

Entwicklung und betriebliche Umsetzung der zerstörungsfreien Heißwandickenmessung von nahtlosen Rohren mittels Laserultraschall

Gerd-Joachim Deppe, Duisburg und Michael Paul, Stuttgart *

1. Einleitung

Nach einigen grundlegenden Vorarbeiten zum Thema Laserultraschall bearbeitete das Fraunhofer-Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) von 1993 bis 1997 ein EGKS-Projekt /1/ mit der Aufgabe, die praktische Anwendung dieses berührungsfreien Ultraschallverfahrens in der Stahlindustrie zu demonstrieren.

Gemeinsam mit dem Mannesmann-Forschungsinstitut (heute Salzgitter Mannesmann Forschung, SZMF) wurde als Pilotanwendung die Wanddickenmessung an heißen Rohren während des Walzprozesses definiert.

Als Anforderung wurde gestellt: Messgenauigkeit vergleichbar zur konventionellen Ultraschalltechnik, hohe Zuverlässigkeit und wettbewerbsfähige Kosten. Zwar war zu diesem Zeitpunkt bereits über den Einsatz von Laserultraschall für exakt diese Anwendung berichtet worden /2, 3/, doch konnten mit den dort vorgestellten Systemen die beiden letzten Punkte (Zuverlässigkeit und Kosten) nicht erfüllt werden. Insbesondere wurden dort eigens entwickelte und nur für diese Anwendungen gebaute Lasersysteme eingesetzt.

So war die Aufgabe definiert, mit kommerziell verfügbaren Komponenten ein industriell einsatzfähiges und von der Kostenseite konkurrenzfähiges Messsystem zu entwickeln. Dazu mussten die einzelnen Komponenten wie die eingesetzten Laser und das Interferometer aufeinander abgestimmt und gegen die rauen Umgebungsbedingungen im Walzwerk geschützt werden.

Der Artikel stellt das Messsystem vor, beschreibt die verwendeten Komponenten und die ersten Betriebsversuche, die vom IZFP durchgeführt wurden, um die Machbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren.

Im Anschluss (ab Kap. 5) wird dargestellt, wie das Messsystem von SZMF weiter verbessert und automatisiert wurde, so dass schließlich ein Produkt entstand, das in die industrielle Anwendung Einzug gehalten hat.

2. Zielsetzung in Rohrwalzwerken

Bei der Warmfertigung nahtloser Stahlrohre bringt eine frühzeitige Kontrolle des Walzprozesses mehrere Vorteile:

- Am heißen Rohr gemessene Wanddickenwerte können für eine Überprüfung und Optimierung der Walzwerkseinstellungen herangezogen werden.
- Durch die schnelle Erfassung von Wanddickenprofilen wird ein wesentlicher Beitrag zur Sicherung und Steigerung der Produktqualität geliefert.
- Die frühe Wanddickenmessung ermöglicht eine optimierte Ausnutzung von Toleranzbereichen und damit eine Verbesserung des Ausbringens.

Wegen der hohen Rohrwalztemperaturen in der Größenordnung von 1000 °C ist generell eine berührungslose Messung mit deutlichem Abstand zwischen Messkopf und Rohr erforderlich. Die Methode des Laserultraschalls steht hier im Wettbewerb zur Isotopendurchstrahlung. An Messorten mit vorhandenem Innenwerkzeug (einer Stange zur Aufnahme des Walzdorns) ist zwingend eine Einwandmessung erforderlich. Diese kann nur mit Laserultraschall erreicht werden; eine Zweiwandmessung, wie sie bei der Durchstrahlung vorliegt, scheidet hier aus.

3. Grundlagen

3.1 Laserultraschall

Unter Laserultraschall versteht man ein berührungsfreies Ultraschall-Mess-

verfahren, gekennzeichnet durch die Ultraschallanregung mittels eines kurzen Laserpulses in Verbindung mit dem optischen - in aller Regel interferometrischen - Nachweis der Ultraschallauslenkung.

Fällt ein Laserpuls von typischerweise einigen Nanosekunden Dauer auf eine Materialoberfläche, so wird ein Teil seiner Energie absorbiert, der Rest transmittiert oder reflektiert. Die absorbierte Energie wird zum größten Teil in Wärme umgesetzt, ein kleiner Teil wird aber in Form einer Ultraschallwelle abtransportiert.

Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Anregungsmechanismen: die thermoelastische Anregung und die Anregung durch Impulsübertrag. Die thermoelastische Ultraschallanregung kann vollständig durch die lokale Absorption, Erwärmung und thermische Ausdehnung erklärt werden. Sie bestimmt die Ultraschallquelle im Falle geringer Laserpulsenintensität. Wird die Intensität erhöht, so kommt es zum Abplatzen von anhaftenden Schichten, zur Materialverdampfung und Plasmabildung. Dieses ist der Anregungsmechanismus mit der größten praktischen Bedeutung, wobei die Beeinflussung der Oberfläche bei Stahl auf eine Schicht im Mikrometerbereich beschränkt bleibt.

Die durch Laserpulse erzeugten Ultraschallschwingungen zeichnen sich durch eine komplexe räumliche wie zeitliche Struktur aus. Bei der Anregung durch Impulsübertrag werden dominant Longitudinalpulse hoher Bandbreite erzeugt, die sich senkrecht zur Oberfläche ausbreiten und im Werkstück in bekannter Art und Weise als Puls-Echofolge reflektiert werden.

Die Oberflächenschwingungen in Normalenrichtung können nun interferometrisch - durch Ausnutzung des Doppler-Effektes - als Phasen- oder Frequenzmodulation gemessen werden.

3.2 Interferometer

Zum Nachweis der Ultraschallauslenkungen, welche typischerweise im Bereich weniger Angström bis Nano-

* Die Autoren sind Träger des Berthold-Preises der DGZfP 2004

meter liegen, eignen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Typen von Interferometern /4/. Allerdings schränken an technischen Oberflächen die mit der Laserstrahlung unweigerlich verbundenen Speckleeffekte die Auswahl erheblich ein. Bei schnell bewegten Oberflächen stehen nur noch das aus den frühen Arbeiten von Krautkrämer und dem BFI bekannte Laufzeitinterferometer /3/ sowie das Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) /5/ zur Verfügung. Das erst genannte ist für eine praktische Anwendung viel zu unhandlich, so dass für die gestellte Aufgabe ein FPI gewählt wurde.

Das FPI besteht aus einem zueinander ausgerichteten Spiegelpaar, durch das ein einfallender Lichtstrahl eine Vielfachreflexion und folglich - bei geeigneter Justierung - eine Vielfachinterferenz erfährt.

Beim konfokalen FPI, welches für den Ultraschallnachweis besonders geeignet ist, werden zwei konvexe, teildurchlässige Spiegel so angeordnet, dass die Foki beider Spiegel in einem Punkt zusammenfallen. Wird Licht einer definierten Frequenz in dieses Spiegelpaar eingekoppelt, so erfährt die transmittierte Lichtleistung eine charakteristische Abhängigkeit von der Lichtfrequenz, wie in Abb. 1 dargestellt. Der Abstand der Transmissionspitzen wird durch den Abstand der beiden Spiegel bestimmt, die relative Breite der Spitzen durch den Reflexionsfaktor der Spiegel.

Zum Nachweis von Ultraschall wird das Prüfobjekt mit einem Laserstrahl beleuchtet und das von der Oberfläche reflektierte Licht in das Spiegelpaar eingekoppelt. Wird der Abstand der Spiegel nun mittels piezoelektrischer Stellglieder feinfühlig so eingestellt, dass die Flanke einer Transmissionspitze gerade auf der Frequenz des eingekoppelten Lichtes liegt, so wird die durch die Ultraschallauslenkung aufgezwungene Dopplermodulation als Intensitätsmodulation des transmittierten Lichtes messbar.

