

# Untersuchung von Spannungen und Deformationen in Eisenbahnradern infolge induktiver Erwärmung bei der Montage

A. G. Andreev, A. W. Tschepkin, F. Laugwitz

Die Montage von Eisenbahnradensätzen kann durch das Aufschrumpfen der im Verlauf von wenigen Minuten induktiv erwärmten Räder auf die kalte Achse erfolgen. Durch das inhomogene Temperaturfeld in den Rädern treten zeitlich und örtlich veränderliche Spannungen und Deformationen auf, die experimentell bestimmt wurden, um diese Technologie besser zu beherrschen. Die Spannungsmessung erfolgte mit aufschweißbaren Dehnungsmessstreifen mit zugeordneter Temperaturmessung mit Thermoelementen. Die Temperaturabhängigkeit des K-Faktors und des DMS-Widerstandes wurde im Temperaturbereich bis 350°C vorher ermittelt und bei der Auswertung rechnerisch berücksichtigt. Durch die inhomogene induktive Erwärmung treten im Eisenbahnrad maximale Radialspannungen bis zu 300 MPa auf.

## 1 Einleitung

Die Montage von Eisenbahnradensätzen durch Aufschrumpfen (Andreev, 1965) weist gegenüber der Montage durch Einpressen eine Reihe von Vorteilen auf. Obwohl dieses Verfahren im Waggonbau überwiegend angewendet wird, basiert diese Technologie noch weitgehend auf empirisch ermittelten Parametern (Larson, Coughlin et al., 1978). Zur besseren Beherrschung dieser Technologie sollen im Rahmen dieser Arbeit die infolge der kurzzeitigen induktiven Erwärmung des Rades auftretenden Deformationen und Spannungen in ihrer örtlichen und zeitlichen Abhängigkeit gemessen und ausgewertet werden.

Bei der Schrumpfmontage erfolgte die Erwärmung des Eisenbahnrades im Verlaufe von 2 bis 3 min in einer induktiven Erwärmungseinrichtung nach Bild 1.

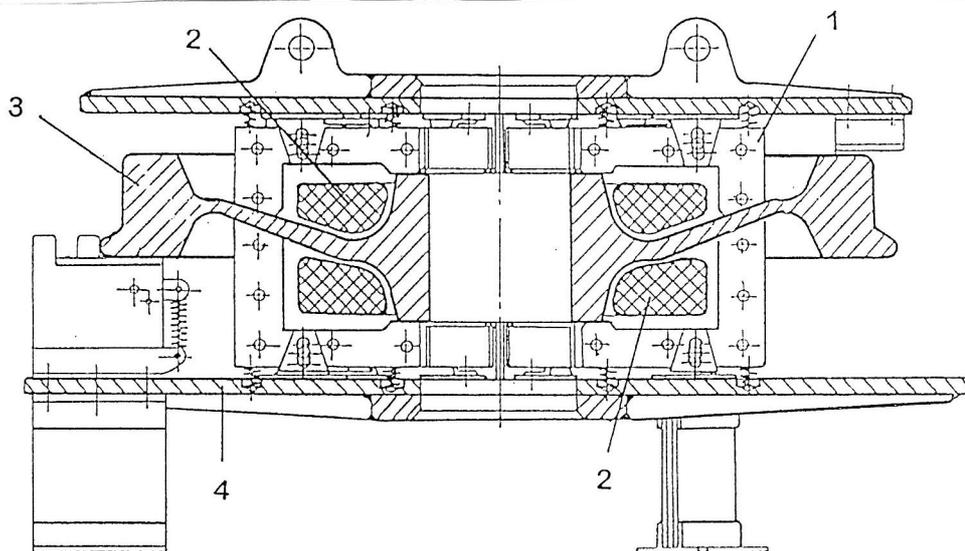


Bild 1. Vorrichtung zur induktiven Erwärmung von Eisenbahnradern

- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| 1- Weicheisenkern | 2- Induktionsspulen |
| 3- Eisenbahnrad   | 4- Basisplatte      |

Dabei entsteht ein inhomogenes Temperaturfeld im Rad mit einem Temperaturunterschied von bis zu 300°C zwischen Felge und Nabe. Die dabei auftretenden Spannungen und Deformationen sollen in einer Versuchsanordnung gemessen werden, die den realen technologischen Bedingungen bei der Schrumpfmontage weitgehend entspricht.

