

# Nachweis verdeckter rissartiger Fehlstellen mittels induktiv angeregter Thermografie

Günter WALLE\*, Christopher STUMM\*, Bernd VALESKE\*, Udo NETZELMANN\*  
\* IZFP (Campus E31, 66123 Saarbrücken)

**Kurzfassung.** Die induktiv angeregte Thermografie eignet sich sehr gut zur Oberflächenrissprüfung ferromagnetischer und austenitischer Stähle und besitzt das Potenzial, zur vollautomatischen Prüfung von Bauteilen in der industriellen Qualitätssicherung eingesetzt zu werden. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit neueren Entwicklungen der Prüftechnik mit dem Ziel, auch verdeckte, unter der Oberfläche liegende, rissartige Fehlstellen nachweisen zu können. Es werden die physikalischen Mechanismen des Fehlernachweises und die Bedingungen behandelt, unter denen solche Fehlstellen nachweisbar sind.

## Einführung

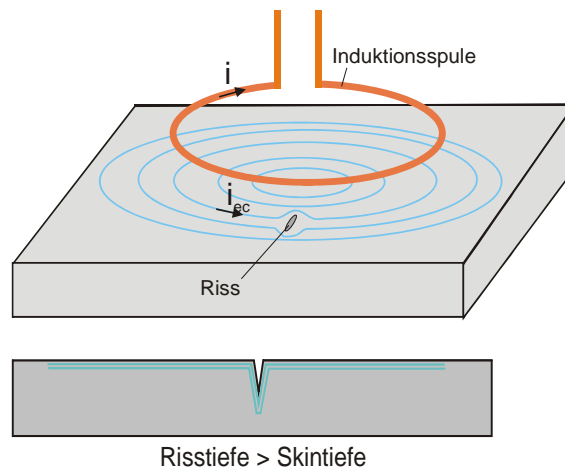
In den vergangenen Jahren wurde die induktiv angeregte Thermografie weiterentwickelt, so dass diese Prüftechnik inzwischen einen Standard und eine Leistungsfähigkeit für die Oberflächenrissprüfung ferromagnetischer und austenitischer Stähle erreicht hat, die sie zunehmend interessant auch für die Anwendung in der industriellen Qualitätssicherung sowie in der wiederkehrenden Prüfung sicherheitsrelevanter Bauteile und Komponenten werden lässt [1, 2, 3, 4]. Diese berührungslos und schnell arbeitende Prüftechnik, die ohne einen größeren Aufwand an Mechanik auskommt, lässt sich sehr gut automatisieren, erlaubt eine objektive Prüfung auch von Bauteilen komplexerer Geometrie, kommt ohne ein wässriges Medium aus und bietet ein gutes Nachweisvermögen für Oberflächenrisse bei relativ geringer Falschalarmrate. Daher eignet sich diese Prüftechnik insbesondere für vollautomatische Prüfanlagen, die in die Fertigungslinie integriert, an sicherheitsrelevanten Bauteilen, z.B. in der Automobilindustrie, 100% - Prüfungen im Rahmen der Qualitätssicherung vornehmen. Da die Prüftechnik bisher jedoch ein relativ schlechtes Nachweisvermögen für unter der Oberfläche liegende rissartige Fehlstellen zeigte, wurden in den vergangenen Jahren Entwicklungsarbeiten durchgeführt, um diesen Nachteil der Prüftechnik zu überwinden. In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst kurz auf das Prinzip der Prüftechnik zur Oberflächenrissprüfung eingegangen, die grundsätzlichen physikalischen Phänomene, die zum Fehlernachweis führen, erläutert und ein typisches Anwendungsbeispiel gezeigt. Ausgehend von den Mechanismen der Wechselwirkung von Wirbelströmen mit rissartigen Fehlstellen wird dann der Bogen gespannt zu der Problematik, die beim Nachweis verdeckter Risse besteht und wie es möglich sein kann, solche unter der Oberfläche liegende Fehlstellen mit verbesserter Nachweisempfindlichkeit zu detektieren. Dabei werden die grundsätzlichen Vorgänge der Wechselwirkung der bei Niederfrequenzanregung erzeugten Wirbelströme mit den verdeckten Rissen anhand von Modellrechnungen erläutert und veranschaulicht. Ausgehend von den hierdurch verursachten lokalen Änderungen der Wirbelstromdichte im Bereich der Fehlstellen ergeben sich lokale Gradienten der Wirbelstromverluste. Hierdurch entstehen instationäre Wärmeströme, die ein charakteristisches Temperaturfeld bzw. Temperatursignal an der

Prüfobjektoberfläche erzeugen, anhand dessen die Fehlstelle dann mit einer berührungslosen Infrarotmesstechnik nachgewiesen werden kann.

