

Zerstörungsfreie Detektion von Schleifbrand mittels elektromagnetischer Prüftechniken

Iris ALTPETER^{*}, Christian BOLLER^{*}, Melanie KOPP^{*}, Bernd WOLTER^{*},
Ralf FERNATH^{**}, Bernd HIRNINGER^{**}, Steffen WERNER^{***}

^{*} Fraunhofer IZFP, Uni Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

^{**} ZF Lenksysteme GmbH, Richard Bullinger Str. 77, 73527 Schwäbisch Gmünd

^{***} Profiroll Technologies GmbH, Pee-Wee-Str. 1, 04849 Bad Dübau

Kurzfassung. Um eine hohe Maß- und Formgenauigkeit nach dem Härten sicherzustellen, ist oftmals eine anschließende Feinbearbeitung der Bauteiloberfläche mittels Schleifen erforderlich. Geringste Abweichungen im Schleifprozess können jedoch zu einer lokalen Temperaturerhöhung im Werkstück führen und somit thermisch bedingte Schäden der oberflächennahen Randzonen verursachen – den sogenannten Schleifbrand. Dieser führt je nach Schädigungsgrad zu einer ungünstigen Veränderung des Härte- und Eigenspannungstiefenverlaufes bis hin zum Auftreten von Härterissen. Die konventionellen Prüfmethoden wie das Nitalätzen, metallographische oder röntgenographische Untersuchungen zum Nachweis von Schleifbrand sind kosten- und zeitintensiv und erlauben daher nur eine stichprobenartige Prüfung.

Mit Hilfe des zerstörungsfreien Prüfverfahrens 3MA (Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungs-Analysen) ist es möglich, über die Ermittlung elektromagnetischer Kenngrößen orts- und tiefenaufgelöste Aussagen über Werkstoffveränderungen in der Randzone eines Bauteils zu treffen, welche in Folge der Hartfeinbearbeitung (Schleifen, Drehen) auftreten. Damit ermöglicht 3MA den qualitativen Nachweis von Schleifbrand und bei Bedarf auch die quantitative Charakterisierung der in Folge von Schleifbrand veränderten Randzoneneigenschaften (z. B. Tiefenprofile der Härte und der Eigenspannungen). Letzteres erfordert eine zuvor bestimmte Korrelation zu den zerstörend ermittelten Kenngrößen (Kalibrierung). Daher ist das Verfahren vielfältig in der Industrie einsetzbar: Im Prüflabor oder fertigungsbegleitend, für die Sicherstellung der Produktqualität oder sogar prozessintegriert für die Regelung und Optimierung der Bearbeitungsprozesse. Dieser Beitrag zeigt hierzu auch einige Anwendungsbeispiele aus dem industriellen Einsatz.

Ausgangssituation

Um eine hohe Maß- und Formgenauigkeit nach dem Härten sicherzustellen, ist oftmals eine anschließende Feinbearbeitung der Bauteiloberfläche mittels Schleifen erforderlich. Störungen im Schleifprozess wie z. B. unzureichende Kühlmittelzufuhr, schlechter Zustand der Schleifscheibe oder fehlerhafte Montage des Werkstückes in der Schleifmaschine können zu einer lokalen Temperaturerhöhung im Werkstück führen und somit thermisch bedingte Schäden der oberflächennahen Randzonen verursachen – den sogenannten Schleifbrand [1, 2]. Je nach Schädigungsgrad hat dies eine ungünstige Veränderung des Tiefenverlaufes von Härte und Eigenspannungen bis hin zum Auftreten von Härterissen zur Folge. Abbildung 1, links zeigt den schematischen Verlauf der Härte und der Eigenspannung in Abhängigkeit von der Werkstofftiefe für eine gehärtete Probe in einem normalen Schleifzustand. Dieser

zeichnet sich durch eine hohe Oberflächenhärte und hohe Druckeigenspannungen in der Oberfläche aus.

Wird beim Schleifen aufgrund einer der oben beschriebenen Prozessstörungen die Anlasstemperatur von ca. 600 °C im Werkstück überschritten, so führt dies zu einer Reduzierung der Oberflächenhärte. Es bilden sich die sogenannten Anlasszonen. Darüber hinaus führt diese Art der thermischen Schädigung zu einer Reduzierung der Druckeigenspannungen an der Oberfläche, wobei sich sogar unter der Oberfläche Zugeigenspannungen ausbilden können. Abbildung 1, Mitte zeigt die entsprechenden Härte- und Eigenspannungstiefenprofile. Aufgrund der so geschädigten Randzonen ergibt sich ein erhöhter Verschleiß des Werkstückes bei Beanspruchung.

Bei Erwärmung des Werkstückes über die Austenitisierungstemperatur (ca. 850 °C) in Verbindung mit einer unkontrollierten Abschreckung bildet sich an der Oberfläche eine Neuhärtungszone in Verbindung mit oberflächennahen Zugeigenspannungen (s. Abbildung 1, rechts). Hierbei können Härterisse entstehen, die bei Beanspruchung zum Bruch des Werkstückes führen können.