## 2 Eigenschaften des Radstahls

Wegen der großen Temperaturdifferenzen, denen das Rad bei der Schrumpfmontage unterworfen ist, wurden die Kennwerte des Stahls der Felge, der Scheibe und der Nabe im Temperaturbereich von 20°C bis 400°C gemessen. Beim Ausschneiden der Probekörper aus den Rädern einer Serie wurde durch sorgfältige Kühlung und geringen Spanabhub bei der Bearbeitung gewährleistet, daß die Proben keine Eigenschaftsänderung durch Verfestigung oder Erwärmung erleiden.

Die Untersuchung der Bruchgrenze  $\sigma_b$  und der Fließgrenze  $\sigma_F$  erfolgte mit einer werkstofftechnischen Zugmaschine, wobei die Probe in einem zylindrischen vertikalen Ofen untergebracht war. Die Temperatur im Ofen wurde elektronisch geregelt und mit Chrom-Alumel-Thermoelementen gemessen. Das Bild 2 zeigt die gemessene Bruchgrenze  $\sigma_b$  (durchgezogene Linie) und Fließgrenze  $\sigma_F$  (gestrichelte Linie) für Proben aus der Felge, der Radscheibe und der Nabe. Obwohl die Festigkeitseigenschaften für die drei Bereiche des Rades sehr unterschiedlich sind, ergibt sich eine ähnliche Temperaturabhängigkeit. Die Bruchgrenze  $\sigma_b$  und die Fließgrenze  $\sigma_F$  steigen bis etwa 300°C an und verringern sich danach wieder.

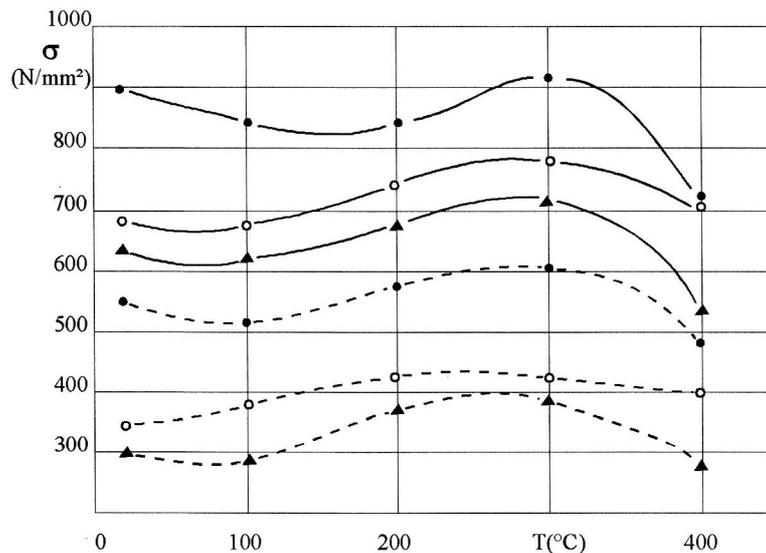


Bild 2. Bruchgrenze  $\sigma_b$  (durchgezogene Kurve) und Fließgrenze  $\sigma_F$  (gestrichelte Kurve) als Funktion der Temperatur für verschiedene Bereiche eines Eisenbahnrades  
 ● - Felge      ○ - Scheibe      ▲ - Nabe

Für den Elastizitätsmodul  $E$  wurde eine kontinuierliche Abnahme von einem einheitlichen Wert von  $E_{20} = 2,09 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$  für alle drei Radbereiche bei Zimmertemperatur auf einen Wert von  $E_{400} = 1,89 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$  für das Material der Felge und der Nabe sowie auf einen Wert von  $E_{400} = 1,83 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$  für das Material der Radscheibe bei der Temperatur von 400°C gemessen.

