

Überwachung des Induktionshärtungsprozesses mit Hilfe der Schallemissionsanalyse

Wolfgang TILLMANN , Reiner ZIELKE , Norman SIEVERS
TU Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

Kurzfassung. Durch eine geeignete Oberflächenhärtung lässt sich die Lebensdauer von schwingungsbelasteten Bauteilen, wie Antriebswellen im Bereich des Automobilbaus, deutlich erhöhen. Die höhere Härte verhindert die Entstehung von Oberflächenrissen, welche für ein Versagen (Bruch) des Bauteiles verantwortlich sind. Eine Möglichkeit zur Oberflächenhärtung in Produktionslinien von Großserien stellt die leicht zu automatisierende Induktionshärtung dar. Hierbei können jedoch bei ungünstigen Prozessparametern schon während des Härtevorgangs kritische Risse entstehen, welche die Lebensdauer und somit die Funktion des Bauteils erheblich reduzieren. Daher ist eine rissfreie Härtung anzustreben, die gerade bei sicherheitsrelevanten Bauteilen mit Hilfe einer geeigneten Qualitätssicherung verifiziert wird.

Eine Möglichkeit zur Prozessüberwachung stellt die zerstörungsfreie Schallemissionsanalyse dar. Mit diesem passiven Verfahren können durch Aufnahme und Auswertung der Schallsignale während des Induktionshärtens die einzelnen Prozessschritte der Wärmebehandlung (Erwärmung und Abkühlung) überwacht und somit die Härterisse prinzipiell detektiert werden.

Im Beitrag wird das für die angestrebte Prozessüberwachung erstellte Schallemissionsanalyzesystem vorgestellt. Weiterhin werden erste Ergebnisse zur Überwachung des Härteprozesses präsentiert.

Einführung

Um die Festigkeit von mechanisch stark belasteten Bauteilen zu erhöhen, kann die Oberfläche gehärtet werden. Aufgrund der Oberflächenhärtung entstehen Risse erst bei einer höheren mechanischen Belastung als bei nicht gehärteten Materialien. Ein weit verbreitetes Verfahren zur Oberflächenhärtung stellt das Induktionsverfahren dar, welches in der Abbildung 1 skizziert ist. Mit Hilfe einer mit Wechselstrom betriebenen Spule wird in das zu härtende Bauteil an der Oberfläche ein Wirbelstrom induziert. Dabei kann die Eindringtiefe der Wirbelströme und somit die Härtetiefe über die Anregungsfrequenz eingestellt werden. Der Wirbelstrom erwärmt aufgrund des elektrischen Widerstands des Materials das Bauteil, wie in der Abbildung 1 links dargestellt. Im nächsten Schritt wird das Bauteil schnell abgekühlt, um ein martensitisches Gefüge zu erhalten, welches eine höhere Härte besitzt (Abbildung 1 rechts). Dabei können jedoch bei ungünstigen Prozessparametern Risse unterhalb der Bauteiloberfläche in der Übergangszone des gehärteten und nicht gehärteten Materials entstehen. Diese verdeckt liegenden Risse können bei mechanischer Belastung wachsen und somit zum Bauteilversagen führen.



