

Zerstörungsfreie Bestimmung der Randzoneneigenschaften hoch beanspruchter Maschinenbauteile

Martin BERNARD, Wilfried REIMCHE, Friedrich-Wilhelm BACH
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung. Im Trend zur Einsparung von Ressourcen und extremem Leichtbau werden neben einer Fehlerfreiheit zunehmend hohe Anforderungen an die Materialeigenschaften hoch beanspruchter Bauteile gestellt. Diese sind neben einer hohen Dauerfestigkeit des Bauteils eine beanspruchungsorientierte Vergütung der Randzonen von Funktionsflächen, um den hohen statischen und dynamischen Belastungen durch die Krafteinleitung und Bauteilbeanspruchung zu entsprechen. Übliche Fertigungsverfahren zur Einstellung gradierter Werkstoffeigenschaften bei Stahlwerkstoffen mit vergüteten Randzonen sind das Einsatzhärten, Nitrieren, Randzonenhärten etc.

In diesem Zusammenhang gewinnt die prozessintegrierte Prüfung zur zerstörungsfreien Bestimmung von Randzoneneigenschaften wie der Randhärte und Einhärtungstiefe in engen Toleranzbändern im Rahmen der Qualitätssicherung zunehmend an Bedeutung.

Ein geeignetes Verfahren zur zerstörungsfreien Materialcharakterisierung und Bestimmung von Werkstoffeigenschaften bei ferromagnetischen Bauteilen ist die Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen. Der Messeffekt basiert auf den physikalischen Materialeigenschaften wie der elektrischen Leitfähigkeit und den magnetischen Eigenschaften die in direktem Zusammenhang mit den mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften wie der Rand- und Kernhärte stehen. Unter Anwendung der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen lassen sich die Messeffekte trennen und unter Variation der Prüffrequenz Informationen aus unterschiedlichen Randzontiefen gewinnen.

Eine geeignete Methode zur Anpassung und problemorientierten Optimierung einer Prüftechnik an die Prüfaufgabe ist die FEM-Simulation elektromagnetischer Felder, der Wirbelstromverteilung und des magnetischen Potentials im Prüfkörper und Sensorbereich in Abhängigkeit der Prüfparameter und Werkstoffeigenschaften.

Aufgezeigt werden umfangreiche Untersuchungen zur FEM-Simulation der Prüfbedingungen in der Randzone und im Kernbereich von dünn- und dickwandigen Bauteilen zur Weiterentwicklung und Optimierung der Prüftechnik. Basierend auf diesen grundlegenden Untersuchungen zur zerstörungsfreien Bestimmung der Randhärte und Einhärtungstiefe wurden bei nitrier-, einsatz- und randschichtgehärteten Bauteilen wie dünnwandigen Näpfen, Scheiben, Wellen und Naben sowie Zahnrädern und großen Tellerrädern Messungen durchgeführt, die exemplarisch vorgestellt werden.



1. Einführung

Eine Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen, wie z. B. schrägverzahnte Zahnräder und Ritzelwellen durch Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung und zerstörungsfreier Bauteilprüfung, wie sie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 an der Leibniz Universität Hannover entwickelt wird, bietet neue Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Fertigung von hochbeanspruchten Maschinenbauteilen hoher Qualität. Die unmittelbare Erfassung relevanter Prozessparameter und Bauteileigenschaften im Prozessablauf ist dabei von wesentlicher Bedeutung für die Prozesssteuerung und Erreichung einer hohen Prozesssicherheit.

Von starkem Einfluss auf die Bauteileigenschaften sind Änderungen in den Werkstoffkennwerten, die durch das Vormaterial, den Wärmebehandlungs- und Hartfeinbearbeitungsvorgang geprägt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit das zu fertigende Werkstück in der Fertigungskette hinsichtlich seiner mechanisch-technologischen Materialeigenschaften zu überprüfen, um die Einhaltung vorgegebener Toleranzbänder nach relevanten Fertigungsschritten zu gewährleisten. Hier kommen nur zerstörungsfreie Prüfverfahren zum Einsatz, die es ermöglichen, Härtekennwerte, wie die Kernhärte, Randhärte und Einhärtungstiefe zu bestimmen [1,2]. Da es sich beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern und Langteilen bevorzugt um ferromagnetische Werkstoffe handelt, bieten sich hier elektromagnetische Prüfverfahren wie die Wirbelstromtechnik in Kombination mit der Harmonischen-Analyse an.

2. Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung



Bild 1: Indirekte Bestimmung mechanischer Bauteileigenschaften

Elektromagnetische Prüftechniken nutzen existierende Zusammenhänge zwischen den mechanischen und physikalischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe (Bild 1). Dabei ist eine zerstörungsfreie, schnelle Bestimmung relevanter magnetischer Kennwerte zur umfassenden Werkstoffcharakterisierung in der Fertigungslinie anzustreben. Eine quantitative Bestimmung der magnetischen Kennwerte ist nur unter Aufnahme der magnetischen Hysteresekurve möglich. Dies bedarf einer aufwändigen Probenvorbereitung und einer anschließenden, sehr zeitaufwändigen quasistationären Messung der Hystereseschleife. Als ein schnelles Messverfahren zur Bestimmung von magnetischen Kennwerten hat sich das magnetinduktive Prüfverfahren der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen bewährt, da die höheren Harmonischen der Prüffrequenz die Gefüge- und magnetischen Eigenschaften besser widerspiegeln als die Grundwelle. Diese Höherharmonischen beschreiben die Form der magnetischen Hysteresekurve, deren Nichtlinearität ihre Ursache in den magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes hat. Die zerstörungsfreie magnetinduktive Prüfung macht sich diesen Zusammenhang zu Nutze. So wirken sich Änderungen des Gefügestandes sowohl

auf die mechanischen Eigenschaften, als auch auf die physikalischen Eigenschaften, wie Leitfähigkeit und Permeabilität, aus. Es besteht eine Korrelation zwischen der mechanischen und der magnetischen Härte [6].

Bei Messsystemen, die nach dem magnetinduktiven Verfahren arbeiten, wird durch eine Erregerspule ein magnetisches Primärfeld erzeugt, welches mit dem Werkstück in Wechselwirkung tritt (Bild 2). Abhängig von der Permeabilität, der Leitfähigkeit und der Geometrie des Bauteils bilden sich Wirbelströme im Material aus und werden Magnetisierungsvorgänge generiert, die zur Entstehung magnetischer Sekundärfelder führen. Die Überlagerung der magnetischen Felder wird mit Hilfe einer Messspule erfasst. Bei ferromagnetischen Materialien wird die Messspannung aufgrund der magnetischen Hysterese, die den nichtlinearen Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte beschreibt, verzerrt. Infolgedessen enthält das Messsignal Oberwellen, die mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation sehr schnell spektral analysiert werden können. Das Ergebnis dieser Transformation liefert Amplituden- und Phasenwerte bzw. Real- und Imaginärteile des komplexen Messsignals als Größen der im Messsignal enthaltenen Harmonischen. Dieses sind aufgrund des nichtlinearen Übertragungsverhaltens der magnetischen Hysterese ungeradzahlig vielfache Harmonische der Prüffrequenz.

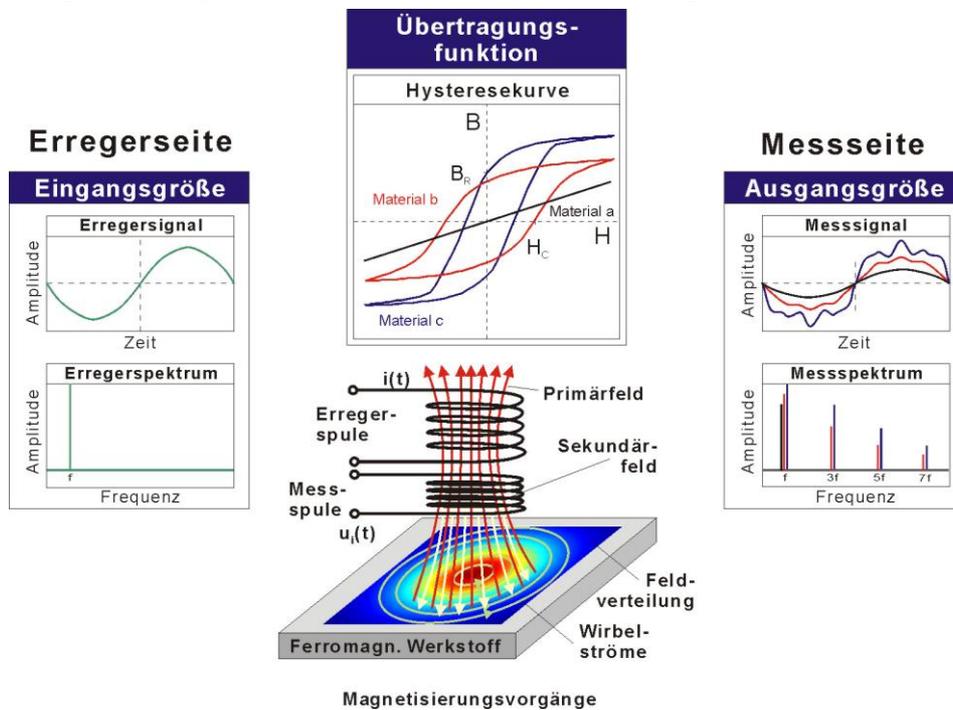


Bild 2: Messprinzip der Harmonischen-Analyse

3. Bestimmung von Härte Kennwerten an Zahnrädern

Im Hinblick auf eine Optimierung der integrierten Wärmebehandlung in einer verkürzten Prozesskette „Präzisionsschmieden“ und einer Überprüfung der Einhärtungstiefe im Verzahnungsbereich von Zahnrädern nach der Hartfeinbearbeitung wurde die Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zur integralen und lokalen Erfassung von Härte Kennwerten randschichtgehärteter Bauteile weiterentwickelt. Damit ergeben sich Möglichkeiten anhand relevanter Härte Kennwerte zum einen den Wärmebehandlungsprozess zu regeln und zum anderen Informationen an die folgende Hartfeinbearbeitung zu liefern [1].

