

Zerstörungsfreie Bestimmung von Härtekennwerten und Belastungsprüfung präzisionsgeschmiedeter Bauteile

M. Bernard, C. Scheer, W. Reimche, F.-W. Bach
Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover

1 Einleitung

Die Qualitätskontrolle von Bauteilen und Halbzeugen erfolgt herkömmlich im Anschluss an die Fertigung mit konventionellen Prüfverfahren. Dazu werden am Ende des Fertigungsprozesses stichprobenartig Proben entnommen, mit erheblichem Zeit- und Personalaufwand transportiert, bearbeitet und zerstörend geprüft. Mit dieser Form der Qualitätskontrolle verbunden sind zum einen hohe direkte Prüfkosten, zum anderen resultieren aus der zeitverzögerten Rückkopplung der für die Optimierung des Fertigungsprozesses notwendigen Prüfergebnisse indirekte Kosten durch Produktionsausfall bzw. erhöhte Ausschussraten.

Unter diesen Gesichtspunkten werden in zunehmendem Maße zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung als Alternative zu konventionellen zerstörenden Prüfverfahren entwickelt [1,2,3,5]. Bei einer 100%-Prüfung im Prozesstakt ergeben sich Möglichkeiten Veränderungen in der Bauteilqualität frühzeitig zu erkennen und relevante Prozessparameter des Fertigungsprozesses kontinuierlich an die Ergebnisse der Qualitätsprüfung anzupassen. Durch eine derartige Qualitätssicherung können Kosten durch Produktionsausfall oder erhöhte Ausschussraten vermieden werden.

Zur Entwicklung und Auslegung einer an die Prüfaufgabe angepassten Prüftechnik und Sensorik ist es sinnvoll, die geplante Anordnung, Beschaltung und Ansteuerung der Prüftechnik im Zusammenspiel mit den zu prüfenden Proben rechnergestützt zu simulieren. Ein zeitaufwändiges empirisches Ermitteln der optimalen Konzeption der Prüfanordnung kann so vermieden werden.

2 Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung

Elektromagnetische Prüftechniken nutzen existierende Zusammenhänge zwischen den mechanischen und physikalischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe (Abbildung 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 Hysterese 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, allerdings gibt es keine allgemein-

gültige Theorie, die den Zusammenhang zwischen magnetischem Verhalten und mikrostrukturellem Aufbau ferromagnetischer Stoffe beschreibt.



Abbildung 1: Indirekte Bestimmung mechanischer Bauteileigenschaften

Entsprechend der Prüfaufgabe ist daher zu prüfen, ob eine eindeutige Korrelation zwischen den mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs besteht /6/.

Bei Messsystemen, die nach dem magnetinduktiven Verfahren arbeiten, wird durch eine Erregerspule ein magnetisches Primärfeld erzeugt, welches mit dem Werkstück in Wechselwirkung tritt (Abbildung 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.

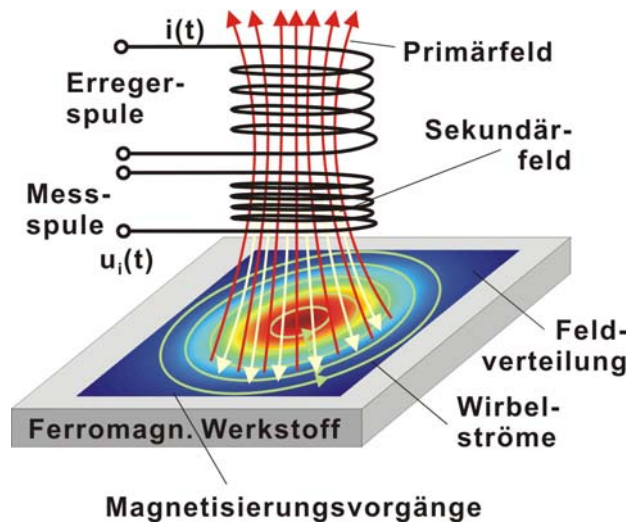


Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen Prüf-sensor und Bauteil

Basierend auf den bestehenden Zusammenhängen bieten sich Möglichkeiten mechanische Eigenschaften indirekt zu bestimmen. Mit dem Ziel einer hohen Aussage-sicherheit und Messgenauigkeit kann im Rahmen einer Signalanalyse nach Zusammenhängen zwischen signifikanten Messgrößen und relevanten Zielgrößen gesucht werden. Werden mehrere dieser Messgrößen, nachdem sie auf ihre Messwertspannung und lineare Abhängigkeit überprüft wurden, z. B. durch eine funktionale Betrachtung linearisiert oder durch eine mehrdimensionale Regressionsanalyse miteinander verknüpft, kann eine weitere Verbesserung der Korrelation zu gesuchten Zielgrößen erreicht werden.

