

Bestimmung des oberflächennahen Spannungszustandes von Walzen

Eckhardt SCHNEIDER, Hans-Rüdiger HERZER, Gerhard HÜBSCHEN,
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken;
Monika WILDAU und Karl STEINHOFF, Steinhoff, Dinslaken

Kurzfassung. Hohe Härte und gleichmäßig verteilte hohe Druckeigenspannungen in der oberflächennahen Zone von Walzen sind wichtige Qualitätsmerkmale. Während die Härtebestimmung mittels etablierter Verfahren tägliche Routine ist, werden das Röntgendiffraktions- oder Bohrlochverfahren nur in besonderen Fällen zur Überprüfung des Spannungszustandes eingesetzt. Eine schnelle, zerstörungsfreie Analyse des Eigenspannungszustandes der gehärteten Oberflächenschicht von einigen 10 Millimetern Dicke hat Vorteile bei der Qualitätssicherung und unterstützt die Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Walzen. Ultraschallverfahren, die schon zur Spannungsanalyse an homogenen Bauteilen in Nutzung sind, wurden insbesondere zur Berücksichtigung des durch den Härtewert charakterisierten Gefügestandes angepasst. EMUS Wandler für streifend eingeschallte Transversalwellen und das Ultraschall-Frontend zur Spannungsanalyse mit EMUS Wandlern wurden für diese Prüfaufgabe ertüchtigt und in tägliche Anwendung gebracht. Zur Bestimmung der Härte entlang von Messspuren wurde das IZFP-3MA-System bzw. die Systemvariante MikroMach kalibriert und eingesetzt. Durch Vergleich der mittels Röntgen- und Bohrlochverfahren ermittelten Spannungswerte wurde das Ultraschallverfahren validiert.

Einführung

Arbeits-, Zwischen- und Stützwalzen für die Stahl-, Al- und Nichteisen-Metallindustrie werden gehärtet. Dabei wird eine möglichst hohe Härte und eine möglichst große Härtetiefe angestrebt. Härte und Härtetiefe sind qualitätsbestimmende Zustandsgrößen der Walzen. Mit etablierten Verfahren wird die Härte an mehreren Messpunkten, insbesondere im Bereich der Ballenkante und der Ballenmitte, überprüft. Als Folge der Gefügewandlung beim Härteprozess entstehen Druckeigenspannungen in der oberflächennahen Zone, die mit zunehmender Tiefe geringer werden. Wenngleich die Eigenspannungen durch den Härteprozess entstehen, gibt es nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten, den oberflächennahen Eigenspannungszustand mithilfe der Werkstoffdaten und der Prozessgrößen des Härtens zuverlässig zu berechnen. Die Eigenspannungen in oberflächennahen Zonen und die möglichst gleichförmige Verteilung des Eigenspannungszustandes in der Ballenoberfläche sind weitere Qualitätsmerkmale von Arbeitswalzen. Sie beeinflussen insbesondere die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Walzen und die Möglichkeiten durch Umhärten die Nutzung der Walze zu erweitern. Im Vergleich zu den häufig eingesetzten etablierten Bohrloch-, Ringkern- und Röntgendiffraktionsverfahren bieten die Ultraschallverfahren den Vorteil einer zerstörungsfreien Analyse von oberflächennahen Schichten bis zu ca. 6 mm Dicke und aufgrund der einfach und schnell

durchführbaren Messungen einer quasi ortskontinuierliche Analyse entlang von Messspuren.

1. Grundlagen der Ultraschallspannungsanalyse

Ultraschallverfahren zur Spannungsanalyse nutzen den akusto-elastischen Effekt, also den Einfluss von Dehnungszuständen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bzw. auf die Laufzeiten von Schallwellen. Zur quantitativen Bestimmung von oberflächennahen Spannungszuständen können prinzipiell Rayleighwellen, schräg in die Oberfläche eingeschallte Longitudinalwellen (Skimming Longitudinal) und streifend eingeschallte, horizontal polarisierte Transversalwellen genutzt werden. Der Einfluss mechanischer Spannungszustände auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen ist geringer als der Einfluss auf die Geschwindigkeiten aller anderen Wellenarten, sodass die Rayleighwelle nur dann zur Spannungsanalyse genutzt wird, wenn die Charakterisierung von Gradienten interessiert. Zur Bestimmung oberflächennaher Spannungszustände mit Ultraschallverfahren werden Sende- und Empfangsprüfkopf in einer festen Anordnung mit unverändert bleibendem Abstand eingesetzt, so dass die Laufzeit die Messgröße ist. Die Beziehungen 1 und 2 beschreiben die relative Laufzeitänderung einer Longitudinal- und einer Transversalwelle als Funktion eines allgemeinen dreiaxialen Spannungszustandes.

