Qualitätsverbesserung durch CFC-Werkstückträger in der Vakuum-Wärmebehandlung

von **Rolf Terjung**

Werkstückträger aus CFC (carbon-fibre reinforced carbon) gehören heute in der Vakuum-Wärmebehandlung zum Stand der Technik. Ein besonderes Qualitätsmerkmal dieses Prozesses ist die hohe Form- und Maßhaltigkeit der Bauteile nach der Wärmebehandlung. Der Beitrag stellt den konkreten Einfluss von CFC-Träger-Ausführungen auf den Verzug von Bauteilen nach dem Einsatzhärten durch Niederdruckaufkohlung (NDA) mit Hochdruckgasabschreckung (HDGA) in den Mittelpunkt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen auf, wie eine bauteilangepasste Positionierung auf dem Werkstückträger in Kombination mit den CFC-Materialeigenschaften zu reproduzierbaren, kontrollierten Verzügen der wärmebehandelten Bauteile führt.

CFC-Fixtures – quality fixturing for vacuum heat treating

Furnace fixturing made of CFC (carbon-fibre reinforced carbon) are the state-of-the-art standard in vacuum heat treating these days. A significant quality feature of the vacuum heat treating process is the shape and dimensional stability of heat treated components. This article focuses on the impact of CFC-fixtures and how they help to reduce the distortion of case hardened parts in Low Pressure Carburizing (LPC) applications with High Pressure Gas Quenching (HPGQ). These results provide evidence that distortion of heat treated components can be minimized and controlled by the use of individually designed fixtures made of CFC material.

Die Vakuum-Wärmebehandlungstechnologie Niederdruckaufkohlung (NDA) mit nachfolgender Hochdruckgasabschreckung (HDGA) für das Einsatzhärten von Bauteilen hat in verschiedenen Untersuchungen [1] gezeigt, dass die Form- und Maßänderungen der wärmebehandelten Komponenten heute soweit kontrollierbar sind, dass die nachgeschalteten Hartbearbeitungsschritte reduziert werden oder gar entfallen können. Dies ist ein wesentlicher Beitrag, um die Durchlaufzeiten und Bauteil-Herstellungskosten zu senken. Die Vorzüge des Verfahrens [2] können insbesondere bei Getriebekomponenten mit komplexer Bearbeitung und großen Oberflächen vorteilhaft genutzt werden. Für ein neu entwickeltes 6-Gang-Automatikgetriebe wurde das Einsatzhärten nach der NDA- und HDGA-Technologie aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen (Form- und Maßtoleranzen, Härteparameter) für ein zu bearbeitendes Hohlrad mit Innenverzahnung ausgewählt. Die Behandlung erfolgte in einer ModulTherm-Anlage[1].

METALL- VERSUS CFC-GESTELL

Aufgrund der Bauteilgeometrie und des geringen Querschnitts ist für das Hohlrad mit Form- und Maßänderungen zu rechnen. In einem Optimierungsprozess haben der Ofenhersteller und der Kunde die Wärmebehandlungsparameter definiert, um die Verzüge infolge der Wärmebehandlung zu minimieren [1]. Verzüge durch freiwerden-

1 ModulTherm ist ein Markenname der ALD Vacuum Technologies GmbH

Bild 1: Voll beladenes CFC-Chargiergestell mit Hohlrädern, 10-lagig (3-dimensional), 120 Teile [1]

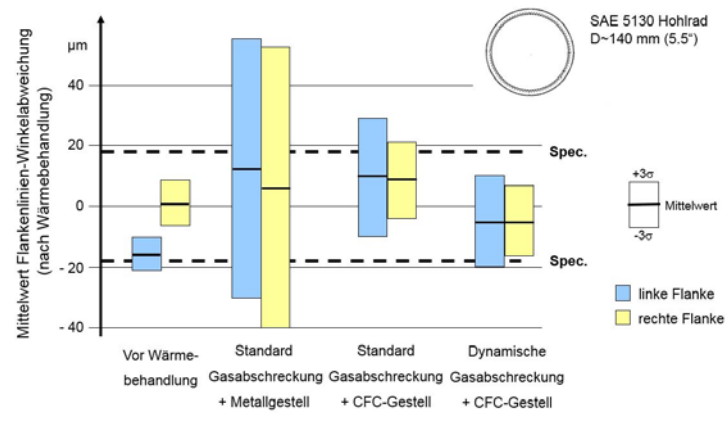

Bild 2: Mittlere Flankenlinienwinkelabweichung von Hohlrädern nach der Wärmebehandlung [1]

de Eigenspannungen infolge der Herstellungskette, vom Metall über den Rohling bis hin zur Weichbearbeitung des Hohlrades, können durch die Wärmebehandlung nicht beeinflusst werden. Volle Ofenladungen aus mehrlagig (3-d-Chargierung) aufgebauten Chargen (**Bild 1**) wurden durch Konvektion (N_2) und Vakuum auf die Behandlungstemperatur erwärmt.