3 Anwendungsbeispiele zur zerstörungsfreien Materialcharakterisierung

3.1 Werkstoffverwechslungsprüfung von Schmiederohlingen

Durch Unregelmäßigkeiten im Materialfluss beim Stahlhersteller, Zulieferer und Abnehmer, durch Lagerhaltung, beim Zuschnitt und in der Logistik kann es zu Materialverwechslungen beim Eingangsmaterial zu Beginn der Prozesskette kommen.

Um die Einsatzfähigkeit der fertigen Schmiedeteile und die Standzeit der Schmiedegesenke zu gewährleisten sowie Ausschuss zu vermeiden, ist eine Werkstoffverwechslung der Schmiederohlinge auszuschließen. Mit Hilfe des rechnerbasierten Harmonischen-Prüfsystems und der Entwicklung eines Klassifizier- und Kalibrierkonzepts wurde eine Werkstoffverwechslungsprüfung für Schmiederohlinge realisiert. Hierzu wurde ein spezieller Prüfsensor entwickelt der in Aufsatztechnik arbeitet. Das Sensorsystem ist auf einen möglichst empfindlichen Nachweis höherharmonischer Signalanteile im Kontakt mit ferromagnetischen Werkstoffen ausgelegt. Mit diesem Messsystem ist eine schnelle Eingangsprüfung der Schmiederohlinge im Rahmen einer Werkstoffverwechslungsprüfung als auch eine sensible zerstörungsfreie Bestimmung von Materialkennwerten der Schmiedeteilen möglich.

Eingangsprüfung „Werkstoffklassifikation“

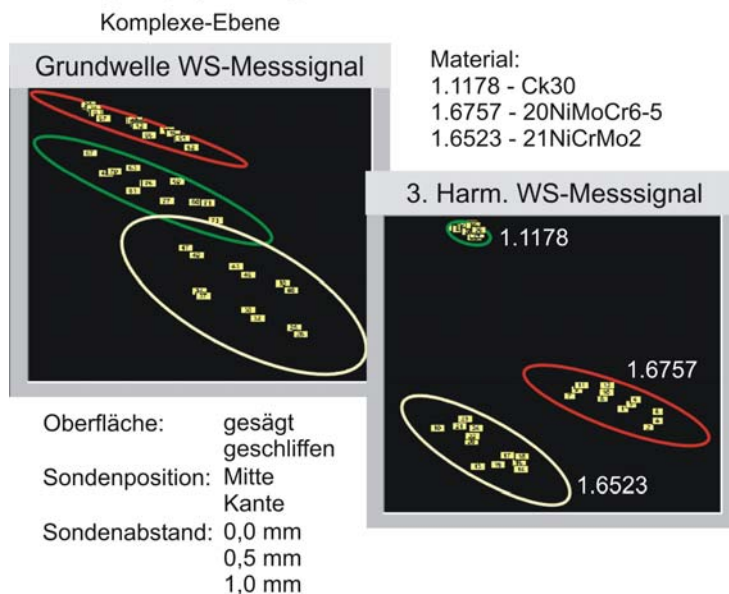


Abbildung 3: Werkstoffverwechslungsprüfung von Schmiederohlingen

In Abbildung 3 ist eine Clusterbildung für drei Schmiedewerkstoffe in der Komplexen Ebene dargestellt. Variiert wurden die Störgrößen Bearbeitungs-zustand der Probenoberfläche, Abstand der Sonde von der Probenoberfläche sowie das Aufsetzen der Sonde im Kantenbereich der Probe. Es ist deutlich zu erkennen, dass schon mit der Grundwelle des Messsignals eine Trennung von drei Schmiedewerkstoffen möglich ist. Der Einfluss von Störgrößen führt allerdings zu einer leichten Überlappung zweier Cluster. Eine deutlichere

Trennschärfe bezüglich der verwendeten 3 Schmiedewerkstoffe zeigt hier die Harmonische 3. Ordnung primär im Zusammenhang mit den magnetischen Werkstoffeigenschaften. Zudem haben Störgrößen bei dieser Messgröße einen geringeren Einfluss auf das Messergebnis.

3.2 Bestimmung von Härtekennwerten

In der Bauteilprüfung spielt hinsichtlich der Überprüfung von Bauteileigenschaften die Bestimmung von mechanisch-technologischen Materialkennwerten eine wichtige Rolle. Während eine hohe Verschleißfestigkeit des Bauteils in erster Linie durch eine hohe Oberflächenhärte des Werkstoffes realisiert wird, hängt die Dauerfestigkeit und Zähigkeit eines Bauteils entscheidend von seiner Kernhärte ab. Die Kombination dieser gewünschten speziellen Werkstoffeigenschaften wird durch Randschichtgehärten erzielt. Daher sei hier beispielhaft die Ermittlung von Härteeigenschaften an randschichtgehärteten zylindrischen Bauteilen vorgestellt. Randschichtgehärtete Bauteile, wie z. B. Motorventile, werden in der Automobilindustrie eingesetzt, wo die genannten Eigenschaften von wesentlicher Bedeutung sind. Um den Ausschussanteil in der Produktion zu minimieren, muss ein stabiler Produktionsprozess gewährleistet werden, z. B. indem prozessintegriert die Einhärtungstiefe der produzierten Bauteile ermittelt und der Produktionsprozess entsprechend diesen zerstörungsfrei ermittelten Werten geführt wird.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal bei der Produktion randschichtgehärteter Bauteile ist daher neben der Randhärte die Einhärtungstiefe im Bereich von Funktionsflä-

