



## Arbeitsblatt

### Randschichthärtung mittels Hochgeschwindigkeits-Abschreckung

AiF-Nr.:  
17384N

Obmann:  
Axel Majorek

beteiligte Unternehmen  
ALD Vacuum-Technologies; Burgdorf GmbH Co. KG; Daimler AG; H+W Arnstadt GmbH; Härtereier Witten GmbH; Heess GmbH Co. KG; Ingenieurbüro für Wärmebehandlung, Industrieofenanlagenbau und Energieberatung; Ipsen International GmbH; Materials & Mechanics Corporate Research Technology, Hilti Corporation; Petrofer Chemie; Robert Bosch GmbH

Laufzeit:  
01.01.2012 – 30.06.2014

Erstelldatum:  
30.01.2015

Forschungsstelle:  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:  
Thomas Lübben

Sachbearbeiter:  
Friedhelm Frerichs, Sören Sander, Sven Schüttenberg

Forschungsvereinigung:  
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 11 (Abschrecken)

#### Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens war die Ableitung von verallgemeinerten Zusammenhängen und Prozessfenstern zur Hochgeschwindigkeits-Abschreckung (HG-Abschreckung), die zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer von Bauteilen aus der Antriebstechnik führen, bzw. bei kostengünstigeren Werkstoffen oder Wärmebehandlungsverfahren zu vergleichbaren Lebensdauern wie unter konventionellen Bedingungen. Dabei standen ausdrücklich nicht durchhärtende Bedingungen im Vordergrund.

Zur Erreichung dieses Kernziels wurden folgende Bausteine untersucht und miteinander gekoppelt:

- Entwicklung von flexiblen Abschreckwerkzeugen zur Erzeugung möglichst gleichmäßiger Druckeigenspannungsverteilungen und Vermeidung von unnötig großen Formänderungen
- Erhöhung des Wärmeübergangs durch den Zusatz eines Speziessalzes (Aquarapid F)
- Verbesserung der Wärmeübergangsbestimmung bei HG-Abschreckprozessen

- Ermittlung von wesentlichen Werkstoffkennwerten zur Abschrecksimulation (Umwandlungsverhalten, Umwandlungsdehnung, thermische Dehnung)
- Evaluierung des technisch verwendbaren Potenzials der HG-Abschreckung zur Schalenhärtung durch experimentelle und numerische Untersuchungen
- Erarbeitung von Zusammenhängen und Prozessfenstern zur HG-Abschreckung in Abhängigkeit von Abmessungen, Wärmeübergang und Umwandlungsverhalten bzw. daraus abgeleiteten Kenngrößen
- Validierung an Demonstrator-Bauteilen im direkten Vergleich von HG-Abschreckung zu konventionellen Wärmebehandlungen durch Lebensdauerbestimmungen

#### Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Forschungsziel wurde durch eine eng miteinander verzahnte experimentelle und numerische Untersuchungsstrategie erreicht. Zunächst wurde

ein neues Verfahren zur Ermittlung sehr großer Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) entwickelt. Die gewählte Messmethode wurde dann zur Validierung der WÜK-Berechnung mittels CFD und zur Charakterisierung der WÜK's für Jet-Strömungen und Rohrströmungen eingesetzt.

Die Strömungssimulation wurde mittels CFD einerseits zur optimalen konstruktiven Gestaltung hinsichtlich Abschreckgleichmäßigkeit für die für dieses Projekt notwendigen neuen Abschreckwerkzeuge eingesetzt. Andererseits wurden die WÜK-Verteilungen in den Werkzeugen aus der Strömungssimulation berechnet.

Nachdem die Prozessgrößen so ermittelt waren, wurden die resultierenden Eigenspannungs- und Härteverteilungen sowohl experimentell als auch numerisch bestimmt. Dazu wurden zwei unlegierte Stähle mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt (C35 und C56E2) in Kombination mit unterschiedlichen Probenabmessungen und Wärmeübergängen untersucht. Das Umwandlungsverhalten dieser Stähle unterscheidet sich sowohl in der Martensitstarttemperatur als auch in der  $t_{8-5}$ -Zeit, die mindestens für ein nicht rein martensitisches Gefüge eingestellt werden muss. Die Extremwerte der erreichbaren Härten liegen in der martensitischen Rand-schicht für den Werkstoff C35 bei ca. 570 HV bzw. bei 750 HV für C56E2. Die Härten im ferritisch-perlitischen Kern betragen ca. 200 HV bis 250 HV. Die Härteunterschiede sind daher prinzipiell geeignet, eine ausgeprägte Schalenhärtung herbeizuführen und unterscheiden sich untereinander ausreichend, um als sinnvolle Variation der Härtebarkeit verwendet zu werden. Im Grenzfall der Durchhärtung unterscheiden sich die beiden Stähle zudem ausreichend in der Martensitstarttemperatur. Mit Fokus auf den Ersatz einer Einsatzhärtung durch eine Schalenhärtung kommt allerdings nur der C56E2 in Frage, da hier Oberflächenhärten oberhalb von 60 HRC erzielt werden können.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden die abgeschreckten Proben röntgenographisch auf die resultierenden Eigenspannungen und metallographisch auf die Härteannahme hin untersucht. Desweiteren wurden im direkten Vergleich von verschiedenen Anströmbedingungen Verzugs-messungen mittels 3D-Koordinatenmesstechnik durchgeführt.