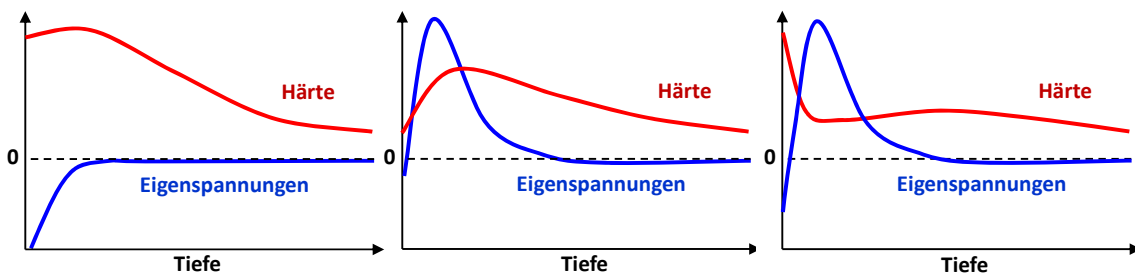


Abb. 1: Härte- und Eigenspannungstiefenprofile

Links: für ein Werkstück mit normalem Schleifzustand

Mitte: für ein Werkstück mit thermischer Schädigung > Anlasstemperatur (ca. 600 °C)

Rechts: für ein Werkstück mit thermischer Schädigung > Austenitisierungstemperatur (ca. 850 °C)

Trotz moderner Schleifmaschinen und ständig verbesserter Prozessführung wird Schleifbrand auch in der Zukunft nicht vollständig vermeidbar sein. Daher besteht nach wie vor ein großer Bedarf an Prüfmethode zur Detektion von Schleifbrand.

1. Stand der Technik zur Detektion von Schleifbrand

1.1 Konventionelle Methoden

Zum Nachweis von Schleifbrand wird häufig der Nitalätzttest eingesetzt [3]. Bei dieser nach ISO 14104 oder ISO 6336-5 genormten Methode wird das Werkstück in mehrere Bäder mit starken Chemikalien (HNO_3 , HCl , NH_4OH , NaOH) getaucht. Aufgrund einer Dunkelfärbung der Oberfläche kann man Rückschlüsse über eine mögliche Schädigung durch Schleifbrand ziehen. Die Aussagekraft dieses Verfahrens ist umstritten, da das Testergebnis durch die Tauchzeit und Konzentration der Chemikalien beeinflusst wird. Daher erfordert die Anwendung große Erfahrung des Prüfpersonals. Eigenspannungen unter der Oberfläche können mittels Nitalätzen gar nicht festgestellt werden. Es werden etwa 3 μm Material abgetragen und die Rauheit verändert, so dass Funktionsflächen beschädigt werden. Der Einsatz der Chemikalien erfordert entsprechenden Aufwand bei der Umsetzung von Arbeitsschutzbestimmungen. Hinzu kommen die lange Prüfdauer, die subjektive Bewertung sowie die Problematik der Umweltverträglichkeit und Entsorgung. Die Anwendung des Nitalätzttests zur Prüfung von Großbauteilen setzt hohe Investitionskosten voraus.

Zur Überwachung des Gefügestandes nach dem Schleifprozess kann eine stichprobenartige metallographische Prüfung am Querschliff durchgeführt werden. Hiermit lassen sich in der Regel durch Schleifbrand verursachte Gefügeveränderungen erkennen. Veränderungen im Eigenspannungszustand können hierbei nicht festgestellt werden. Diese Prüfmethode bedeutet in der Regel eine totale Zerstörung des Werkstückes. Zur Überwachung des Eigenspannungszustandes kommen diffraktometrische Methoden auf Basis von Röntgen-, Neutronen- und Synchrotronstrahlung [4] in Frage. Allerdings sind diese Methoden sehr zeit- und kostenintensiv. Einige Hersteller führen zur Überprüfung nach dem Schleifen eine Rissprüfung am Werkstück durch. Die durch schwersten Schleifbrand verursachten Härterisse können jedoch nicht immer zuverlässig gefunden werden, da sie oftmals durch Schleifabrieb zugeschmiert und verdeckt sind, oder sich erst nach Beanspruchung des Werkstücks bilden.

Da die oben genannten konventionellen Methoden z. T. zu einer Beschädigung oder gar zur Zerstörung des Werkstückes führen und zudem zeit- und kostenintensiv sind, erlauben diese nur eine stichprobenartige Überprüfung in der Fertigung.

1.2 Zerstörungsfreie Methoden

Die zerstörungsfreie Prüfung mittels magnetischem Barkhausenrauschen ist seit längerer Zeit in der industriellen Anwendung bekannt [5]. Hierbei werden die Intensität des Barkhausenrauschens und daraus abgeleitete Prüfgrößen zur Charakterisierung von Werkstückoberflächen nach dem Schleifen eingesetzt.