## 1. Grundlegende Betrachtungen zur Prüftechnik

### 1.1 Prinzip der induktiv angeregten Thermografie

Bei der induktiv angeregten Thermografie wird mittels eines Induktors ein elektromagnetisches Wechselfeld in das zu untersuchende, leitfähige Bauteil eingekoppelt. Hierbei werden nach dem Induktionsgesetz Wirbelströme im Bauteil induziert, die bei höherfrequenten Wechselfeldern im oberflächennahen Bereich des Bauteils verlaufen. So liegt z.B. die Eindringtiefe der Wirbelströme im Falle eines typischen ferromagnetischen Stahls bei einer Anregungsfrequenz von 100 kHz im Bereich von ca. 60  $\mu\text{m}$ . Man spricht daher auch vom sogenannten Skineffekt oder Hauteffekt. Befindet sich nun ein Oberflächenriss in dem Bauteil, so werden die Wirbelströme (siehe Abb. 1) von dem Riss in ihrer Ausbreitung gestört, was zur Folge hat, dass sie entweder lateral oder unterhalb der Fehlstelle ausweichen müssen. Diese lokale Veränderung der Wirbelstrombahnen infolge eines Risses führt zu zusätzlichen Wirbelstromverlusten in der Fehlerumgebung und auf den Flankenflächen des Risses. Hierdurch werden letztlich Temperaturkontraste (lokale Temperaturerhöhungen relativ zur Umgebung) an der Oberfläche erzeugt, die mit einer berührungslosen Infrarotmesstechnik erkannt werden können.