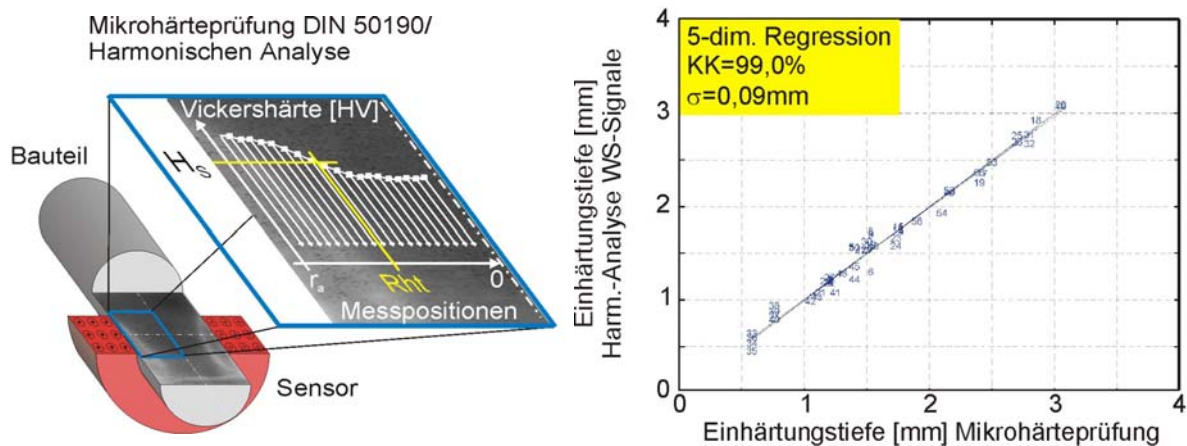


Abbildung 4: Bestimmung der Einhärtungstiefe bei einem zylindrischen Bauteil

chen. In Abbildung 4 ist die Bestimmung der Einhärtungstiefe im Ventilschaftbereich dargestellt. Diese erfolgte konventionell durch einen Längsschnitt des Schaftes und eine Mikrohärteprüfungen über dem Randabstand. Die Einhärtungstiefe ist dabei definiert als der Abstand vom Probenrand, an dem die Härte einen definierten Härtewert H_s unterschreitet. Im genannten Beispiel war in einem Abstand von 1 mm von der Bauteiloberfläche ein Härtewert von 440 HV gefordert. Die anschließende zerstörungsfreie Ermittlung der Einhärtungstiefe erfolgte mit einer Wirbelstrom-Außendurchlaufspule bei Prüffrequenzen von 200 Hz bis 2 kHz.

Im Rahmen der Qualitätskontrolle der Einhärtungstiefe an Proben aus Vergütungsstahl, wie sie z. B. als Ventilschäfte für Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, konnten eindeutige lineare Zusammenhänge zwischen der mittels Mikrohärteprüfung zerstörend ermittelten Einhärtungstiefe und den Klassifizierungsergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung mittels Harmonischen-Analyse aufgezeigt werden.

Der Korrelationskoeffizient aus der 5-dimensionalen Regression von Einzelmessgrößen aus der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen einerseits und der zerstörend mittels Mikrohärteprüfung ermittelten Einhärtungstiefe andererseits beträgt 99,0%, dabei liegt die Standardabweichung bei $\sigma = 0,09$ mm.

Damit ist die Einhärtungstiefe von randschichtgehärteten Bauteilen zerstörungsfrei mit einer recht hohen Messgenauigkeit bei einer Messabweichung von $\pm 0,1$ mm bestimmbar.