Auf dem Markt werden ebenfalls Wirbelstromprüfsysteme zur Detektion von Schleifbrand angeboten [6,7]. Diese zeichnen sich durch einen einfachen Sensoraufbau aus, was die Anpassung an komplizierte Bauteilgeometrien vereinfacht. Gleichzeitig kann auch eine Rissprüfung durchgeführt werden. Nachteil der Wirbelstromprüfmethode für diese Anwendung ist die Empfindlichkeit gegen Restmagnetfelder und Chargenschwankungen. Es ist nur eine Schwellenbewertung zur „Gut“- „Schlecht“- Trennung aber keine quantitative Bestimmung der Härte und Eigenspannungen möglich.

Neuerdings werden auch zerstörungsfreie Prüfmethode auf Basis photothermischer Verfahren angeboten, die eine flächenhafte Bestimmung von Härte- und Härtetiefenprofilen ermöglichen. Bei dieser Methode hat sich jedoch die Anpassung an komplizierte Bauteilgeometrien als schwierig herausgestellt. Zudem können Spannungszustände im Werkstück nicht erfasst werden. Bei den photothermischen Verfahren liegen die Nachteile vor allem in der sehr aufwändigen Kalibrierung, den langen Messzeiten und den hohen Anforderungen an die Bauteiloberfläche.

Eine weitere Prüfmethode zur Detektion von Schleifbrand ist die am Fraunhofer IZFP entwickelte elektromagnetische 3MA (Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur und Spannungs-Analysen) – Methode [7,8]. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Methode und zeigt hierzu einige Anwendungsbeispiele aus dem industriellen Einsatz.

2. Zielsetzung

Es besteht Bedarf an einem Prüfverfahren, das alle Varianten von Schleifbrand, also Anlass- und Neuhärtungszonen, sowie eine Reduzierung der Druckeigenspannungen zuverlässig erkennt, objektive Ergebnisse liefert, schnell und wirtschaftlich arbeitet, auf Chemikalien verzichtet und zerstörungsfrei arbeitet.

3. Lösungsweg

Die am Fraunhofer IZFP entwickelte elektromagnetische 3MA-Methode nutzt folgende vier elektromagnetische Prüfmethode „Magnetisches Barkhausenrauschen“, „Überlagerungspermeabilität“, „Wirbelstrom“ und „Oberwellenanalyse“ in intelligenter Informationsverknüpfung. Hierbei wird ein Werkstoff periodisch ummagnetisiert, wobei aus jeder der Prüfmethode zahlreiche Merkmale abgeleitet werden, so dass bei einer Messung insgesamt 41 Prüfgrößen zur Verfügung stehen. Diese sind gekennzeichnet durch unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Mikrostruktur und Spannungszustand, durch unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen und unterschiedliche Analysiertiefen.

Bei der Ummagnetisierung von ferromagnetischen Werkstoffen wird die magnetische Hysterese durchlaufen. Deren Kurvenform ist abhängig vom jeweiligen Gefüge und Eigenspannungszustand des Werkstoffes. Abbildung 2, links zeigt die Veränderung der magnetischen Hysteresekurve unter Einfluss von Gefügeveränderungen. So zeichnet sich die Hysteresekurve für einen weichen Werkstoff durch eine geringe Koerzitivfeldstärke (H_C) und eine hohe Remanenz (B_r) aus, diejenige für einen harten Werkstoff durch eine große Koerzitivfeldstärke und eine geringe Remanenz. Bei Änderung des Eigenspannungszustandes des Werkstoffes wird die Hysteresekurve, wie in Abbildung 2, rechts verdeutlicht, geschert, und zwar unter Zugeigenspannungen zu kleineren Magnetfeldstärken und unter Druckeigenspannungen zu größeren Magnetfeldstärken hin, was sich in einer Änderung der Koerzitivfeldstärke bemerkbar macht.

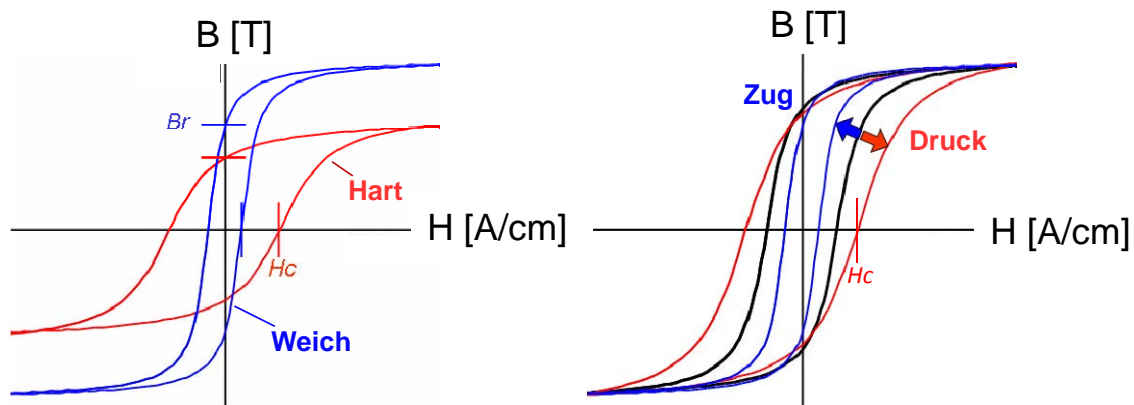


Abb. 2: Magnetische Hysteresekurve; links unter dem Einfluss einer Gefügeänderung, rechts unter dem Einfluss einer Eigenspannungsänderung