Zur Kontrolle und Regelung der Wärmebehandlung mittels Spraykühlung ist eine schnelle und integrale Bewertung des Härtezustandes der abgeschreckten und angelassenen Zahn-

räder im Anschluss an den Anlassvorgang und die erfolgte Abkühlung notwendig. Hierzu wurde basierend auf Simulationsergebnissen eine Messsonde entwickelt. Diese umfasst das Zahnrad vollständig und ermöglicht so eine integrale Beurteilung der Zahnhärte im Verzahnungsbereich. In Bild 3 ist der exponentielle Zusammenhang zwischen der Abschreckdauer von Zahnradern aus dem Werkstoff 100Cr6, der Härte und der Amplitude der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals bei einer Prüffrequenz von 100 Hz gezeigt. Die eingetragenen Messwerte der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals über der Abschreckdauer sind dabei mit der Zahnradnummer bezeichnet, um die Zuordnung zum Zahnrad und Prozessschritt zu gewährleisten.

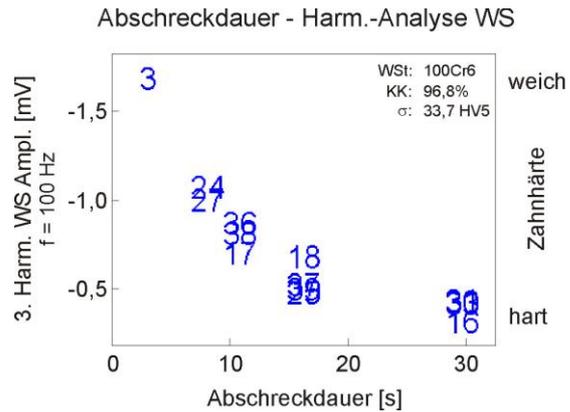


Bild 3: Zusammenhang Abschreckdauer – 3. Harm. WS Ampl.

Die hohen Anforderungen, die an die Qualität von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen gestellt werden, erfordern prozessintegriert eine örtliche Prüfung der Randzoneigenschaften im Bereich der Funktionsflächen. Zur Realisierung einer prozessintegrierten Prüfung ist daher bei den präzisionsgeschmiedeten, schrägverzahnten Zahnradern die zerstörungsfreie Prüfung von Härtekenntwerten an Einzelzähnen realisiert worden. Im Hinblick auf eine schnelle, zerstörungsfreie Bestimmung von Härtekenntwerten an Einzelzähnen schrägverzahnter Zahnradern wurde die Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zu einer geeigneten Prüftechnik entwickelt. [1,2,4,5]

Zur Anpassung der Messtechnik an die Prüfaufgabe wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um über eine Bewertung der Feldverläufe und magnetischen Flussdichten in der Messspule, im Zahn und insbesondere im Bereich der Randzone zu einer optimierten Prüftechnik zu kommen. Basierend auf einer in der Simulationsrechnung verwendeten Anordnung von Senderspule und Zahnradsegment zeigen die Simulationsergebnisse anhand des Betrags der magnetischen Flussdichte sehr anschaulich den Verlauf der Feldlinien und die Ausbildung der magnetischen Flussdichte im Zahn in Abhängigkeit der Prüffrequenz (Bild 4). Dabei wurde im Zahn eine gehärtete Randschicht mit einer dementsprechend niedrigen relativen Permeabilität von $\mu_r = 200$ und ein weicher Kern mit einer Permeabilität von $\mu_r = 700$ vorgegeben [3]. Die magnetische Flussdichte ist bei einer niedrigen Prüffrequenz von 50 Hz in der gehärteten Randschicht kaum ausgeprägt während sie im weichen Kern des Zahns über der gesamten Zahnbreite recht konstant ist. Damit wird eine relativ gleichmäßige Bewertung des Zahnkernbereichs erreicht. Zur Zahnmitte hin nimmt die Flussdichte etwas geringere Werte an und ist im breiten Zahnfußbereich entsprechend geringer. Mit zunehmender Prüffrequenz erfolgt eine starke Verdrängung der Flussdichte in den gehärteten Zahnflankenbereich, wobei die Flussdichte in der Randzone größere Werte annimmt. Aber auch bei hohen Prüffrequenzen von 3 kHz ist die magnetische Flussdichte in einer dünnen Randzone im Zahnflankenbereich über der Zahnhöhe relativ konstant und ist eine gleichmäßige Bewertung der Randzone gewährleistet. Im Zahnkernbereich ist die magnetische Flussdichte bei hoher Prüffrequenz sehr gering. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation der Feldverhältnisse im Zahn wurde die Messsonde konzipiert. Sie besteht aus einer zentral angeordneten Senderspule und einer Empfängerspule. Die Empfängerspule ist so ausgelegt, dass sie als Messspule einen einzelnen Zahn vollständig umfasst.

