

HANSER



Leseprobe

zu

„Schleifbrand und dessen Prüfung“

von Martin W. Seidel

Print-ISBN: 978-3-446-46334-9
E-Book-ISBN: 978-3-446-46417-9
E-Pub-ISBN: 978-3-446-46466-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46334-9>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorworte	VII
Dank und Widmung	IX
1 Einleitung	1
2 Begriffsbestimmungen	3
3 Werkstofftechnische Grundlagen der Entstehung von Schleifbrand	5
3.1 Einflussfaktoren auf die Entstehung von Schleifbrand	5
3.2 Anlass- und Neuhärtezone(n)	8
3.2.1 Natürlicher Schleifbrand	8
3.2.2 Mittels Laser generierte Anlass- und Neuhärtezone(n) ..	13
3.3 Schleifbrand und Eigenspannungen	15
3.4 Chemische Zusammensetzung von Stahl und dessen Schleifbrandgefährdung	19
3.5 Schleifbrand und Bauteilverhalten	21
3.6 Schädigungen bei anderen mechanischen Bearbeitungsverfahren	23
4 Prüfverfahren – Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen ...	25
4.1 Überblick	25
4.2 Laborverfahren	27
4.2.1 Metallografie und Härteprüfung	27
4.2.2 Eigenspannungsmessungen	31
4.3 Industrielle Methoden	34
4.3.1 Nital-Ätzen	34

4.3.2	Elektromagnetische Verfahren	44
4.3.2.1	Grundlagen	44
4.3.2.2	Wirbelstromprüfung	49
4.3.2.3	Barkhausenrauschen-Verfahren	62
4.3.2.4	Mikromagnetisches 3MA-Verfahren	73
5	Zusammenfassung und Ausblick	79
6	Glossar	81
7	Quellenverzeichnis	89
	Anhang	95
	Index	99

Vorworte

Trotz vieler konkurrierender Fertigungsverfahren, ob abtragende, trennende oder generative, ist das Schleifen in der Präzisions- und Feinbearbeitung nicht wegzudenken. Darüber hinaus lassen sich viele Werkstoffe wie auch Stähle in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen dank der Schleiftechnik gut bearbeiten. Obwohl die Technologie dieses Verfahrens in den letzten Jahrzehnten große Entwicklungsschritte erfahren hat, ist die Wärmeentwicklung in der Kontaktzone bedingt durch den Zerspanmechanismus ein immer begleitendes Phänomen, welchem sehr viel Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Besonders bei Stahlwerkstoffen kann eine thermische Randzonenschädigung zum Bauteilversagen führen. Durch Strukturoptimierungen von Bauteilgeometrien können Gewichtseinsparungen erreicht werden, sie führen aber meist auch zu Querschnittsreduzierungen, die wiederum bei Belastung hohe Spannungen entstehen lassen. So müssen thermische Gefügebeeinflussungen unbedingt vermieden werden. Da solche Schädigungen nicht immer an der Oberfläche sichtbar sind, kommt der Schleifbrandprüfung eine besondere Bedeutung zu. Es werden Prüfverfahren benötigt, die schnelle, praktikable und zuverlässige Resultate hervorbringen. So gibt dieses Buch dem Leser einen guten Überblick über die wichtigsten Prüfverfahren und zeigt dessen Möglichkeiten und Grenzen auf. Durch seine enorme Erfahrung ist es dem Autor Dr. Martin Seidel gelungen, die Zusammenhänge verständlich und nachvollziehbar zu erklären. So hat der Anwender von Verfahren zur Schleifbrandprüfung mit diesem Buch einen sehr guten praktischen Begleiter für seine alltägliche Arbeit.

Köln, im Januar 2020

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Saxler

Um den kontinuierlich steigenden Anforderungen an Präzisionsbauteile gerecht zu werden, ist die Schleiftechnologie das in sehr vielen Fällen dominierende Fertigungsverfahren. Das Thema „Schleifbrand“ erhält dabei wachsende Bedeutung in vielen industriellen Anwendungen. Während die Einhaltung geometrischer Kenngrößen für Maß- und Formgenauigkeit sowie Rauheit seit Jahren den Stand der Technik darstellt, gerät die Einhaltung sogenannter Randzoneneigenschaften bei allen hochbelasteten Bauteilen zunehmend in den Fokus. Die Forderung nach Schleifbrandfreiheit, das heißt nach der Vermeidung jeglicher thermischer Überlastung des Bauteils, ist dabei die zwingend notwendige Bedingung. Vermehrt gehen Endabnehmer geschliffener Präzisionsbauteile inzwischen auch dazu über, definierte Randzonenzustände (wie z. B. ein Mindestdruckeigenspannungsniveau an der geschliffenen Oberfläche) einzufordern.

Hier sind schnelle und zerstörungsfreie Messverfahren gefordert, die belastbare, reproduzierbare, dokumentierbare und objektive Messgrößen liefern, die den Schleiftechnologieanwender zum Nachweis der fehlerfreien Produktion befähigen.

Das vorliegende Werk richtet sich an interessierte Personen aus der Praxis, die mit derartigen Messaufgaben betraut werden und über den Hintergrund der verschiedenen Verfahren mehr Informationen erhalten möchten. Es werden die wesentlichen Messprinzipien kurz und verständlich erklärt, begleitet von wichtigen Informationen zur Messpraxis und zur Kalibrierung der Verfahren. Das darüber hinausgehende Interesse wird durch relevante Literaturangaben befriedigt.

Besondere Eignung zur Detektion von Schleifbrand besitzen mikromagnetische Messverfahren. Genau 100 Jahre nach der Vorführung des „Rauschversuchs“ durch Heinrich Georg Barkhausen im Jahr 1919 an der Technischen Universität Dresden haben Messverfahren auf Basis dieses Barkhausenrauschens längst industrielle Reife erlangt und finden vielfältig Anwendung zur Schleifbranddetektion. Möge Ihnen das vorliegende Werk das Verständnis für dieses und alle anderen ausgewählten Verfahren näher bringen und Ihnen bei der täglichen Arbeit hilfreich sein.