Bei etwa 900 °C wurde in Vakuum mit Acetylen aufgekohlt, um eine Eindringtiefe von 0,3–0,5 mm zu erreichen. Im Anschluss wurden die Werkstücke auf Austenitisierungstemperatur abgesenkt und mit Helium abgeschreckt [1]. Ausgedehnte Vorversuche hatten gezeigt, dass die Verzugsergebnisse für Helium anstelle von Stickstoff besser waren, obwohl die Stahlsorte AISI 5130 durch den relativ hohen Kohlenstoffgehalt und das Bauteil durch den geringen Querschnitt für Stickstoff geeignet wäre. Der schematische Prozessablauf ist in [2] beschrieben. Als Chargiermittel wurden hoch legierte Metall- und CFC-Gestelle eingesetzt. Das Verzugskriterium ist die mittlere Flankenlinienwinkelabweichung und der Rundlauffehler. Die Verzugsuntersuchungen wurden an 15 Teilen durchgeführt, die an verschiedenen Stellen einer Chargierebene positioniert waren und aus unterschiedlichen Lagen entnommen wurden. Die Ergebnisse der Form- und Maßänderungen sind in **Bild 2** dargestellt. Das Bild veranschaulicht die Mittelwerte und Streuungen der mittleren Flankenlinienwinkelabweichung für die linke und rechte Flanke der Innenverzahnung nach der Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Parametern in Bezug auf die unbehandelten Werte. Nach der Chargierung auf einem Metallgestell mit Standardgasabschreckung steigt der Mittelwert an, die Streuung dagegen nimmt signifikant zu und übersteigt die Unter- und Obergrenze der Spezifikation.

Beim Wechsel auf das CFC-Gestell sinkt die Streuung deutlich um 50 %. Optimiert man zusätzlich den Abschreckprozess mittels Gasdruck und/oder Gasgeschwindigkeit (dynamische Abschreckung) unter Beibehaltung des CFC-Gestells, können die Mittelwerte gesenkt und die Streuungen soweit eingeengt werden, dass sie innerhalb der Spezifikation liegen [1]. Die Untersuchungen haben darüber hinaus gezeigt, dass das Verzugsverhalten der Teile unabhängig von ihrer Position auf der Gestell-Ebene und -Lage war. Der Wärmebehandlungsprozess hat im Juni 2006 die Serienreife erlangt. Seit Herbst 2008 werden nur noch stichprobenartig die Verzugswerte überprüft. Fortlaufende Optimierungen des Abschreckprozesses und der CFC-Gestelle haben dazu geführt, dass diese Hohlräder heute ohne Hartbearbeitung direkt in das Getriebe verbaut werden.

EINFLUSS DER CFC-MATERIALEIGENSCHAFTEN AUF FORM- UND MASSÄNDERUNGEN

Bemerkenswert ist die Verringerung der Streuung für beide Verzugskriterien bei der Umstellung von Metall auf CFC. Aufgrund der höheren Festigkeit und geringeren Dichte beträgt das Gewicht der CFC-Träger nur etwa 10 % des vergleichbaren Metall-Systems bei gleicher Tragfähigkeit.

Für den Abschreckprozess bedeutet die geringere Gestellmasse eine schnellere und gleichmäßigere Abkühlung. Das schlanke Design reduziert die Kontaktflächen und Auflagepunkte des Bauteils und minimiert die Verschattungen gegen Aufkohlung. Gleichzeitig erhöht sich die Durchströmbarkeit für das Kühlgas durch den verringerten Oberflächenwiderstand (C_W-Wert). An Knotenpunkten und anderen Materialverdickungen wird keine signifikante Restwärme gespeichert, die an die Werkstücke zurückgegeben werden kann. Durch die reduzierte „nicht-wertschöpfende

Masse“ des Chargiermittels minimieren sich schon während der konvektiven Aufheizphase die Verzüge (wärmeinduzierte Spannungen) [1]. Die Erwärmung der Bauteile erfolgt gleichmäßiger und schneller. Ein CFC-Werkstückträger konsumiert nur etwa 20 % der Energie im Vergleich zu einem gleichwertigen Metallgestell (**Bild 3**).