$$(t_0 - t_L) / t_0 = (A/C) \sigma_A + (B/C) (\sigma_U + \sigma_R) \quad (1)$$

$$(t_0 - t_T) / t_0 = (D/K) \sigma_A + (H/K) \sigma_U + (F/K) \sigma_R \quad (2)$$

Dabei repräsentiert t_0 die Laufzeit der entsprechenden Welle im spannungsfreien Material, t_L bzw. t_T sind die Laufzeiten der Longitudinal- bzw. Transversalwelle mit Ausbreitung entlang der Walzenlänge (A) und im Falle der SH₀-Welle mit Schwingung in Umfangsrichtung (U) der Walze mit Eigenspannungen. σ_A , σ_U und σ_R sind die Hauptspannungen in axialer-, Umfangs- und radialer Richtung der Walze. A, B, C, D, H, F und K sind Kombinationen der elastischen Konstanten II. (Elastizitäts- und Schermodul) und III. Ordnung, die auch akusto-elastische Materialkennwerte genannt werden. Sie wichten den Einfluss der entsprechenden Hauptspannungskomponente auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten, bzw. Laufzeiten der Ultraschallwellen. Literaturergebnisse und eigene Untersuchungen zeigen, dass der Wert für A/C für alle bisher untersuchten ferritischen Stähle etwa 20 mal größer ist als der Wert für B/C, und dass H/K etwa 3 – 5 mal größer ist als der Wert für D/K und etwa 10 mal größer ist als der Wert für F/K. Diese Erfahrung zu Grunde legend, können in erster Näherung die oben angegebenen Beziehungen zur Bestimmung von oberflächennahen Spannungszuständen vereinfacht werden:

$$(t_0 - t_L) / t_0 = (A/C) \sigma_A \quad (1a)$$

$$(t_0 - t_T) / t_0 = (H/K) \sigma_U \quad (2a)$$

Damit ist die relative Laufzeitänderung der Longitudinalwelle direkt proportional zu der Hauptspannung, die in der Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle wirkt; und die relative Laufzeitänderung der Transversalwelle ist direkt proportional zu der Hauptspannung, die in der Schwingungsrichtung der Welle wirkt.

Die martensitische Gefügewandlung, die die Härte und auch die oberflächennahen Druckspannungen verursacht, ändert die elastischen Werkstoffeigenschaften und damit auch die Schallgeschwindigkeit. Bei der Spannungsanalyse muss also der durch unterschiedliche Härtewerte charakterisierte Unterschied des Gefügezustandes entlang der

Messspur berücksichtigt werden. Unterschiedliche Gefügestände und damit unterschiedliches elastisches Werkstoffverhalten verändert auch den akusto-elastischen Kennwert, also die Änderung der Schallgeschwindigkeit als Funktion des Dehnungs- bzw. Spannungszustandes. Zur quantitativen Spannungsanalyse mittels Ultraschallverfahren müssen diese beiden Werte bekannt sein.

Die Genauigkeit des quantitativen Ergebnisses der Ultraschall-Spannungsanalyse wird im Wesentlichen von zwei Messunsicherheiten bestimmt: Der Fehler, mit dem die akusto-elastischen Materialkennwerte behaftet sind, liegt auf Grund von Messfehlern bei der experimentellen Ermittlung bei ca. $\pm 10\text{-}15\%$. Die Änderung des an einer Messstelle festgestellten Spannungswertes zum Wert eines benachbarten Messpunktes hat diese Unsicherheit. Der Fehler, mit dem die Laufzeit t_0 oder die Schallgeschwindigkeit v_0 ermittelt wird, die den spannungsfreien Zustand repräsentiert, liegt auf Grund der Fehler bei der Bestimmung der absoluten Werte für die Laufzeit und den Laufweg der Welle bei ca. $\pm 20 - 50$ MPa, in Ausnahmefällen bis zu ca. ± 100 MPa. Der Wert für die Laufzeit t_0 oder Schallgeschwindigkeit v_0 bestimmt den Nullpunkt der Spannungsskala.

