

Wirbelstromprüfung auf Schleifbrand auf Werkstoffen nach Sekundärhärtung bzw. thermisch-chemischer Behandlung

Antje ZÖSCH¹, Martin SEIDEL¹, Konstantin HÄRTEL¹

¹ imq-Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH, Crimmitschau

Kontakt-E-Mail: a.zoesch@imq-gmbh.com

Kurzfassung. Die Wirbelstromprüfung ist ein etabliertes Verfahren zur Schleifbrandprüfung. Voraussetzung für die hohe Bewertungssicherheit ist dabei die richtige Interpretation der Prüfsignale. Die Entstehung von Schleifbrand bei der Bearbeitung von herkömmlich martensitisch gehärteten Stahloberflächen ist bekannt und gut verstanden. Zunehmend spielen Werkstoffe eine Rolle, die von diesem Schema abweichen. Diese können z.B. unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt aufweisen, höher legiert sein, oder das Härten erfolgt über thermisch-chemische Verfahren wie Nitrieren oder Karbonitrieren. Auch bei diesen Werkstoffen stellt sich die Frage, ob durch lokale Überhitzung des Gefüges eine Beeinträchtigung der Bauteileigenschaften eintritt. Oder aber, ob es zu lokalen Gefügeänderungen kommen kann, die die Wirbelstromprüfung beeinflussen. Der Chargeneinfluss durch Unterschiede in der Wärmebehandlung ist bekannt. Daher ist zu erwarten, dass lokale Wärmeeinbringung ebenfalls messbare Signaländerungen hervorbringen kann.

Der Beitrag stellt eine Systematik vor, mit der die Schleifbrandgefährdung von Werkstoffen mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen und unterschiedlichen Wärmebehandlungen abgeschätzt werden kann. An Beispielen werden mögliche Gefügeänderungen diskutiert und die zugehörigen Wirbelstromsignale gezeigt.

Weiterhin werden Effekte beschrieben, die bei lokaler Überhitzung von nitrierten Oberflächen auftreten können. Auch diese Effekte äußern sich bei der Wirbelstromprüfung und müssen bei der Interpretation der Prüfsignale berücksichtigt werden. An gezielt eingebrachten, lasergenerierten Ersatzfehlern werden Wirbelstromsignale und die Ergebnisse von Referenzuntersuchungen (Metallografie, Härtemessung, Nital-Ätzung) diskutiert und erste Schlussfolgerungen gezogen.

1 Einführung

Die Wirbelstromprüfung ist ein automatisierbares zerstörungsfreies Prüfverfahren, das sich auf Grund seiner Eigenschaften für den Einsatz in der Fertigung eignet. Ein großes Anwendungsfeld ist die Rissprüfung nach verschiedenen Bearbeitungsschritten an Halbzeugen. Auf gehärteten Stahloberflächen wird oft gleichzeitig eine Schleifbrandprüfung durchgeführt. Die Bewertung der Prüfsignale bei der Rissprüfung erfolgt durch den Vergleich mit Prüfsignalen an Vergleichskörpern, in denen je nach Prüfspezifikation rissähnliche Ersatzfehler eingebracht wurden. Bei der Schleifbrandprüfung geht man in ähnlicher Weise vor und benötigt dazu Vergleichskörper mit Ersatzfehlern, die den zu



erwartenden Schädigungen in ihren physikalischen Eigenschaften möglichst nahekommen und vergleichbare Wirbelstromprüfsignale erzeugen. Um diese richtig zu konditionieren, ist es notwendig, die durch die Bearbeitung möglicherweise erzeugten Schädigungen zu kennen. Bei martensitisch gehärteten Stählen sind Vorgehensweisen für die Abschätzung des Gefährdungspotentials auf der Basis der chemischen Zusammensetzung und der Wärmebehandlung bekannt und werden in Abschnitt 2 beispielhaft diskutiert.

Bei höher legierten Stählen und nach dem Härten durch thermochemische Verfahren sind die Effekte durch lokal eingebrachte Wärme bei der weiteren Bearbeitung noch nicht ausreichend untersucht worden. Auch auf solchen Oberflächen werden bei der Wirbelstromprüfung Änderungen in den Prüfsignalen registriert, die keinen Rissen zugeordnet werden können, sondern ihre Ursache in Veränderungen des Gefüges bzw. der Werkstoffeigenschaften haben müssen. Um diese Anzeigen interpretieren zu können, sind die Analyse der vorliegenden Werkstoffeigenschaften und die Untersuchung des Werkstoffverhaltens bei Wärmeeinbringung durch den Bearbeitungsprozess notwendig.