Bremen, im November 2019

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Dr. h. c. Bernhard Karpuschewski

Dank und Widmung

In dieses Buch sind Erfahrungen und Ergebnisse, die im imq Ingenieurbetrieb GmbH auf dem Gebiet der Schleifbrandprüfung gewonnen worden sind, eingeflossen. Ich danke den Mitarbeitern von imq, insbesondere der Abteilung Forschung/Entwicklung unter der Leitung von Frau Dr. Antje Zösch für die Mitarbeit an diesem Buchprojekt.

Bildmaterial wurde dankenswerter Weise von der Grindaix GmbH, der ibg Prüfcomputer GmbH, dem IZFP Saarbrücken, der Rohmann GmbH, der QASS GmbH und der Stresstech GmbH bereitgestellt.

Den Professoren Gerhard Mook/Universität Magdeburg, Lothar Spieß/Technische Universität Ilmenau und Silke Mücklich/Westsächsische Hochschule Zwickau verdanke ich wertvolle Hinweise und Bildmaterial für einzelne Abschnitte.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Wilfried Saxler/Rheinische Fachhochschule Köln und Herrn Prof. Bernhardt Karpuschewski/Universität Bremen für die vielfältige Unterstützung, das bereitgestellte Material und die Hinweise nach Durchsicht des Manuskriptes.

Dieses Buch widme ich meiner Frau Christine, die mich ermutigt hat, mit diesem Projekt zu beginnen und es über einen längeren Zeitraum zu verfolgen. Sie konnte die Fertigstellung des Buches nicht mehr erleben. Aber ich hoffe, dass sie dort, wo sie jetzt ist, meine immerwährende Liebe und Dankbarkeit spürt.

Crimmitschau im Januar 2020

Dr. sc. techn. Dr. rer. nat. Martin Wolfgang Seidel

4

Prüfverfahren – Grundlagen, Möglich- keiten und Grenzen

■ 4.1 Überblick

Für die Schleifbrandprüfung kommen verschiedene Prüfverfahren in Betracht. Je nach Verfahren werden dabei unterschiedliche Eigenschaften der Anlass- bzw. Neuhärtezone genutzt, um diese nachzuweisen. In Tabelle 4.1 sind die unterschiedlichen Prüfverfahren den Merkmalen von Anlass- bzw. Neuhärtezone zugeordnet.

Tabelle 4.1 Zuordnung der Prüfverfahren zu den Merkmalen der Anlass- und Neuhärtezone

Merkmale	Anlasszone	Neuhärtezone	Prüfverfahren
Härte	Niedrig	Hoch	Kleinlast- bzw. Mikrohärtprüfung
Beständigkeit gegen Säuren	Niedrig	Hoch	Metallografie Nitalätzverfahren
Eigenspannungen	Zugspannungen	Druck- oder Zugspannungen	Röntgenbeugungsverfahren
Elektromagnetische Eigenschaften	Magnetisch „weicher“	Magnetisch „härter“	Barkhausenrauschen-Verfahren Wirbelstromprüfung 3MA-Verfahren
Oberflächenrisse			Wirbelstromprüfung Magnetpulverprüfung Farbeindringverfahren Ultraschallprüfung
Verdeckte Risse			(Magnetpulverprüfung) Ultraschallprüfung

Die Härteunterschiede zwischen Anlass- und Neuhärtezonen einerseits und deren ungeschädigter Umgebung andererseits werden bei der Kleinlast- und Mikro Härteprüfung ausgenutzt. Die metallografischen Methoden beruhen auf der unterschiedlichen Beständigkeit des Martensits und des Restaustenits gegenüber Säuren und anderen starken Oxidationsmitteln. Röntgenbeugungsverfahren nutzen aus, dass die Eigenspannungen zu Änderungen der Netzebenenabstände im Kristall führen. Die genannten Prüfungen erfolgen in der Regel nicht direkt am Bauteil, sondern an herausgearbeiteten Proben und sind insgesamt zeitaufwendig. Dies bedeutet, dass zwischen der Probeentnahme und dem Vorliegen des Prüfergebnisses eine längere Zeit vergeht. Außerdem kann die Prüfung aufgrund der Zerstörung der gefertigten Teile nur stichprobenartig erfolgen. Die vorstehend genannten Prüfverfahren werden einem Vorschlag in /KAR1995/ folgend der Gruppe der Laborverfahren zugeordnet. Diese werden in Abschnitt 4.2 behandelt.

Als industrielle Verfahren (Abschnitt 4.3) werden Prüfmethode bezeichnet, die es aufgrund kleiner Prüfzeiten ermöglichen, in kurzer Zeit größere Stückzahlen von gefertigten Teilen zu prüfen, ohne diese zu zerstören. Dazu gehören das Nitalätzverfahren, die Wirbelstromprüfung, das Barkhausenrauschen-Verfahren und das Mikromagnetische 3MA-Verfahren sowie Verfahren zur Oberflächenrissprüfung.

Beim Nital-Ätzen (Abschnitt 4.3.1) wird wie bei der Metallografie die Beständigkeit gegenüber Säuren – insbesondere gegenüber der Salpetersäure – ausgenutzt. Führt man das Nital-Ätzen nach Norm durch, so bewirkt die Säure in der Regel nur einen sehr geringen Abtrag der Oberfläche /ZÖ2017/. Störend kann aber die Verfärbung der Teileoberfläche sein. Diese Prüfung wird daher hin und wieder auch als quasi zerstörungsfrei bezeichnet.