Simulation der Einzelzahn-Härteprüfung

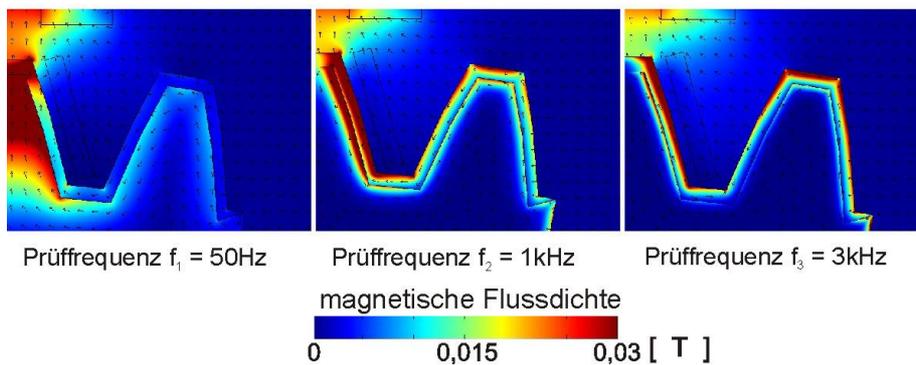


Bild 4: Simulation der magnetischen Flussdichte im Verzahnungsbereich

Ein wesentlicher Punkt bei der Einzelzahnprüfung ist die exakte und reproduzierbare Positionierung des Zahns in der Messsonde. Dies wurde durch die Integration der Messsonde und des Zahnrades in eine Verfah- und Drehvorrichtung realisiert. Wichtig ist hierbei das immer wieder gleiche Eintauchen jedes Zahns in die Messspule, so dass sich keine Fehler aufgrund unterschiedlicher Spulenfüllgrade ergeben (Bild 5).

Die Verschleiß- und Dauerfestigkeit einer Verzahnung wird im Zusammenhang mit dem Werkstoff im Wesentlichen durch die Härtekennwerte im Verzahnungsbereich wie der Randhärte und Einhärtungstiefe geprägt. Zur zerstörungsfreien Bestimmung dieser Härtekennwerte und Qualifizierung

eines Harmonischen-Analyse-Messsystems wurde ein Referenzprobensatz mit definierten Randhärten und Einsatzhärtungstiefen aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 konventionell gefertigt. Jeweils 10 Zahnräder in einem Zahnradsatz wurden mit Einhärtungstiefen von 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 und 1,1 mm aufgekühlt und einsatzgehärtet. Eine integrale Härtemessung aller Zahnräder des Referenzprobensatzes mit der integralen Zahnradsonde ergab bei den Zahnrädern mit den

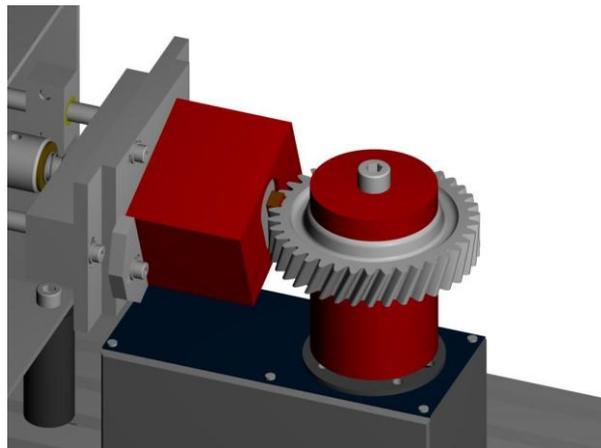


Bild 5: Einzelzahnprüfungsvorrichtung

Einsatzhärtungstiefen von 0,3; 0,7; 0,9 und 1,1 mm einen nahezu konstanten Wert der Randhärte über die Amplitude der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals bei einer Prüffrequenz von 3200 Hz. Bei dem Zahnradsatz mit einer Einhärtungstiefe von 0,5 mm hingegen zeigte diese Messgröße stark abweichende Messwerte, was auf eine Fehlhärtung mit geringeren Härtewerten im Verzahnungsbereich deutet (Bild 6). Eine Überprüfung der Randhärte der Einzelzähne mit der Einzelzahnsonde ergab bei diesen Zahnrädern über dem Umfang stark schwankende Einzelzahn-Härtewerte anhand der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals, was auf eine ungleichmäßige Einzelzahn-Randhärte über dem Zahnradumfang infolge einer Fehlhärtung zurückzuführen ist.