Das FPI benötigt einen frequenzstabilen Laser, dessen Leistung in einem einzigen Mode konzentriert ist. Die Abstimmung des Arbeitspunktes des FPI auf die Laserfrequenz erfordert einen Regelkreis, welcher den Spiegelabstand einstellt und stabilisiert. Dazu wird jeweils vor und nach dem Spiegelpaar ein kleiner Bruchteil der Laserleistung auf eine Photodiode ab-

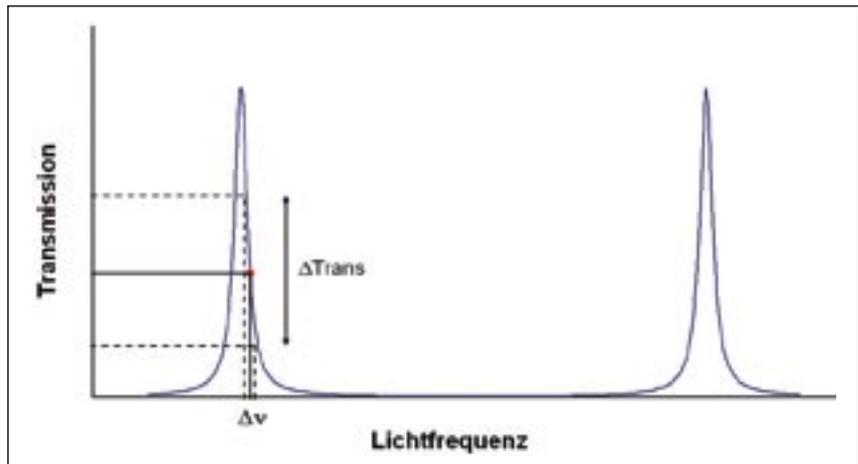


Abb.1: Transmission des Fabry-Pérot-Interferometers als Funktion der Lichtfrequenz

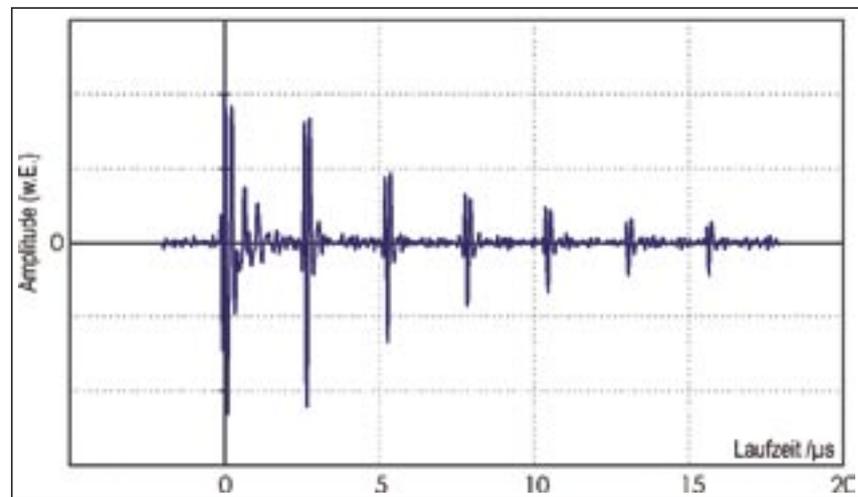


Abb 2: Typische Laserultraschall-Echofolge

gezweigt. Der Arbeitspunkt ist durch den Quotienten dieser Lichtleistungen bestimmt, welcher durch permanentes Nachführen des Spiegelabstandes mittels der oben erwähnten Stellglieder konstant gehalten wird.

Wenn das Interferometer derart betrieben wird, kann in Transmission mittels einer schnellen Signaldiode ein Ultraschallsignal mit hoher Empfindlichkeit gemessen werden.

Abb. 2 zeigt ein solches Beispiel an einer Rohrprobe.

4. Versuchsmessung im Rohrwalzwerk

Als kritischste Komponente für das Laserultraschall-Messsystem konnte sehr schnell der für das FPI geeignete Laser zum Nachweis der Oberflächenauslenkungen definiert werden.

Die Ausgangsleistung des am ehessen in Frage kommenden Lasers, ein

diodegepumpter und frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit 532 nm Wellenlänge betrug zum damaligen Zeitpunkt maximal 100 mW. Sie liegt damit etwa 4 Zehnerpotenzen unter der Leistung des in /2/ eingesetzten Systems.

Da das Signal-Rausch-Verhältnis des Interferometers mit der empfangenen Lichtleistung proportional ansteigt, wurde das System daraufhin optimiert, eine maximale Lichtleistung in das Interferometer einzukoppeln.