Die experimentellen Daten wurden außerdem zur Verifikation der Abschrecksimulation verwendet. Dabei ist zwar keine perfekte Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreicht worden, aber es konnten die richtigen Trends vorhergesagt werden. Aus den experimentell ermittelten Umwandlungsdaten wurden durch lineare Interpolation systematische Variationen des Umwandlungsverhaltens

zwischen den beiden oben erwähnten Basisstählen für die Abschrecksimulation ermittelt. Entsprechend konnte ein breites Spektrum an Kombinationen von Härtebarkeit, Abmessung und Wärmeübergang untersucht werden. Anhand von systematischen Variationen dieser drei Größen wurden kritische Biot-Zahlen für Druckeigenspannungen an der Oberfläche ermittelt. In Abhängigkeit der relevanten Prozessgrößen wurden Prozessfenster für Schalenhärtung mit Druckeigenspannungen am Rand von Wellen ermittelt.

Im letzten Schritt wurden Demonstratorbauteile untersucht, die normalerweise aus einem legierten Stahl mit konventioneller Abschreckung bzw. aus einem Einsatzstahl mit Aufkohlung und konventioneller Abschreckung hergestellt werden. In diesem Projekt wurden die Bauteile aus unlegiertem Stahl (C56E2) gefertigt und einer HG-Abschreckung unterzogen. Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen wurden verglichen mit gleichen Bauteilen, die induktiv erwärmt und mit Polymerlösung abgeschreckt wurden.

Bild 1 zeigt die Arbeitspakete des Projektes und die jeweilige Verzahnung der Arbeitspakete.

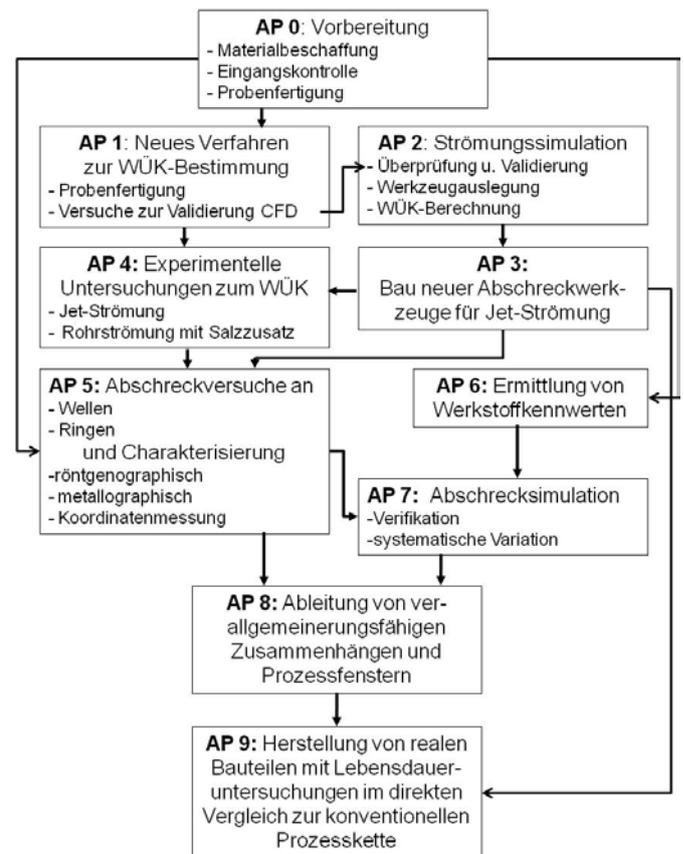


Bild 1: Übersicht der Arbeitspakete und ihr Zusammenwirken

**Ergebnisse**

In den Untersuchungen in diesem Vorhaben ist es gelungen, hohe Wärmeübergangskoeffizienten bis zu 100.000 W/m²K zu erzeugen und zu messen. Die Messungen erfolgten mit Kupferproben und konnten mit Hilfe von CFD-Simulationen und einem Abgleich mit Daten aus dem VDI-Wärmeatlas verifiziert werden. Mit diesen Messungen ist es nun möglich, Biot-Zahlen, in die die Wärmeübergangskoeffizienten einfließen, zu berechnen und die Eigenspannungsbildung an den Oberflächen mit Biot-Zahlen zu korrelieren. Die Untersuchungen in diesem Vorhaben weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit der Oberflächeneigenspannungen der verwendeten Wellen von der Biot-Zahl nach.