Die bei der 3MA-Methode eingesetzten oben genannten Prüfmethode messen indirekt das Hystereseverhalten des untersuchten Werkstoffes. Die Prüfmethode unterscheiden sich durch ihre Wechselwirkungstiefe und -Mechanismen, so dass z. T. sich ergänzende und z. T. redundante Informationen gewonnen werden [9]. Die Vielfalt der Informationen ermöglicht die Separierung mehrerer Einflussgrößen bei gleichzeitiger Unterdrückung von Störgrößen. So kann beispielsweise die Härte unabhängig von variierenden Eigenspannungszuständen und umgekehrt oder aber beides gleichzeitig bestimmt werden.

Für eine quantitative Bestimmung von Werkstoffeigenschaften ist eine Kalibrierung erforderlich. Hierbei werden die 3MA-Messdaten mehrerer Proben mit abgestuften und bekannten Werkstoffeigenschaften mit den jeweiligen Referenzwerten verknüpft. Mittels Regressionsalgorithmen wird nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (least-square) ein Polynom als Modellfunktion ermittelt, das den Zusammenhang zwischen den elektromagnetischen Prüfgrößen und der jeweiligen Nutzinformation (z.B. Härte) mathematisch beschreibt. Spezielle Kalibrierprozeduren ermöglichen eine Bestimmung von tiefenabhän-

gigen Werkstoffzuständen, z.B. Härte- oder Eigenspannungstiefenprofilen.

Abbildung 3 zeigt das 3MA-Prüfsystem, welches bereits für zahlreiche industrielle Applikationen eingesetzt wurde [10], bestehend aus dem 3MA-Frontend mit 3MA-Prüfkopf und einem Steuerungsrechner. Der 3MA-Prüfkopf magnetisiert mit einem Elektromagneten das Prüfobjekt in Aufsatztechnik. Mittig zwischen den Polschuhen befinden sich eine Hallsonde, sowie die Messspulen zur Erfassung der Ummagnetisierungsvorgänge. Die 3MA-Prüfköpfe können zur Messung an komplizierten Bauteilgeometrien speziell angefertigt werden.

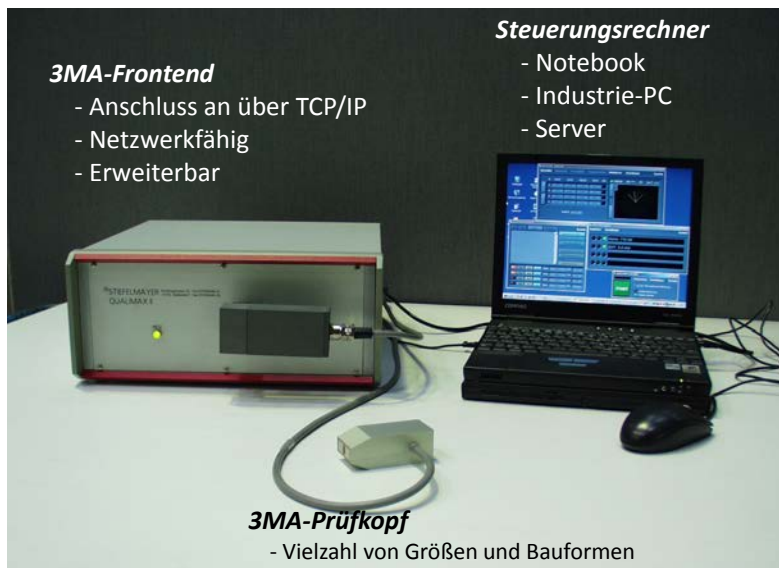


Abb. 3: 3MA-Prüfsystem bestehend aus 3MA-Frontend, 3MA-Prüfkopf und Steuerrechner

Das Potential der 3MA-Methode zur Charakterisierung von Randschichtzuständen nach dem Schleifen soll an folgenden Anwendungsbeispielen aus der Praxis aufgezeigt werden. Aufgrund der geringen Messzeiten (wenige Sekunden für eine Messposition) kann das System auch prozessintegriert für die Regelung und Optimierung der Bearbeitungsprozesse eingesetzt werden.

4. Anwendungsbeispiele

4.1 Prüfung von Gewindetrieben für elektromechanische Lenksysteme

Die ZF Lenksysteme GmbH ist ein Gemeinschaftsunternehmen der Robert Bosch GmbH und der ZF Friedrichshafen AG. Die Kernkompetenz liegt in der Entwicklung und Fertigung innovativer Lenksysteme, wie beispielsweise der Aktivlenkung oder der Servoelectric. Kugelumlaufspindeln für elektromechanische Lenksysteme wurden bisher stichprobenartig mittels Nitalätzen auf Schleiffehler überprüft. Dieses Verfahren hatte jedoch viele Nachteile. Deshalb wurde nach einer zerstörungsfreien Prüfmethode gesucht, die das Nitalätzen zukünftig ersetzen kann.