Der erste Schritt war, den Messkopf möglichst nahe an der Walzlinie zu positionieren. In Absprache mit dem Walzwerksbetreiber wurde ein Abstand von 18 cm festgesetzt. Weiterhin ist bekannt, dass die effektiv in das Interferometer eingekoppelte Leistung dann am größten ist, wenn der Lichtspot auf der Oberfläche minimal wird. Daher wurde der Interferometrielaser, der kaum größer als

eine Zigarettschachtel ist, im Messkopf untergebracht und direkt auf die Rohroberfläche fokussiert, ein deutlicher Vorteil gegenüber dem in /2/ beschriebenen System, bei dem die Laserstrahlung mittels einer Glasfaser zum Messkopf transportiert wurde.

Der Lichtspot auf der Rohroberfläche wurde mittels eines Objektivs auf den Kern einer 20 Meter langen Glasfaser abgebildet, welche den Messkopf mit dem Interferometer verbindet. Um letzteres vor den harten Umgebungsbedingungen im Rohrwalzwerk zu schützen, wurde es - gegen Erschütterungen entkoppelt - in einer Messkabine aufgestellt. Mit dieser Vorrichtung konnte in einem Vorversuch gezeigt werden, dass die von der Rohroberfläche empfangene Lichtleistung für den Nachweis von Ultraschallauslenkungen ausreichend hoch war.

Mit dem Vorversuch wurden auch wertvolle Erfahrungen gesammelt, wie empfindliche optische Systeme und Geräte gegen Staub, Hitze und Erschütterungen in unmittelbarer Nähe des Walzwerkes geschützt werden können.

Im Anschluss wurde der Messkopf für eine Wanddickenmessung am heißen Rohr aufgerüstet. Letztlich bedeutete dies, dass der Pulslaser zur Anregung des Ultraschalls zu integrieren war.

Dazu stand ein kompakt gebauter, luftgekühlter Laser mit >300 mJ Pulsenergie, 1064 nm Wellenlänge, 5 ns Pulsdauer und 10 Hz Wiederholrate zur Verfügung. Dieser Laser wurde in den Messkopf integriert, so dass bis auf das Interferometer alle sonstigen Komponenten unmittelbar an das Rohr herangebracht wurden. Der Messkopf war mit Wasser gekühlt und mittels Überdruck gegen eindringende Verschmutzung geschützt. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

Da aber die Messung des Ultraschalls an der gleichen Stelle stattfindet wie seine Anregung durch den Pulslaser, bei der kurzzeitig ein hell leuchtendes Plasma entsteht, mussten die Fotodioden des FPI gegen die hohe Intensität des Streulichtes abgeschirmt werden, um Sättigung und nachfolgende Totzeiten zu vermeiden. Daher wurde vor dem FPI ein leistungsfähiges optisches Filter eingebracht.

Für den Betriebsversuch /6/ wurde der Messkopf unmittelbar hinter dem Streckreduzierwalzwerk der Rohrkonstruktionsstraße von Vallourec & Mannesmann (V&M) im Werk Mülheim montiert. An dieser Stelle beträgt die Temperatur der Rohre zwischen 900 und 950 °C, ihre Geschwindigkeit bis zu 12 m/s. Die Justierung auf die jeweilige Rohrgeometrie erfolgte manuell. Der Be-

triebsversuch erstreckte sich über zwei Tage, in denen das Messsystem ohne Störungen im Einsatz war. Es wurde an Rohren mit völlig unterschiedlichen Geometrien gemessen mit Ergebnissen vergleichbar zu dem in Abb. 2.

Nachdem so die technische Machbarkeit gezeigt werden konnte, wurden bei der weiteren betrieblichen Umsetzung und Optimierung durch SZMF in einem industriellen Rohrwalzwerk entscheidend auch anwendungsspezifische Aspekte berücksichtigt. Für das IZFP wurde eine Entwicklung, die in den 80er Jahren durch Prof. Dr. Arnold initiiert und koordiniert wurde, zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht.

5. Systemkomponenten für den Einsatz im Walzwerksbetrieb

Bei der technischen Umsetzung der Systemkomponenten wurde in Hinblick auf den automatisierten Einsatz in einem Rohrwalzwerk besonders auf Robustheit, Kompaktheit und Modularität geachtet.