Die Wirbelstromprüfung, das Barkhausenrauschen-Verfahren und das Mikromagnetische 3MA-Verfahren gehören zur Gruppe der elektromagnetischen Prüfmethode (Abschnitt 4.3.2) und beruhen auf den unterschiedlichen elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Anlass- und Neuhärtezonen. Diese Prüfmethode wirken zerstörungsfrei direkt am Bauteil und können oftmals innerhalb der Fertigungstaktzeiten durchgeführt werden. Allerdings erfordern sie immer die Kalibrierung an Teilen mit bekannten Eigenschaften, d. h. im Falle der Schleifbrandprüfung an Teilen mit definierten Anlass - bzw. Neuhärtezonen.

Oberflächenrisse, die nach dem Schleifen im Teil vorhanden sind, können mit Farbeindringverfahren, mittels der Magnetpulverprüfung und der Ultraschallprüfung detektiert werden. Verdeckte Risse können mittels Ultraschallprüfung und, falls sie unmittelbar unter der Oberfläche beginnen, unter bestimmten Bedingungen mit der Magnetpulverprüfung angezeigt werden.

Für die Interpretation der Prüfergebnisse ist es erforderlich, dass das Verfahrensprinzip verstanden wird und insbesondere die Anwendungsgrenzen bekannt sind. Andernfalls besteht die Gefahr von Fehlinterpretationen der Prüfergebnisse.

In den folgenden Abschnitten soll deshalb neben den Verfahrensprinzipien insbesondere auch auf die Anwendungsgrenzen und Quellen für mögliche Fehlinterpretationen eingegangen werden.

Mit den vorstehend genannten Prüfverfahren werden die Teile nach Beendigung des Schleifprozesses in gesonderten Prüfeinrichtungen untersucht. Der Fertigungsprozess läuft dann in der Regel weiter, sodass bis zum Vorliegen des Prüfergebnisses unter Umständen weitere schleifbrandbehaftete Teile gefertigt werden. Es besteht daher Bedarf an sogenannten Online-Überwachungssystemen, die die Entstehung des Schleifbrandes während des Schleifens durch geeignete Sensorik registrieren können. Von /SAX1997/ wurden dazu die physikalischen Grundlagen der Signalentstehung und Signalausbreitung zur Erkennung von Schleifbrand durch Schallemissionsanalyse untersucht. Am Beispiel des Außenrundschleifens und des Verzahnungsschleifens konnte gezeigt werden, dass es durch Auswertelgorithmen, die mithilfe künstlicher neuronaler Netze erstellt wurden, möglich ist, thermisch geschädigte Bauteile von Gut-Teilen zu unterscheiden. Der breiten Einführung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung ganzer Fertigungslinien steht aber der hohe gerätetechnische Aufwand entgegen. Dieser ist erforderlich, um die Schleifbrandsignale von den Störsignalen der Schleifmaschine und des Prozesses zu trennen.

■ 4.2 Laborverfahren

4.2.1 Metallografie und Härteprüfung

Metallografie

Eine metallografische Untersuchung beginnt mit der Herstellung eines metallografischen Schliffes. Dabei wird zunächst mittels einer abrasiven Trennmaschine ein Segment aus dem Bauteil herausgearbeitet.



Beim Trennen darf das Werkstück nicht derart erwärmt werden, dass dadurch angelassene Bereiche entstehen und so Schleifbrand vorgetäuscht wird.

Eine besondere Herausforderung besteht bei der Verwendung üblicher Trennschleifgeräte darin, dass die Trennscheiben oftmals viel breiter als die zu findenden Anlasszonen sind. Das Trennen der Teile muss deshalb unmittelbar neben der vermuteten Zone erfolgen. Danach sind die herausgetrennten Teile einzubetten und dann systematisch so weit abzuschleifen, dass der Querschliff möglichst mittig in der Anlass- oder Neuhärtezone liegt. Das Einbetten der Proben muss so erfol-

gen, dass das Einbettmittel die Probe vollständig und spaltenfrei umschließt. Ansonsten können beim späteren Ätzen durch aus Spalten herausgelaufenes Ätzmittel Scheinanzeigen entstehen, die zu Fehlinterpretationen führen.

Beim Ätzen mit verdünnter Salpetersäure wird ausgenutzt, dass Anlasszonen stärker angegriffen werden als der diese Zone umgebende Martensit. Sie erscheinen deshalb im Mikroskop dunkel /ECK1969/. Die Neuhärtezonen wiederum bestehen aus sehr feinkörnigem Martensit und aus Restaustenit. Die extreme Feinkörnigkeit des Martensits und der Restaustenit, der durch Salpetersäure nicht angegriffen wird, sind verantwortlich für deren „weiße Färbung“ /ECK1969, TÖ1998, ANG2006/. In der Literatur werden diese Neuhärtezonen daher oftmals als weiße Schichten bezeichnet. Bild 4.1 zeigt beispielhaft Neuhärtezonen und diese umschließende Anlasszonen auf der Laufbahn eines Wälzlageraußenringes.

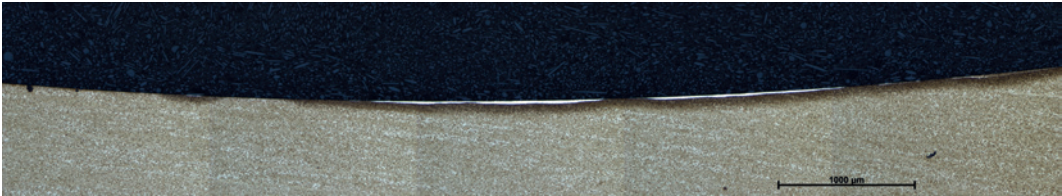


Bild 4.1 Querschliffe durch einen Wälzlageraußenring mit mehreren Neuhärtezonen und diese umschließenden Anlasszonen, Ätzung in 3%iger alk. HNO_3 (Quelle:imq)

Die Neuhärtezonen grenzen sich deutlich von den umgebenden Bereichen ab. Deren Tiefe kann im Schliff somit recht genau bestimmt werden. Die dunklere Färbung der Anlasszonen dagegen geht allmählich in die hellere Färbung des unbeeinflussten Bereiches über. Hier bedarf es daher einer einheitlichen Festlegung des Grauwertes, bei dem der Übergang zum Grundgefüge erfolgt ist.