## 3 Temperaturabhängigkeit von Dehnungsmeßstreifen

Für die experimentellen Untersuchungen der Dehnungen wurden aufschweißbare Hochtemperaturdehnungsmeßstreifen mit einer Basislänge von 10 mm und einem Widerstand von 100  $\Omega$  benutzt. Die Wahl fiel deshalb auf aufschweißbare Dehnungsmeßstreifen (DMS), weil bei einem so voluminösen Bauteil, wie es Eisenbahnräder sind, die Einhaltung des Temperaturregimes für das Einbettungsverfahren von trägerfreien DMS schwierig ist. Da für die verwendeten DMS in dem Temperaturbereich und für diese Stahlorten keine Daten verfügbar waren, wurde die relative Widerstandsänderung der DMS in Abhängigkeit von der Temperatur, die Temperaturabhängigkeit der DMS-Empfindlichkeit ( $K$ -Faktor) und die Exemplarstreuung der DMS-Eigenschaften untersucht.

Bei der Messung von zeitlich und örtlich veränderlichen Dehnungen infolge von Temperaturänderungen treten zwei Bestandteile des DMS-Meßsignals auf:

1. Meßsignale infolge von Temperaturspannungen im Basismaterial
2. Fiktive Meßsignale, die durch die freie Wärmeausdehnung des Basismaterials und des DMS-Materials sowie durch die Änderung seiner elektrischen Kennwerte entstehen.

Bei Messungen der Dehnung bei instationären Temperaturfeldern mit DMS ist eine Differenz zwischen der Temperatur des DMS-Meßgitters und der Temperatur des Basismaterials anzunehmen. Für die relative Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur gilt dann (Hoffmann, 1987)

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = (\beta_R + \alpha_B K + \alpha_M K)(T_1 - T_0) + (\beta_R - \alpha_M K)(T_2 - T_1) \quad (1)$$

mit  $T_0$  - Anfangstemperatur des Bauteils und des Meßgitters  
 $T_1$  - Endtemperatur des Bauteils  
 $T_2$  - Endtemperatur des Meßgitters  
 $\beta_R$  - Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Meßgitterwerkstoffs  
 $\alpha_B$  - Wärmeausdehnungskoeffizient des Bauteilwerkstoffs  
 $\alpha_M$  - Wärmeausdehnungskoeffizient des Meßgitterwerkstoffs  
 $K$  - Empfindlichkeit des Dehnungsmeßstreifens

Der erste Ausdruck in Gleichung (1) ist der Temperaturgang der DMS, und der zweite Ausdruck beschreibt den Einfluß der Wärmeübergangsbedingungen auf die Meßgröße. Bei der experimentellen Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der relativen Widerstandsänderung der Dehnungsmeßstreifen müssen die realen Bedingungen während der Messungen hinsichtlich der Temperaturdifferenzen, der Erwärmungsmethode und der zeitlichen Änderung der Temperatur möglichst genau eingehalten werden.

Die in dieser Arbeit verwendete Methode der Meßwertkorrektur beruht auf der vorherigen Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der relativen Widerstandsänderung und der rechnerischen Berücksichtigung dieser Korrekturwerte bei den Messungen, um den reinen Effekt der Dehnung zu erhalten. Das erfordert eine zusätzliche Temperaturmessung an den DMS. Die Temperaturabhängigkeit der relativen Widerstandsänderung der DMS wurde auf Proben der Abmessungen 80 mm x 27 mm x 3 mm gemessen, die aus einem Rad der gleichen Serie ausgeschnitten wurden. Auf jeder Probe befanden sich 4 DMS, und die Temperatur wurde an 4 Stellen mit Thermoelementen gemessen. Die Proben wurden in einem horizontalen Röhrenofen, mit dem Erwärmungsgeschwindigkeiten von 1°C min<sup>-1</sup> bis 7°C min<sup>-1</sup> realisiert werden konnten, untergebracht. Die maximalen Temperaturunterschiede in der Probe betragen ca. 1°C für die niedrigste und ca. 4°C für die höchste Erwärmungsgeschwindigkeit.