Die Hitzeschutzmaßnahmen wurden durch das Einbringen von Kühlkanälen in die Gehäusewände des Messkopfes verstärkt. Alle optischen Komponenten im Messkopf einschließlich der Laser wurden auf Grundplatten großer Stabilität montiert. In der Standardkonfiguration ergibt sich ein Messabstand von ca. 150 mm. Da es sich um eine optische Messung in einem rauen Betriebsumfeld handelt, wird die Messstrecke mittels Blaskvorrichtungen von Dampf oder Spritzwasser freigehalten.

Abb. 4 zeigt einen Messkopf in Messposition zwischen zwei Gerüsten eines Maßwalzwerkes in einem Werk von V&M in Aulnoye, Frankreich. In Bildmitte ist das längs durchlaufende heiße Rohr zu erkennen.

In einer sogenannten Vorort-Elektronik befinden sich im wesentlichen die notwendigen Versorgungs- und Steuereinheiten für den Impulslaser. Diese Einheiten sind in einem Gehäuseschrank mit integriertem Wärmetauscher untergebracht und können so - wie erforderlich - in räumlicher Nähe zum Messkopf aufgestellt werden.

Das Interferometer als sehr empfindliches Detektorsystem steht auf einer schwingungsdämpfenden Grundplatte in einem eigenen, mechanisch sicheren Gehäuse.

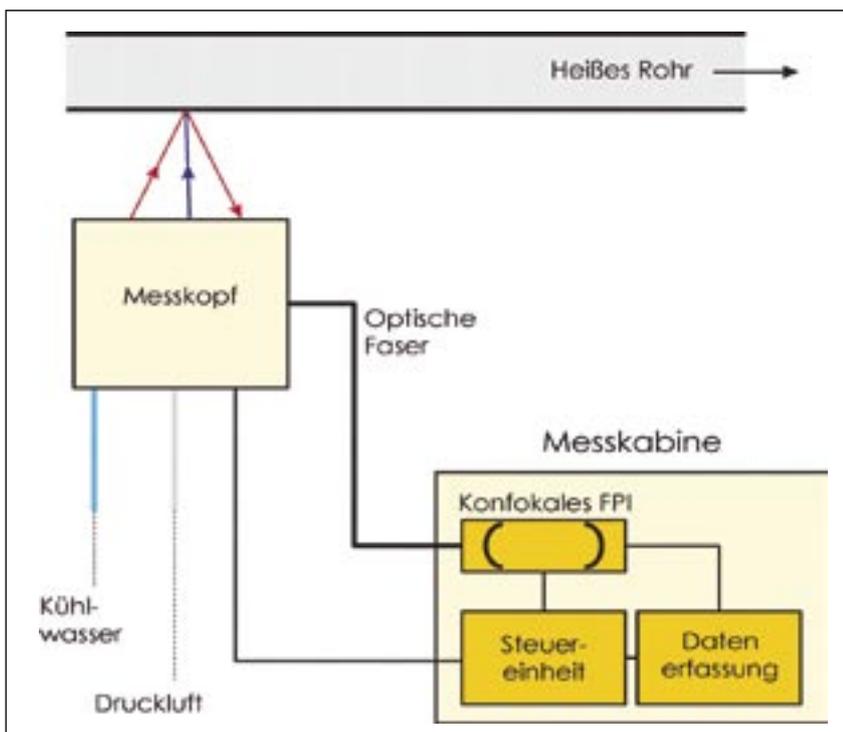


Abb.3: Messaufbau des ersten Betriebsversuchs (schematisch dargestellt)