3.3 Bestimmung von Härtekennwerten an Zahnrädern

In der industriellen Fertigung und in aktuellen Forschungsprojekten gibt es aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen Bestrebungen zur Verbesserung der Fertigungstechnologien und zur Verkürzung konventioneller Fertigungsstraßen. Bei der Fertigung von hoch beanspruchten Maschinenbauteilen wird derzeit angestrebt die mechanische Bearbeitung durch Präzisionsschmieden zu ersetzen. Hierbei sollen mit anschließender Wärmebehandlung aus der Schmiedewärme Vormaterial sowie energie- und zeitintensive Arbeitsschritte eingespart und somit eine verkürzte Fertigungsprozesskette realisiert werden [4,7,8,9]. Durch Unregelmäßigkeiten in einzelnen Fertigungsschritten der verkürzten Prozesskette, wie dem Präzisionsschmieden, der integrierten Wärmebehandlung mit einer gesteuerten Abkühlung und anschließendem Anlassen des Zahnrades aus der Schmiedewärme sowie der Hartfeinbearbeitung, kann es zu Fertigungsfehlern mit unzulässigen Auswirkungen auf die Randzoneneigenschaften kommen. So führt ein erhöhter Werkzeugverschleiß bzw. eine Werkzeugverkipfung beim Präzisionsschmieden oder ein Spannfehler bei der Bauteilaufnahme zu ungleichmäßigem Materialabtrag bei der Hartfeinbearbeitung, was örtlich von Einfluss auf die verbleibende Randhärte und Einhärtungstiefe ist. Auch können Veränderungen in der Prozess- und Temperaturführung sowie der Bauteilbeaufschlagung beim Präzisionsschmieden und der Wärmebehandlung zu veränderten Abkühlbedingungen und damit zu Abweichungen und Unsymmetrien in der Gefüge- und Randzonenausbildung führen. Zusätzlich kann es bei ungünstigen Prozessbedingungen im Rahmen der Hartfeinbearbeitung zu Schleiffehlern mit unzulässigen Gefügeveränderungen (Anlassen, Schleifbrand) im Bereich der Randzone kommen.

Die hohen Anforderungen, die an die Qualität von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen gestellt werden, erfordern daher eine örtliche, prozessin-

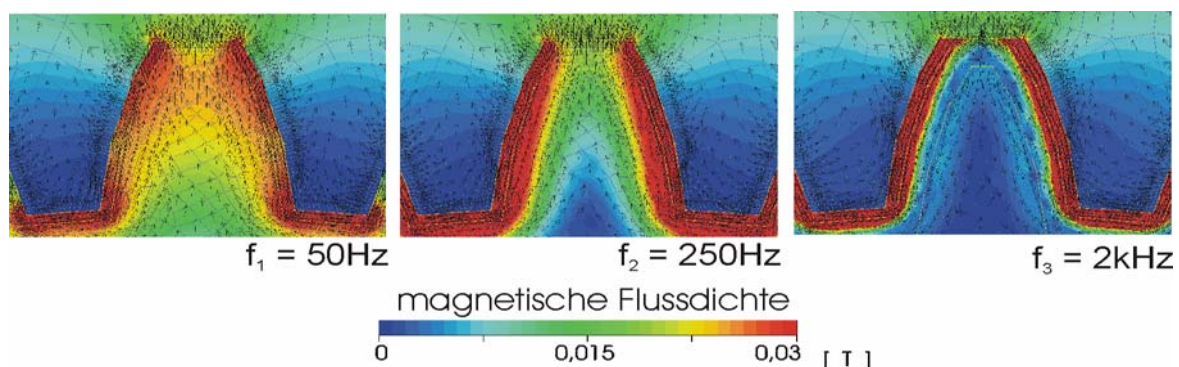


Abbildung 5: Simulation der Flussdichte im Einzelzahn in Abhängigkeit der Prüffrequenz

tegrierte Prüfung der Randzoneneigenschaften im Bereich der Funktionsflächen. Zur Realisierung einer prozessintegrierten Prüfung ist daher bei den präzisionsgeschmiedeten, schrägverzahnten Zahnrädern in einem ersten Ansatz die zerstörungsfreie Prüfung von Härtekennwerten an Einzelzähnen beabsichtigt.

Im Hinblick auf eine schnelle, zerstörungsfreie Bestimmung von Härtekennwerten an Einzelzähnen schrägverzahnter Zahnräder bietet auch hier die Harmonischen-

Analyse von Wirbelstromsignalen Möglichkeiten zur Realisierung einer geeigneten Prüftechnik.

Zur Anpassung der Messtechnik an die Prüfaufgabe wurden Simulationsberechnungen durchgeführt (Abbildung 5), 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. Die Simulationsergebnisse zeigen anhand des Betrags der magnetischen Flussdichte sehr anschaulich den Verlauf der Feldlinien und die Ausbildung der magnetischen Flussdichte im Zahn in Abhängigkeit der Prüffrequenz.