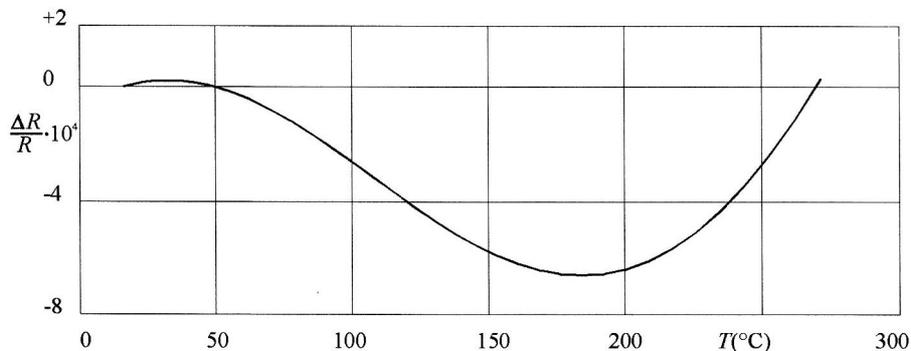


Bild 3. Temperaturabhängigkeit der relativen Widerstandsänderung für eine Serie von Hochtemperatur-DMS

Die im Bild 3 dargestellten Ergebnisse der Korrekturwerterstellung bestätigen, daß der durch die Temperaturabhängigkeit verursachte Effekt der relativen Widerstandsänderung mit  $\frac{\Delta R}{R} = -6.5 \cdot 10^{-4}$  bei 180 °C in der gleichen Größenordnung wie der Meßeffect infolge von Spannungen im Rad liegen kann. Ein Einfluß der Erwärmungsgeschwindigkeit im untersuchten Bereich von 0,06°C s<sup>-1</sup> bis 9,4°C s<sup>-1</sup> auf die im Bild 3 dargestellte Charakteristik war nicht nachweisbar. Der Hystereseeffekt zwischen Erwärmung und Abkühlung lag unter 1 · 10<sup>-4</sup>. Für unterschiedliche DMS einer Serie wurden Abweichungen in der gleichen Größe ermittelt.

Außerdem wurde die Temperaturabhängigkeit der DMS-Empfindlichkeit (K-Faktor) mit einem mit Dehnungsmeßstreifen bestückten Biegebalken, der in einem Rohröfen untergebracht war und über Zugseile belastet wurde, bestimmt. Die Durchbiegung des Balkens und der relative Widerstand der DMS wurden gemessen, und daraus wurde der K-Faktor berechnet.

#### 4 Meßplatz zur Bestimmung der Deformation, der Verschiebung und der Temperatur von Eisenbahnrädern bei der Schrumpfmontage

Das Ziel der Untersuchung war die Messung der Temperatur, der Dehnung und der Verschiebung an relativ vielen Punkten eines Eisenbahnrades während der Erwärmungs- und Abkühlzeit bei der Schrumpfmontage und -demontage von Radsätzen. Beim Konzept der Meßeinrichtung mußten neben den Erfordernissen der Vielkanalmessung mögliche Störungen durch Streufelder der Induktionserwärmung berücksichtigt werden. Der Versuchsaufbau bestand aus einem nahtlos gewalzten Eisenbahnrad von 950 mm Durchmesser, das mit insgesamt 66 Thermoelementen und 60 aufgeschweißten DMS bestückt war, der zugehörigen Achse und der Induktionserwärmungseinrichtung sowie einer Einrichtung zur Messung der Verschiebung des Rades an ausgewählten Punkten. Das Bild 4 zeigt beispielhaft die Anordnung der Thermoelemente und der DMS auf der Vorderseite des Eisenbahnrades. Die Verteilung der Meßstellen in den drei radialen Richtungen sowie auf der Vorder- und Rückseite des Rades wurde bewußt unterschiedlich gewählt, um mit möglichst wenigen Meßstellen eine umfassende Meßinformation zu erhalten. Jeweils zwei DMS wurden als rechtwinklige Rosette so angeordnet, daß sie auf der Scheibenoberfläche radial und in Umfangsrichtung angebracht wurden. Jeder Rosette wurde ein Thermolement zugeordnet.