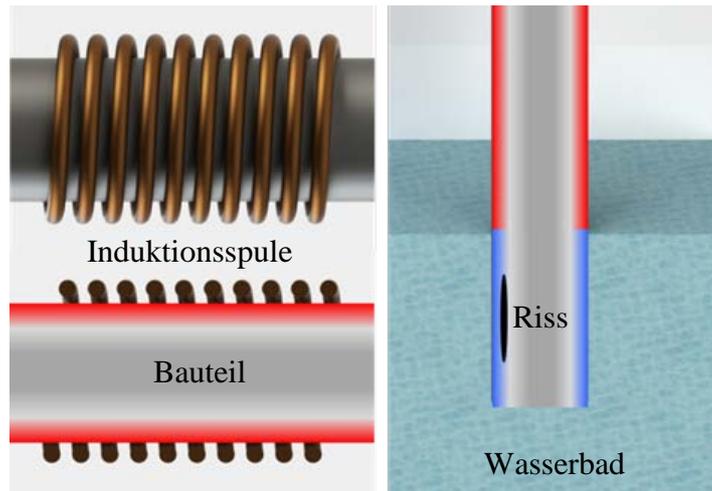


Abb. 1. Prinzip des Induktionshärtens

Die Detektion von Rissen während des Härtevorgangs, insbesondere während der Abschreckung, ist das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten. Hierzu wird die Schallemissionsanalyse, die sich bereits bei ähnlichen Aufgabenstellungen bewährt hat, eingesetzt. Integriert wird dieses System in einen Induktionsofen, um die Schallsignale sowohl während der Erhitzung, als auch bei der Abschreckung aufzuzeichnen. Durch nachträgliche Auswertung der Schallemissionssignale wird dann auf mögliche Risse geschlossen, welche mit visueller Überprüfung korreliert werden.

Beschreibung des eingesetzten Induktionsofens sowie des Schallemissionssystems

Als Induktionswärmevorrichtung wurde eine Anlage der Firma Himmel (Typenbezeichnung HA5-2/22 HG54-15) eingesetzt, welche bei einer Betriebsfrequenz von 300 kHz eine Leistung von 15 kW bereitstellen kann. In der Abbildung 2 sind die Anlage sowie das eingesetzte Schallemissionssystem abgebildet. Die Induktionsspule wird mit Wasser durchflossen, um die Induktionsspule selbst vor Überhitzung zu schützen. Das zu härtende Werkstück, hier ein Rundstahl, wird so in der Spule positioniert, dass kein Berührungspunkt mit der stromdurchflossenen Induktionsspule entsteht, um einen Kurzschluss zu vermeiden.

Für die Schallemissionsanalyse wurde das PCI-2 based AE System der Firma Physical Acoustic eingesetzt, welches rechts im Bild dargestellt ist. Für die folgenden Untersuchungen wurde ein Breitbandsensor (WD), ebenfalls von Physical Acoustic, mit einem Frequenzbereich von 100 bis 900 kHz eingesetzt. Der Sensor wurde an der oberen Stirnfläche des Stahlstabs befestigt, wobei für eine gute und reproduzierbare Ankopplung des Sensors ein Koppelgel zwischen Stahloberfläche und Sensor eingesetzt wurde. Die Ankopplung des Sensors wurde mit Hilfe einer Hsu-Nielsen Quelle (der Bleistift-Minenbruch-Test) vor der eigentlichen Messung überprüft.



Abb. 2. Messaufbau

Für die eigentliche Härtung (Abschreckung) wurde der Rundstab gelöst und zusammen mit dem angebrachten Sensor nach unten in den Wasserbehälter geführt. Während der Aufwärmung und der anschließenden Abschreckung wurden die vom Sensor aufgenommenen Signale aufgezeichnet.

Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden C45-Rundstähle mit einem Durchmesser von 3 cm eingesetzt. Die Temperatur während der induktiven Erwärmung wurde mit Hilfe eines Thermoelementes überprüft. Mit der eingesetzten Induktionsanlage konnten hierbei Temperaturen über 1000°C realisiert werden. Nach erfolgreicher Erwärmung erfolgte dann die Abschreckung im Wasserbad, wobei die Oberflächenspannung des Wassers durch Zugabe von Tensiden herabgesetzt wurde, um eine möglichst schnelle Abkühlung zu erhalten. Der Aufheiz- sowie der Abkühlprozess sind in der Abbildung 3 dargestellt.