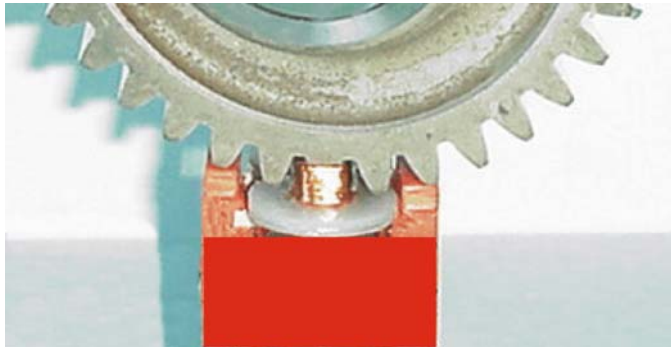


Abbildung 6: Sonde zur Härtemessung an Einzelzähnen

Zur Bestimmung der Zahnhärtete an Einzelzähnen wurden Messungen bei Prüffrequenzen von 250 Hz bis 6 kHz durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation der Feldverhältnisse im Zahn wurde eine Messsonde konzipiert (Abbildung 6). Messungen zur zerstörungsfreien Bestimmung der Randhärtete an Einzelzähnen

wurden an einem konventionell und einem präzisionsgeschmiedeten Zahnrad durchgeführt. Zur Veränderung der Härteeigenschaften in der Randzone wurden einzelne Zähne kurzzeitig bei Temperaturen von 300° C bis 650° C in Stufen von 50° C kontrolliert angelassen. Die Bestimmung der Randhärtete erfolgte integral über jeden Einzelzahn nach Vickers (HV10) und wurde über 5 Messwerte gemittelt.

Ein Vergleich der konventionellen Härtemessung nach Vickers und der zerstörungsfreien Härtemessung anhand der Harmonischen-Analyse von Wirbelstrom-

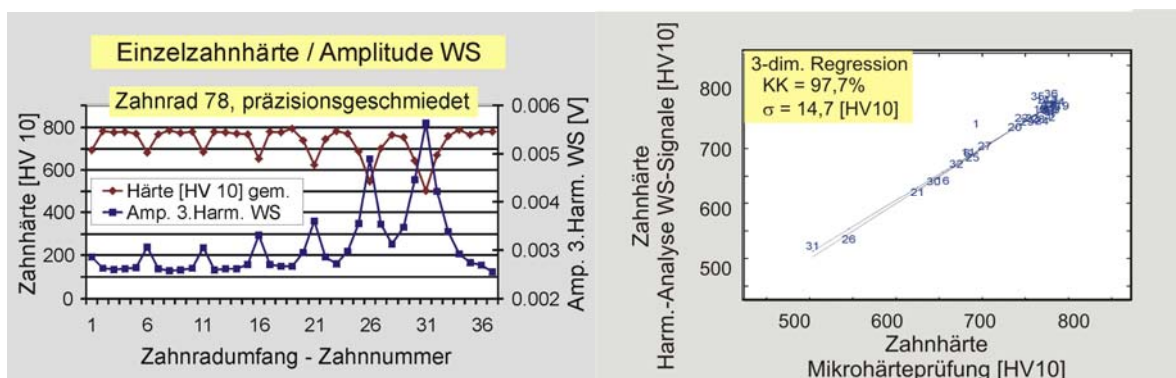


Abbildung 7: Zahnhärtete und Wirbelstrom-Signal (Amplitude 3. Harmonische), 3-dim. Regression

signalen der entwickelten Einzelzahnmessspule ist in Abbildung 7 aufgezeigt. Dabei ist sowohl die Randhärtete der Einzelzähne in HV10 als auch die Amplitude der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals, über der Zahnnummer in Zahnradumfangsrichtung aufgetragen.

Mit steigender Anlasstemperatur ist ein Abfall der Randhärtete von 780 HV auf bis zu 500 HV zu verzeichnen. Durch den lokalen Anlassvorgang bleibt bei geringen Anlasstemperaturen die Randhärtete der Nachbarzähne unbeeinflusst. Bei hohen

Anlasstemperaturen kommt es aufgrund von Wärmeleitung auch zu einem geringen Anlassen der Nachbarzähne.

In Analogie zu der Änderung der Randhärte der Einzelzähne über dem Zahnradumfang ist eine direkt umgekehrt proportionale Änderung der Amplitude der 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals in Abhängigkeit der Zahnhärte zu verzeichnen. Dies dokumentiert sehr anschaulich die Empfindlichkeit, lokale Auflösung und Messgenauigkeit, die mit der entwickelten Einzelzahnmessspule und der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zerstörungsfrei hinsichtlich der lokalen Bestimmung von Härtekennwerten zu erreichen ist /3/.

4 Bauteilprüfung unter Betriebsbedingungen

Zur Beurteilung der Bauteileigenschaften Laufruhe, Flankentragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit ist nach der Endbearbeitung präzisionsgeschmiedeter Bauteile eine Prüfung unter realistischen Betriebsbedingungen notwendig. Die präzisionsgeschmiedeten Bauteile werden hier auch mit herkömmlich gefertigten Bauteilen verglichen, um Einflüsse des Präzisionsschmiedens, der Wärmebehandlung und der Hartfeinbearbeitung auf die Qualität und die Bauteileigenschaften beurteilen zu können (Abbildung 8). Neben der Prüfung im umlaufenden dynamischen Belastungsprüfstand für schrägverzahnte Zahnräder hinsichtlich Flankentragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit lassen sich auch Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit und Geometrieabweichungen nachweisen. Dies ermöglicht anderen Teilprojekten eine Optimierung des Bauteils sowie einzelner Fertigungsschritte.