Zur Vorbereitung der Detektion von Schleifbrand mittels 3MA, wurden Testmessungen an Gewindetrieben mit gezielt eingestellten Schleifzuständen durchgeführt. Hierzu wurden, mit einem speziell an die Probengeometrie angepassten 3MA-Prüfkopf (s. Abbildung 4, links), die Messpunkte entlang eines Gewindenganges abgetastet. Es zeigte sich, dass bereits die aus der Überlagerungspermeabilitätsmessung abgeleitete Prüfgröße $\mu_{\Delta\text{MAX}}$ eine eindeutige Erkennung von Schleif Fehlern ermöglicht (s. Abbildung 4, rechts).

In einem weiteren Schritt, wurde von der ZF Lenksysteme GmbH ein Prüfstand für den Einsatz des 3MA-Verfahrens entwickelt (s. Abbildung 4, links). Im Rahmen serienbegleitender Messungen wurden damit umfangreiche Vergleiche zwischen 3MA und der Nitalätzung durchgeführt. Ergänzende metallographische Untersuchungen im Werkstofflabor halfen dabei, die Ergebnisse zu bewerten.

Angepasster 3MA-Prüfkopf

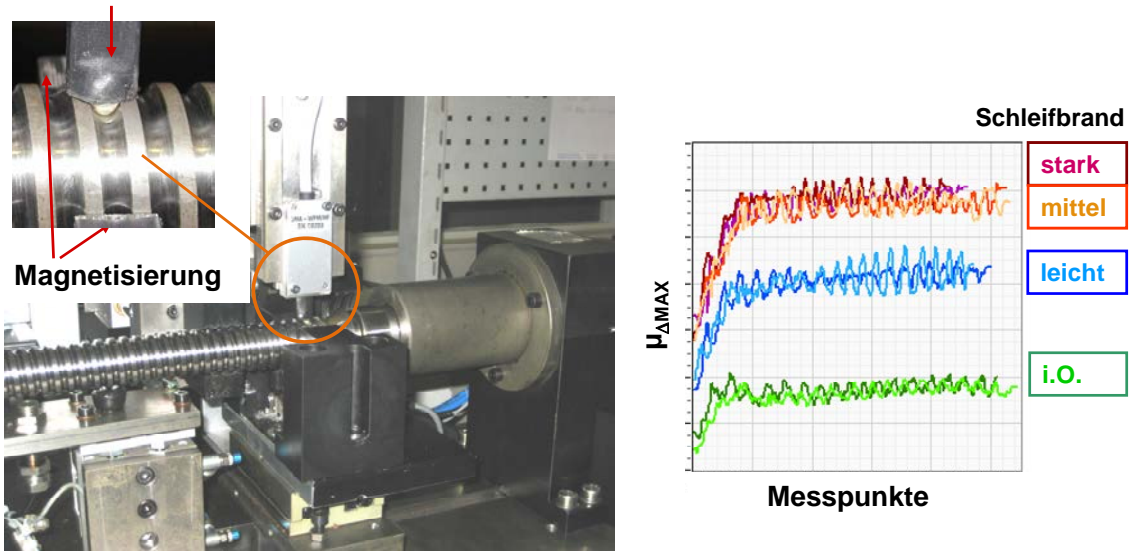
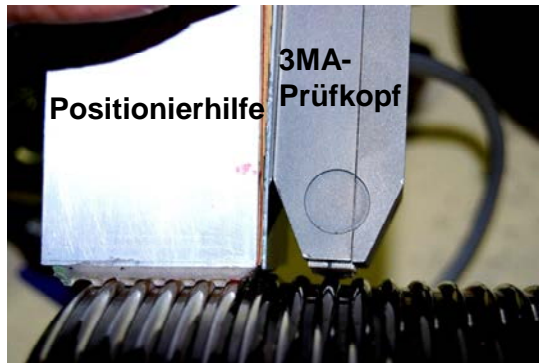


Abb. 4: Links: Prüfstand zum Abscannen der Gewindetriebe mit Detailbild des angepassten 3MA-Prüfkopfes
Rechts: Verlauf der Prüfgröße $\mu_{\Delta MAX}$ entlang eines Gewindeganges für Bauteile mit unterschiedlichen Schleifzuständen

Es zeigte sich, dass die magnetische Prüfung wesentlich empfindlicher als die konventionelle Methode auf eine beginnende Schleifbrandschädigung reagiert. Die ZF Lenksysteme GmbH plant, das 3MA-Verfahren zur automatisierten Fertigungsüberwachung aller Gewindetriebe dieser Bauform einzusetzen.