Zerstörungsfreie Verfahren werden in der Industrie zur Überwachung von Härteprozessen eingesetzt, um die erzielten Härtewerte im Volumen oder in der Randschicht zu überprüfen. Diese Verfahren sind in der Regel nicht für eine hohe laterale Auflösung ausgelegt. Eine weitere Anwendung ist die Bestimmung der Einhärtetiefe, z. B. beim induktiven Härten mittels Ultraschallrückstreuverfahren [1]. Da Eisennitride ferromagnetisch sind und unterschiedliche Curietemperaturen besitzen, können diese Effekte bei nitrierten Bauteilen für zerstörungsfreie Prüfverfahren ausgenutzt werden. Die Wirbelstromprüfung, mikromagnetische Verfahren (z. B. Barkhausenrauschenverfahren) oder die harmonische Analyse der Wirbelstromsignale können unter Beachtung der Einflussfaktoren genutzt werden, um die Dicke der Verbindungsschicht und die Nitrierhärtetiefe zu bestimmen [2]. Industriell nutzbar ist bislang nur die Wirbelstromprüfung zur Qualitätssicherung bei Nitrierprozessen.

2 Vorgehensweise zur Abschätzung des Gefährdungspotentials und der zu erwartenden Unregelmäßigkeiten

Schleifen ist ein Bearbeitungsverfahren, bei dem ein hoher Anteil der aufgewendeten Energie in Reibungswärme umgewandelt wird (> 92 %) [3]. Dabei spielen eine Vielzahl von Einflussfaktoren eine Rolle. Durch ungünstige Beeinflussung der Prozessparameter kann es lokal zu einem ungewollten Wärmeeintrag kommen, der die Gefügeeigenschaften in der Randzone verändert. Man spricht von Schleifbrand. Die Entstehung und die Erscheinungsformen der Gefügeänderungen sind bei martensitisch gehärteten und angelassenen Stählen gut bekannt und erforscht. Der Kohlenstoffgehalt und die Wärmebehandlung des Werkstoffs spielen eine wichtige Rolle. Die Abbildung 1 zeigt ein Schema, das zur Abschätzung der zu erwartenden Effekte genutzt werden kann [4].

- *Frage 1: Ist eine α - γ -Umwandlung möglich?*

Prinzipiell ist die Frage zu stellen, ob im vorliegenden Stahl das Gefüge eine Umwandlung vom kubisch raumzentrierten Gitter (krz, α -Fe) zum kubisch flächenzentrierten Gitter (kfz, γ -Fe) vollziehen kann. Ist dies nicht der Fall, dann kann kein Schleifbrand entstehen. Bei allen un- und niedriglegierten sowie bei Schnellarbeitsstählen und allen hochlegierten martensitischen Stähle ist diese Voraussetzung erfüllt und es besteht eine Schleifbrandgefährdung.

- *Frage 2: Reicht der Kohlenstoffgehalt aus, um Martensit zu bilden?*

Bei einem Kohlenstoffgehalt > 0,3 % in der Randzone von Stahlteilen sind diese härtbar und deshalb schleifbrandgefährdet (einschließlich eingesetzter Stähle mit entsprechendem Kohlenstoffgehalt in der Randschicht). Mit zunehmenden C-Gehalt

nimmt Gefährdung zu.

- *Frage 3: Wurde der Werkstoff gehärtet und angelassen?*

Um zu beurteilen, ob und welches Schleifbrandgefüge entstehen kann, muss die vorangegangene Wärmebehandlung betrachtet werden. Wurde das Bauteil gehärtet und angelassen, können beim Schleifen Temperaturen oberhalb der ursprünglichen Anlassstemperatur weitere Anlassvorgänge auslösen und lokal zu Anlasszonen aus weicherem Martensitgefüge führen. Übersteigt die Temperatur die Temperatur für die α - γ -Umwandlung entstehen zudem Neuhärtezonen. Die genannten Gefügeänderungen führen außerdem zur Änderung der Eigenspannungen in diesem Bereich.

Wurde das Bauteil nicht gehärtet und angelassen, finden keine Anlassprozesse statt. Es können jedoch bei entsprechend hohem Wärmeeintrag Härtezonen aus sprödem Martensit entstehen.