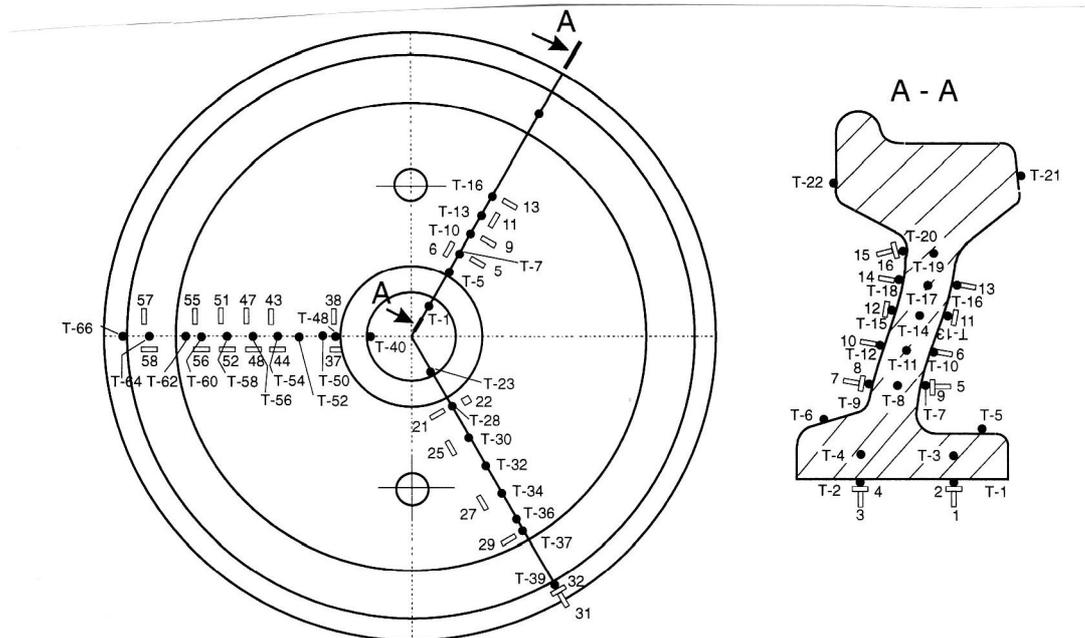


Bild 4. Anordnung der Thermoelemente und der DMS am Versuchsobjekt

Unter der Voraussetzung eines ebenen Spannungszustandes erhält man aus den Meßwerten der Dehnung  $\varepsilon_{M1}$  und  $\varepsilon_{M2}$  unter Berücksichtigung des Korrekturwertes aus der Temperaturabhängigkeit der relativen Widerstandsänderung  $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T$  die Hauptspannungen zu

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E(T)}{(1-\nu^2)} \left\{ \left[ \varepsilon_{M1} - \frac{1}{K(T)} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_T \right] + \nu \left[ \varepsilon_{M2} - \frac{1}{K(T)} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_T \right] \right\} \\ \sigma_2 &= \frac{E(T)}{(1-\nu^2)} \left\{ \left[ \varepsilon_{M2} - \frac{1}{K(T)} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_T \right] + \nu \left[ \varepsilon_{M1} - \frac{1}{K(T)} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_T \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

mit  $E(T)$  - Elastizitätsmodul (temperaturabhängig)  
 $\nu$  - Querdehnzahl  
 $K(T)$  - Temperaturabhängigkeit des  $K$ -Faktors

Im Verlaufe des technologischen Prozesses wurden die axiale Verschiebung der Nabe relativ zur Felge, die Aufweitung der Nabe und die Ausdehnung der Felge längs des Laufkranzes mit Meßuhren gemessen. Die Meßuhren besaßen Verlängerungsstäbe aus Quarz, um die Temperaturbeeinflussung zu verringern.