2. Die materialspezifischen Kennwerte

Materialproben wurden so wärmebehandelt, dass sie die in Kaltwalzen typischerweise vorliegenden Härte- und Gefügestände repräsentieren. Die Härten wurden nach Vickers bestimmt; die Gefügestände metallografisch charakterisiert. Unter Laborbedingungen wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Longitudinal- und linear polarisierten Transversalwellen mit einer Genauigkeit von besser als 0,1% ermittelt. Die Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse früherer Messungen, nämlich eine lineare Abnahme der Transversal- und Longitudinalwellengeschwindigkeit mit zunehmender Härte von kontinuierlich und isotherm umgewandelten Materialproben. Die Transversalwellengeschwindigkeit ändert sich um ca. 0,42‰ bzw. 0,36‰ pro 10 HV Einheiten, die Longitudinalwellengeschwindigkeit um ca. 0,2‰ pro 10 HV.

Die zur quantitativen Spannungsanalyse mit Ultraschallverfahren notwendigen akusto-elastischen Materialkennwerte wurden in einaxialen Druckversuchen ermittelt. Während sich der akusto-elastische Kennwert für Transversalwellen (K/H) bei Proben mit Härten von ca. 680 HV bis 850 HV nur innerhalb eines Streubandes von $\pm 7\%$ um den Mittelwert von 135 MPa/‰ verändert, zeigt der akusto-elastische Wert für die Longitudinalwellen (C/A) eine deutlich größere Beeinflussung durch den jeweiligen Gefüge- bzw. Härtezustand. Der Mittelwert liegt bei 87 MPa/‰ und streut ohne erkennbare Systematik mit den Härtewerten der Proben um ca. $\pm 27\%$. Der Wert für die akusto-elastische Konstante K/H bedeutet, dass eine Spannung von 135 MPa eine Laufzeitänderung der Transversalwelle von 1 ‰ verursacht; zur Veränderung der Laufzeit der Longitudinalwelle um den gleichen Betrag ist nur eine Spannung von 87 MPa notwendig.

3. Verfahrensoptimierung

Die Schallgeschwindigkeit einer sich in der oberflächennahen Zone eines Walzenballens ausbreitenden Longitudinalwelle wird von dem Spannungszustand deutlich stärker beeinflusst als die der sich in der gleichen Zone ausbreitenden Transversalwelle. Allerdings bedarf es aufgrund der notwendigen Schalleinprägung über einen Keil und ein Koppelmedium (Wasser, Öl) einer größeren Sorgfalt bei der Bestimmung der Laufzeit der Longitudinalwelle als im Falle der Verwendung einer Transversalwelle, die elektromagnetisch, also ohne Koppelmittel, direkt in der Bauteiloberfläche erzeugt wird. In einfachen Rechnungen unter Nutzung experimentell festgestellter Messwerte und Messunsicherheiten lässt sich zeigen, dass die Verwendung der Transversalwelle – elektromagnetische Anregung und vernachlässigbarer Einfluss der lokalen Härteänderung auf den akusto-elastischen Kennwert - eine robustere Anwendung ermöglicht als die Nutzung der schräg eingeschallten Longitudinalwelle. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, ändert sich die Geschwindigkeit bzw. Laufzeit der Transversalwelle mit der Härte. Diese härtebedingte Änderung der Laufzeit t_0 , die den spannungsfreien Zustand repräsentiert, muss bei der Spannungsanalyse entlang der Messspur berücksichtigt werden. Das bedeutet, die Härte muss nicht wie bisher üblich an wenigen Stellen, sondern kontinuierlich entlang der Messspuren ermittelt werden. Eine Korrektur des Härteeinflusses auf den akusto-elastischen Kennwert ist nicht notwendig, wie sich aus den in Abschnitt 2 mitgeteilten Messergebnissen ergibt.