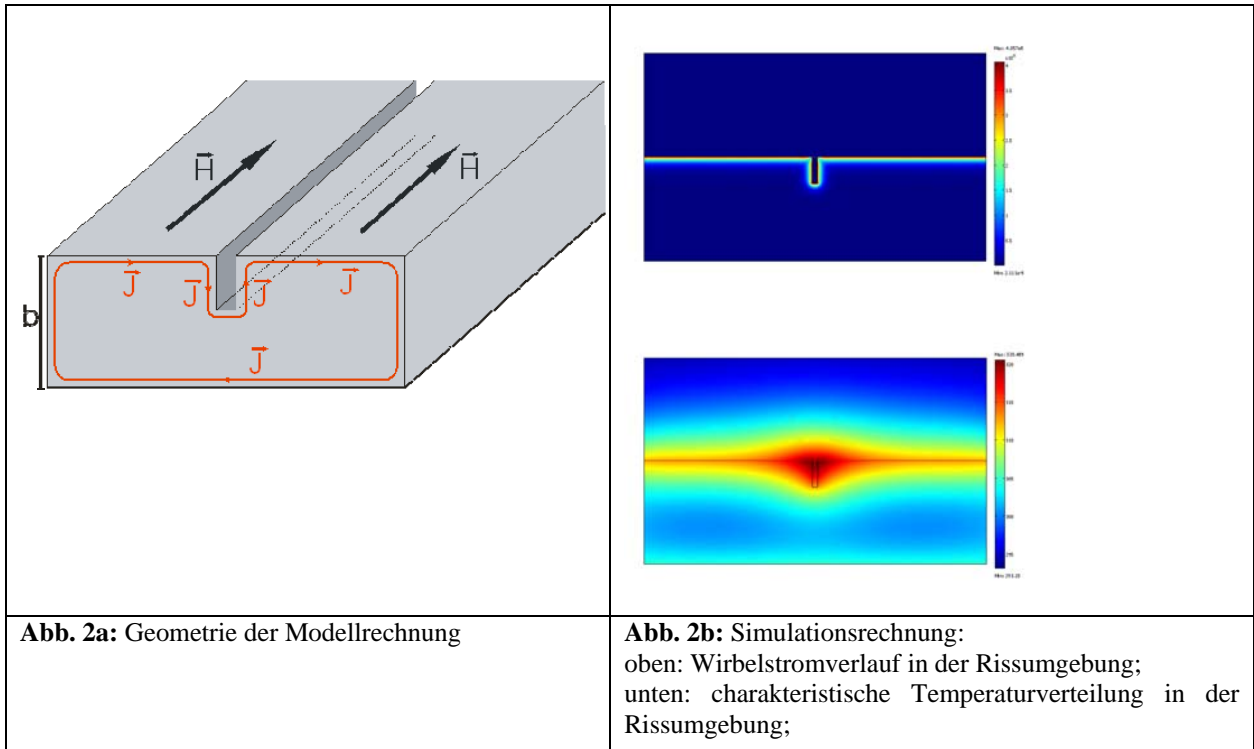


**Abb. 1:** Prinzip der Prüftechnik

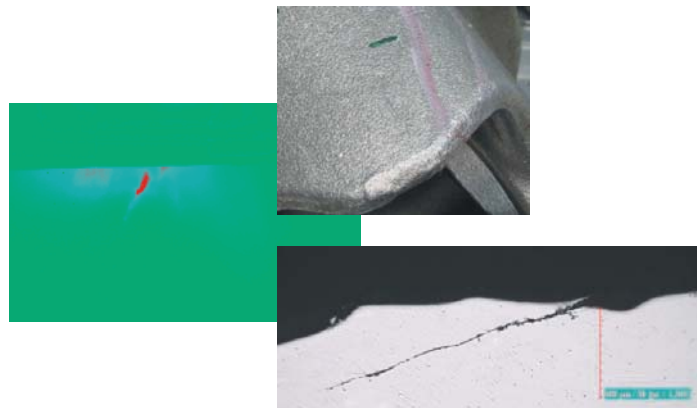
### 1.2 Modellrechnungen zu den induzierten Wirbelströmen und den hierdurch bedingten charakteristischen Temperaturfeldern in Fehlerumgebung

Zur Veranschaulichung des Wirbelstromverlaufs im Bereich einer Fehlstelle und der hierdurch bedingten Erzeugung eines charakteristischen Temperaturfeldes an der Prüfobjektoberfläche, das als Temperatursignal die Fehlstelle anzeigt, wurden Modellrechnungen (2-dim) auf der Basis einer quaderförmigen Geometrie (Abb. 2a) durchgeführt. Als Fehlstelle wurde eine Nut mit einer Tiefe von 1,0 mm angenommen, die sich in z-Richtung (senkrecht zur Bildebene), ebenso wie der Prüfkörper, unendlich ausdehnt. Es wurde weiter angenommen, dass die anregende magnetische Feldstärke  $H$  parallel zur Fehlstelle orientiert ist, so dass die Wirbelströme ausschließlich in der x-y-

Ebene, senkrecht zur Fehlstelle, verlaufen. In Abb. 2b ist die simulierte Stromdichteverteilung an der Prüfobjektoberfläche und im Bereich der Fehlstelle dargestellt. Hierbei bedeuten die roten Farbtöne eine hohe Wirbelstromdichte, dunkelblaue Farbtöne sind geringen Stromdichten zuzuordnen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Wirbelströme sehr eng an die Oberfläche anschmiegen und dem Fehlerverlauf folgen. Dies führt dazu, dass auf den Rissflankenflächen zusätzliche Wirbelstromverluste entstehen. Diese zusätzlichen Wärmequellen an den Rissflanken verursachen nun einen Wärmestrom, der sich auch zur Oberfläche hin ausbreitet und dort ein charakteristisches Temperaturfeld erzeugt [1]. Dieses Temperatursignal (Abb. 2b, unten) kann nun mit einer berührungslos arbeitenden Infrarotmesstechnik erfasst und ausgewertet werden.



Ein Anwendungsbeispiel dieser Prüftechnik an Schmiedeteilen zeigt Abb. 3. Links im Bild ist ein Thermografiebild dargestellt, das farbcodiert die Temperaturverteilung nach der induktiven Anregung des Bauteils (rechts oben im Bild erkennbar) zeigt. Man erkennt das deutliche, linienförmige Temperatursignal (rot), das die Fehlstelle anzeigt. Unten rechts ist ein metallografisches Schliffbild wiedergegeben, das senkrecht zur Fehleranzeige angefertigt wurde. Es ist im Schliffbild ein schräg einlaufender Riss mit einer Tiefe von 200  $\mu\text{m}$  zu erkennen.



**Abb. 3:** Anwendungsbeispiel: Messung an einem Schmiedeteil mit Riss

## 2. Niederfrequenzanregung zum Nachweis verdeckter, rissartiger Fehlstellen

Aus obigen Betrachtungen ergibt sich, dass rissartige Fehlstellen, die unter der Oberfläche liegen und keinen Kontakt zur Oberfläche aufweisen, mit der Prüftechnik bei höherfrequenter Anregung nicht oder schlecht nachweisbar sind (insbesondere in ferromagnetischen Materialien), da die Wirbelströme in diesem Falle oberhalb der Risse an der Oberfläche entlang laufen können und somit keine Störung in ihrer Ausbreitung durch die Fehlstellen erfahren. Zum Nachweis der verdeckten Risse ist es daher erforderlich, die Frequenz zu verringern, um damit die Eindringtiefe zu erhöhen. Damit können die Wirbelströme mit tiefer unter der Oberfläche liegenden Fehlstellen in Wechselwirkung treten, womit schließlich ein Fehlernachweis möglich wird.