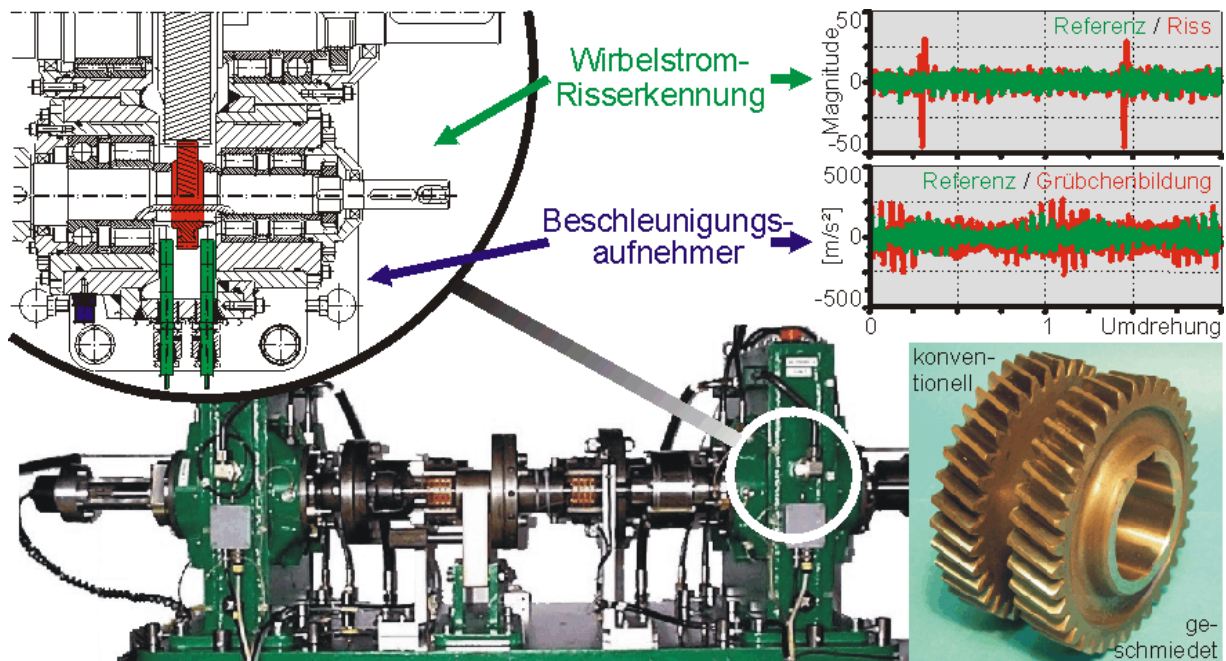


Abbildung 8: Umlaufender dynamischer Belastungsprüfstand für schrägverzahnte Zahnräder

Als Mittel zur Beurteilung des Lauf- und Geräuschverhaltens wird die Körperschall- und Schwingungsanalyse eingesetzt. Die Anwendung spezieller Analyseverfahren ermöglicht die Erkennung verzahnungsspezifischer Schwingungssignaturen, die Zuordnung entsprechender Anregungsursachen und erlaubt eine Klassifizierung des Bauteilzustandes.

Zur frühzeitigen Erkennung von Anrissen im Zahnfuß wurden Wirbelstromsensoren integriert. Ein Riss verändert die Ausbildung der Wirbelstromverteilung im

Bauteil, was zu einer Änderung der Signalamplitude führt. Die Abbildung zeigt neben der Anordnung der Sensorik Signale der Wirbelstromrisserkennung sowie der Schwingungsüberwachung.

Stand der Technik bei der schwingungstechnischen Überwachung rotierender Maschinen ist die Bildung von Effektiv- und Maximalwerten der Schwingwege bzw. Schwinggeschwindigkeiten und deren Vergleich mit vorgegebenen Grenzwerten nach Norm. Oftmals treten dabei Alarmzustände mit Grenzwertüberschreitung auf, ohne Hinweise auf die eigentliche Anregungsursache zu geben. Durch den Einsatz von Körperschallsensoren und der Nutzung computergestützter Datenerfassung- und Datenanalyse ergibt sich die Möglichkeit nicht nur maschinen- und fehlerspezifische Grenzwerte zu definieren, sondern einzelne Anregungen zur Fehlerlokalisierung ihrem Ursprung zuzuordnen und im Trend zu verfolgen. Die einfachste Möglichkeit ein Schwingungssignal global zu beschreiben ist die Trendbetrachtung statistischer Zeitkennwerte. Eine differenzielle Betrachtung der Signalinformation hinsichtlich der Festlegung von Abschaltkriterien ermöglichen die Amplitudenspektren, welche die im Signal enthaltene Amplitudeninformation einzelnen Frequenzkomponenten zuordnen /10,11/.