Zur Überprüfung des Härtevorgangs wurde eine Härtemessung nach Vickers vor und nach der Härtung durchgeführt. Im nicht gehärteten Zustand lag die Härte nach Vickers bei 160 HV. Für die Abschreckung wurden drei Vorgänge (Umgebungsluft, Druckluft und ein Wasserbad) ausgewählt. Dabei ergab die Abkühlung an Luft eine Härte von 180 HV, an Druckluft von 230 HV und im Fall des Wasserbads ergab sich eine Härte von bis zu 900 HV. Die folgenden Untersuchungen wurden mit der Wasserabschreckung durchgeführt. Um die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung zu erhöhen, wurden ausgewählte Proben mehrfach gehärtet.



Abb. 3. Induktive Erwärmung und anschließende Abschreckung

Messungen und Auswertung

Während des gesamten Härtevorgangs bestehend aus Erwärmung auf über 1000°C und anschließender Abschreckung werden die auftretenden Schallsignale aufgezeichnet und nach der Härtung ausgewertet. Die Abbildung 4 zeigt die erhaltenen Signale während der induktiven Erwärmung in Form des Zeitsignals und eines Frequenzteppichs, der die Amplitude der auftretenden Frequenz farblich in Abhängigkeit der Zeit wiedergibt.

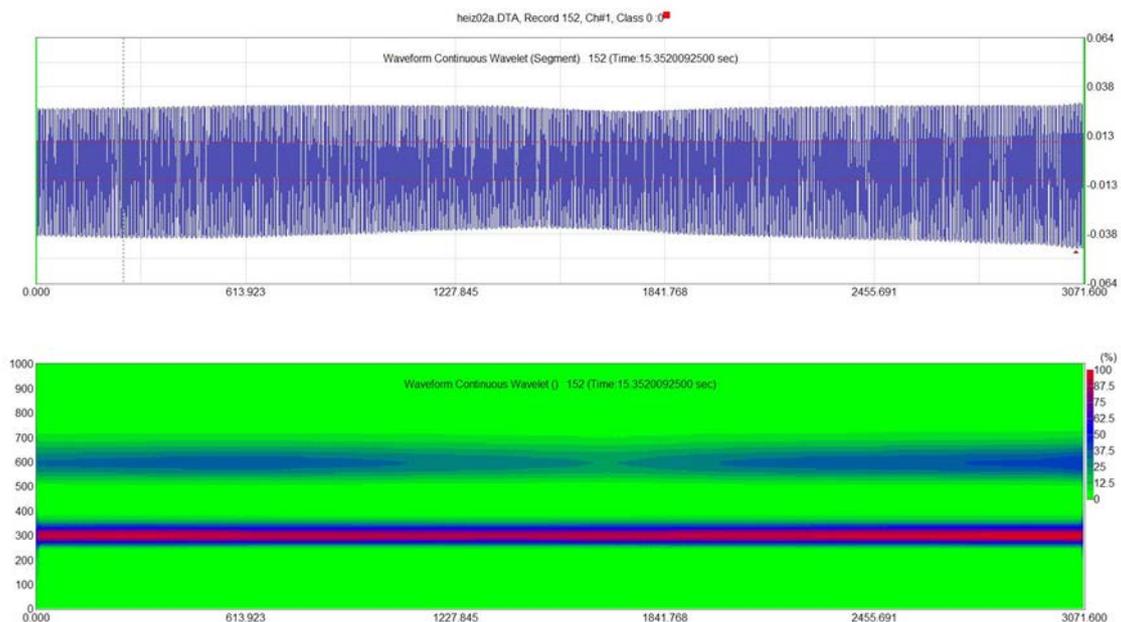


Abb. 4. Zeitsignal (oben) und Frequenzverhalten (unten) während der Erwärmung

Dargestellt ist das Messsignal 15 Sekunden nach Einschalten des Induktionsofens. Oben im Bild ist das Zeitsignal dargestellt, welches eine Schwingung mit einer Schwebung zeigt. Dabei gibt die Y-Achse die Amplitude und die X-Achse die Zeit in μsec an. Hierbei ist zu beachten, dass der Zeitpunkt der Messung oben im Diagramm angegeben ist (Time: 15,3520092500 sec), der dann auf der X-Achse als 0 sec gesetzt wird.