4.2 Prüfung von Durchlaufgewindewalzwerkzeugen

Profiroll Technologies GmbH zählt zu den weltgrößten Produzenten von Gewinde- und Profilwalzwerkzeugen. Zur weiteren Optimierung des Schleifprozesses von Durchlaufgewindewerkzeugen wurde das 3MA-Verfahren zur Überprüfung des erzielten Schleifzustandes eingesetzt. Zur Validierung des 3MA-Verfahrens wurden Testmessungen an geschliffenen Durchlaufgewindewerkzeugen mit gezielt eingestellten Anlass- und Neuhärtezonen durchgeführt. Abbildung 5, links zeigt die Vorrichtung zum Abscannen des Werkstückes mit einem 3MA-Prüfkopf. Die Abbildung 5, rechts stellt den Verlauf der Prüfgrößen M_{MAX} (Maximalamplitude des Barkhausenrauschens) und H_{CM} (Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus dem Barkhausenrauschen) entlang eines Gewindeganges dar. Man erkennt in dem Bereich zwischen den Messpositionen 6 und 10 einen deutlichen Anstieg der Prüfgröße M_{MAX} und einen Abfall in der Prüfgröße H_{CM} verursacht durch die Reduzierung der Oberflächenhärte im Bereich der Anlasszonen. Im weiteren Verlauf des Gewindeganges entstand eine Neuhärtungszone, so dass hier die Prüfgröße M_{MAX} wieder stark abfällt, während die Prüfgröße H_{CM} wieder ansteigt. Würde man in diesem Falle zur Beurteilung des Schleifzustandes nur die Prüfgröße M_{MAX} allein bewerten, so könnte man den Bereich mit aufgetretener Neuhärtungszone nicht von dem Bereich ohne Schleifbrand unterscheiden. Die Kombination beider Prüfgrößen ermöglicht jedoch eine eindeutige Bewertung.



Durchlaufgewindewalzwerkzeug
(Profiroll)

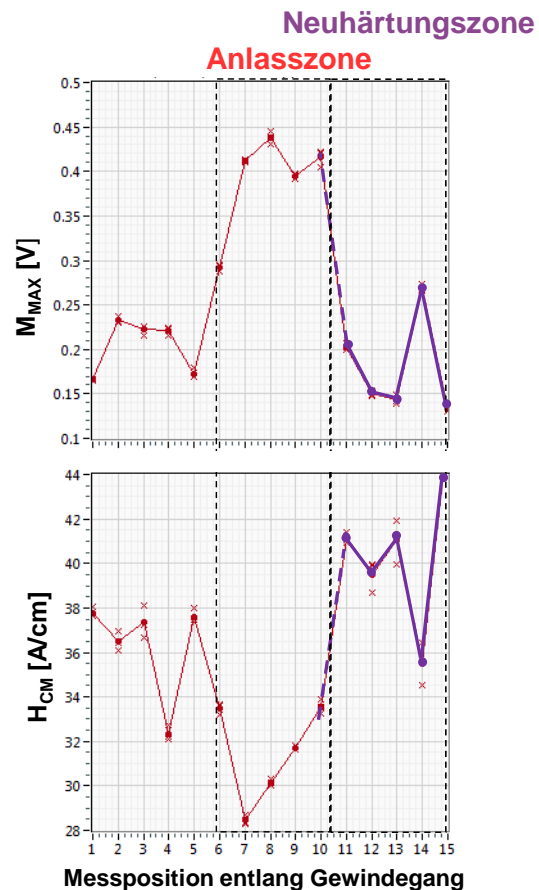


Abb. 5: Links: Vorrichtung zum Abscannen des Werkstückes
Rechts: Verlauf der Prüfgrößen M_{MAX} und H_{CM} entlang eines Gewindenganges

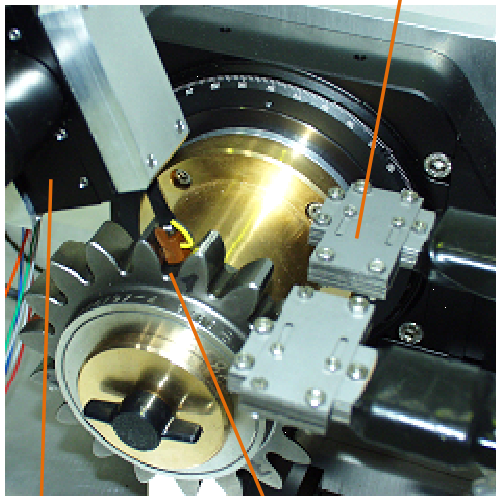
4.3 Prüfung von geschliffenen Zahnflanken