4. Zerstörungsfreien Bestimmung der Oberflächenhärte

Eine Alternative zu den etablierten Verfahren zur Bestimmung der Härte bietet das im Fraunhofer IZFP entwickelte 3MA-Prüfsystem und die Systemvariante MikroMach mit dem Vorteil einer schnellen ortskontinuierlichen Härtebestimmung. Wie alle elektromagnetischen Verfahren müssen auch das 3MA- und das MikroMach-System kalibriert werden. Zur Kalibrierung wurden die oben erwähnten Proben genutzt. Mit dem IZFP-Prüfsystem wurden im Rahmen der üblichen Qualitätsüberwachung auch Messdaten an den gleichen Positionen aufgenommen, an denen die etablierten Verfahren eingesetzt wurden, um so die Kalibrierdatenbank zu erweitern. Die zur Validierung des Verfahrens notwendigen Vergleiche mit den Ergebnissen der Härtebestimmung mit etablierten Verfahren zeigen bei Härten von ca. 650 HV bis 850 HV eine Übereinstimmung der Härtewerte innerhalb ± 5 in Ausnahmen ± 10 HV. Die Abbildung 1 zeigt das IZFP-MikroMach-Prüfsystem, bestehend aus einem Sensor und einem üblichen PC zur Parametrisierung des Systems, zur Messdatenaufnahme, -auswertung und zur Dokumentation.

5. Ultraschall-Spannungsanalyse

Zur Bestimmung der oberflächennahen Umfangsspannungen wird die Sender-Empfängeranordnung händisch in äquidistanten Abständen über die Messspur bewegt, die Laufzeit automatisch gemessen und dem Messort zugeschrieben, der in der Mitte von Sende- und Empfangsprüfkopf liegt. Zur Charakterisierung der oberflächennahen Umfangsspannungen entlang von Spuren durch die Zentralbohrung wird die Sensoranordnung per Seilzug kontinuierlich bewegt. Die Zuggeschwindigkeit und die Messrate sind in Grenzen einstellbar; üblicherweise ergibt sich ein Messwert alle 20-25 mm. Die Abbildung 2 skizziert die Sende-Empfängeranordnung für Messungen an der Ballenoberseite und durch die Zentralbohrung.

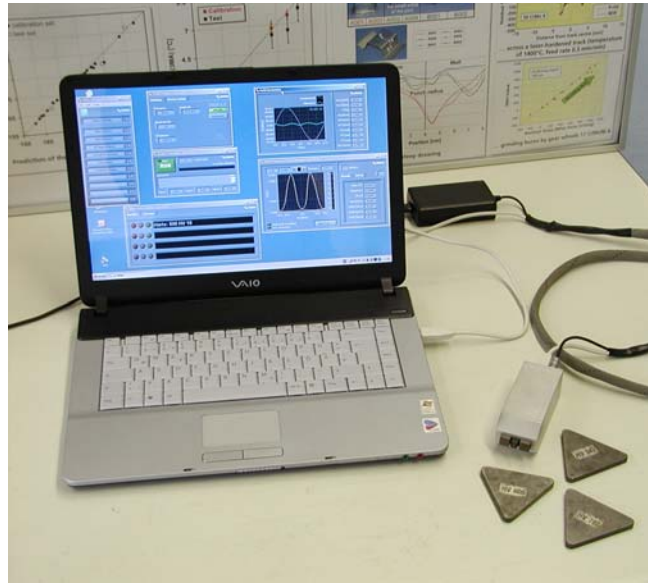


Abb. 1: IZFP-Prüfsystem-MikroMach zur zerstörungsfreien Bestimmung der Härte.

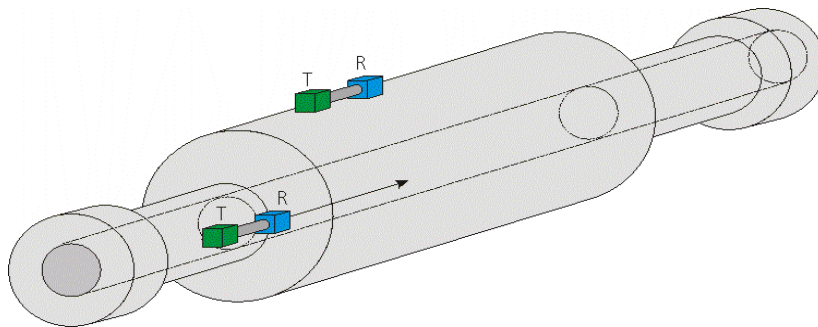


Abb. 2: Skizze der Sender-Empfänger-Anordnung für Messungen an der Ballenoberfläche und durch die Zentralbohrung.