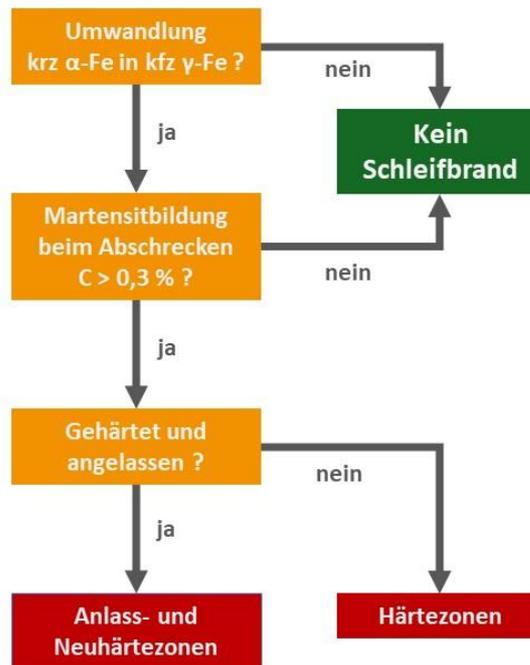


Abb. 1. Schematische Darstellung des Vorgehens zur Abschätzung der Schleifbrandgefährdung und der zu erwartenden Unregelmäßigkeiten [4]

Kaltarbeitsstähle werden bei niedriger Temperatur angelassen und besitzen somit eine geringe Wärmebeständigkeit. Hier können bereits bei niedrigen Temperaturen Anlasszonen entstehen. Sie sind besonders schleifbrandgefährdet. Warmarbeitsstähle, die bei höheren Temperaturen angelassen werden, besitzen eine höhere Wärmebeständigkeit, d. h. Anlassprozesse werden erst bei höheren Temperaturen ausgelöst.

3 Signalentstehung bei thermischen Schädigungen und Zusammenhang mit den Werkstoffeigenschaften

3.1 Härten durch thermische Behandlung: martensitisch gehärtete und angelassene Stähle

Ein klassisches Beispiel ist der Wälzlagerstahl 100Cr6 (1.3505). Mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 1 Masse% ist genügend Kohlenstoff vorhanden, um Martensit zu bilden. Üblicherweise wird der Stahl martensitisch gehärtet und höher angelassen für den Einsatz bei Gebrauchstemperaturen bis ca. 150 °C (Wärmestabilisierung S0) [5]. Damit wird

eine durchgehende Härte von 60-62 HRC erreicht. In dieser Form hat der Stahl 100Cr6 nur eine geringe Wärmebeständigkeit. Beim Schleifen können bereits Temperaturen um 200 °C zu Anlassvorgängen führen, wobei sich lokal Bereiche mit geringerer Härte ausbilden. Bei Temperaturen oberhalb der α - γ -Umwandlungstemperatur (> 800 °C) erfolgt wie beim Härten die Umwandlung in Martensit. Es entstehen spröde Neuhärtezone mit hoher Härte (> 62 HRC) umgeben von Anlasszonen mit geringerer Härte (< 60 HRC).

Bauteile aus dem Stahl 100Cr6 erfüllen demnach alle Voraussetzungen für die Entstehung von Schleifbrand in Form von Eigenspannungsänderungen, Anlasszonen und Neuhärtezone, die bei sehr starker Schädigung auch zur Rissbildung führen können. Deshalb werden Wälzlagerkomponenten aus 100Cr6 nach dem Schleifen häufig zu 100% mit dem Wirbelstromverfahren auf Risse und Schleifbrand geprüft. Für die Prüfung sind Vergleichskörper mit bekannten Schädigungen notwendig. Bei Bauteilen mit Realfehlern können die Schädigungen nur äußerlich ermittelt werden, ohne die Teile zu zerstören. Deshalb werden an Vergleichskörpern künstlich Gefügeänderungen erzeugt. Dabei haben sich Laserverfahren zur Wärmeeinbringung bewährt, um die thermische Belastung zu simulieren [6, 7]. Die Abbildung 2 zeigt zwei lasergenerierte Ersatzfehler im metallografischen Querschliff: links eine Neuhärtezone (hell) umgeben von einer Anlasszone (dunkel) und rechts ein sehr schwache Anlasszone (dunkel) mit geringer Tiefenausdehnung.