Dieses Ergebnis konnte durch die Bestimmung der Randhärte an den Stirnseiten der einzelnen Zähne über eine Vickers-Härteprüfung verifiziert werden (Bild 6). Infolge der Fehlhärtung dieses Zahnradsatzes variieren die Härtewerte der Einzelzähne bei diesen Zahnrädern in einem Bereich von 300...700 HV30. Der Verlauf der Einzelzahn-Härtewerte

ist dabei bei allen 10 Zahnrädern kongruent zum Verlauf der Messwerte der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals über dem Zahnradumfang.

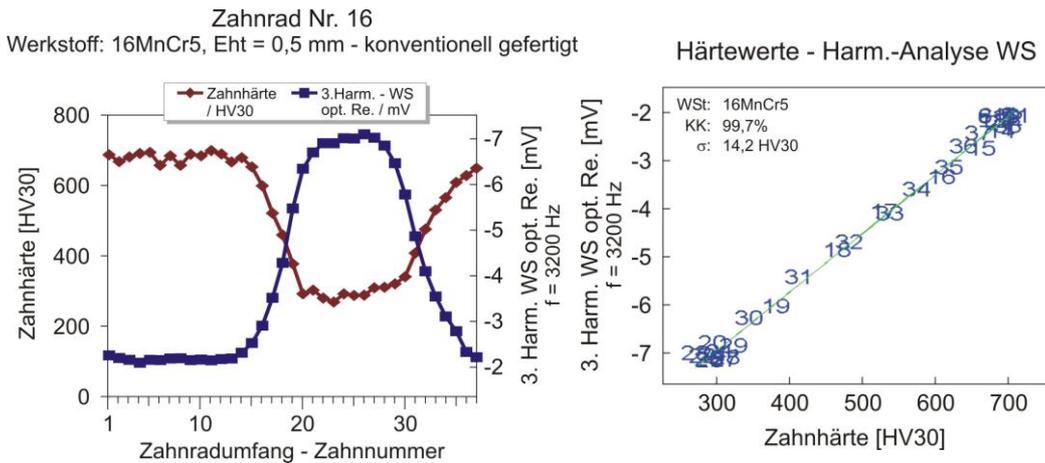


Bild 6: Fehlhärtung eines industriell gefertigten Zahnradsatzes

Der optimierte Realteil der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals bei einer Prüffrequenz von 3200 Hz zeigt einen guten Zusammenhang zu dem Prüfergebnis der Vickers-Härteprüfung. Bei einem Korrelationskoeffizienten von 99,7% und einer Standardabweichung von $\sigma = 14,2$ HV30 wird anhand einer Einzelmessgröße eine deutliche Abhängigkeit bei einer sehr geringen Messwertabweichung erreicht (Bild 6). Zur Beurteilung des Randzonengefüges wurden Schlitze aus dem „harten“ und „weichen“ Bereich eines Zahnrads angefertigt (Bild 7). Der Schliff aus dem „harten“ Bereich des Zahnrads zeigt deutlich eine 0,5 mm tiefe Randzone aus Vergütungsgefüge während die Randzone im „weichen“ Bereich nur aufgekohlt ist. Auch dieses Ergebnis macht deutlich, dass durch eine Aufkohlung und Wärmebehandlung hervorgerufene Gefügeveränderungen mit Hilfe der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen empfindlich nachgewiesen und lokale Härtekenntnisse zerstörungsfrei bestimmt werden können. Außerdem wurde deutlich, dass auch bei konventioneller Fertigung von Zahnrädern aus Einsatzstahl eine zerstörungsfreie Härteprüfung zur Qualitätssicherung sinnvoll ist.

Ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal bei randschichtgehärteten Bauteilen ist neben der Randhärte die Einhärtungs- oder Einsatzhärtungstiefe im Bereich von Funktionsflächen zur Gewährleistung einer hohen Flankentragfähigkeit und Dauerfestigkeit unter Betriebsbedingungen. Auch hier bietet die Wirbelstromprüfung durch die Entwicklung einer problemorientierten Messsonde, unter Variation der Prüfparameter in Abhängigkeit der physikalischen Werkstoffeigenschaften Möglichkeiten zur Bestimmung von Einhärtungstiefen. Dabei gelingt es mit einer angepassten Sonde über eine Variation der Prüfparameter anhand der magnetischen Flussdichte überwiegend den Kern- oder Randbereich des Bauteils messtechnisch zu erfassen, was auch Möglichkeiten zur Bewertung der Übergangszone bietet.