Berücksichtigt man den Ausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien bei 1.000 °C (CFC: $1*10^{-6}$/K, Metall: $12*10^{-6}$/K) so sind CFC-Gestelle formstabil. Verformungen des Werkstückträgers, die unmittelbar an die Bauteile übertragen werden, können vernachlässigt werden. Eine ausführliche Darstellung der CFC-Werkstoffeigenschaften und wie sie für CFC-Warenträger nutzbar gemacht werden, ist in [4] beschrieben. CFC zeichnet sich für die Vakuum-Wärmebehandlung u. a. durch folgende Materialeigenschaften aus:

- Niedrige Dichte von 1,3 bis ca. 1,7 g/cm³
- Höhere Biegefestigkeit mit ansteigender Temperatur (1.000 °C + 15 %; 2.000 °C + 30 %)
- Sehr hohe Thermoschockbeständigkeit: $R_1 \approx 1.000$ °C
- Keine Änderungen der Maßhaltigkeit (CTE für CFC-Träger ca. $1*10^{-6}$/K).

WERKSTÜCKTRÄGER-DESIGN REDUZIERT BAUTEILVERZÜGE

Beispiel 1: Eingangswelle

Die stetige Forderung nach hoch präzisen Bauteilen mit minimalen Verzügen und reduzierten Herstellungskosten hat in den letzten Jahren zu einer Weiterentwicklung der Anlagentechnik des Niederdruckaufkohlens mit Hochdruckgasabschreckung geführt. Durch die direkte Integration der Wärmebehandlung in die Produktionslinie der Weich- und Hartbearbeitung werden die Durchlaufzeiten der Teile verkürzt und damit der Fertigungsprozess effektiver und wirtschaftlicher. Ziel der Integration ist der sogenannte „one-piece-flow“ [5].

Die Werkstücke werden nur noch einlagig (2-dimensional) chargiert und mit dem vor- und nachgeschalteten Prozess getaktet (synchronisiert) [3]. Im Vergleich zu mehrlagig (3-d) aufgebauten Losen werden die Bauteile schneller und gleichmäßiger aufgeheizt und abgeschreckt. Die Werkstückträgermasse ist deutlich reduziert, sodass die Wärmeenergie unmittelbar auf die Bauteile übergehen kann. Während der Abkühlung strömt das Kühlgas derart am Bauteil vorbei, dass die Wärme unmittelbar und gleichmäßg entzogen wird. Dadurch wird eine bauteilangepasste Wärmebehandlung ermöglicht, die einerseits zu einer Verkürzung der Prozesszeit und andererseits zu einer Steigerung der Qualität in Form von reduzierten Form- und Maßänderungen führt [5].

Um die Vorteile der Technologie bestmöglich zu nutzen, kam ein CFC-Träger zum Einsatz, der mit 30 Wellen voll beladen wurde.

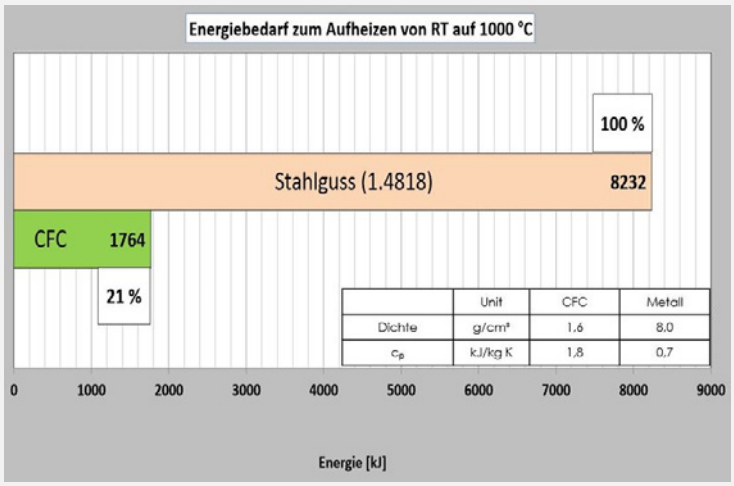

Bild 3: Energiebedarf CFC und Metall zum Aufheizen von Raumtemperatur (RT) bis 1.000 °C