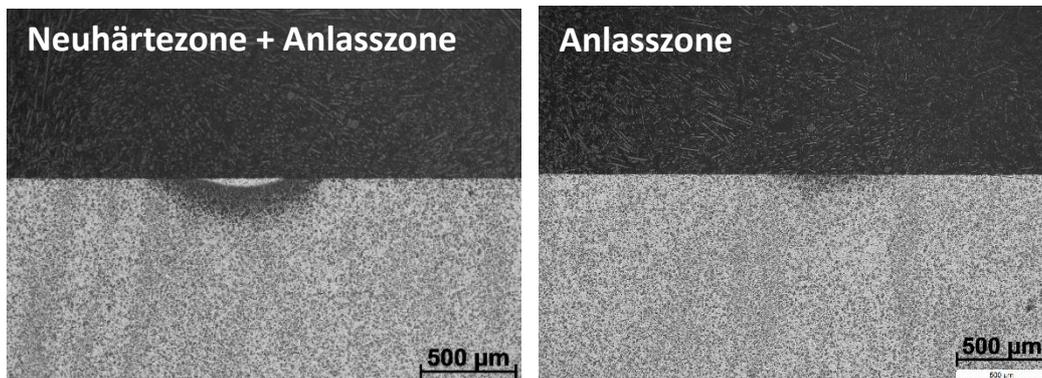


Abb. 2. Lasergenerierte Gefügeänderungen bei Wälzlagerstahl 100Cr6, Härte 60 HRC; metallografische Querschliffe, geätzt mit 3%ig HNO₃

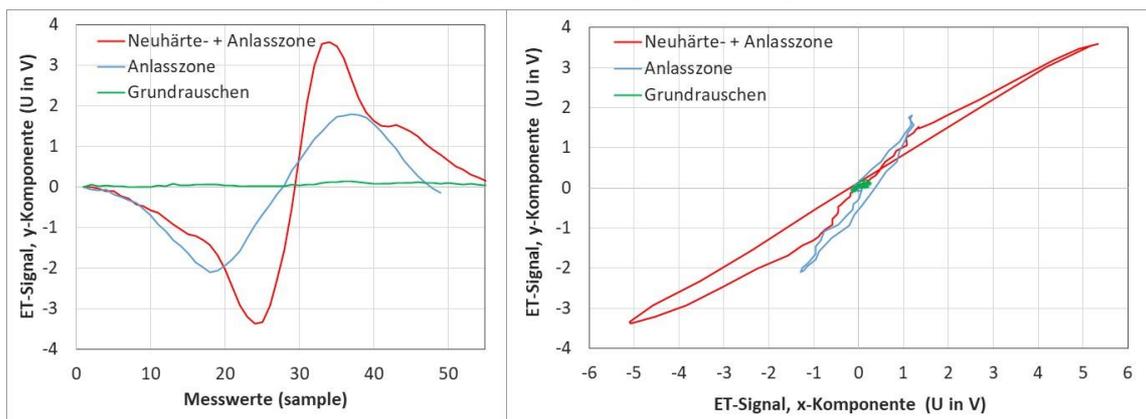


Abb. 3. Prüfsignale der Wirbelstrommessung mit Differenzsonde; Prüffrequenz 3 MHz, Hauptverstärkung 35 dB

Die Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Wirbelstromprüfung mit Differenzsonde. Beide Ersatzfehler erzeugen ein Prüfsignal, das sich deutlich vom Grundrauschen abhebt. Bereits kleine Wärmeeinträge führen zur Änderung der Eigenspannungen bzw. schwachen Anlasszonen und können mit der Wirbelstromprüfung detektiert werden.

3.2 Härten durch thermische Behandlung: kohlenstoffmartensitische korrosionsbeständige Stähle

Ein Beispiel für einen martensitischen korrosionsbeständigen Stahl ist der stickstofflegierte Chromstahl X30CrMoN 15 1 (1.4108) [8]. Dieser Stahl wird martensitisch gehärtet und angelassen. Mit einer Kohlenstoffkonzentration von 0,3 Masse% ist die Bildung von Martensit möglich. Die Zugabe von 0,4 Masse% Stickstoff dient der Stabilisierung des Restaustenits beim Anlassen. Vorher ist ein zusätzliches Abkühlen auf min. -80 °C nach dem Härten notwendig. Er erreicht eine Härte bis 58-60 HRC durchgehend und ist für den Einsatz bei Betriebstemperaturen von über 150 °C geeignet. Beim Anlassen bis ca. 300 °C wird eine hohe Korrosionsbeständigkeit erreicht, bedingt durch die Chromzugabe von ca. 15 Masse%. Bei Anlassen bis ca. 500 °C ist der Stahl weniger korrosionsbeständig hat jedoch eine hohe Warmfestigkeit und Zähigkeit. Bei letzterem tritt eine thermische Schädigung in Form von Anlasszonen erst bei Temperaturen oberhalb von 500 °C auf. Der Übergangsbereich zur Bildung von Neuhärtezone ist gering, so dass hier deutlich früher auch mit stärkeren Schädigungen zu rechnen ist.