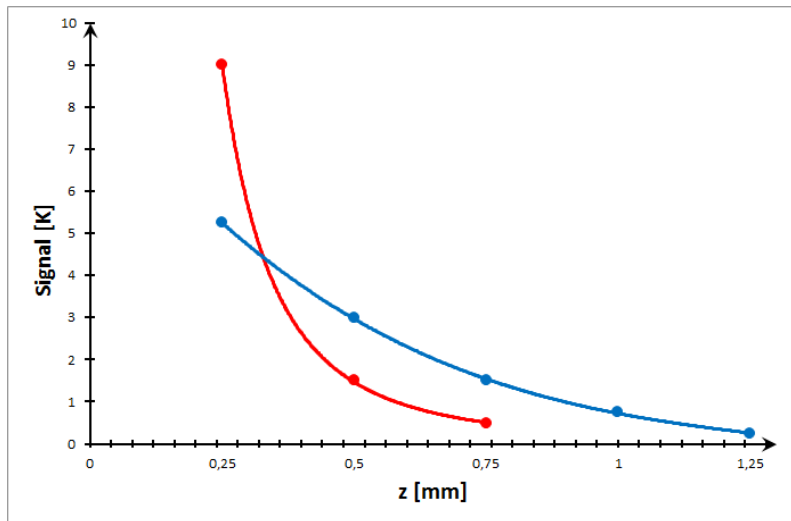
### 2.1 Modellrechnungen zur Veranschaulichung der physikalischen Vorgänge an verdeckten Rissen

In Abb. 4a ist eine Modellrechnung analog zu den unter Punkt 1 dargestellten Ergebnissen und der dort verwendeten Geometrie gezeigt. Wird eine Niederfrequenzanregung gewählt, bei der sich eine Eindringtiefe ergibt, die im Bereich der Fehlertiefenlage  $z$  (Überdeckung) liegt, so treten die Wirbelströme in Wechselwirkung mit der Fehlstelle. Dies bedeutet, dass die Wirbelströme von der Fehlstelle abgelenkt werden, was in Abb. 4a anhand der Pfeile (kennzeichnen Richtung und Amplitude der induzierten Wirbelströme) gut zu erkennen ist. Infolge dieser Ablenkung kommt es oberhalb der Fehlstelle zu einer lokalen Verdichtung der Wirbelströme, ebenso unterhalb der Fehlstelle, was an den roten Farbtönen sichtbar wird. Die Verdichtung der Wirbelströme oberhalb der Fehlstelle führt zu einer verstärkten Aufheizung infolge von Wirbelstromverlusten und dies bewirkt nun an der Oberfläche einen charakteristischen Temperaturkontrast (Temperatursignal) aufgrund dessen die Fehlstelle nachgewiesen werden kann (siehe Abb. 4b).

<p><b>Abb. 4a:</b> Simulation: eingebetteter Riss; <b>Stromdichte in Rissumgebung;</b> Tiefenlage <math>z = 0,5</math> mm; Tiefenausdehnung: 1,0 mm; Anregungsfrequenz: 300 Hz; Eindringtiefe: 1,1 mm;</p>	<p><b>Abb. 4b:</b> Simulation: eingebetteter Riss; <b>Temperaturverteilung in Rissumgebung;</b> Tiefenlage <math>z = 0,5</math> mm; Tiefenausdehnung: 1,0 mm; Anregungsfrequenz: 300 Hz; Eindringtiefe: 1,1 mm;</p>