Erfahrungen zeigen, dass Anlasszonen geringer Tiefe (als Richtwert können 10 µm angenommen werden) nur mit großem Aufwand nachgewiesen werden können.

Die korrekte Abarbeitung aller aufgeführten Präparationsschritte ist entscheidend für die Aussagefähigkeit der metallografischen Schliffe. Eine zuverlässige metallografische Untersuchung ist nur möglich, wenn diese in einem gut ausgerüsteten Metallografielaboratorium durch erfahrenes und geschultes Prüfpersonal erfolgt.

Kleinlast- und Mikrohärteprüfung

Anlass- und Neuhärtezonen können auch mittels *Kleinlast- und Mikrohärteprüfung* ausgemessen werden. Dabei werden auf den Querschliff – beginnend nahe dem Probenrand – Härteeindrücke gesetzt. Bild 4.2 zeigt Härteeindrücke in einer Neu-

härte- und in der umgebenden Anlasszone. Im unteren Teilbild ist der gemessene Härte-Tiefen-Verlauf abgebildet.

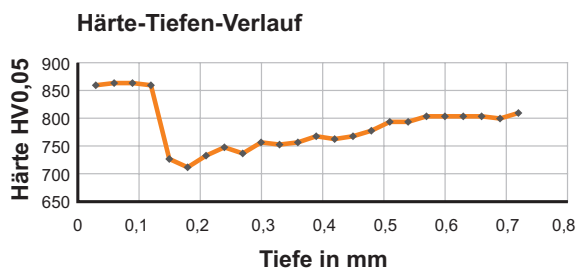
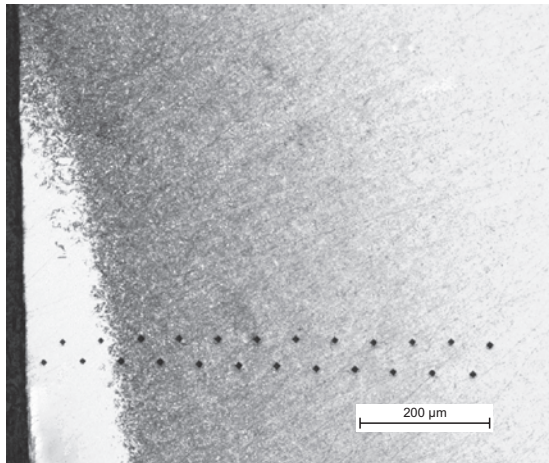


Bild 4.2

Mikrohärteprüfung an einer mittels Laser erzeugten Neuhärte- und Anlasszone – oberes Bild: Härte-eindrücke am Querschliff; unteres Bild: Härte-Tiefen-Verlauf HV0,05 (Quelle: imq)

Die Neuhärtezone weist Härten von über 850 HV0,05 auf. Ab einer Tiefe von 0,1 mm fällt die Härte auf Werte fast 500 HV0,05 ab, um danach allmählich auf den Wert des ungeschädigten Bereiches von ungefähr 700 HV0,05 anzusteigen. Dieser wird ungefähr bei 0,5 mm erreicht.

Die Durchführung der Prüfung erfolgt nach DIN EN ISO 6507. Je nach Tiefe der Anlass- und Neuhärtezone kann diese mit Lasten zwischen 10 und 0,05 N erfolgen. Der Abstand der Härteeindrücke zum Probenrand und zwischen den Härteeindrücken selbst muss so groß sein, dass diese sich nicht gegenseitig beeinflussen. Der Abstand zwischen den Härteeindrücken soll zwei- bis dreimal größer als die Diagonale der Eindrücke sein. Um dennoch eine ausreichend feine Tiefenauflösung zu erhalten, wurden hier zwei parallele Reihen von Eindrücken gesetzt. Eine Übersicht, welche Randabstände bei verschiedenen Prüflasten einzuhalten sind, ist im Anhang enthalten. Im obigen Beispiel wurde nach HV0,05 geprüft. Geht man in der Neuhärtezone von einer Härte von 900 bis 1000HV aus, so muss der Abstand des ersten Messpunktes zum Rand größer als 0,01 mm sein. Daraus ist ableitbar, dass insbesondere die häufig nur wenige µm dünnen Neuhärtezone nicht mittels Mikrohärteprüfung charakterisiert werden können.

Härtemessungen auf der Teileoberfläche

Es wird auch häufig gefragt, ob mittels Messung der Oberflächenhärte auf den Teilen Schleifbrand nachgewiesen werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage muss die Tiefe der entstehenden Härteeindrücke betrachtet werden. Beim Rockwell-Verfahren mit Diamantkegel (HRC) haben diese eine Tiefe von ca. 0,1 mm. Bei der Prüfung nach Vickers mit einer Last von 100 N (HV10) beträgt die Eindringtiefe ca. 0,03 bis 0,05 mm. Will man die Härte einer Anlass- bzw. einer Neuhärtezone annähernd korrekt bestimmen, so muss sowohl deren laterale Ausdehnung als auch die Tiefenausdehnung deutlich größer als die Breite und Tiefe der Härteeindrücke sein. Ansonsten ermittelt man einen „Misch“-Wert, der nicht nur die Härte der Schleifbrandzone, sondern auch die Härte darunter befindlicher bzw. angrenzender ungeschädigter Bereiche widerspiegelt. Neuhärtezone sind häufig nur wenige μm dick. Deshalb werden sie bei der Prüfung sowohl nach HRC als auch nach HV10 vom Eindruckkörper durchstoßen. Die gemessenen Härtewerte spiegeln dann vornehmlich die Härte der darunterliegenden Bereiche und nicht die der Neuhärtezone wider.