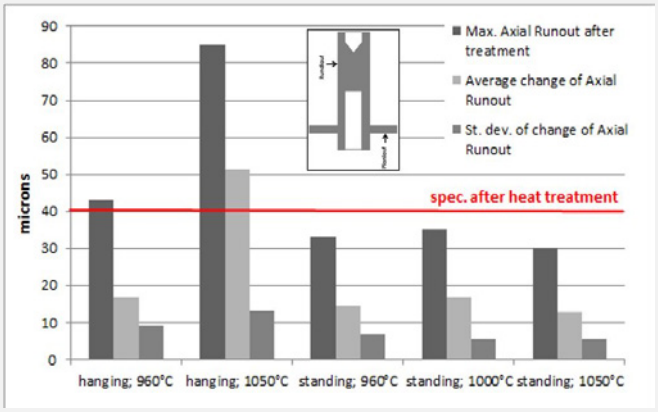

Bild 4: Planlauf der Eingangswellen nach der Einsatzhärtung für verschiedene Testbedingungen [6]

Die Verzugskriterien waren Planlauf und Rundlauf für die Aufkohlungstemperaturen 960 °C, 1.000 °C und 1.050 °C. Zur Ermittlung der geringsten Verzüge wurden zwei Positionen erprobt: hängende und stehende Chargierung.Die Verzugsergebnisse für den Planlauf, als der kritischen Maßabweichung für den Einsatz der Wellen, sind in **Bild 4** zusammengetragen. Aufgetragen sind die Maximalwerte, die durchschnittliche Abweichung und die Standardabweichung. Bei „stehender“ Positionierung werden die besten Ergebnisse erzielt und für alle drei Behandlungstemperaturen die Spezifikation von 40 µm erfüllt. Auch in diesem Beispiel wird deutlich, wie der CFC-Werkstückträger durch die geringe Gestellmasse und gute Durchströmbarkeit die niedrigen Werte der Standardabweichung unterstützt [6] und damit zur Prozesssicherheit erheblich beiträgt.

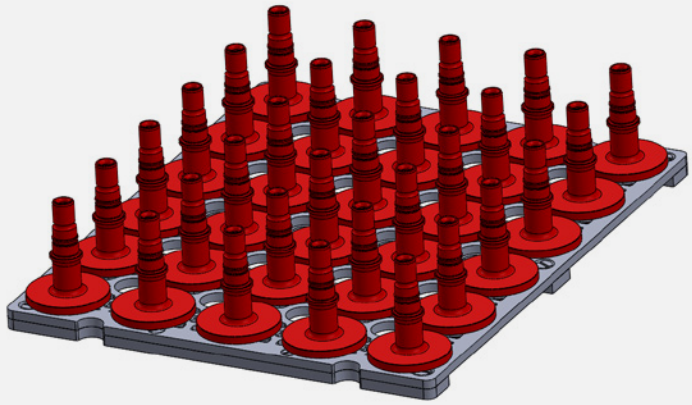

Bild 5: Optimiertes Trägerdesign für Eingangswellen

Die in diesem Bericht zitierten Untersuchungen zur Reduzierung der Form- und Maßänderungen haben gemeinsam, dass sowohl die zügige und gleichmäßige Wärmezufuhr als auch die gezielte Kühlgasanströmung der Komponenten wesentlich sind für das Ziel minimaler Bauteilverzüge. Neben der konstruktiven Ausführung der Abschreckkammer kommt damit der Bauteilaufnahme auf dem CFC-Träger eine zentrale Bedeutung zu. Nachdem die „stehende" Chargierung für diese Eingangswelle als optimal ermittelt wurde, erfolgte eine konstruktive Anpassung des Werkstückträgers nach folgenden Designkriterien:

- Bauteilquerschnitt (Massigkeit)
- Verzugskriterien
- Kontaktflächen Bauteil – Warenträger (Verschattung)
- Durchströmbarkeit (Wärmeabfuhr)
- Beladungsdichte (Wirtschaftlichkeit)
- Tragfähigkeit (Belastung)
- Positioniergenauigkeit
- Beladung (automatisch, händisch)
- Prozesstemperatur (Kontaktreaktion)

Das Ergebnis ist in **Bild 5** dargestellt. Die Beladung der Bauteile als auch die Chargierung in die Behandlungskammer erfolgt in der Serienproduktion automatisiert über einen Roboter.