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens (FVA Nr. 453) [11] mit der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau FZG der TU München wurden die Zusammenhänge zwischen dem Tragfähigkeitsverhalten von geschliffenen Zahnflanken und der durch die Schleifbearbeitung beeinflussten Randzonen untersucht. Auf Basis der 3MA-Technik wurden die Randzoneneigenschaften zerstörungsfrei geprüft, so dass ein geprüftes Zahnrad anschließend noch in Laufversuchen hinsichtlich seiner Zahnflankentragfähigkeit und hinsichtlich der Veränderung seiner Randzoneneigenschaften systematisch untersucht werden konnte. Die speziell angepasste und miniaturisierte 3MA-Sensorik wurde in ein mehrachsiges Manipulationssystem integriert (s. Abbildung 6, links), so dass in mäanderförmigen Flächen-scans die Oberfläche der Zahnflanken abgetastet werden konnte. Zur Kalibrierung wurden die 3MA-Prüfgrößen an unzerstörten nachgeschliffenen Ritzeln aufgenommen. Anschließend wurden die Härte- und Eigenspannungstiefenverläufe der Randzonen mit Referenzmethoden (HV1, Röntgendiffraktometrie) gemessen. Auf dieser Datenbasis wurde das 3MA-System auf folgende 11 Zielgrößen kalibriert:

- Härte in den Werkstofftiefen 0.1, 0.2, 0.3, 1.0 und 3.0 mm
- Eigenspannungen in den Werkstofftiefen 0, 0.01, 0.02, 0.04 und 0.06 mm

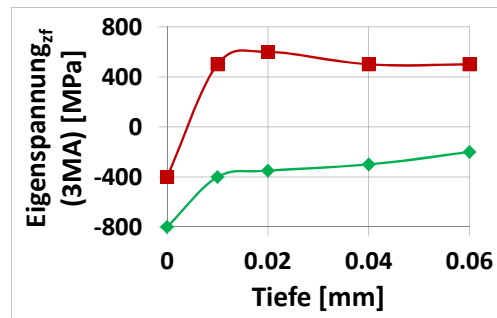
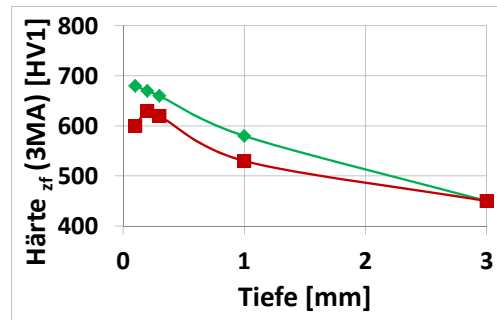
Abbildung 6, rechts zeigt die mittels 3MA zerstörungsfrei bestimmten Härte- und Eigenspannungstiefenprofile für eine Zahnflanke ohne und eine Zahnflanke mit Schleifbrand (Mittelwert über die gescannte Fläche).

Einstellbares Magnetisierungsjoch



Gefedertes Sensorelement

Manipulatorsystem zum Scannen der Zahnflankenoberfläche



— Ohne Schleifbrand
— Mit Schleifbrand

Abb. 6: Links: Komponenten des 3MA-Zahnradscanners

Rechts: Zerstörungsfrei bestimmte Härte- und Eigenspannungstiefenprofile für eine Zahnflanke ohne und eine mit Schleifbrand (Mittelwert über die gescannte Fläche)

4.4 In-Prozess-Prüfung während des Schleifens

Im Rahmen einer Diplomarbeit [12] wurde ein 3MA-Prüfkopf in eine Schleifmaschine integriert (s. Abbildung 7, links), um somit nach entsprechender Kalibrierung online den Gefüge- und Eigenspannungszustand von Antriebskomponenten während des Schleifprozesses zu erfassen. Mithilfe dieser Untersuchungen konnte der Schleifprozess bezüglich seiner Bearbeitungsparameter optimiert werden. Abbildung 7, rechts zeigt den Verlauf der mittels 3MA bestimmten Härte und Eigenspannungen in Abhängigkeit von der Variation des Zerspanvolumens/Weg und parallel hierzu die Ergebnisse der Messungen mit Referenzmethoden (Vickershärte, Röntgendiffraktometrie). Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung der zerstörungsfrei bestimmten Kennwerte mit den Referenzwerten. Aus diesen Untersuchungen wurde deutlich, dass die Druckeigenspannungen stetig mit steigendem Zerspanvolumen/Weg abgebaut werden und in Zugeigenspannungen übergehen. Eine Reduzierung der Härte machte sich erst bei einem Zerspanvolumen/Weg von 600 mm³/mm bemerkbar.