## 5 Meßergebnisse

Das Bild 5 zeigt einen typischen Temperaturverlauf für eine induktive Erwärmung von 2 min Dauer (von  $t = 1$  min bis  $t = 3$  min) und für die anschließende Abkühlung eines Eisenbahnrades. Durch die Nähe der Induktionsspulen zur Nabe ergibt sich eine hohe Temperatur in der Nabe, während der Radkranz zunächst auf Zimmertemperatur bleibt. Auch innerhalb der Nabe entstehen durch die induktive Erwärmung große Temperaturdifferenzen von bis zu  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , und über die Scheibendicke wurden Temperaturunterschiede von bis zu  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen. Innerhalb von ca. 2 h haben sich die Temperaturen weitgehend angeglichen.

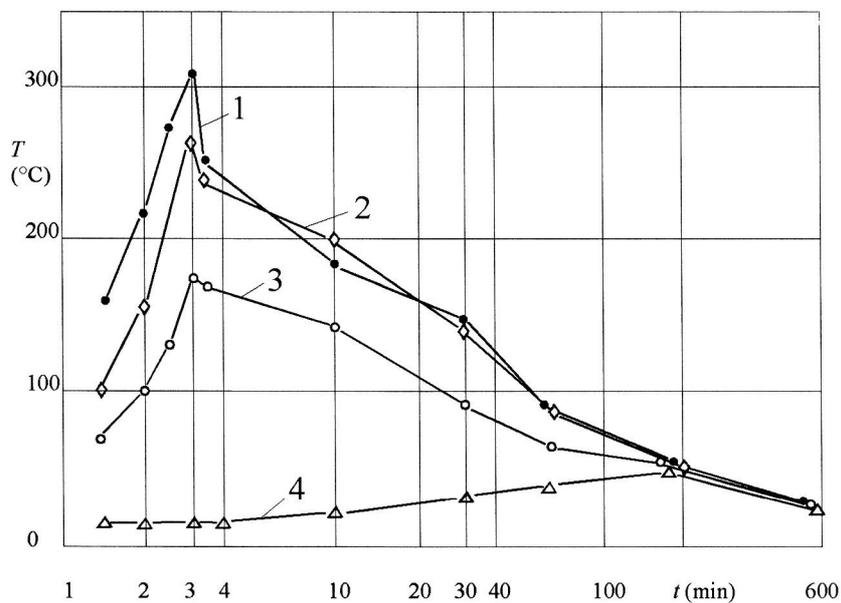


Bild 5. Temperaturverlauf bei der induktiven Erwärmung eines Eisenbahnrades

- |                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 - Außenseite der Nabe | 2 - Übergang Nabe - Scheibe |
| 3 - Mitte der Scheibe   | 4 - Mitte des Radkranzes    |

Durch die inhomogene Erwärmung des Eisenbahnrades ergeben sich auch große axiale Verschiebungen  $v_N$  der Nabe relativ zur Felge, deren Maximalwert von  $2,6\text{ mm}$  (Bild 6) unmittelbar nach dem Ende der induktiven Erwärmung auftritt. Der Wert dieser axialen Verschiebung zwischen Nabe und Felge zum Zeitpunkt der Schrumpfmontage ist für die genaue Einhaltung der Spurweite von Bedeutung.