Im Frequenzteppich sind zwei Frequenzen deutlich zu erkennen, bei 300 kHz und bei 600 kHz. Da das Messkabel im Bereich des Induktionsofens verlief, handelt es sich bei den Signalen wahrscheinlich um elektrische Spannungen, die durch den Induktionsofen in das Messkabel induziert wurden, und nicht um Schallsignale. Die Anregungsfrequenz des Induktionsofens beträgt 300 kHz und entspricht somit auch der aufgenommenen Frequenz sowie deren 1. Oberwelle bei 600 kHz.

In der gleichen Art wie bei der Erwärmung wurde auch der Abschreckungsprozess überwacht. Die Abbildung 5 zeigt die Schallaktivität nach 6,8 Sekunden im Wasserbad. Da hierbei der Induktionsofen ausgeschaltet war, traten auch keine entsprechenden Signale bei 300 und 600 kHz auf.

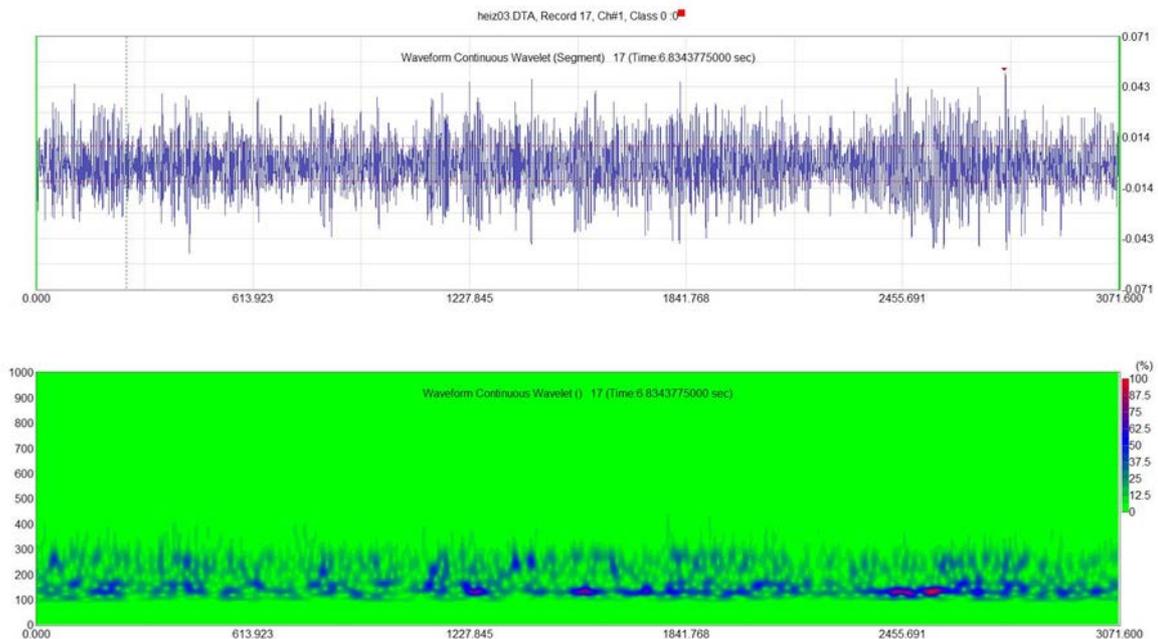


Abb. 5. Zeitsignal (oben) und Frequenzverhalten (unten) während des Abschreckens

Zu sehen sind Signale bei 100 kHz und vereinzelte Signale im Bereich von 300 kHz. Bei der Angabe des Zeitpunkts ist anzumerken, dass erst nach dem Start der Messung der Probekörper ins Wasser getaucht wurde. Dieser Vorgang kann mit ungefähr 4 Sekunden abgeschätzt werden, sodass die Messung in der Abbildung 4 nach ca. 2 Sekunden Abkühlung erfolgte. Nach 6,9 Sekunden Messzeit (siehe Abbildung 6) trat ein hohes Burstsinal mit einem Frequenzbereich von 300 kHz auf, welches auf Rissbildung deutet. Ähnliche Signale wurden auch zu späteren Zeitpunkten (Abbildung 7) detektiert.