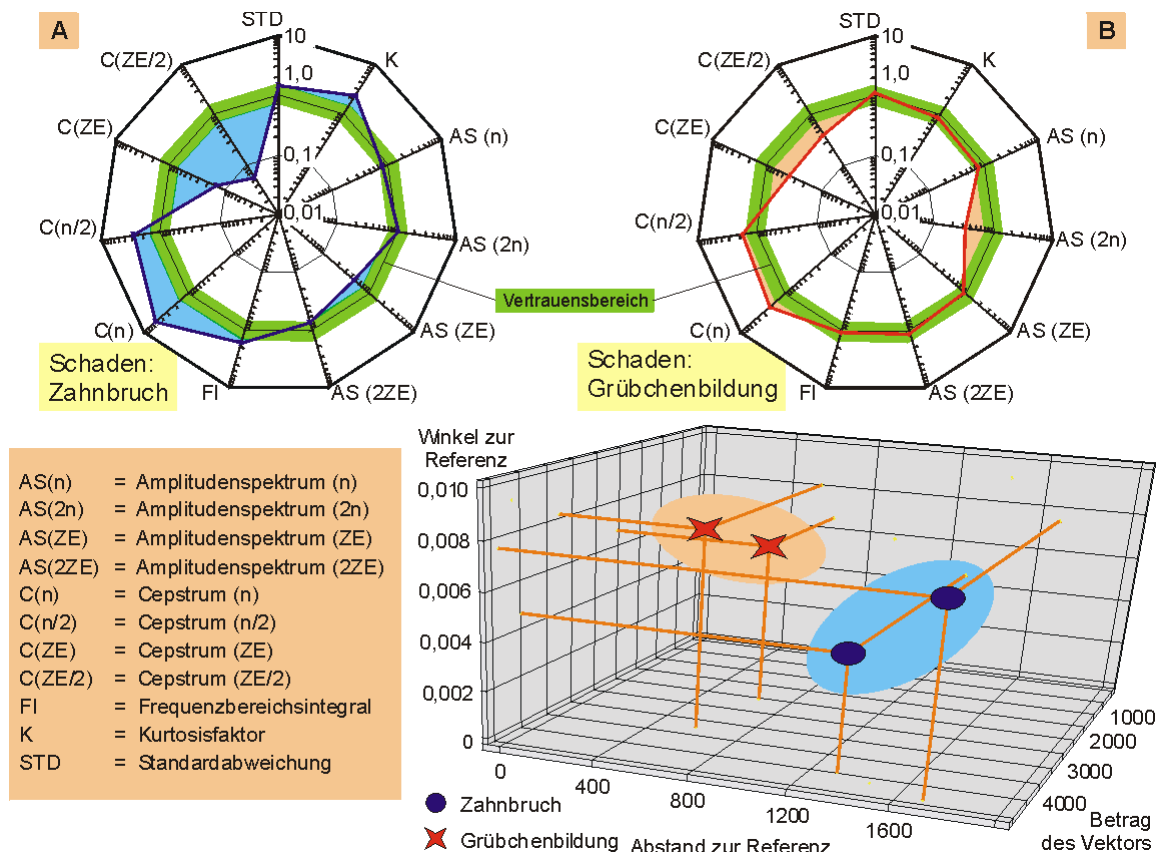


Abbildung 9: Schadenssignaturen mit Vertrauensbereichen, Schadensvektoren

Durch eine vektorielle Verknüpfung von Schadensmerkmalen und den Vergleich mit dem ungestörten Referenzzustand lassen sich Klassifizierer erarbeiten und hinsichtlich einer gesicherten sensitiven Schadensdiagnose nutzen. Grundvoraussetzung einer automatisierten Schadensanalyse ist der Bezug auf den ungestörten Referenzzustand. Hier sollte eine genügende Anzahl unabhängiger Messwerte zur Verfügung stehen, mit denen eine Referenzklasse zu bilden ist. Je größer die Anzahl von Referenzzuständen, desto besser wird die statistische Absicherung. Ungeeignete Muster, die zu einer Verfälschung des Klassifizierers führen, lassen sich bereits im Vorfeld erkennen. In einem Netzdiagramm aufgetragen sind die oben beschriebenen Schwingungskennwerte aus dem Zeit- und Frequenzbereich

als Quotient bezogen auf den zu „1“ normierten Zustand des ungeschädigten Betriebes nach kurzer Einlaufzeit. Die statistische Schwankungsbreite unterschiedlicher Referenzräder ist als „Vertrauensbereich“ gekennzeichnet /7/.