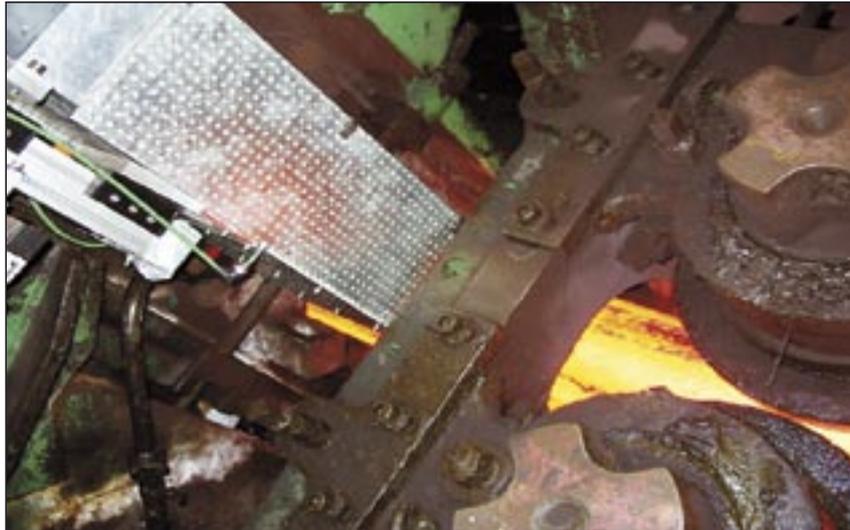


Abb. 4: Laserultraschall-Messkopf in Messposition in einem Rohrwalzwerk

Für die Ultraschallanregung wurde ein blitzlampengepumpter Nd:YAG-Impulslaser mit stabilem Laserkopf und guter Wechselmöglichkeit der Blitzlampe ausgewählt. Der letzte Punkt ist besonders interessant bei Einsatz im mehrschichtigen Dauerbetrieb und dem damit verbundenen hohen Verschleiß der Blitzlampen.

Das vom Rohr rückgestreute Nutzsignal wird innerhalb des Messkopfes auf den Eintritt eines Lichtwellenleiters abgebildet, der über Entfernungen von bis zu ca. 100 m die Verbindung zum Interferometer herstellt, welches in seinem Gehäuse in einer werksüblichen Messkabine steht. In dieser Messkabine befinden sich auch das zentrale Steuerungssystem mit der Interferometer-Stabilisierung sowie die Ultraschall-Elektronik. Letztere baut auf der bereits vielfach in Rohrwalzwerken eingesetzten, von SZMF ge-

bauten MESUS-Elektronik für konventionelle Ultraschalltechnik auf.

6. Automatisierter Messbetrieb

Bei dem Einsatz im Rohrwalzwerk wird der Messkopf relativ zum Rohr positioniert, wobei sein Abstand aus dem „inneren“ Aufbau des Messkopfes vorgegeben ist. Der Messstrahl trifft das Rohr radial. Jede Abweichung von der Nominalposition hat eine Beeinträchtigung der Messsignalgüte zur Folge, und entsprechend muss der Messkopf bei Durchmesserwechsel im Walzbetrieb verfahren werden. So wurden Messkopfhalterung und -positionierung in einer Endmontage im Walzwerk durch die Hand eines Roboters umgesetzt.

Der automatisierte Messbetrieb wird über Betriebskontakte gesteuert, z. B. durch Lichtschranken zur Synchronisation mit dem Rohrdurchlauf.

Die Wiederholrate von blitzlampengepumpten Nd:YAG-Impulslasern ist bis zu einem Wert von etwa 100 Hz wählbar. Diese Wiederholfrequenz definiert die Messrate, welche allerdings aus thermischen Gründen für ein bestehendes System jeweils festgelegt ist. Zusammen mit der Rohrgeschwindigkeit ergibt sich dann der Abstand zwischen zwei Messpunkten. Geht man von einer konstanten mittleren Leistung bei einem Lasertyp aus, führt eine höhere Wiederholrate zu einer verringerten Energie des einzelnen Laserpulses und umgekehrt. Die Pulsenergie hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wanddickenbereich, der mit der Messung abgedeckt werden kann.

Um insbesondere bei nicht konstanten Rohrgeschwindigkeiten und festem zeitlichen Messtakt eine sichere Koordinatenzuordnung der Messwerte zu gewährleisten, werden im allgemeinen Synchronisierungstakte, z. B. von einem externen Geschwindigkeits- und Längenmesssystem, mit den Wanddickenwerten verknüpft.

Über eine bidirektionale Datenkopplung mit einem übergeordneten (Werks-) Rechnersystem können Einstell- und Ergebnisdatensätze ausgetauscht werden: Rohrspezifische und der geforderten Spezifikation der Messung angepasste Datensätze werden dem Messsystem zur Einstellung übermittelt, dieses schickt seinerseits aufgenommene Messdatensätze zur Weiterverarbeitung und Speicherung zurück.