Die Härte kann auch mittels *mobiler Härteprüfung* nach dem *Ultrasonic-Contact Impedance-Verfahren (UCI-Verfahren)* ermittelt werden /TIETZE2015/. Hier werden spezielle Härteprüfsonden manuell oder mit einer Vorrichtung auf die Teileoberfläche aufgesetzt. Wie bei der klassischen Vickershärte kann mit unterschiedlichen Prüfkräften von 1 N bis 100 N gemessen werden. Verwendet man z. B. 1 N, so entstehen Härteeindrücke einer Tiefe von 0,002 bis 0,003 mm. Um zuverlässige Messwerte zu erhalten, darf die Rauigkeit der Oberfläche maximal 1/3 der Eindringtiefe, d. h. $< 0,001$ mm betragen. Bild 4.3 zeigt UCI-Härteverläufe über der Oberflächen von induktiv gehärteten Kurbelwellen, in die mit einem Laser eine Anlasszone eingebracht wurde.

Die Anlasszone kann sehr gut nachgewiesen werden. Allerdings war dies nur möglich, weil die Sonden nicht manuell, sondern mit einer Vorrichtung auf die Oberfläche aufgesetzt wurden.

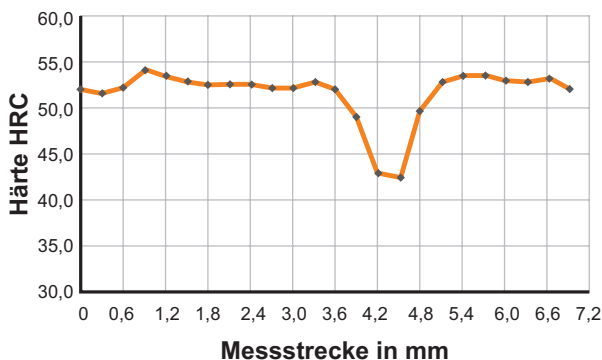


Bild 4.3

Verlauf der UCI-Härte $F = 1$ N auf der Oberfläche einer induktiv gehärteten Kurbelwelle, in die mittels Laser eine Anlasszone eingebracht wurde (nach /ZÖ2016/)

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die klassische Härteprüfung nicht geeignet ist, Schleifbrand zu detektieren. Führt man die Sonden mit einer Vorrichtung, können mittels des UCI-Verfahrens mit niedrigen Prüfkraften Anlasszonen festgestellt werden. Generell muss aber bei der Oberflächenhärteprüfung beachtet werden, dass die entstehenden Härteeindrücke eine Schädigung der Oberfläche darstellen und diese Ausgangspunkt von Rissen sein können. Insofern gehört die Oberflächenhärteprüfung nicht zur Gruppe der zerstörungsfreien Prüfmethoden.

4.2.2 Eigenspannungsmessungen

Die Messung der Eigenspannungen in Bauteilen kann mit unterschiedlichen Verfahren erfolgen. An geschliffenen Teilen wird sehr häufig das Röntgenbeugungsverfahren /MACH1961, TIETZ1982, KRI1990, SPIE2019/ zur Ermittlung der Eigenspannungen eingesetzt.

Dabei werden monochromatische Röntgenstrahlen auf die Teileoberfläche gelenkt. Diese dringen nur wenige Mikrometer tief in das Material ein. An den Elektronenhüllen der Atome werden die Strahlen gebeugt. Die von den einzelnen Atomen ausgehenden „reflektierten“ Wellen überlagern sich. Bei bestimmten Einstrahlwinkeln verstärken sich diese Wellen und es entstehen für das jeweilige Material charakteristische Röntgeninterferenzlinien. Diese werden in einem Detektor registriert. Die Winkel, bei denen die Interferenzlinien auftreten, sind nach BRAGG allein abhängig von der Wellenlänge der Röntgenstrahlung und dem Abstand der Netzebenen. In Bild 4.4 ist dies schematisiert dargestellt.

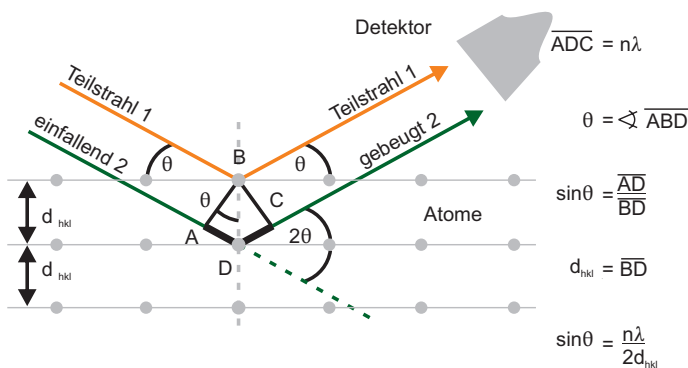


Bild 4.4 Bragg-Reflexion (nach /SPIE2019/)

Bild 4.5 zeigt beispielhaft das Beugungsdiagramm von Reineisen.