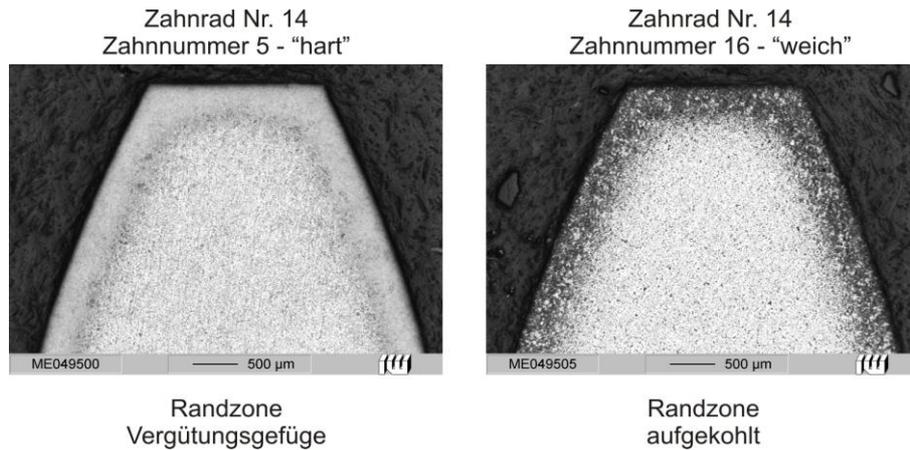


Bild 7: Randzone „hart“ – „weich“; konv. gefertigtes fehlgehärtetes Zahnrad

Die zerstörungsfreie Ermittlung der Einhärtungstiefe erfolgte mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen im Frequenzbereich von 50 Hz bis 3,2 kHz. Die Verknüpfung mehrerer Messgrößen mit dem Verfahren der mehrdimensionalen linearen Regression ergibt dabei ein Messergebnis, das der Einhärtungstiefe gegenübergestellt ist. In Bild 8 ist deutlich ein linearer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen und der Einhärtungstiefe zu erkennen. Der Korrelationskoeffizient einer 4-dimensionalen Regression von Einzelmessgrößen aus der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen und der Einhärtungstiefe gemäß Mikrohärtprüfung beträgt 96,5% bei einer Standardabweichung von $\sigma = 0,08$ mm. Damit ist die Einhärtungstiefe randschichtgehärteter Zahnräder zerstörungsfrei mit einer recht hohen Messgenauigkeit von kleiner 0,10 mm bestimmbar.

Die bisher erzielten Ergebnisse belegen, dass durch die gezielte Entwicklung einer zerstörungsfreien Prüftechnik basierend auf der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen und eine werkstoffbezogene Kalibrierung die lokale Bestimmung von Härtekennwerten an Einzelzähnen prozessintegriert mit einer hohen Empfindlichkeit, Aussagesicherheit und Messgenauigkeit zu realisieren ist. Einflüsse von Eigenspannungen und der Gefügeausbildung wirken sich sowohl auf die Härte, wie auf die physikalischen Werkstoffeigenschaften aus und werden in der Messung und in der werkstoffbezogenen Kalibrierung berücksichtigt.

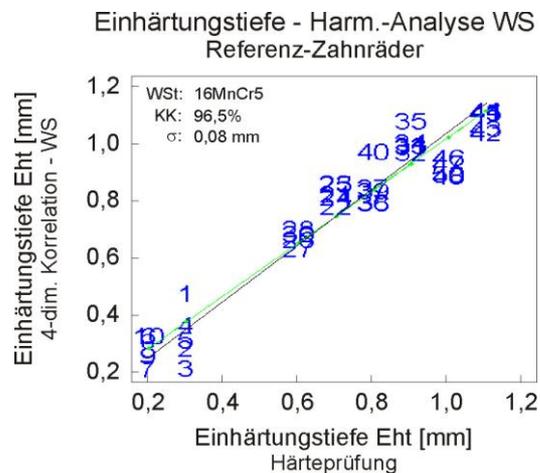


Bild 8: Einhärtungstiefen-Bestimmung

4. Qualitätsprüfung in der Fertigung – Einhärtungstiefe

Die 100%-Prüfung der Einhärtungstiefe im Fertigungsprozess nach dem Härten der Randschicht ist eine in der Industrie häufig gestellte Forderung im Rahmen der Qualitätsprüfung. Um die Eignung der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zur Bestimmung der Einhärtungstiefe an industriell gefertigten dünn- und dickwandigen Bauteilen zu zeigen,

wurden dünnwandige Buchsen und dickwandige Tellerräder auf ihre Einhärtungstiefe hin untersucht. Die Spezifikationen der Bauteile sind in Tabelle 1 angegeben.

	Buchse	Tellerrad
		
Werkstoff	1.0338	Einsatzstahl
D_a	20mm	330mm
s	0,65mm	>10mm
Eht	0,07+0,1mm	1,4...1,6mm
Qualität	Gutteile; Obere/untere Toleranzgrenze überschritten	Gutteile; Schlechteile

Tabelle1: Spezifikationen Buchse/Tellerrad

Die zerstörungsfreie Ermittlung der Einhärtungstiefe bei den dünnwandigen Buchsen erfolgte mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen und einer an dünnwandige Bauteile angepassten Messsonde im Frequenzbereich von 200 Hz bis 3,2 kHz. Bei Tellerrädern wurde die Einhärtungstiefe mit Hilfe einer an dickwandige Bauteile angepassten Messsonde bei Prüffrequenzen von 100 Hz bis 3,2 Hz bestimmt.