Der Laserschutz im Walzwerk ist ein sehr wichtiger Punkt, der unbedingt zu beachten ist – für den normalen Mess- wie den Wartungsbetrieb. Sowohl die Sicherheit der Beschäftigten muss gewährleistet sein als auch eine Behinderung des Produktionsablaufes vermieden werden. Dies gelingt zum einen durch bauliche Abschirmungsmaßnahmen, zum anderen durch zusätzliche Verriegelungsschaltungen.

7. Ergebnisse

In Abb. 5 wird als Ergebnisbeispiel ein typischer Wanddickenverlauf gezeigt, aufgenommen in der bereits oben genannten Rohrkontrollstraße /7/. Bei der Messung befand sich das Rohr in einem Längstransport, die Abbildung zeigt also einen Wanddickenverlauf über die Länge des Rohres an einer (zufälligen) Umfangsposition. Deut-

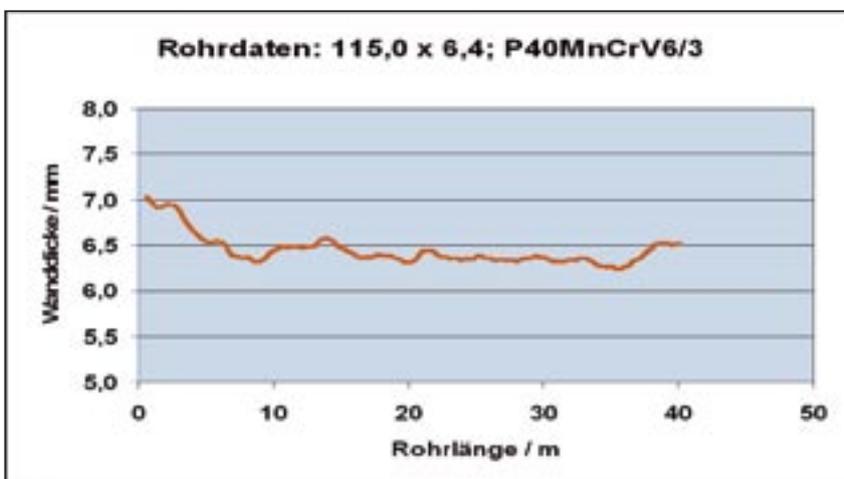


Abb. 5: Mit Laserultraschall an einem heißen Rohr gemessener Wanddickenverlauf

lich erkennbar sind z. B. für den Walzprozess charakteristische verdickte Enden.

Sind Wanddickeninformationen über Länge und Umfang gefordert, so bietet sich bei fester Messkopfposition ein Messort an, an dem das Rohr schraubenlinig bewegt wird, z. B. im Auslauf eines Walzgerüsts oder in einem entsprechend angestellten Rollgang.

8. Genauigkeit

Bezüglich der Genauigkeit bei der Ultraschall-Wanddickenmessung ergibt sich durch die prinzipielle Art der Messung sowohl für den laserangeregten wie auch für den piezoangeregten Ultraschall bei der Messunsicherheit je ein Anteil der Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit, d. h. grundsätzlich sind die Messunsicherheiten bei den beiden Verfahrensvarianten vergleichbar. Allerdings wirkt sich bei der Heißmessung noch die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit aus, womit die Kenntnis von Rohrtemperatur und zugehöriger Schallgeschwindigkeit unbedingt erforderlich wird.

Aus dem Grund ist in den Messkopf auch ein Faseroptik-Pyrometer zur Messung der Rohrtemperatur integriert. Im Auswertesystem wird bei der Bestimmung der Wanddicke die der aktuellen Rohrtemperatur entsprechende Schallgeschwindigkeit berücksichtigt.

Um ein zahlenmäßiges Beispiel für die Genauigkeit bei der Ultraschall-Wanddickenmessung zu geben: Nimmt man bei einer Heißmessung eine Messunsicherheit in der Laufzeitmessung von 10 ns und einen Fehler in der Schallgeschwindigkeit von 25 m/s an, so ergibt sich für eine Wanddicke von 20 mm eine Messunsicherheit von etwa 0.1 mm.

9. Fazit

Mit dem vorgestellten Laserultraschall-Wanddickenmesssystem steht ein effektives Werkzeug der Prozess- und Qualitätskontrolle zur Verfügung.