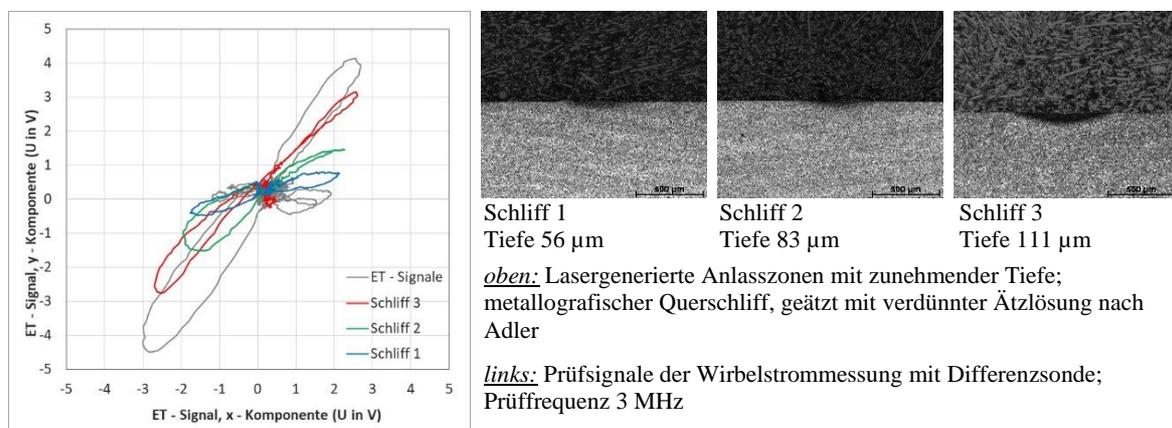


Abb. 4. Ergebnisse der Wirbelstrommessung und der Untersuchung der Gefügeänderungen

Die Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Wirbelstrommessung und die dazugehörigen Wirbelstromprüfsignale. Die metallografischen Querschliffe zeigen Anlasszonen im Randbereich, die einen Härteabfall von ca. 750 HV_{0,2} (Ausgangszustand) auf 500-600 HV_{0,2} bewirken (gemessen am Querschliff). Die Amplitude der Wirbelstromsignale der Ersatzfehler nimmt mit zunehmender Tiefe der Anlasszonen ebenfalls zu und die Phasenlage dreht sich. Dies weist auf eine höhere Eindringtiefe der Wirbelströme im Vergleich zu un- und niedrig legierten Stählen hin. Die magnetische Permeabilität ist ca. eine Größenordnung geringer als bei kohlenstoffmartensitischen Stählen. Die Magnetisierbarkeit durch hohen Anteil an Chrom und den durch Stickstoff stabilisierten Restaustenit beeinträchtigt [9]. Zudem beträgt der spezifische elektrische Widerstand des Stahls X30CrMoN 15 1 mit $60\ \mu\Omega\text{cm}$ ca. das 3fache des spezifischen elektrischen Widerstands des Stahls 100Cr6 ($22\ \mu\Omega\text{cm}$) [10, 11]. Durch die größere Eindringtiefe der Wirbelströme kann das Ausmaß tiefer gehender Schädigungen besser eingeschätzt werden.

3.3 Härten durch thermochemische Behandlung

Thermochemische Behandlungen wie Nitrieren, Nitrocarborieren werden in der Wälzlagerindustrie zur Verbesserung des Wälzverschleißes und der Korrosionsbeständigkeit eingesetzt [2, 12]. Die Härtesteigerung wird nicht durch die Umwandlung in Martensit, sondern durch die chemische Veränderung der Randschicht erreicht. Das Nitrieren findet im

„klassischen“ Temperaturbereich bei Temperaturen bis 650 °C statt. In diesem Bereich finden keine α - γ -Phasenumwandlungen im Stahl statt, d. h. es wird kein neuer Martensit gebildet. Voraussetzung ist die Verwendung von Nitrierstählen, die typischerweise einen Kohlenstoffgehalt von 0,3-0,4 Masse% und Legierungselemente besitzen (s.g. Nitridbildner wie Al, Cr, Mo, V, Ti). Im Ausgangszustand sollte der Stahl vergütet sein oder ein Ferrit – Perlit – Gefüge aufweisen. Die Nitrierschicht bildet sich durch Diffusion von N-Atomen in die Randschicht und durch Bildung von Nitriden (Eisennitrid und Legierungsnitride). Das Lösungsvermögen für Stickstoff ist dabei abhängig vom Gefüge des verwendeten Stahls und von der Temperatur beim Nitrieren. Es werden ähnliche Härteprofile wie beim Einsatzhärten erreicht. Die Nitrierschicht ist beständig bis min. 500 °C. Die Abbildung 5 zeigt den Aufbau einer Nitrierschicht mit Verbindungsschicht, Diffusionsschicht und Grundgefüge.