Beispiel 2: Dünnwandiger Ring

Ein dünnwandiger Ring wurde einlagig auf einem CFC-Träger im Vakuum einsatzgehärtet.

Das Verzugsmerkmal Rundheit war für eine Serienproduktion noch unzureichend erfüllt. Die Bauteilpositionierung wurde durch eine ringoptimierte Aufnahme unter Beachtung definierter Kriterien neu gestaltet (**Bild 6**). 700 Ringe aus vier unterschiedlichen Chargen wurden nach der Wärmebehandlung, auf dem optimierten Träger, vermasst und ausgewertet.

Die Ergebnisse der Rundheitsabweichungen sind in **Bild 7** zusammengefasst.

Durch das bauteilangepasste Trägerdesign konnten die Maximalwerte der Rundheitsabweichung um 25 % auf 0,3 mm und die mittlere Abweichung um 50 % auf 0,12 mm abgesenkt werden. Die an den 700 Teilen ausgewerteten Abweichungen lagen innerhalb der Unter- (UG) und Obergrenze (OG). Kein Ring musste als Ausschuss deklariert werden. Das neue Trägerdesign erhielt die Serienfreigabe und wurde als neuer Standard umgesetzt.

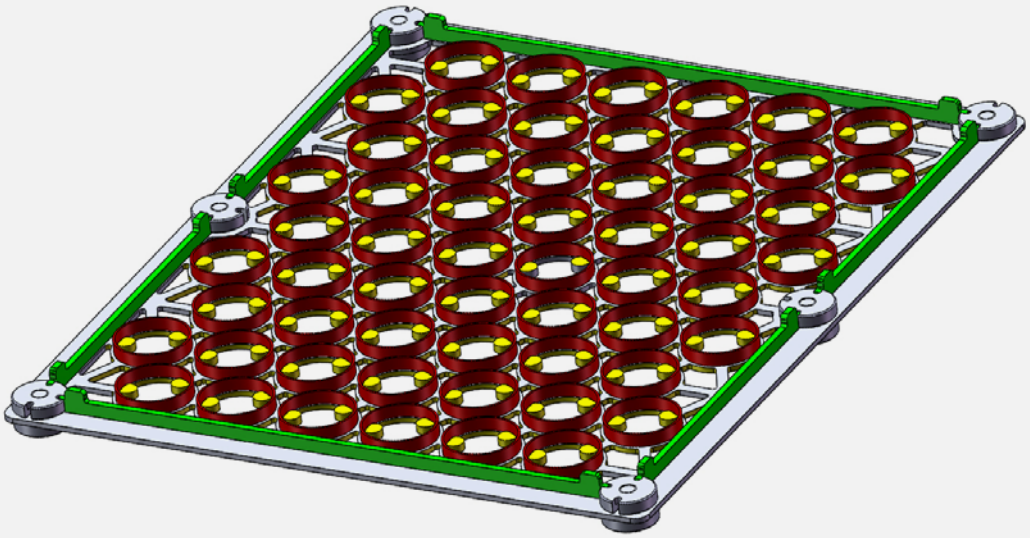

Bild 6: Bauteiloptimiertes CFC-Werkstückträgerdesign „Ring"