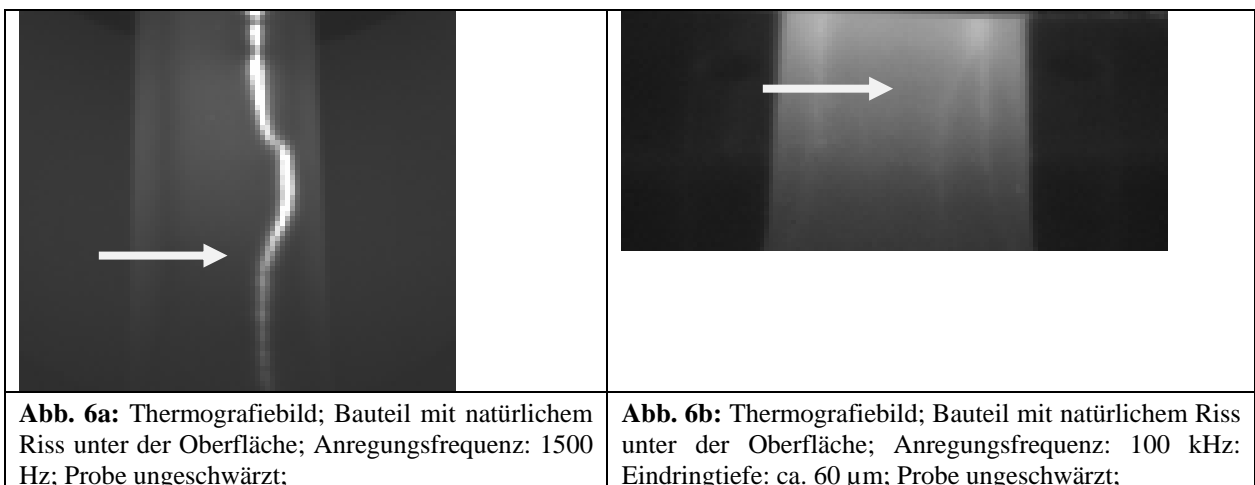
Es wurden nun Modellrechnungen durchgeführt, um zu untersuchen, wie tief unter der Oberfläche liegende Fehlstellen mit der Prüftechnik noch nachweisbar sind. Das Ergebnis dieser Rechnungen ist in Abb. 5 präsentiert. In dem Schaubild ist das Temperatursignal, das sich an der Oberfläche bei einer Anregung mit einer Frequenz von 300 Hz bzw. 1500 Hz ergibt, in Abhängigkeit von der Fehlertiefenlage dargestellt. Hierbei wurde jeweils von einer Tiefenausdehnung der Fehlstelle von 1,0 mm ausgegangen. Es

zeigt sich, dass das Fehlersignal bei einer Frequenz von 1500 Hz mit zunehmender Tiefenlage rasch abnimmt, so dass bei dieser Frequenz (Eindringtiefe: ca. 0,5 mm) etwa 0,75 mm tief unter der Oberfläche liegende Fehlstellen noch nachweisbar sind. Verringert man jedoch die Frequenz weiter auf 300 Hz (Eindringtiefe: ca. 1,1, mm), so ist zwar das Fehlersignal bei einer Tiefenlage von  $z = 0,25$  mm geringer als das bei  $f = 1500$  Hz, jedoch fällt dann das Signal weniger deutlich mit der Fehlertiefenlage ab. Dadurch ist es in diesem Falle noch möglich, auch gut 1 Millimeter tief unter der Oberfläche liegende Fehlstellen noch zu erkennen, sofern die Tiefenausdehnung der Fehlstelle mindestens 1 Millimeter beträgt.



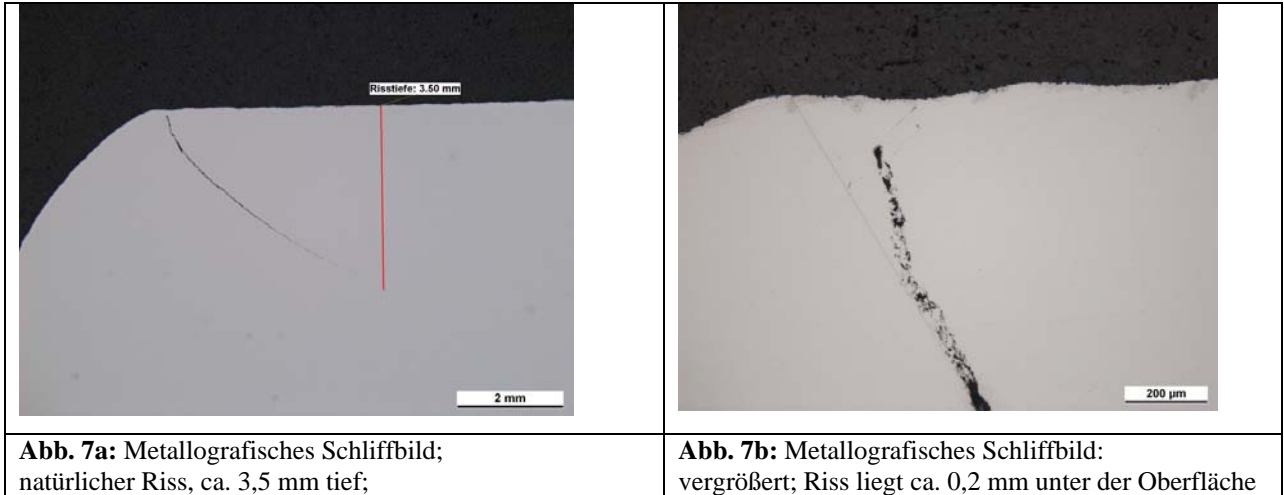
**Abb. 5:** Simulationsrechnung zur Abhängigkeit des Fehlersignals von der Fehlertiefenlage beim eingebetteten Riss; blau: 300 Hz; rot: 1500 Hz; Tiefenausdehnung des Risses: 1,0 mm;