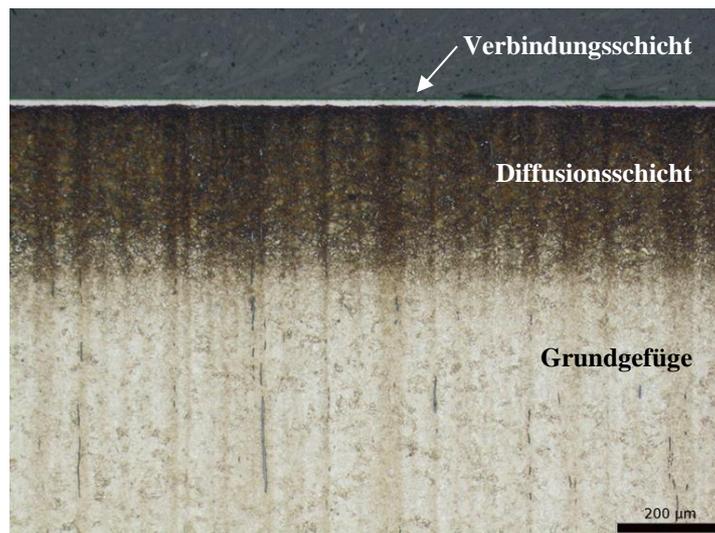


Abb. 5. Aufbau der Nitrierschicht [2]

Auch bei nitrierten Oberflächen kann es z. B. beim Entfernen der Verbindungsschicht durch Schleifen zum ungewollten Wärmeeintrag kommen, der Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, der Gefügestruktur und damit eine Verringerung der Nitrierschichthärte hervorrufen kann. Eine Prüfung nitrierter Bauteile mit Hilfe der Nitalätzung ist nach Norm ISO 14104 nicht möglich. Deshalb werden alternative Prüfverfahren benötigt. Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich thermische Einflusszonen durch Laserbehandlung erzeugen und mit der Wirbelstromprüfung erkennen lassen.

Um eine Schädigung beim Entfernen der Verbindungsschicht zu simulieren, wurde diese abgeschliffen. Anschließend wurden durch Laserbehandlung in die Diffusionszone der Nitrierschicht fünf thermische Einflusszonen unterschiedlicher Intensität eingebracht. Die Abbildung 6 zeigt die metallografischen Schlitze der Strukturänderungen durch die vier höchsten Intensitäten (geätzt mit 3% Nitalsäure). Bei den Schlitzen 1-3 sind in Abhängigkeit der Intensität helle Einflusszonen zu erkennen, deren Ausdehnung mit der eingebrachten Wärme korreliert. Bei Schliff 4 und 5 waren keine Gefügeänderungen mehr zu erkennen.

Die so veränderten Versuchsteile wurden mittels Wirbelstromverfahrens unter Verwendung einer Absolutsonde geprüft. Von allen fünf Einflusszonen wurden Prüfsignale erhalten, die sich ausreichend vom Grundrauschen abhoben (Abbildung 7). Die thermischen Einflusszonen konnten somit mittels Wirbelstromverfahrens auch erkannt werden, wenn im Querschliff lichtmikroskopisch keine Gefügeänderungen mehr sichtbar waren.