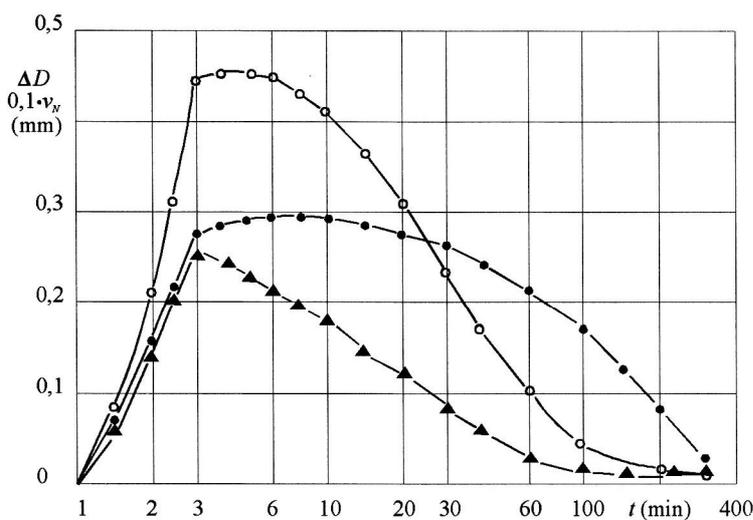


Bild 6. Durchmesseränderung der Nabe  $\Delta D_N$  und der Felge  $\Delta D_F$  und relative Verschiebung  $v_N$  zwischen Nabe und Felge als Funktion der Zeit

- |                  |                  |           |
|------------------|------------------|-----------|
| ○ - $\Delta D_N$ | ● - $\Delta D_F$ | ▲ - $v_N$ |
|------------------|------------------|-----------|

In Bild 6 ist außerdem die zeitliche Änderung des Nabendurchmessers  $\Delta D_N$  und des Felgendurchmessers  $\Delta D_F$  dargestellt. Die Aufweitung der Nabe erreicht nach 4 min den Maximalwert von  $\Delta D_N = 0,47$  mm und nimmt anschließend relativ schnell wieder ab. Der optimale Zeitpunkt für die Schrumpfmontage ist also 1...2 min nach dem Ende der induktiven Erwärmung erreicht. Die Aufweitung der Felge erreicht erst nach 10 min ihren Maximalwert von  $\Delta D_F = 0,294$  mm und nimmt anschließend relativ langsam ab.

Ein wesentliches Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Spannungen, die im Rad infolge der inhomogenen Erwärmung entstehen. Im Bild 7 ist der Verlauf der Radialspannungen über dem Radius des Eisenbahnrades für verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Die gestrichelten Linien markieren den Innenradius der Nabe ( $R = 95$  mm) und den Radius der Lauffläche ( $R = 475$  mm). Die Radialspannung ist am größten am Übergang zwischen Nabe und Scheibe ( $\sigma_R = 300$  MPa) und am Übergang zur Felge ( $\sigma_R = -305$  MPa) für die Zeit  $t = 3$  min, d.h. am Ende der induktiven Erwärmung. Die erreichten maximalen Spannungen liegen unterhalb der Fließspannung  $\sigma_F$  des Scheibenmaterials, so daß im Rad im wesentlichen elastische Verformungen auftreten.

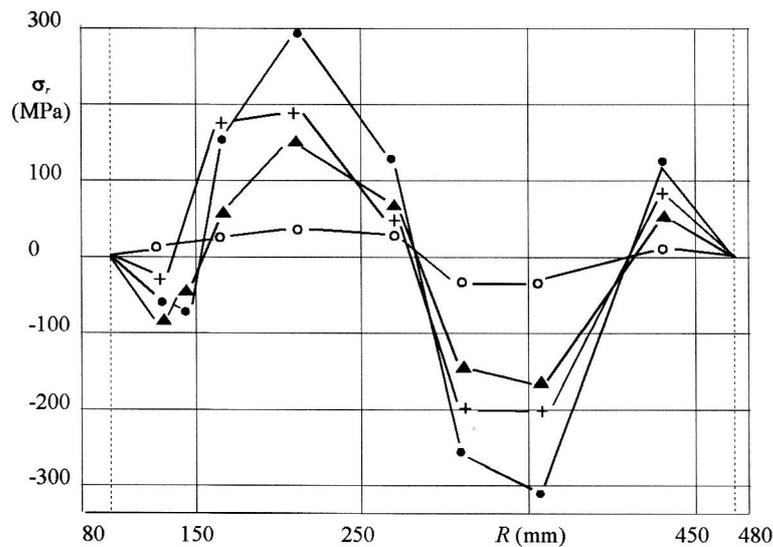


Bild 7. Örtliche Verteilung der Radialspannungen  $\sigma_r$  im Eisenbahnrad infolge induktiver Erwärmung zu verschiedenen Zeitpunkten

▲ - 2 min      ● - 3 min      + - 10 min      ○ - 60 min

Die Umfangsspannung erreicht ihren größten Wert von  $|\sigma_u| = 180$  MPa innerhalb der Nabe während im Bereich der Scheibe und der Felge keine wesentlichen Umfangsspannungen auftreten.