Unterschiede in den Kennwerten der Netzdiagramme ergeben sich nach längerer Betriebszeit im Fall der Grübchenbildung „A“ und des Zahnbruchs „B“, wobei der Abstand des aktuellen Werts vom Vertrauensbereich die Signifikanz der jeweiligen Signatur bezüglich des aufgetretenen Schadensausmaßes beschreibt.

Die oben beschriebenen Kennwerte zur Beschreibung des Laufverhaltens der Anlage bzw. der Schadensentwicklung bilden die Eingabematrix einer vektoriellen Verknüpfung zur Entwicklung eines Überwachungs- und Diagnosesystems, mit dem Ziel charakteristische Merkmale zu gewinnen und in einer anschließenden Klassifikation automatisch eine differenzierende Aussage über den aktuellen Anlagenzustand zu geben. Stand der Technik ist die oben dargelegte Extraktion schadens- und zustandsbeschreibender Kenngrößen aus den Schwingungssignalen zur Bildung von Prototypvektoren und Referenzmustern, die mit den aktuellen Messvektoren verglichen werden. Anwendung finden hier als beschreibende Größen der Abstand, der Winkel und der Betrag zum Referenz- bzw. Schadensvektor. Üblicherweise wird noch ein Wichtungsvektor eingesetzt. Dieser hat die Aufgabe im Fall des zu beschreibenden Schadens besonders charakteristische Merkmale zu wichten. So lassen sich in Abbildung 9 die exemplarisch aufgetragenen Signalklassen für Zahnbruch und Grübchenbildung deutlich unterscheiden.

5 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 Materialsortierung von Schmiederohlingen, der Bestimmung der Einhärtungstiefe an Ventilschaftproben und Bestimmung der Zahnhärte bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern.

Die Beurteilung der Bauteileigenschaften sowie der Lebensdauer erfolgt durch die Prüfung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder unter realistischen Betriebsbedingungen in einem umlaufenden Belastungsprüfstand für schrägverzahnte Zahnräder. Hierzu wird ein Körperschallmesssystem zur Schadensfrüherkennung eingesetzt, zusammen mit einer weiterentwickelten Wirbelstromsensorik zur Risserkennung auch im Zahnfußbereich. Eine Schadensklassifikation erfolgt durch eine vektorielle Verknüpfung von Schadensmerkmalen und den Vergleich mit dem ungestörten Referenzzustand.

Literatur

- /1/ Alekseev, V.A.; Krenev, A.N.; Melder, M.V.; Paporkov, V.A.; Preobrazhenskii, M.N.: Checking the depth of case-hardening of steel on the basis of magnetic interference. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 31 (1996), Heft 11, Seite 855-858
- /2/ Feiste, K. L.; Reichert, Ch.; Reimche, W.; Stegemann, D.: Härtekennwerte zerstörungsfrei bestimmen. Der Wärmebehandlungsmarkt, Feb. 1998
- /3/ Anisimov, S.D.; et al.: Nondestructive electromagnetic testing of hardened layers on surfaces of steel components. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 36, No. 1, 2000
- /4/ Breuer, M.: Verknüpfung von Wärmebehandlung und Formgebung beim Präzisionsschmieden von Verzahnungen; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 555; VDI Verlag, Düsseldorf 2000
- /5/ Makarov, A.V.; et al.: Eddy-current evaluation of wear resistance of case-hardened chromium-nickel 20KhN3A steel. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 2, 2001
- /6/ Klümper-Westkamp, H.; Mayr, P.; Feiste, K. L.; Bernard, M.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes in Aufkohlungsfolien. Härtereitechnische Mitteilungen 57, 5/2002, pp. 364-372
- /7/ Bernard, M.; Scheer, Ch.; Reimche, W.; Henze, A.; Bach, Fr.-W.: Sonderforschungsbereich 489, Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile, Teilprojekt B6, Ergebnisbericht 2000-2002
- /8/ 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-Härtereitechnische Mitteilungen, Band 60 (2005), Heft 3
- /9/ Bernard, M.; Krause, C.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Verkürzung der Prozesskette präzisionsgeschmiedeter Zahnräder durch integrierte Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Bauteilprüfung Kongressbeitrag HK 2004, AWT, 60. Kolloquium für Wärmebehandlung, Werkstofftechnik, Fertigungs- und Verfahrenstechnik, Wiesbaden, 6.-8. Oktober 2004
- /10/ Meltzer, G.: Stand und Tendenzen der Schwingungsüberwachung und -diagnostik / Innovative Diagnosetechnik, VDI-Schwingungstagung '99, Frankenthal, 27. u. 28. Mai 1999
- /11/ Scheer, C.; Pietsch, O.; Südmersen, U.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Schadensdiagnose an Getriebestufen durch problemangepasste Multisensorsysteme, VDI-Tagung, Schwingungen in Antrieben 2001, Würzburg, 18. u. 19. September 2001