Da es nicht möglich ist, eingebettete unter der Oberfläche liegende Risse wie sie oben betrachtet wurden, künstlich herzustellen, kam es uns entgegen, dass wir ein Bauteil mit einem natürlichen, unter der Oberfläche liegenden Riss zur Verfügung hatten. In Abb. 6a ist ein Messergebnis hierzu mit unserer Prüftechnik mit Niederfrequenz – Induktionsanregung dargestellt. Während der Riss mit der Niederfrequenzanregung sehr gut detektierbar ist und ein hohes Signal liefert, ist derselbe Fehler mit Hochfrequenzanregung (100 kHz) nur sehr schwach erkennbar (Abb. 6b).



Die Ursache für den wesentlich besseren Nachweis dieses Fehlers mit Niederfrequenzanregung ist nach Durchführung einer metallografischen Untersuchung an

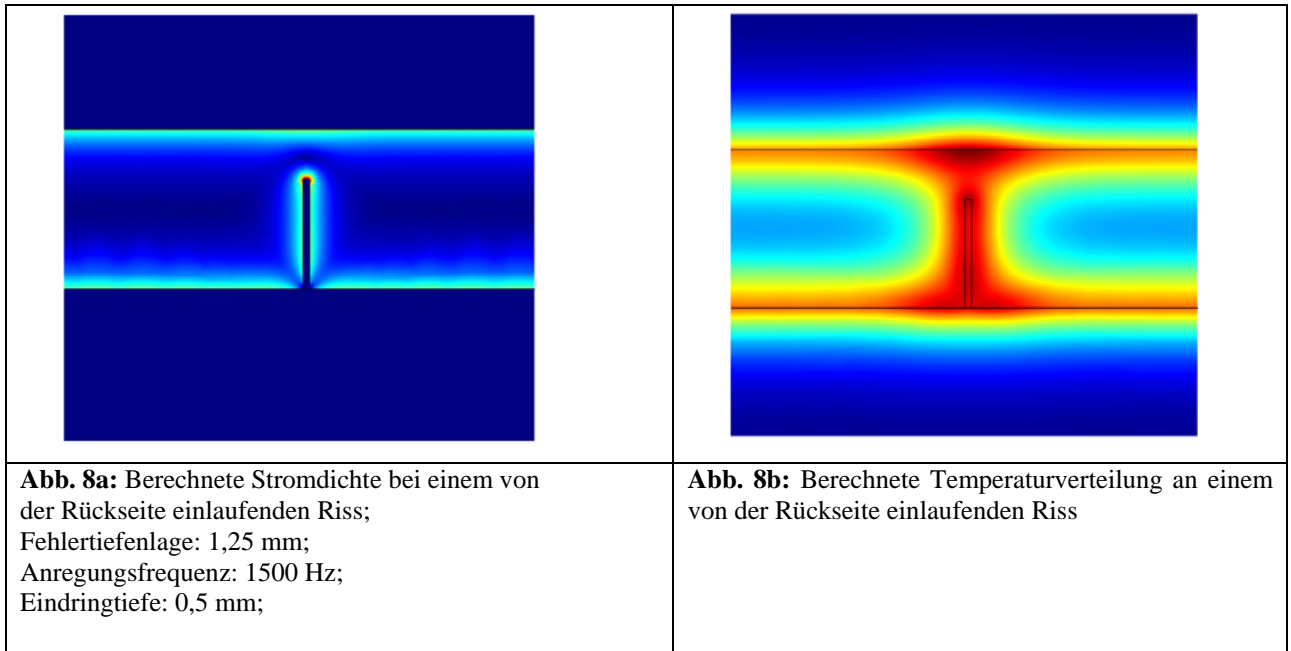
dem betreffenden Bauteil zu erkennen. Entlang des Pfeils in Abb. 6a wurde ein metallografisches Schliffbild hergestellt, das in Abb. 7a, b dargestellt ist. Wie aus den Schliffbildern zu erkennen ist, befindet sich in dem Bauteil ein Riss, der sich bis in eine Tiefe von ca. 3,5 mm unter der Oberfläche ausbreitet. Der Riss beginnt jedoch nicht an der Oberfläche, sondern liegt ca. 0,2 mm unter der Oberfläche.