Um die Abstrahlcharakteristik der elektromagnetischen Prüfköpfe zu verbessern, wurden zwei Erregerspulen mit definiertem Versatz unter dem Permanentmagneten der EMUS-Wandler integriert. Die Sende-Empfangelektronik des im IZFP entwickelten mehrkanaligen EMUS-Frontends wurde so auf die Prüfköpfe abgestimmt, dass auch die Messdatenaufnahme an der Ballenkante ohne Messfehler durch Interferenzen des Messsignals mit dem an der Kante reflektierten Ultraschallsignal möglich ist. Mit einer Spurwellenlänge von 5 mm und einer Mittenfrequenz von 620 kHz senden bzw. empfangen die EMUS-Prüfköpfe eine Transversalwellenmode, der sich in der Oberfläche zwischen Sender und Empfängerprüfkopf ausbreitet und in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Die Prüfköpfe sind in einer festen Anordnung mit einem zunächst auf 120 mm festgelegten Abstand fixiert. In Abbildung 3 ist eine Sensoranordnung für die Messdatenaufnahme entlang der Zentralspur wiedergegeben.

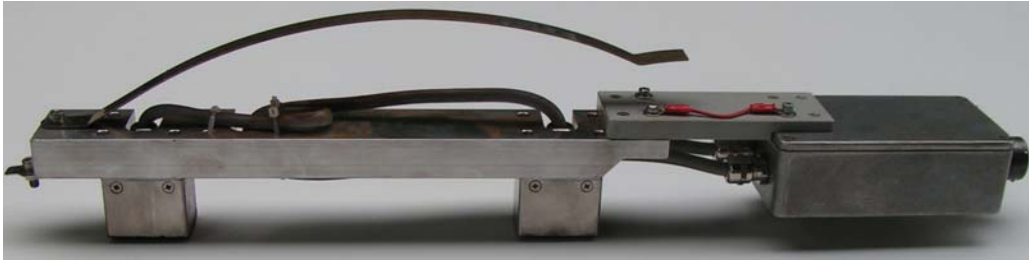


Abb. 3: Anordnung eines EMUS Sender- und Empfängerprüfkopfes für eine streifend eingeschaltete Transversalwelle zur Spannungsanalyse entlang der Zentralbohrung von Walzen.

Die Abbildung 4 zeigt das Frontendsystem mit den wesentlichen Modulen Ultraschallsende- und Empfangseinheit für EMUS-Prüfköpfe, Signalverarbeitung. Die im handelsüblichen PC abgelegten Softwaremodule führen durch die Parametrisierung des Messsystems, messen die Schalllaufzeit, ermöglichen die Darstellung der Messsignale, die Auswertung sowie die Ergebnisdarstellung und Dokumentation. Die Laufzeit der Ultraschallwelle wird unter Nutzung der Kreuzkorrelationsmethode ermittelt. Die Genauigkeit ist abhängig von der Anzahl der gemittelten Einzelmessungen; die relative Genauigkeit ist etwa 1 in 10000.

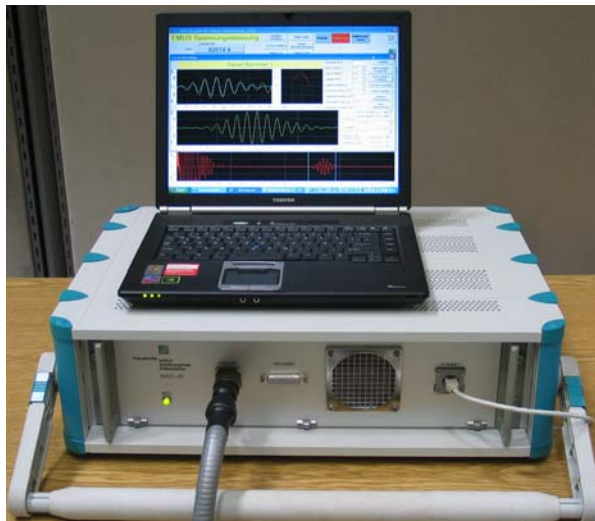


Abb. 4: Ultraschall-Frontendsystem für EMUS-Prüfköpfe und PC zur Parametrisierung des Messsystems, zur Messdatenaufnahme, -auswertung und Dokumentation.