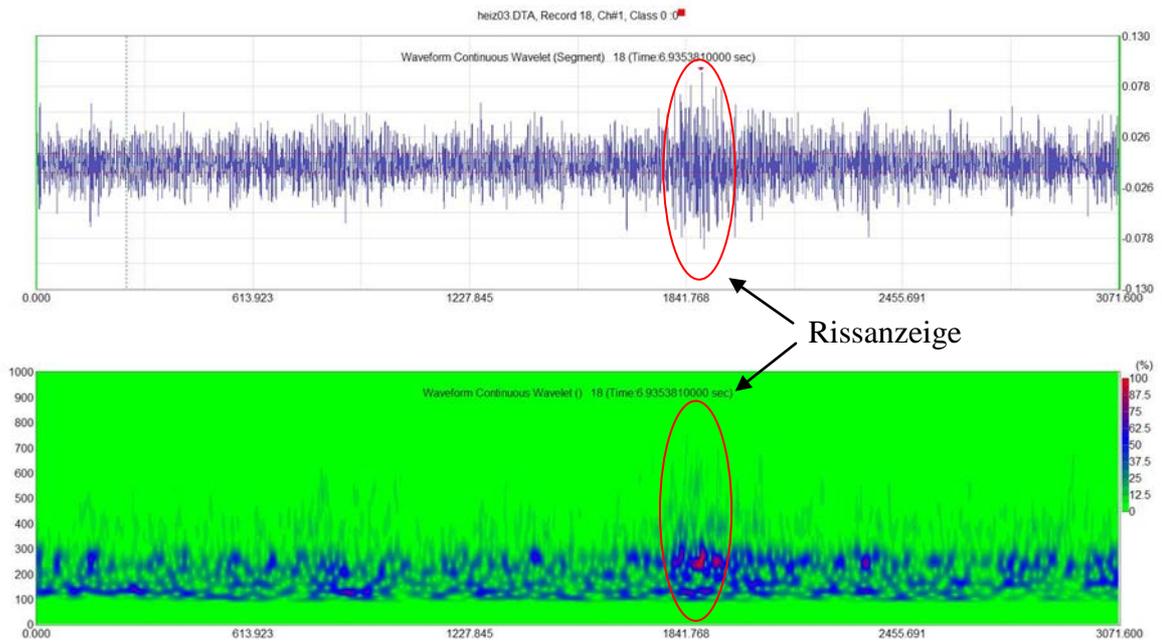


Abb. 6. Zeitsignal (oben) und Frequenzverhalten (unten) während des Abschreckens

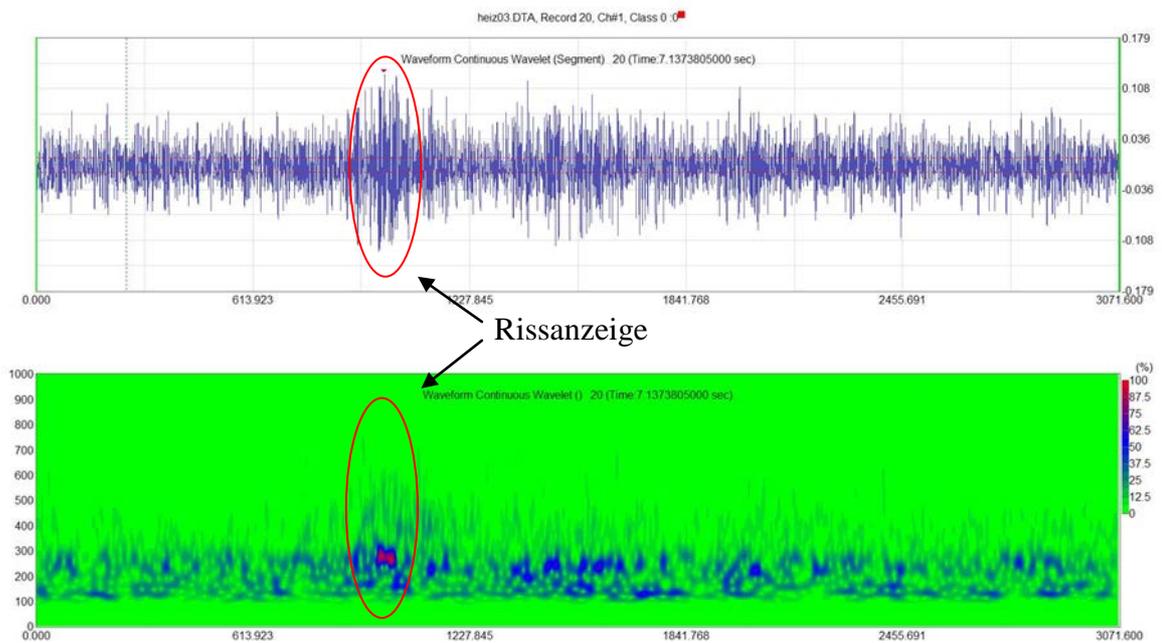


Abb. 7. Zeitsignal (oben) und Frequenzverhalten (unten) während des Abschreckens

Nach den Messungen wurde die Oberfläche der gehärteten Rundstäbe insbesondere an der Stirnfläche visuell untersucht. In der Abbildung 8 unten links ist die Stirnfläche eines einmal gehärteten und rechts eines mehrfach gehärteten Rundstahls abgebildet. In beiden Fällen sind Härterisse deutlich zu erkennen.