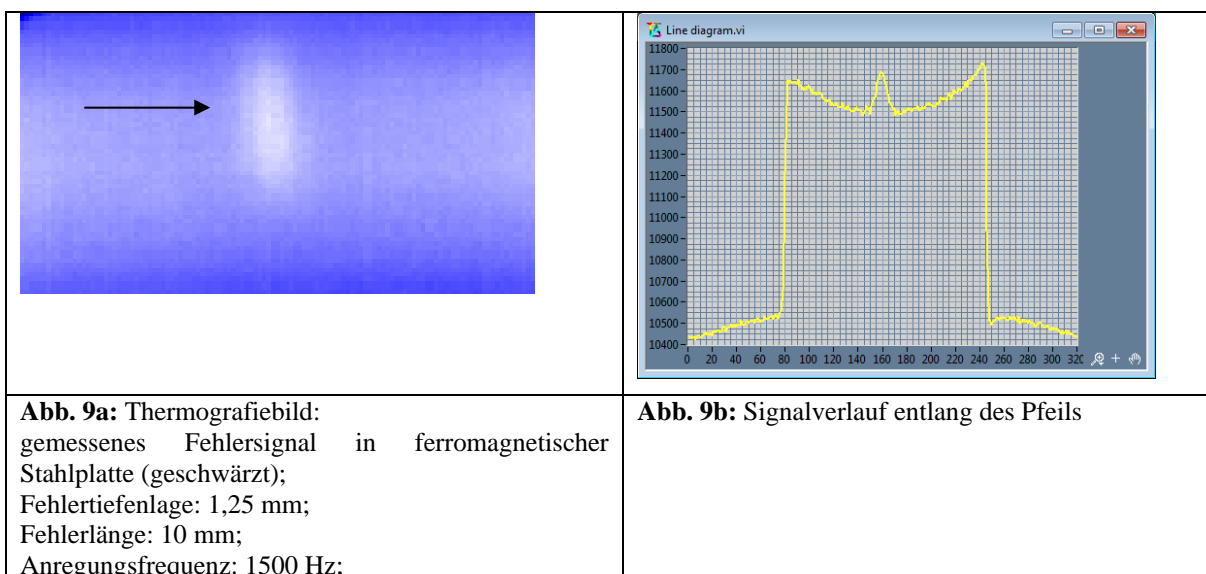
Letzteres ist maßgeblich dafür, dass der Riss mit Hochfrequenzanregung schlecht detektierbar ist, während er bei Niederfrequenzanregung sehr gut nachgewiesen werden kann.

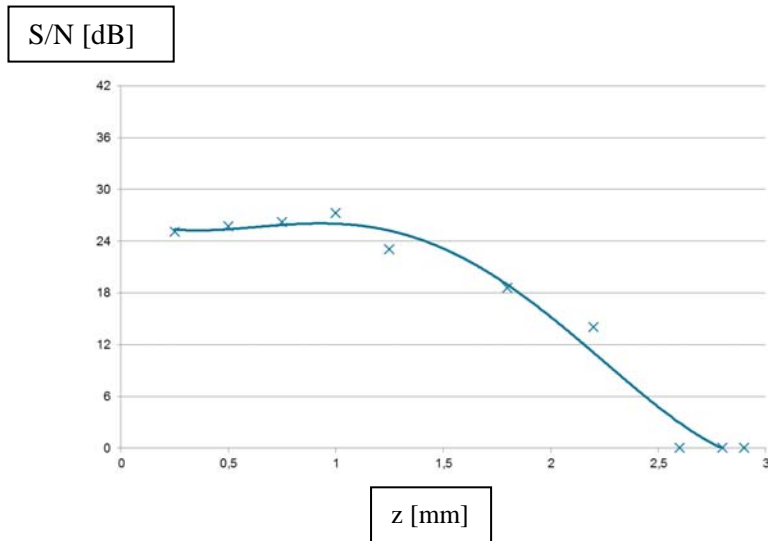
## 2.2 Modellrechnungen und Messungen zum Nachweis von verdeckten, künstlichen Rissen, die von der Rückseite in Platten eingebracht wurden

Im Folgenden wurden Untersuchungen an künstlichen Rissen (Sägeschnitten) vorgenommen, die von der Rückseite in Stahlplatten (ferromagnetisch) einlaufen. Auch hier erfolgte die Anregung analog zu Abb. 2a mit einer Anregungsfrequenz von 1500 Hz. Zunächst wurden Modellrechnungen vorgenommen, deren Ergebnisse in Abb. 8a, b präsentiert sind. Abb. 8a zeigt den Verlauf der Wirbelströme in diesem Falle; man erkennt, dass die auf der Plattenrückseite verlaufenden Wirbelströme (Eindringtiefe: ca. 0,5 mm) entlang der Rissflanken verlaufen und sich am Rissgrund verdichten. Diese erhöhte Wirbelstromdichte führt zu Wärmequellen, die einen Wärmestrom auch zur Oberfläche hin erzeugen. Hinzu kommt, dass auch die an den Rissflanken verlaufenden Wirbelströme Wärmeströme erzeugen, die sich zur Oberfläche hin ausbreiten. Beide Effekte bewirken nun einen deutlichen Temperaturkontrast an der Oberfläche, was in Abb. 8b gut zu erkennen ist.



Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wurden Messungen mit unserer Prüftechnik an ferromagnetischen Stahlplatten mit von der Rückseite eingebrachten Sägeschnitten unterschiedliche Tiefe durchgeführt. Die Sägeschnitte hatten somit Tiefenlagen (Überdeckungen) unter der Vorderseite (auf der die Temperatursignale gemessen wurden) zwischen 0,25 mm und ca. 2 mm. Die Länge der Sägeschnitte war jeweils 10 mm, ihre Breite ca. 0,2 mm. In Abb. 9a, b ist eine Messergebnis hierzu an einer Fehlstelle mit einer Tiefenlage von 1,25 mm dargestellt. Die Fehlstelle ist anhand des Temperatursignals deutlich erkennbar und zeigt einen Signal-Rausch-Abstand von mehr als 20 dB. In Abb. 10 wurden für Fehlstellen mit unterschiedlichen Tiefenlagen unter der Oberfläche die gemessenen Signal-Rausch-Abstände in Abhängigkeit von der Tiefenlage aufgetragen. Hieraus ist zu entnehmen, dass sich für verdeckte Risse bis zu Tiefenlagen, die etwa dem 2-fachen der Eindringtiefe (0,5 mm) entsprechen, eine sehr gute Fehlererkennbarkeit ergibt, mit Signal-Rausch-Abständen (S/N) von mehr als 20 dB. Erst bei größeren Tiefenlagen fällt der S/N – Abstand deutlich ab [5].





**Abb. 10:** Messung: Signal-Rausch-Abstand [dB] in Abhängigkeit von der Fehlertiefenlage;  
 $f = 1500$  Hz; Eindringtiefe: 0,5 mm;

### 3. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, unter welchen Bedingungen verdeckte, rissartige Fehlstellen in Stählen, insbesondere ferromagnetischen Materialien, mit der induktiv angeregten Thermografie nachweisbar sind. Es wurde gezeigt, dass es mit Niederfrequenzanregung möglich ist, solche Fehlstellen mit gutem Signal-Rausch-Abstand zu detektieren, falls die Eindringtiefe der Wirbelströme im Bereich der Tiefenlage der Fehlstellen liegt. Speziell zeigte sich für rissartige, eingebettete Risse, dass diese etwa bis zu einer Tiefenlage von 1 mm nachweisbar sind, falls die Eindringtiefe der Wirbelströme im Bereich der Tiefenlage liegt und ihre Tiefenausdehnung mindestens 1 mm beträgt. Für Risse, die in plattenförmigen Materialien von der Rückseite einlaufen, gilt, dass diese etwa bis zu einer Tiefenlage bis 1,75 mm nachgewiesen werden können, wenn die Eindringtiefe der Wirbelströme mindestens etwa 30 % der Tiefenlage beträgt.

Bei der induktiv angeregten Thermografie handelt es sich um eine schnelle und berührungslos arbeitende Prüftechnik für den objektiven Nachweis von Oberflächenrissen sowie verdeckten – auch rissartigen Fehlstellen in ferromagnetischen und austenitischen Stählen. Die Prüftechnik eignet sich aufgrund ihrer berührungslosen Arbeitsweise und relativ einfachen Automatisierbarkeit sehr gut für vollautomatische Prüfanlagen zur 100 % - Prüfung von Bauteilen in der industriellen Produktionslinie.

### Referenzen

- [1] G. Walle, U. Netzelmann: "Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components Using Inductive Heating", Proc. 9th ECNDT Berlin, DGZFP Berichtsband BB 103-CD, Paper Tu.4.8.5, (2006).
- [2] U. Netzelmann, H. Strauß und G. Walle: „Zerstörungsfreie thermographische Methoden zur Detektion von Fehlern an Massivumform-Teilen“, Schmiede-Journal, (2007), S. 26-28.
- [3] B. Valeske, G. Walle, S. Bessert: „Aktive dynamische Thermografie und ihre Anwendung für die zerstörungsfreie Oberflächenrissprüfung“, QZ, Jahrgang 53, (2008), S. 66 – 69.
- [4] G. Walle, B. Valeske, U. Netzelmann, S. Bessert, H. Strauß, F. Wolf: „Eine thermische Prüftechnik zur Oberflächenrissprüfung leitfähiger Materialien“, MP Materials Testing, 9/ 2009, S. 593-602.
- [5] C. Stumm, Bachelor-Arbeit, Fraunhofer IZFP (2010).