Das Bildschirmfoto in Abbildung 5 zeigt das A-Bild (unten), das Referenzsignale (gelb) mit dem überlagerten Messsignal (blau). In der Mitte ist die Korrelationsfunktionskurve zu sehen und oben rechts das Maximum der Kreuzkorrelationskurve.

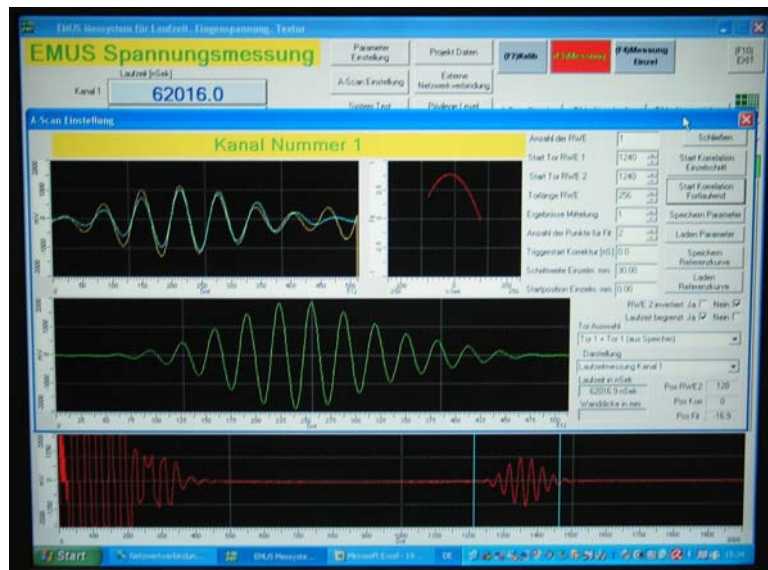


Abb. 5: Bildschirmdarstellung während der Messdatenaufnahme. A-Bild (unten), Referenzsignal und überlagertes Messsignal (oben, rechts), Kreuzkorrelationssignal (Mitte) und vergrößerte Darstellung des Maximums der Kreuzkorrelationskurve (rechts oben).

In einem EXCEL Programm wird der Einfluss des durch die Härte charakterisierten Gefügestandes auf die Laufzeiten unter Nutzung der entlang der gleichen Messspur aufgenommenen Härtewerte und einer abgelegten Härte-Laufzeit-Beziehung korrigiert. Unter Nutzung des in Abschnitt 2 angegebenen akusto-elastischen Kennwertes, des härtekorrigierten Wertes für die entsprechenden Laufzeiten und der Beziehung (2a) wird die Umfangsspannung an jedem Messpunkt berechnet und als Funktion des Abstandes vom Bezugspunkt, meist der Ballenkante, dargestellt.

Ein typisches Ergebnis der Ultraschallspannungsanalyse entlang der Ballenlänge einer Kaltwalze zeigt Abbildung 6. Die oberflächennahen Umfangsspannungen σ_T sind, wie beabsichtigt, um den Umfang gleichförmig ausgeprägt; die dargestellten Ergebnisse entlang der Spuren bei 0° und 90° sind gleich. Zur Validierung des Ultraschallverfahrens wurde der Spannungszustand mittels Bohrloch- und Röntgendiffraktionsverfahren vergleichend ermittelt. Dazu wurde unter anderem der Ballen in Schritten bis jeweils ca. 6 mm abgedreht. Die in den einzelnen Teilschritten festgestellten Bohrloch- und Röntgen-Ergebnisse wurden gemittelt, der Mittelwert dem Ultraschall-Wert gegenübergestellt. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse einer der Messserien zur Validierung dargestellt.