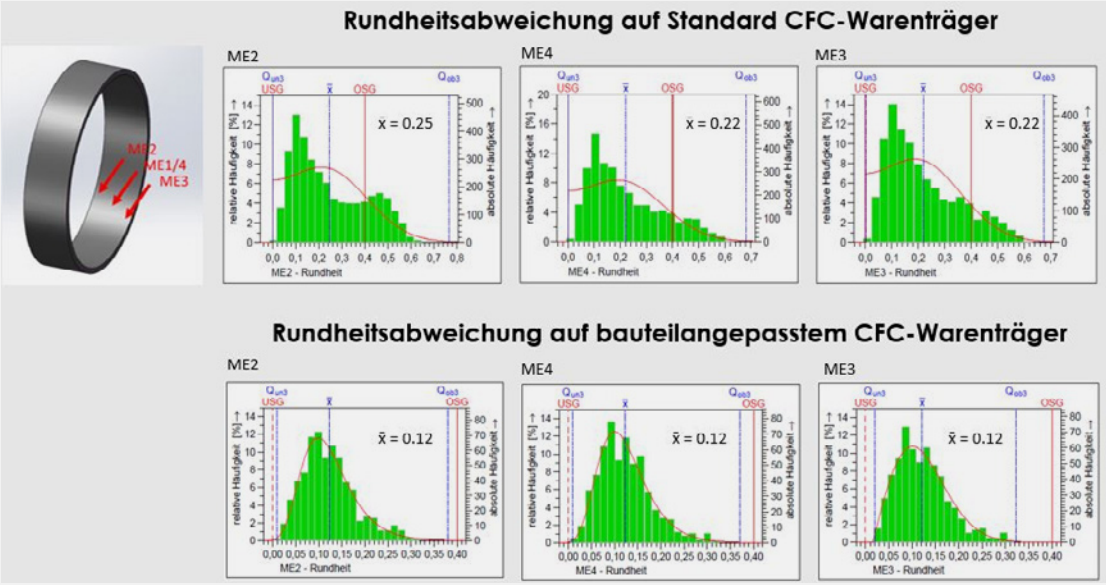

Bild 7: Rundheitsabweichungen von Ringen (dia) auf Standard- und ringoptimierten CFC-Trägern

FAZIT

Die Beherrschung von Wärmebehandlungsverzügen ist von zentraler Bedeutung für komplexe Komponenten wie Getriebebauteile, um die Herstellungskosten zu senken.

Wärmebehandlungsverzüge von Getriebebauteilen mit hohem Bearbeitungsgrad und dünnwandigen Querschnitten können durch das Niederdruckaufkohlen mit Hochdruckgasabschreckung kontrolliert werden. Durch den Einsatz von CFC-Werkstückträgern in Verbindung mit Verfahrensvarianten (z. B. dynamisches Abschrecken) können Form- und Maßänderungen soweit reduziert werden, dass die Hartbearbeitung in Einzelfällen ganz entfallen kann. Die Standardabweichung der mittleren Verzugswerte, als Indikator für beherrschbare, reproduzierbare Formabweichungen, wird durch CFC-Träger signifikant unterstützt. Die Weiterentwicklung des Verfahrens von der 3-d- zur 2-d-Chargierung zeigt auf, wie Verfahrensinnovationen und bauteilangepasste CFC-Werkstückträger zu einer weiteren Reduzierung der Verzüge führen. Die Prozesssicherheit wird erhöht und die Herstellungskosten werden gesenkt. Durch die aktuelle Entwicklung zu mikrolegierten Einsatzstählen kann die Aufkohlungstemperatur ohne signifikantes Kornwachstum bis zu 1.050 °C angehoben werden. Diese Entwicklung ist nur auf CFC-Trägern möglich, die eine gleichmäßige Werkstückerwärmung und Abkühlung gewährleisten.

LITERATUR

[1] Loeser, K. et al.: Distortion control by innovative heat treating technologies. Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung. 61 (2006), Nr. 6

[2] Loeser, K.; Ritter, K.: Operating experience with modular vacuum heat treatment plants in the automotive industry. heat processing 2 (2007)

[3] Heuer, V.; Loeser, K.; Leist, T.; Bolton, D.: Enhancing control of distortion through "one-piece-flow heat treatment". Gearsolution, 2013

[4] Kern, A.; Terjung, R.; Lassel, E.; Rutkowski, T.: Chargierroste aus Kohlefaser – Wettbewerbsvorteil im Fokus der Energiewende. [Buchverf.] Alexander Schreiner, Olaf Irretier (Hrsg.). Praxishandbuch Härtereitechnik. Essen: Vulkan-Verlag, 2013

[5] Löser, K.: Fertigungsintegrierte Vakuum-Wärmebehandlungssysteme in der Automobilindustrie. ewi – elektrowärme international 1 (2016)

[6] Heuer, V.; Leist, T.; Schmitt, G.: Distortion control through synchronized vacuum heat treatment. HTM, Journal of Heat Teatment and Materials. 2016, Bd. 71, 2

AUTOR

Dr. **Rolf Terjung**
Graphite Materials GmbH
Oberasbach
Tel.: 0911 / 9990103-51
rolf.terjung@graphite-materials.com