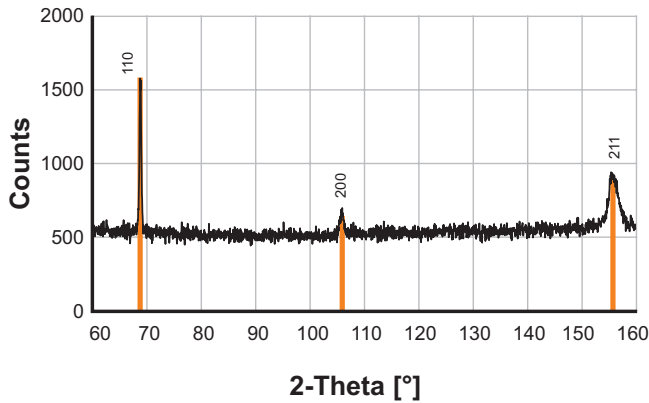


Bild 4.5 Beugungsdiagramm für Reineisen, aufgenommen mit Chromstrahlung mit den charakteristischen Röntgeninterferenzlinien der (110), (200) und (211) Netzebene (nach /SPIE2019/)

Eigenspannungen bewirken nun eine Veränderung des Abstandes der Netzebenen und damit eine Veränderung des Winkels, unter dem die Röntgeninterferenzen auftreten (Bild 4.6). Aus dieser Winkeländerung $\Delta\theta$ können die im Bauteil wirkenden makroskopischen Eigenspannungen errechnet werden.

Die im Werkstoff durch Versetzungen und Fremdatome hervorgerufenen mikroskopischen Eigenspannungen bewirken eine Verbreiterung der Röntgeninterferenzlinien. Deren Halbwertsbreite HWB wird deshalb häufig als Maß für die Mikrospannungen verwendet (Bild 4.7).

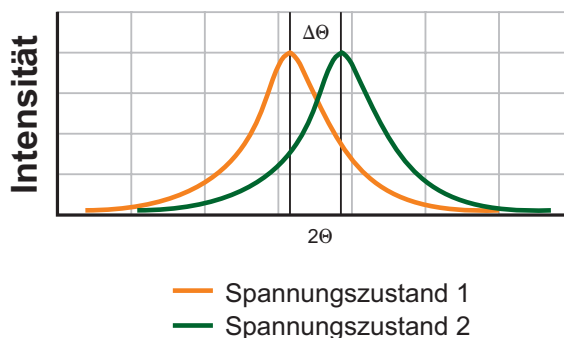
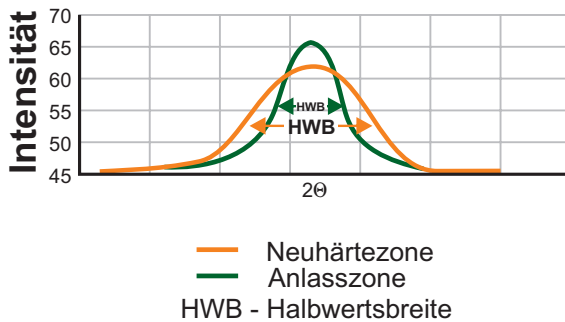


Bild 4.6 Schematische Darstellung des Einflusses von Makroeigenspannungen auf die Röntgeninterferenzen (Quelle: imq)

**Bild 4.7**

Schematische Darstellung des Einflusses von Mikroeigenstressungen auf die Röntgeninterferenzen (Quelle: imq)

Eigen Spannungsmessungen erfolgen mittels Röntgen-Diffraktometer. Diese sind in der Regel stationäre Anlagen, in denen kleinere Bauteile und herausgetrennte Proben untersucht werden können. Es gibt auch ortsveränderliche Anlagen, mit denen es möglich ist, Eigen Spannungen an größeren Bauteilen zu ermitteln.

Für die Anwendung zur Eigen Spannungsmessung an schleifbrandgeschädigten Bauteilen sind einige Besonderheiten des Verfahrens zu beachten.

Der Fokus des Röntgenstrahles bestimmt die laterale Auflösung der Messungen. Dieser beträgt zwischen 0,05 bis 10 mm. Der gewählte Fokus muss deshalb an die laterale Ausdehnung der Schleifbrandschädigungen angepasst werden. Dabei sollte beachtet werden, dass die Messzeiten mit kleiner werdendem Fokus stark ansteigen.

Ein weiterer Gesichtspunkt sowohl für die Auswahl des Verfahrens als auch für die Interpretation der Ergebnisse ist die Eindringtiefe der Röntgenstrahlen. Diese ist abhängig von Strahlungsart und Einstrahlwinkel θ . Letzterer sollte möglichst Werte zwischen 70 und 80 Grad annehmen, da hier die besten Bedingungen zur Bestimmung des Netzebenenabstandes bestehen. Im Anhang sind Eindringtiefen für die Cr-, Co-, Cu- und Mo- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung aufgeführt. Bei Cr-Strahlung erfüllt der Reflex der (211)- Netzebene am besten obige Bedingung. Hier beträgt die Tiefe, aus der 63% der Information stammen, ca. 5,5 μm . Bei Co-Strahlung sollte der (310)-Reflex verwendet werden. Der Hauptteil der Informationen stammt dort aus einer Tiefe von ca. 11 μm . Bei der Messung mit Cu-Strahlung am (310)-Reflex ist die Eindringtiefe kleiner als 2 μm . Allerdings ist die Messung mit Cu-Strahlung höher fehlerbehaftet, da hier bei kleineren Winkeln θ gemessen wird.

Beachtet werden muss die Eindringtiefe insbesondere bei Eigen Spannungsmessungen an dünnen Neuhärte zonen. Häufig sind diese „weißen Schichten“ nur wenige Mikrometer dick. Die Röntgenstrahlung erfasst dann auch die darunter befindlichen Anlass zonen. Die gemessenen Eigen Spannungen und auch die röntgenografisch ermittelten Restaustenitgehalte repräsentieren dann nicht nur die Neuhärtezone, sondern auch die Eigen Spannungen in der darunterliegenden Anlasszone.

Mittels der Röntgenbeugungsmethode ist es auch möglich, die Richtungsabhängigkeit der Eigenspannungen zu ermitteln, indem z.B. die Spannungen senkrecht und parallel zur Schleifrichtung gemessen werden. Hier muss dann dreiaxsig gemessen werden. Dabei steigt insgesamt der Messaufwand.