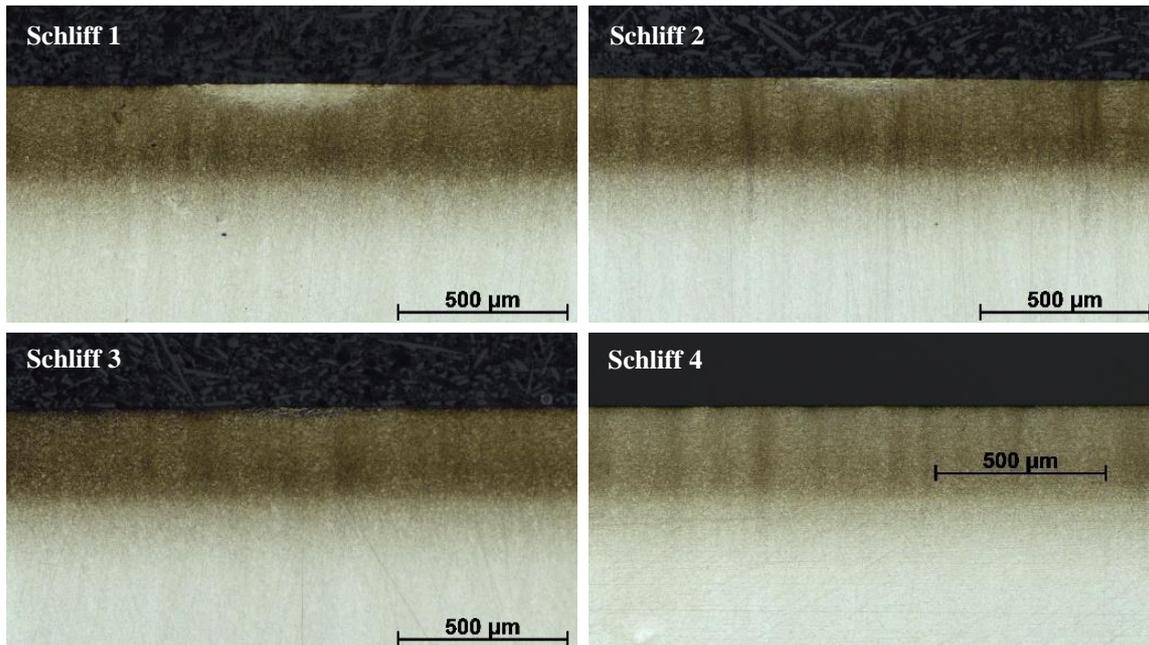


Abb. 6. Strukturänderungen durch thermische Beeinflussung der Nitrierschicht; metallografische Schliffe

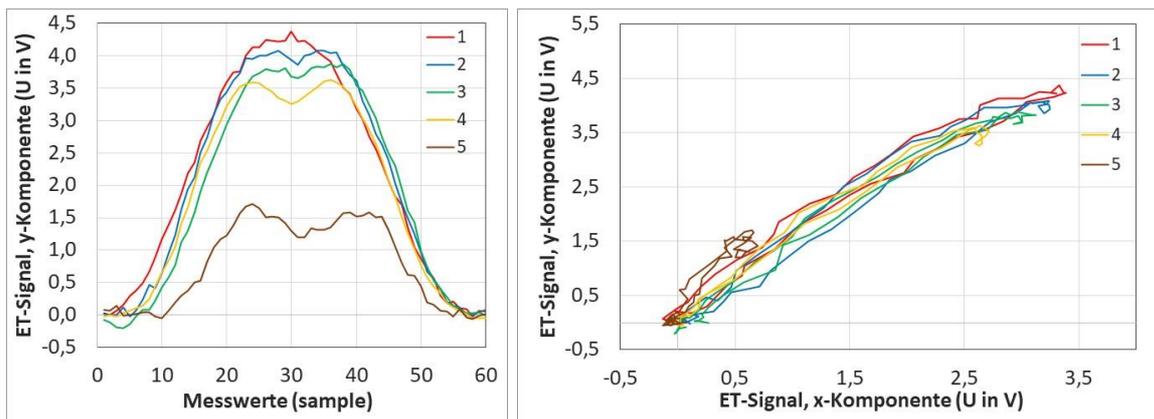


Abb. 7. Prüfsignale der Wirbelstrommessung mit Absolutsonde; Prüffrequenz 3 MHz

Zur Interpretation der Prüfsignale müssen die Vorgänge untersucht werden, die in der Nitrierschicht durch erneuten Wärmeeintrag ausgelöst werden können. Anhaltspunkte liefern mehrfach kombinierte thermochemische/Hochgeschwindigkeitswärmebehandlungen, bei denen nach der thermochemischen Behandlung (Nitrieren) ein Laser- bzw. Elektronenstrahlhärteprozess durchgeführt werden [13]. Durch kurzzeitigen hohen Wärmeeintrag und die anschließende Selbstabschreckung können Diffusionsvorgänge des Stickstoffs in Richtung Oberfläche und Kern sowie Umwandlungsvorgänge ausgelöst werden. Dabei kann es in der Zone der thermischen Beeinflussung zur Erhöhung der Härtewerte durch die Bildung von feinem Martensit in der Diffusionszone kommen.