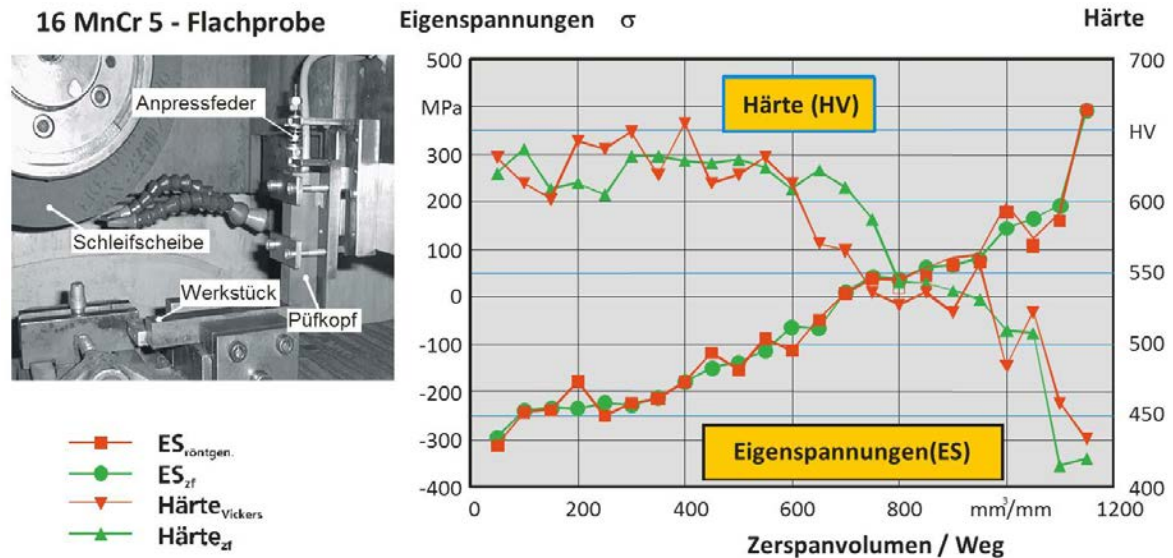


Abb. 7: Links: Vorrichtung zur prozessintegrierten Überwachung des Schleifzustandes
Rechts: Zerstörungsfrei und online bestimmte Härte- und Eigenspannungsverläufe in Abhängigkeit von Zerspannungsvolumen/Weg

5. Zusammenfassung

Die 3MA-Methode bietet die Möglichkeit, Schleiffehler zerstörungsfrei, objektiv, schnell, wirtschaftlich und ohne Einsatz von Chemikalien zu erkennen. Dabei kann sowohl das Auftreten von Anlasszuständen als auch die Entstehung von Neuhärtezonon festgestellt werden. Insbesondere bietet die 3MA-Technik nach entsprechender Kalibrierung die Möglichkeit einer quantitativen Bestimmung der Härte und des Eigenspannungszustandes oder deren Tiefenprofile. Die 3MA-Prüfköpfe können an komplizierte Bauteilgeometrien angepasst und dabei so kompakt und robust ausgelegt werden, dass eine Prüfung auch im Maschinenraum einer Schleifmaschine möglich ist. Aufgrund der hohen Messgeschwindigkeiten sind automatisierte Prüfungen in der Fertigungslinie realisierbar.

Referenzen

- [1] Brinksmeier, E.: „Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke“; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1982
- [2] Badger, H.J.: „Thermische Schädigung beim Schleifen von Schnellarbeitsstahl“; Werkzeug – Technik, S. 40, Heft 84, 2004.
- [3] International Organization for Standardization, ISO 14104:1995: „Gears-Surface temper etch inspection after grinding“, 1995.
- [4] Manke, I.; Kardjilov, N.; Schneider, R.; Haibel, A.; Denker, A.; Hilger, A.; Banhart, J.: „Zerstörungsfreie Messmethoden am Hahn-Meitner-Institut“; ZfP-Zeitung 88, 2004.
- [5] Wojtas, A.S.; Suominen, L.; Shaw, B.A.; Evans, J.T.: „Detection of Thermal Damage in Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method“; NDT.net, vol.3, no.9, 1998.
- [6] C. Rodner, R. Becker: „Erkennung von Gefügeveränderungen mit Hilfe der Wirbelstrommethode“, IZFP-Bericht Nr. 820123-E, 1982.
- [7] Wolter, B.; Theiner, W.; Kern, R.; Becker, R.; Rodner, Ch.; Kreier, P.; Ackeret, P.: Detection and Quantification of Grinding Damage by Using EC and 3MA Techniques. In: Donzella, G. (Editor); Associazione Italiana Prove Non-Distruttive: 4th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing: Conference Proceedings. Vaajakoski: Stresstech Oy, 2003, S. 159-170.
- [8] Wolter, B.: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schleifbrand; In: Hanselka, H.; VDI Wissensforum IWB GmbH: Windkraftanlagen: Sicherheit und Zuverlässigkeit. Düsseldorf: VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (GMA), 2004, Vortrag 12.

- [9] Altpeter, I.; Becker, R.; Dobmann, G.; Kern, R.; Theiner, W.; Yashan, A.: Robust Solutions of Inverse Problems in Electromagnetic Non-Destructive Evaluation; In: Inverse Problems. 18 (2002), S. 1907-1921.
- [10] Dobmann, G.; Altpeter, I.; Wolter, B.; Kern, R.: Industrial Applications of 3MA - Micromagnetic Multi-parameter Microstructure and Stress Analysis. In: Romanian Welding Society: 5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures: ISCS 2007. Timisoara, 2008, 7 Seiten.
- [11] Forschungsvorhaben Nr. 453 der FVA; Kennwort: "Randzonentragfähigkeit-Zahnflanke"; Arbeitskreis Werkstoffe.
- [12] Graus, M.: Zerstörungsfreie Randschichtcharakterisierung an geschliffenen Teilen aus der Antriebstechnik; Saarbrücken, 1998. (Diplomarbeit).