Eine eindeutige Einteilung der Buchsen in Gutteile und Teile, die die obere bzw. untere Toleranzgrenze der Einhärtungstiefe überschreiten, kann mit der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals (f_3) in der Impedanzebene erreicht werden. Die Sortierung der Tellerräder in Gutteile und Ausschuss ist ebenfalls mit der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals (f_1) in der Impedanzebene möglich (Bild 9).

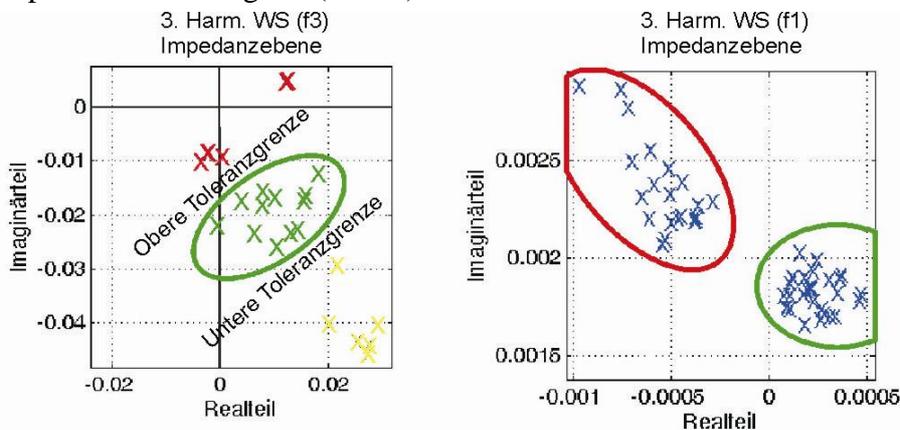


Bild 9: Bauteilsortierung in der Impedanzene

5. Qualitätsprüfung beim Nitrocarburieren – Nitrierschichtdicke

Zur Bestimmung von Härtekennwerten an nitriergelärteten Motorkomponenten wurden 21 Rondenproben aus dem Nitrierstahl X40CrMoV51 mit einer Grundhärte nach Vickers im Bereich zwischen 250 HV und 300 HV untersucht. Die Proben haben eine zylindrische Grundform mit einer Bohrung (Durchmesser 3 mm) im Randbereich, der Probendurchmesser beträgt 60 mm, die Probenhöhe variiert im Bereich von 8,5 mm bis 10 mm. Der Randbereich wurde durch Nitrocarburieren Oberflächenhärten von etwa 1100 HV erreicht. Je

nach Charge bzw. Nitrierzeit weisen die Proben eine unterschiedliche Nitrierhärte auf. Jeweils eine Stirnseite der Proben wurde nach dem Nitrocarburiervorgang planparallel beschliffen, um eine unterschiedlich starke Nitrierhärte auf dieser Probenseite einzustellen.

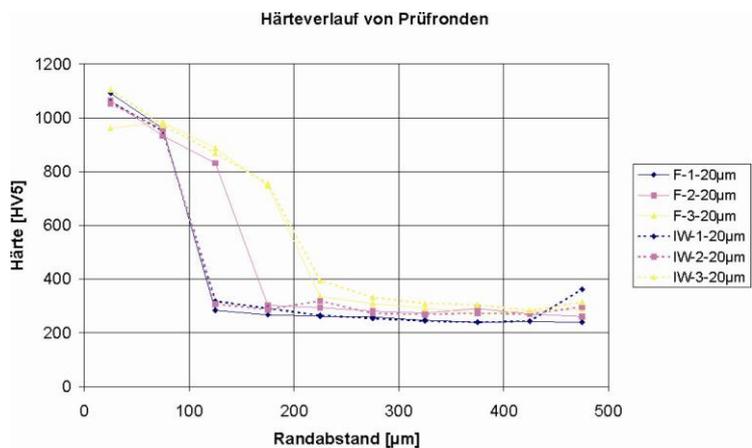


Bild 10: Härteverlauf ausgewählter Prüfronden [7]

datenanalyse den Zielwerten, d. h. den jeweiligen Nitrierhärte tiefen gegenübergestellt. Es wurde aufgrund dieser Gegenüberstellung eine Gütebewertung für alle ausgewerteten Messgrößen durchgeführt, um die für diese Prüfaufgabe am besten geeigneten Messgrößen zu ermitteln. Dabei wurden Prüffrequenzen zwischen 100 Hz und 3,2 kHz eingesetzt, die für die verwendeten Probengrößen und den hierbei vorliegenden Werkstoff grundsätzlich geeignet sind.

Zur weiteren Verbesserung des Untersuchungsergebnisses wurde eine Verknüpfung dreier für sich stabiler Einzelmessgrößen innerhalb einer dreidimensionalen Regressionsrechnung durchgeführt. Diese Verknüpfung führte nochmals zu einer Erhöhung des Korrelationsergebnisses auf 98,6% bei gleichzeitiger Verringerung der Standardabweichung auf 14,8 µm (Bild 12).