Die Messung der Härte nach Vickers am metallografischen Schliff ergab eine leichte Erhöhung im laserbeeinflussten Bereich. Außerdem wurden im Gefüge Umwandlungsvorgänge im Bereich der Nitride und Karbide festgestellt, die ebenfalls lokal zu veränderten Eigenschaften der Härte und der Eigenspannungen führen können. Diese Effekte und insbesondere deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

4 Zusammenfassung

Das Wirbelstromverfahren wird in der Wälzlagerindustrie zur Riss- und Schleifbrandprüfung eingesetzt. Für die sichere Interpretation der Prüfsignale ist es notwendig, die zu erwartenden Schadensbilder zu kennen. Eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Schleifbrand und der zu erwartenden Unregelmäßigkeiten kann auf der Basis der chemischen Zusammensetzung und der vorliegenden Wärmebehandlung des Bauteiles erfolgen. Besonders schleifbrandgefährdet sind Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von mehr als 0,3 Masse%, die martensitisch gehärtet und bei niedriger Temperatur angelassen wurden. Mit steigender Anlass temperatur nimmt auch die Warmfestigkeit zu und die Schädigung tritt der Bearbeitung erst bei höheren Oberflächentemperaturen ein.

Beispiele für Wirbelstromprüfsignale wurden für martensitisch gehärtete und angelassene Stähle, kohlenstoffmartensitische korrosions-beständige Stähle und nitrierte Stähle gezeigt. Dafür wurden mit Hilfe von Lasertechnologie Ersatzfehler erzeugt. In den ersten beiden Fällen entstehen abhängig vom Wärmeeintrag lokal Anlasszonen mit geringerer Härte und Neuhärtezonen (spröder Martensit) mit hoher Härte. Diese Gefügeänderungen lassen sich mit der Wirbelstromprüfung gut darstellen. Bei kohlenstoffmartensitischen korrosionsbeständigen Stählen wurde auf Grund der geringeren magnetischen Permeabilität und geringeren elektrischen Leitfähigkeit eine größere Eindringtiefe erreicht, die es ermöglicht, Information über tiefer ausgedehnte Gefügeänderungen abzuleiten. Nitrierte Oberflächen wurde nach Entfernen der Verbindungsschicht einer Laserbehandlung unterzogen. In der Diffusionsschicht wurden Gefügeänderungen erzeugt, die mit dem Wirbelstromverfahren messbar waren. Weiterführende Untersuchungen sollen Aufschluss über die Wirkung auf die Bauteileigenschaften und das Einsatzverhalten liefern.

5 Referenzen

- [1] Scherleitner E, Kerschbaummayr C, Haderer W, Reitinger B, Mitter T, Gruensteidl C. Characterization of Microstructure Variations by Laser-Ultrasound during and after the Heat Treatment of Metals. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2021; 1178:012050
- [2] D. Lietke et. al.: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen II, Nitrieren und Nitrocarborieren. 7. Auflage, 2018, expert Verlag GmbH, ISBN 978-3-8169-3402-8
- [3] M. Meister: Vademecum der Schleiftechnik, Carl Hanser Verlag, München 2011
- [4] Martin W. Seidel, Antje Zösch, Konstantin Härtel: Beurteilung der Gefährdung von Stählen hinsichtlich thermischer Schädigungen beim Schleifen. Hanser Schleiftagung, 09.-10.02.2021, Digitales Event
- [5] Werkstoffe für die Wälzlagertechnik. © Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Ausgabe: 2013
- [6] M. Seidel: Schleifbrand und dessen Prüfung. Hanser Fachbuchverlag 2020, ISBN-10: 3446463348
- [7] DIN SPEC 4882: Zerstörungsfreie Prüfung- Elektromagnetische Prüfverfahren- Vergleichskörper für die Schleifbrandprüfung. Nov. 2016
- [8] Nichtrostender Kaltarbeitsstahl X 30 CrMoN 15 1, CRONIDUR® 30; Energietechnik Essen GmbH, 2003
- [9] Merkblatt 827: Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1. Auflage, Ausgabe 2013, Best.-Nr. MB 827
- [10] Merkblatt 821: Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei; 5. Auflage Ausgabe 2014, Best.-Nr. MB 821
- [11] IBC Wälzlager GmbH: Werkstoffe für Wälzlager. 06.04.2023
https://www.ibc-waelzlager.com/files/IBC_Waelzlagerwerkstoffe.pdf
- [12] Merkblatt 447: Wärmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarborieren. Stahl- Informationszentrum, Ausgabe 2005, ISSN 0175-2006
- [13] H.-J. Eckstein: Technologie der Wärmebehandlung von Stahl. 2. Auflage (1987). VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. ISBN-Nr. 3-342-00220-4