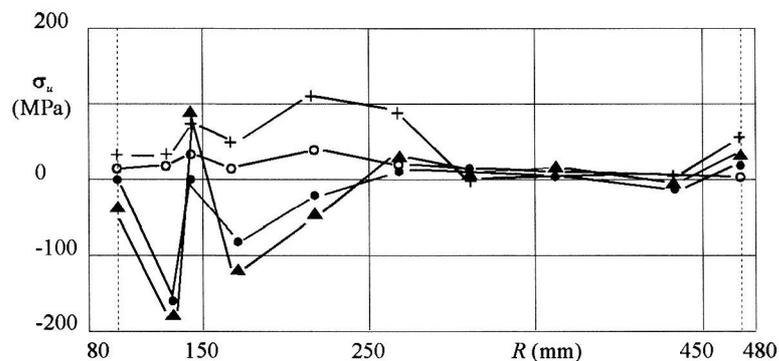


Bild 8. Örtliche Verteilung der Umfangsspannungen  $\sigma_u$  im Eisenbahnrad infolge induktiver Erwärmung zu verschiedenen Zeitpunkten

▲ - 2 min      ● - 3 min      + - 10 min      ○ - 60 min

Die nach der Schrumpfmontage und dem Erkalten der Rad-Achsen-Verbindung erhaltenen Spannungen lagen wesentlich unter den thermisch bedingten Spannungen, die im Bild 7 und 8 dargestellt sind. Daher wurde auf die Wiedergabe dieser Meßergebnisse verzichtet.

## 6 Zusammenfassung

Bei der induktiven Erwärmung von Bauteilen für die Schrumpfmontage treten zeitlich und örtlich stark veränderliche Deformationen und Spannungen auf. Zur Messung dieser Spannungen wurden aufschweißbare Dehnungsmeßstreifen in Verbindung mit einer vorherigen Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der DMS-Parameter und der Temperaturmessung direkt am Ort der zugeordneten DMS verwendet. Die dargestellte Methode erwies sich gut geeignet und hinreichend genau. Das Meßprinzip läßt sich auch auf die Untersuchung anderer Schrumpfverbindungen im Maschinenbau, wie Zahnräder oder Muffen, bei denen eine Erwärmung bis etwa 300 °C erfolgt, anwenden.

## Literatur

1. Andreev, G. J.: Thermische Montage von Radsätzen (russ.), Verlag ChGU, Charkov 1965
2. Larson, H.R.; Coughlin, J. M.; Haley, M. R.; Rusin, T. M.: Experimental verification of computer predicted temperatures and elastic predicted thermal strains in railroad wheels. 6. International wheel sets congress (1978), USA
3. Sakamoto, H.; Ishihara, K.; Yamamura, Y.; Nakata, M.: Design concept for solid rolled corrugation wheels. Sumitomo metals, Vol. 41 (1989), Nr. 1, S. 45-52
4. Rusin, T.M.; Kleeschulte, D. G.; Coughlin, J. M.: Application of the Finite Element Methode in the development of improved railroad car wheel designs. Transaction of the ASME, Jour. Eng. Ind. Vol. 101 (1979) Nr. 3, S. 378-384
5. Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, 1987, Darmstadt

---

*Anschriften:* Doz. Dr.-Ing. A. G. Andreev u. Dipl.-Ing. A. W. Tschepkin, Lehrstuhl für Dyn.und Festigkeit von Maschinen, Polytechn. Universität, Frunse-Straße 21, 310002 Charkov (Ukraine); Dr.rer.nat.habil. F. Laugwitz, Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität, Postfach 4120, 39016 Magdeburg