An einigen ähnlichen Proben, die die gleichen Härtungs- und Abschleifprozesse durchlaufen haben, wurden Mikrohärteproofungen an Schlifften durchgeführt (Bild 10).

Mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen wurden die Rondenproben auf beiden Seiten mit einer Prüfsensorik in Aufsatztechnik vermessen (Bild 11). Die aufgezeichneten Messdaten wurden dann in der Mess-

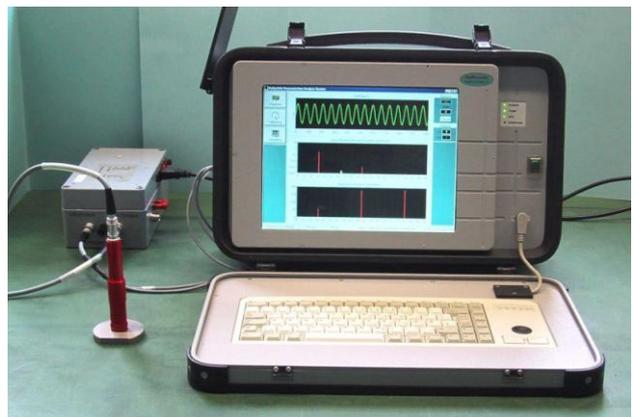


Bild 11: Versuchsaufbau zur elektromagn. Rondenprüfung

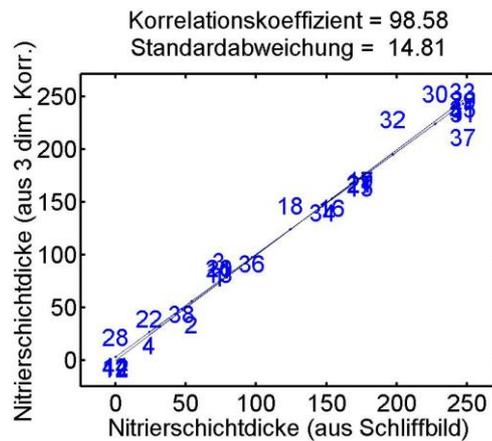


Bild 12: Ergebnis der WS-Prüfung (Ferritkernsonde) über der Nitrierschichtdicke [µm] (3-dimensionale Regressionsrechnung nach Schliffbildauswertung)

6. Zusammenfassung

Die Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zeichnet sich durch ihre hohe Messgenauigkeit, hohe Prüfgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 1 Sekunde, ihre robuste und hinsichtlich Störgrößen unempfindliche Ausführung und ihr einfaches Handling aus. Bei diesen Qualifikationen erfüllt das Prüfsystem wesentliche Anforderungen, die an eine prozessintegrierte Qualitätsprüfung gestellt werden.

Durch die Anpassung des Sensorsystems an das Prüfobjekt ist zum einen die zuverlässige Prüfung auch komplexer Bauteilgeometrien möglich. Zum anderen ist ein kontinuierlicher Betrieb auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten möglich. Die Darstellung des experimentellen Nachweises der hohen Praxistauglichkeit der Harmonischen-Analyse in zerstörungsfreien Online-Prüfsystemen erfolgte exemplarisch anhand der Bestimmung der Randhärte und Einhärtungstiefe bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern, dünnwandigen Buchsen und dickwandigen Tellerrädern.

7. Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“

8. Referenzen

- [1] Bach, Fr.-W.; Kerber, K.: Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“, www.sfb489.uni-hannover.de, 2006
- [2] Bernard, M.; Well, M. van; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Randzonenhärtung von Vergütungsstahl mit Sprühabschreckung. Einfluss der Düsenanordnung auf das Härteergebnis und zerstörungsfreie Bestimmung der Randzonenhärte mittels Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen, HTM-Härterei Technische Mitteilungen, Band 60 (2005), Heft 3
- [3] Hünike, U.-D.; Möller, S.: Auswertung der statischen Magnetisierungskurve zur Kontrolle von Gefüge- und Behandlungszuständen bei Stählen. DGZfP-Jahrestagung 2003, Mainz, 26.-28. Mai 2003

- [4] Scheer, C.; Bernard, M.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Nondestructive determination of hardness values and dynamic load test of precision forged components. VDI-Conference „International Conference on Gears“, München, 14.-16. September 2005
- [5] Bernard, M.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Nondestructive in-process determination of hardness values by harmonic analysis of eddy current signals. 9th European Conference on NDT, Berlin, 25.-29. September 2006
- [6] Feiste, K. L.: Entwicklung der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zur Charakterisierung mechanischer Kugelgraphitgusseigenschaften, Dissertation, März 2003, ISBN 3-18-500608-9
- [7] Duhm, R.; Bernard, M.; Feiste, K.-L.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Zerstörungsfreie Bestimmung von Härte Kennwerten der Nitrier- und Diffusionsschicht bei beschliffenen Rondenproben, Machbarkeitsstudie IW-ZfP 5/12/2002, Hannover, 2002