunkt „ α -ME“ aufgerufen und der externe Strompol an die

Sonde angeschlossen. Danach wird die Sonde erst an rißfreier Stelle unmittelbar neben dem Riß auf das Werkstück aufgesetzt, dann genau über dem Riß. Anschließend wird die Anordnung um 180° gedreht und die Sonde wieder nacheinander erst neben, dann auf dem Riß aufgesetzt.

Die Meßwerte werden währenddessen vom Mikroprozessor des Gerätes überwacht: Zu stark schwankende Meßwerte oder falsches Aufsetzen werden erkannt, eine Fehlermeldung ausgegeben und der Anwender zur Neuaufnahme des Meßwertes aufgefordert. Der über dem Riß ermittelte Meßwert wird im Gerät automatisch mit dem unmittelbar neben dem Riß aufgenommenen Wert normiert. Auf diese Weise werden unterschiedlich gewählte Abstände zwischen externem Strompol und der Sonde vollständig kompensiert. Der Anwender muß nur auf einen gewissen Mindestabstand von 10 cm achten.

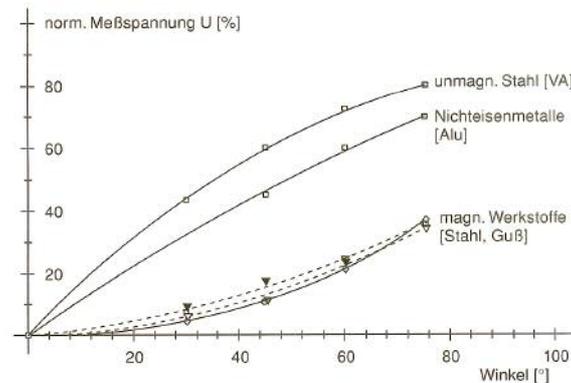


Bild 4. Winkelabhängigkeit der relativen (normierten) Spannung U bei Werkstoffen mit unterschiedlicher Skin-Eindringtiefe



Bild 5. Spezialsonde zur Messung schräger Risse

Bei richtiger Handhabung zeigt das Gerät nunmehr automatisch den errechneten Winkel α mit Vorzeichen an. Das Vorzeichen gibt den Rißverlauf relativ zur Position des Haftmagneten (externer Strompol) bei der zuletzt ausgeführten Messung an: Verläuft der Riß auf den Haftmagneten zu, ist das Vorzeichen negativ – verläuft dieser vom Haftmagneten weg, wird der Winkel positiv angezeigt. Wird der Stecker für den externen Strompol nun wieder aus der Sonde herausgezogen, schaltet das Gerät automatisch in den Meßbetrieb mit der entsprechend höheren Frequenz um. Jede nun ermittelte Rißtiefe wird im Gerät sofort mit dem Winkelfaktor ($\cos \alpha$) multipliziert, und nur noch die gesuchte Projektion der Rißtiefe wird senkrecht zur Oberfläche angezeigt.

Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Weiterentwicklung des Rißtiefenmeßgerätes RMG 4015 ist nunmehr auch eine komfortable Möglichkeit geschaffen, schräg verlaufende Risse zu erkennen und ihre Schräglage zu bestimmen. Gegenüber früheren Lösungen wurde hier nicht nur die Meßgenauigkeit erheblich verbessert, sondern auch die Gefahr von Meßfehlern aufgrund fehlerhafter Bedienung nahezu ausgeschaltet.

Literatur

- 1 Matting, A.; Deutsch, V.: Die Möglichkeiten genauer Rißtiefenmessungen. *Materialprüfung* 3 (1961), S. 218 – 224.
- 2 Deutsch, V.; Vogt, V.: Die Rißtiefenmessung. Druckschrift SD 4/3 Fa. Karl Deutsch, veröffentlicht in „Neue Fachberichte der Werkstatttechnik“ (1976).
- 3 Deutsch, V.; Ettel, P.; Platte, H.; Cost, H.: Rißtiefenmessung – zeitgemäße Meßtechnik für ein bewährtes Verfahren. *Materialprüfung* 38 (1996), S. 306 – 310.

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. Philipp Ettel, Jahrgang 1961, studierte physikalische Technik an der FH Aachen in Jülich. Seit 1989 ist er als Entwicklungs-Ingenieur für Geräte- und Sensortechnik bei der Firma Karl Deutsch, Wuppertal, tätig.

Prof. Dr.-Ing. Volker Deutsch, Jahrgang 1932, studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen, promovierte an der TU Hannover und ist Honorarprofessor an der Universität Dortmund. Seit 1961 leitet er als geschäftsführender Gesellschafter die Karl Deutsch, Prüf- und Meßgerätebau GmbH & Co. KG, Wuppertal.

Dr. rer. nat. Michael Platte, Jahrgang 1953, studierte Physik an der RWTH Aachen und promovierte dort am Institut für Technische Akustik. Er ist seit 1985 für die Firma Karl Deutsch, Wuppertal, tätig. Seit 1994 ist er technischer Geschäftsführer im vorgenannten Unternehmen. (100212)