■ 4.3 Industrielle Methoden

4.3.1 Nital-Ätzen

Standardisierung



Das sogenannte Nitalätzverfahren (im englischen Sprachraum wird der Begriff „Surface Temper Etching“ verwendet) ist das bisher einzige standardisierte Verfahren zur Schleifbrandprüfung.

Im Anhang sind derzeit geltende Normen zur Schleifbrandprüfung zusammengestellt.

Das in der Norm ISO 14 104 beschriebene Prüfverfahren richtet sich speziell an die Getriebeteilefertigung, kann aber auch für andere Teilegruppen wie Wälzlager Teile angewandt werden. Die Norm AMS 2649 betrifft die Prüfung hochfester Stahlteile für die Luft- und Raumfahrt. Im MIL-STD-867C werden spezielle Belange der militärischen Luftfahrt wie z.B. die Prüfung von durch Schleifen wieder aufgearbeiteter Teile berücksichtigt.

In der AS7108/2 sind die Anforderungen an die Akkreditierung von Prüflaboratorien zur Schleifbrandprüfung mittels Nital-Ätzen speziell für die Luft- und Raumfahrtindustrie definiert. SAE ARP 1923 beschreibt Bedingungen für die Ausbildung von Schleifbrandprüfern.

Vorbereitung und Durchführung

In den genannten Normen wird eine chemische Ätzmethode zur Detektion von Schleifbrand auf Teileoberflächen beschrieben. Das Ätzen erfolgt entweder mit wässriger oder mit alkoholischer Salpetersäure (Nitalsäure).

Bei Verwendung von wässrigen Lösungen müssen höhere Ansprüche an die Reinigung der zu prüfenden Bauteile erfüllt werden als bei Verwendung alkoholischer Lösungen. Außerdem sind die Ätzzeiten wesentlich kürzer als beim Ätzen in alkoholischen Lösungen. Dadurch ist die Gefahr größer, dass die Teile generell zu dunkel geätzt werden. Schleifbrand kann dann nicht mehr sicher erkannt werden,

da sich dann der Schleifbrand nicht von der ebenfalls dunklen Umgebung unterscheidet.

Die Verwendung alkoholischer Salpetersäure ist hinsichtlich Reinigung und Ätzzeiten etwas einfacher handhabbar; ist aber aus Gründen des Umwelt- und Arbeitsschutzes problematischer. So müssen bei der Prüfung mittels alkoholischer Säuren Vorrichtungen zum Absaugen des verdunsteten Alkohols vorhanden sein. In großtechnischen Anlagen zur Prüfung ganzer Fertigungslose (100%-Prüfung) wird daher vornehmlich mit wässriger Säure gearbeitet.

Die zu prüfenden Oberflächen müssen frei von Anhaftungen, Verschmutzungen, Fetten und Ölen sein. Deshalb ist vor dem Ätzen ein gründliches Reinigen der Teile erforderlich. Zur Kontrolle wird ein Wasserbenetzungstest, der s. g. water-break-free-Test durchgeführt, bei dem der Wasserfilm auf der Bauteiloberfläche für mindestens 15 Sekunden nicht reißen darf.

Das Nital-Ätzen ist ein mehrstufiges Prüfverfahren. Die einzelnen Schritte können aus Bild 4.8 und Tabelle 4.2 entnommen werden.

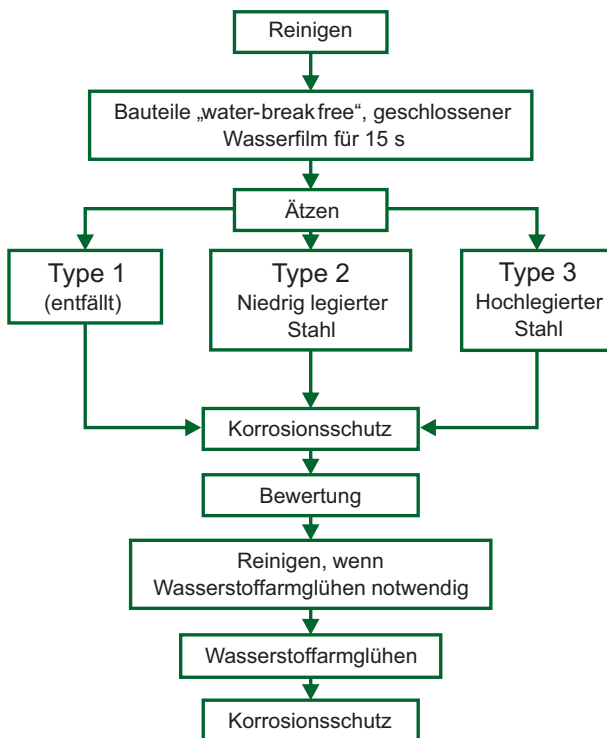


Bild 4.8 Arbeitsschritte beim Nital-Ätzen nach ISO 14104 – Schema des gesamten Prozesses (Quelle: imq)

Index

Symbole

- α-γ-Umwandlung
- Neuhärtezone 10

A

- Abhebeeffect
 - Wirbelstromprüfung 57
- Abhebeeffect
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 67
- Absolutsonde
 - Wirbelstromprüfung 51, 57
- Anlassen
 - Entstehung von Schleifbrand 10
 - magnetische Permeabilität 47
 - terragonale Verzerrung 16
- Anlasszone
 - 3MA-Prüfung 76
 - Anlasstemperatur 10
 - Barkhausenrauschen-Prüfung 66, 71
 - Eigenspannungen 16, 19
 - Härte und Eigenspannungen 12
 - Kleinlast- und Mikrohärtprüfung 29
 - künstliche Inhomogenitäten, Ersatzfehler 13
 - magnetische Permeabilität 47
 - Metallografischer Schliff 11
 - Metallografische Untersuchung 27
 - Nitalätzverfahren 36
 - röntgenografische Eigenspannungsmessung 33
 - Schadensfälle 22