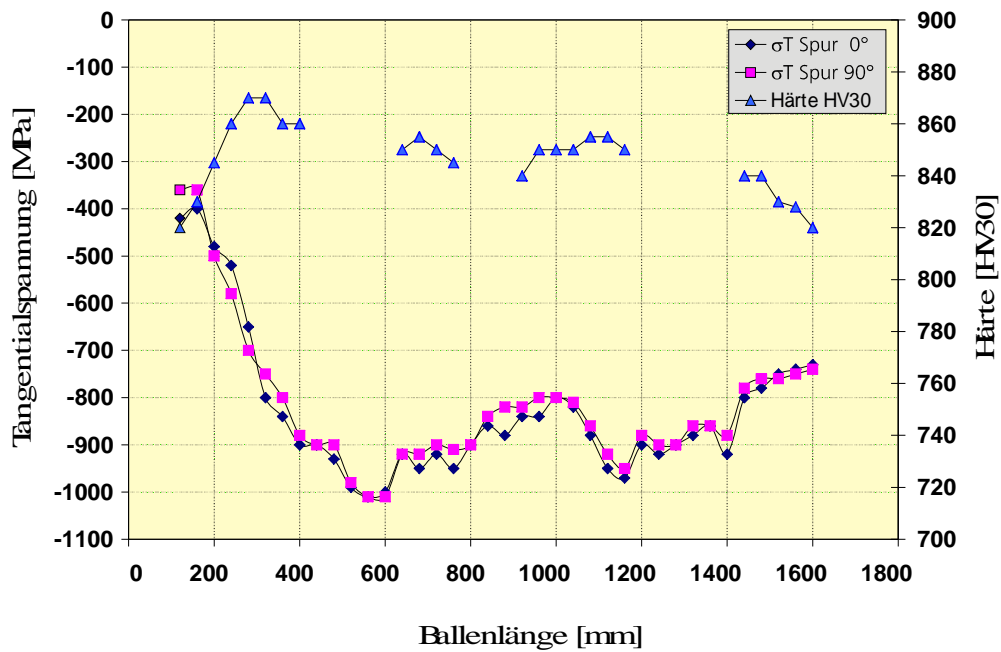


Abb. 6: Änderung der Härte (blau) und der oberflächennahen Umfangs- bzw. Tangentialspannungen σ_T entlang zweier Messspuren über die Ballenlänge einer Kaltwalze.

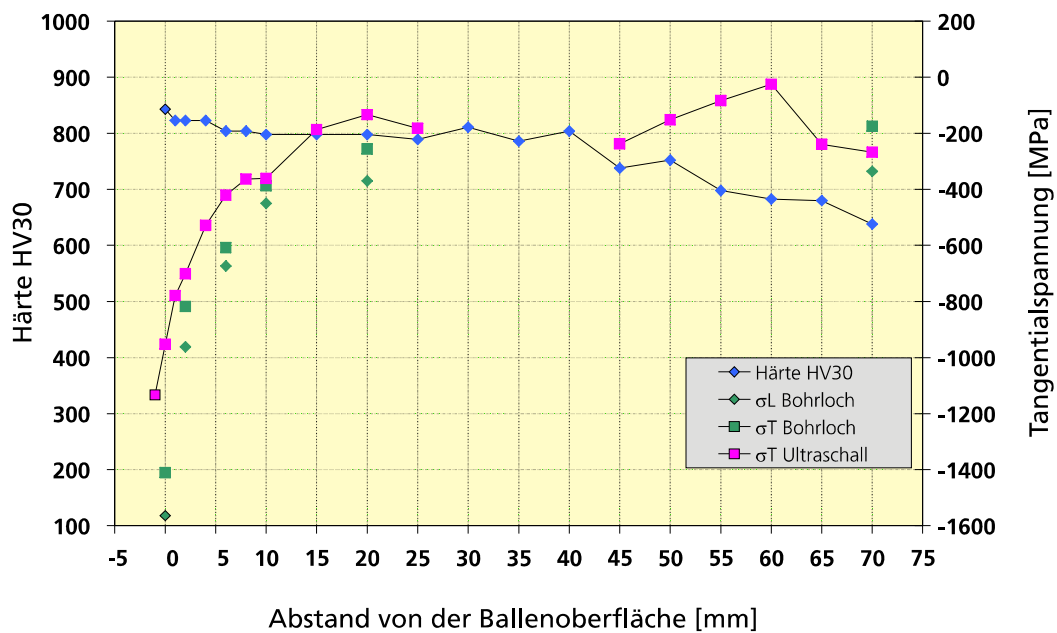


Abb. 7: Änderung der Härte (blau), der mittels Ultraschall- (rot) und Bohrlochverfahren (grün) nach schrittweisem Abdrehen des Ballens ermittelten Umfangs- bzw. Tangentialspannung (σ_T).