Da ein laserbasiertes System prinzipiell deutlich aufwändiger ist als ein „konventionelles“ Ultraschallsystem, wird es nur da wirtschaftlich genutzt, wo letzteres nicht einsetzbar ist. Eine wirtschaftliche Anwendbarkeit ergibt sich vor allem im Heißbereich, auch an anderen Produkten als Rohren.

Darüber hinaus ist ein Einsatz an komplexen, schlecht zugänglichen Bauteilen bzw. Oberflächen vorteilhaft, an denen eine Messung mit „konventionellem“ Ultraschall schwierig oder gar unmöglich ist. Prinzipiell gehen die Anwendungsmöglichkeiten über eine Wanddickenmessung hinaus; so ist auch der Einsatz zur Fehlerprüfung oder zur Bestimmung von Materialkennwerten möglich. Wegen des Aufbaus aus einzelnen Modulen, deren Auswahl und Anordnung in Grenzen modifizierbar sind, ist eine Optimierung für den jeweiligen Anwendungsfall möglich. Für eine Wanddickenmessung in einem Rohrwalzwerk als Festinstallation ist das beschriebene System erstmals bei einem chinesischen Kunden von SMS Meer (s. u.) zum Einsatz gekommen.

Mit der parallel und zum Teil unabhängig von der zerstörungsfreien Prüfung verlaufenden Entwicklung insbesondere von Laserkomponenten wird sich das Anwendungspotenzial noch vergrößern. Die Fortschritte könnten bei der Wiederholrate, Pulsenergie sowie einer weiteren Steigerung der Robustheit liegen.

Die im zweiten Teil des Artikels (ab Kap. 5) beschriebene betriebliche Umsetzung des Messverfahrens in ein walzwerktaugliches System ist das Ergebnis eines Entwicklungsprojektes dreier Partner, eines Rohrherstellers (V&M), eines Lieferanten von Nahtlosrohranlagen (SMS Meer) und eines Forschungsinstituts (SZMF), das auch Messsysteme baut.

Literatur

- /1/ M. Paul, B. Haberer, A. Hoffmann, L. Oesterlein, Abschlussbericht zu EGKS-Projekt 7210-GB/120 (1997), IZFP-Bericht 970910-E
- /2/ J.-P. Monchalain, Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 12, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (eds.), Plenum Press, New York (1993), 495
- /3/ R. Keck, B. Krüger, G. Coen und W. Häsing, Stahl u. Eisen 107, 1057 (1987)
- /4/ J.W. Wagner, in Physical Acoustics Vol. 19, R.N. Thurston, A.D. Pierce (eds.), Academic Press, San Diego (1990), S. 201 ff
- /5/ J.-P. Monchalain, Appl. Phys. Lett. 47, (1985) 14
- /6/ M. Paul, G.-J. Deppe, A. Hoffmann, L. Oesterlein, 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, May 26-29, 1998; Proceedings, 2134-2141
- /7/ G.-J. Deppe, Conference of the International Tube Association (ITA), Bilbao, October 24-26, 2001

Über die Autoren:

Gerd-Joachim Deppe, geboren in Braunschweig 1948, studierte von 1966 - 1973 Mathematik und Physik an der TU Hannover, 1973 Diplom in Physik.



1973 - 1979 Wissenschaftlicher Assistent am Physikalischen Institut der Universität Düsseldorf.

1979 Promotion zum Dr. rer. nat. mit dem Promotionsthema „Untersuchungen an einem elektrooptisch schnell durchstimmbaren Farbstofflaser“.

Seit 1980 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Mannesmann Forschungsinstitut (heute Salzgitter Mannesmann Forschung SZMF), Abteilung Automatisierung, Tätigkeitsfelder: ZfP und Messtechnik.

Verheiratet, 2 Töchter.



Michael Paul, geboren in St. Ingbert 1960, studierte 1980 - 1988 Physik an der Universität des Saarlandes, 1988 Diplom.

1988 - 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)

1998 Promotion zum Dr. Ing. mit dem Thema: „Wandstärkemessung im Rohrwalzwerk mittels Laserultraschall“.

Seit 1998 Fachgebietsleitung Akustik Behr GmbH & Co. KG

Verheiratet, 3 Kinder.