- UCI-Verfahren 30
 - Wirbelstromprüfung 50, 60
- Array-Sonde
- Wirbelstromprüfung 60
- austenitischer Stahl
- Schleifbrandgefährdung 20

B

- Barkhausenrauschen 62
- Blochwände
- magnetische Permeabilität 44, 46, 62
- Bohr- und Fräsbearbeitung 23

C

- Chargeneinfluss
- 3MA-Verfahren 75
 - BHR-Prüfung 67
 - elektromagnetische Verfahren 48
 - Wirbelstromprüfung 55, 57

D

- Differenzsonden
- Chargeneinfluß 57
 - Wirbelstromprüfung 52
 - Wirbelstromprüfung von Wälzlager- ringen 59
- Druckeigenspannungen 15
- Barkhausenrauschen-Verfahren 66
 - Tiefenverläufe 17

E

- Eigenspannungen 15
 - 3MA- Verfahren 77
 - Anlass- und Neuhärtezone 15
 - Anlasszone 12
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 64
 - Einlass- und Neuhärtezone 12
 - künstliche Inhomogenitäten 13, 18
 - Makroelastizitäten 32
 - Mikroelastizitäten 33
 - Restaustenit 66
 - Röntgenografische Spannungsmessung 31
 - Tiefenverläufe 18
- Eindringtiefe
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 63
 - Härteprüfung 30
 - Röntgenstrahlen 33
 - Wirbelstromprüfung 44
- Einsatzstahl
 - Eigenspannungen 17
 - Schleifbrandgefährdung 20
- Ersatzfehler
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 70
 - Nital-Ätzverfahren 40
 - Wirbelstromprüfung 55

F

- Farbeindringverfahren
 - Oberflächenrisse 26
- ferritischer Stahl
 - Schleifbrandgefährdung 20

G

- Graufleckigkeit 24

H

- Hartdrehen 23
- Härteprüfung/UCI-Verfahren 30
- Härte-Tiefenverlauf
 - Mikroelastizität 29

- hochlegierter martensitischer Stahl
 - Schleifbrandgefährdung 21
- Honen 23
 - Eigenspannungen 18

K

- Kaltarbeitsstähle
 - Schleifbrandgefährdung 21
- Kanteneffekt
 - Wirbelstromprüfung 56
- Kleinlasthärteprüfung 28

M

- magnetische Hysterese 45
 - Blochwände 47
 - geöhlte Stähle 46
 - gehärteter Stähle 47
- Magnetpulverprüfung
 - Oberflächenrisse 26
- Martensit
 - Anlassen 10
 - Ätzen 26
 - Eigenspannungen 15
 - Gefüge 9
 - Gelöster Kohlenstoff 15
 - magnetische Eigenschaften 47
 - weiße Schichten 28
- Metallografie 25, 27
- Metallografischer Schliff
 - Anlass- und Neuhärtezone 28
 - Herstellung eines 27
 - künstliche Inhomogenität 40
 - Vergleichskörper BHR-Verfahren 70
- Mikroelastizität 28
- mobile Härteprüfung
 - UCI-Verfahren 30

N

- Neuhärtezone
 - 3MA-Verfahren 76
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 66, 70
 - Eigenspannungen 12, 15

- Kleinlast- und Mikrohärteprüfung 28
 - magnetische Permeabilität 47
 - metallografischer Schliff 11, 27
 - Nital-Ätzverfahren 36
 - Restaustenitgehalt 17
 - röntgenografische Eigenspannungsmessung 33
 - Schadensfälle 23
 - Temperatur der Kontaktzone 10
- Normen
- Nitalätzen 34
 - Vergleichskörper DIN SPEC 4882 54

O

- Oberflächenrisse
- Prüfverfahren 26

P

- Polierschleifen 23

R

- Räumen 23
- Restaustenit
- BHR-Signal 66
 - Eigenspannungen 17
 - Hartdrehen 23
 - Härten und Anlassen 9
 - magnetische Eigenschaften 47
 - Metallografische Untersuchung 28
 - Neuhärtezonen 12
 - Röntgenografische Spannungsmessung 33
- Risse 12, 16, 18, 22, 23
- Härteprüfung 31
 - Wirbelstromprüfung 57
- Risse
- verdeckte 12
- Röntgenografische Feinstrukturanalyse 12
- Neuhärtezonen nach dem Hartdrehen 23

S

- Schallemissionsanalyse 27
- Schnellarbeitsstähle
- Schleifbrandgefährdung 21
- Schruppschleifen
- Eigenspannungen 18
- Störgrößen
- 3MA-Verfahren 75
 - Barkhausenrauschen-Verfahren 67
 - Sondenarten bei der Wirbelstromprüfung 57
 - Wirbelstromprüfung 55

T

- tetragonale Verzerrung
- magnetische Eigenschaften 47
 - Martensit 15

U

- Ultraschallprüfung
- Risse 26
- Un- bzw. niedriglegierter Stahl
- Schleifbrandgefährdung 20
- Un- bzw. niedriglegierter Vergütungsstahl
- Schleifbrandgefährdung 20

V

- Vergleichskörper 13
- BHR-Verfahren 71
 - Nital- Ätzverfahren 40, 41
 - Normung 56
 - Wirbelstromprüfung 55
- Vergütungsstähle
- Schleifbrandgefährdung 20

W

- Warmarbeitsstähle
- Schleifbrandgefährdung 21
- Weichglühen
- magnetische Eigenschaften 46

weiße Schichten

- Neuhärtezonen 28

Weißsche Bezirke

- Magnetische Eigenschaften 44

Werkzeugstähle

- Schleifbrandgefahr 20