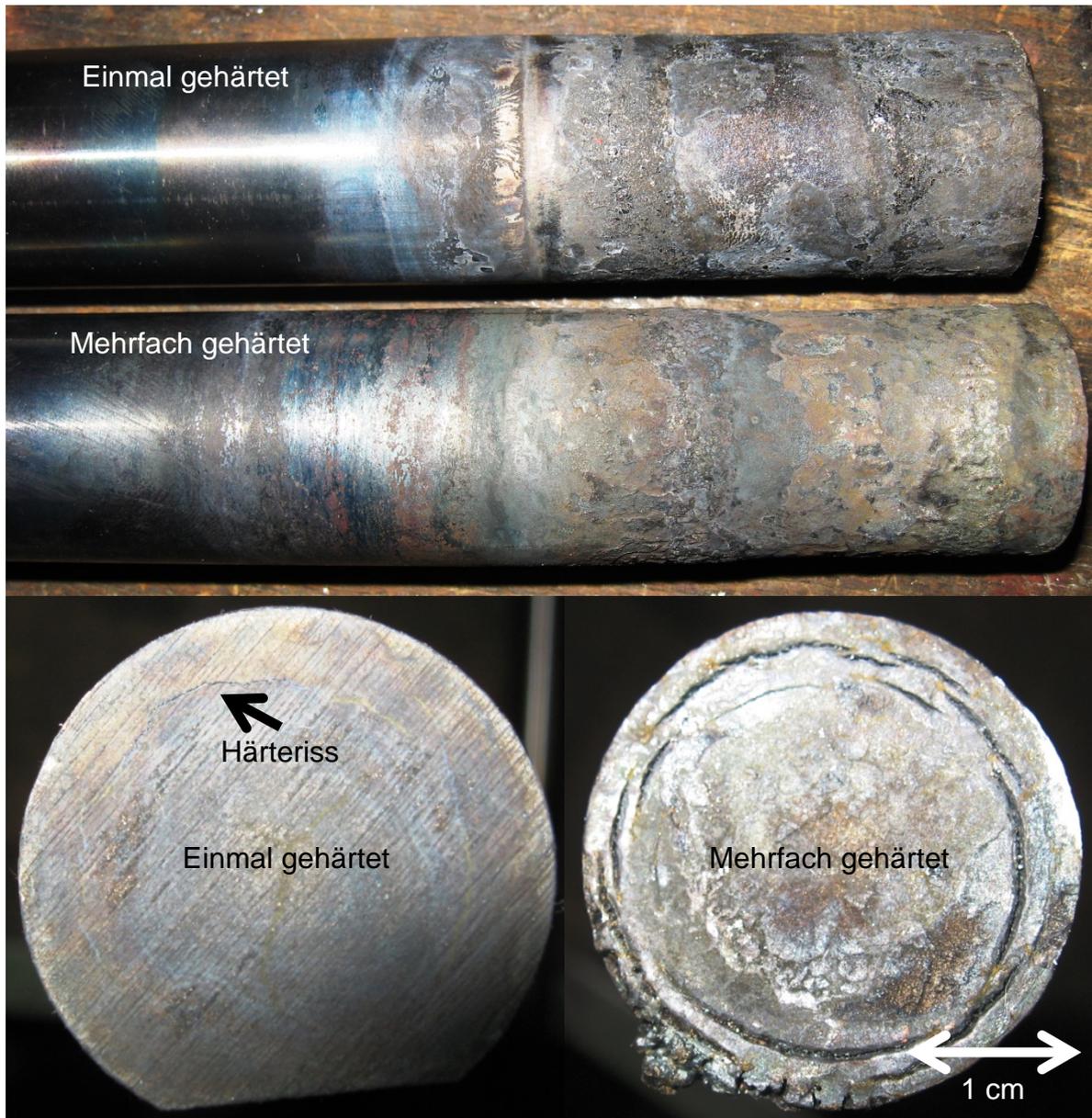


Abb. 8. Visuelle Untersuchung der Proben

Die bei der Schallemission detektierten Burstsignale liegen in dem für Rissentstehung charakteristischen Frequenzbereich zwischen 100 und 300 kHz. In diesem Frequenzbereich wurden auch bei Zugversuchen an C45-Stahlproben vergleichbare Burstsignale aufgenommen. Damit ist eine Korrelation der während des Abschreckens aufgezeichneten Burstsignale mit den nachher optisch erkennbaren Rissen höchst wahrscheinlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten wurde die Schallemissionsanalyse erfolgreich zum Nachweis von Härterissen bei den Induktionshärten eingesetzt. Hierzu wurde am zu überwachenden Bauteil ein Schwingungssensor adaptiert und die Emissionssignale während der Erwärmung und der anschließenden Abkühlung aufgezeichnet. Die nachfolgende Auswertung zeigte typische Burstsignale, die auf Rissentstehung während der Abschreckung hinweisen. Die visuelle Überprüfung der Bauteile ergab ebenfalls deutliche Rissanzeigen. Somit ist die Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Induktionshärtung prinzipiell geeignet.

Für eine Online-Überwachung des Härteprozesses sind jedoch noch weitere Arbeiten notwendig. So müssen Kriterien (z.B. Frequenzbereich und Amplitude) festgelegt werden, um die Burstsignale sicher und schnell zu erkennen. Diese müssen dann in die Messsoftware integriert werden, um die Rissentstehung direkt während der Abschreckung anzuzeigen. Weiterhin wäre es sinnvoll, das Bauteil auch während der Erwärmung zu überwachen. Hierzu muss der Einfluss des Induktionsofens (Anregungsfrequenz) durch Einsatz von analogen oder digitalen Filtern reduziert werden, um auch Signale, welche vom Bauteil ausgehen, hinreichend genau aufzuzeichnen. Eine Lokalisierung der Härterisse wäre durch den Einsatz mehrerer Sensoren und der Auswertung der Signallaufzeiten möglich. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Sensoren auch thermisch belastet werden. Eine Alternative stellt der Einsatz eines Laservibrometers dar, welches berührungslos Schwingungen senkrecht zur Bauteiloberfläche aufzeichnen kann.