Ein zentrales Ergebnis dieses Projekts ist die Ermittlung von Prozessfenstern, innerhalb derer eine Schalenhärtung der Bauteile sinnvoll ist. Drei Kriterien müssen dabei erfüllt sein, damit eine Schalenhärtung als sinnvoll angesehen werden kann: Erstens muss eine ausreichende Härtung am Rand vorliegen, zweitens muss ein signifikanter Härteabfall zum Kern der Bauteile erfolgen und drittens sollen Druckeigenspannungen am Rand entstehen. Aus den Untersuchungen konnten Minimalgrößen für zylindrische Bauteile und minimale Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden, bei denen alle drei Bedingungen erfüllt sind. Bild 2 zeigt die Prozessfenster für C35 und C56E2, in denen eine ausreichende Härtung für die beiden Werkstoffe erreicht wird.

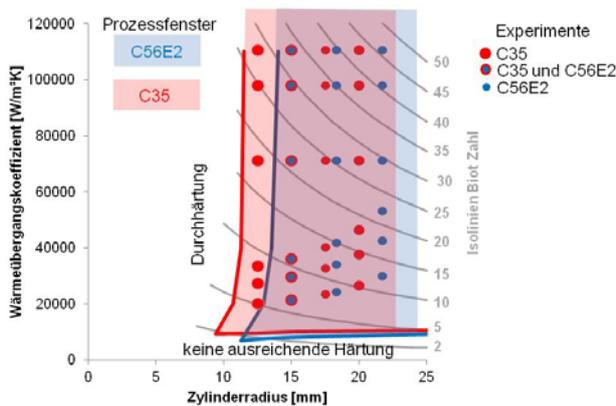


Bild 2: Prozessfenster für Schalenhärtung für die Werkstoffe C35 und C56E2

Es zeigt sich, dass bei Werkstoffen mit höherer Härtebarkeit die Bedingung der Druckeigenspannungen am Rand zu einer Einschränkung des Prozessfensters führen kann. Bei niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten kann zwar ein akzeptables Härteergebnis erzielt werden, die Eigenspannungen am Rand sind allerdings noch im Zugbereich. Bild 3 zeigt die Einschränkung des Prozessfensters für C56E2.

Reale Bauteile, die mit der Hochgeschwindigkeits-Abschreckung wärmebehandelt wurden, haben zwar teilweise gute Lebensdauerergebnisse erzielen kön-

nen, allerdings wurde im Verlauf des Projektes festgestellt, dass die im Zuge der Antragsausarbeitung ausgewählten Werkstoffe und Bauteilgrößen nicht innerhalb der sinnvollen Prozessfenster für die Schalenhärtung liegen und aus diesem Grund keine Schalenhärtung möglich war.

Ein grundsätzliches Problem der Hochgeschwindigkeits-Abschreckung liegt in der Notwendigkeit, Bauteile über alle Oberflächen abzukühlen. Abdeckungen von einzelnen Oberflächenteilen, die die Abkühlung unterbinden, bzw. deutlich vermindern, können Risse in den Bauteilen verursachen. Diese bereits von Kobasko et al. erwähnte Forderung wird durch die Ergebnisse dieses Projektes bestätigt. Eine Weiterentwicklung der Abschrecktechnik ist aus diesem Grund zwingend erforderlich. Aus den Erfahrungen in diesem Vorhaben stellen Jet-Felder hierbei eine vielversprechende Möglichkeit dar.

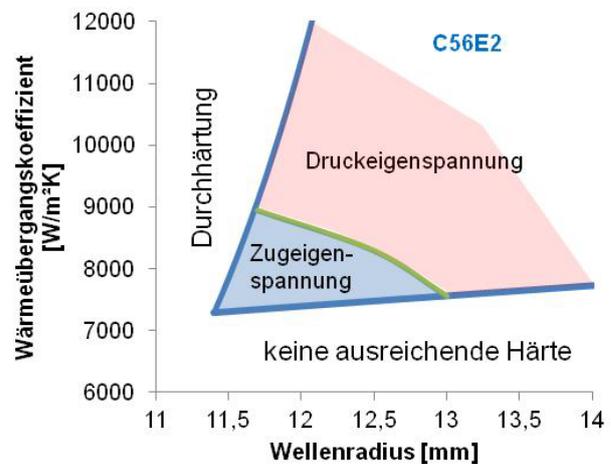


Bild 3: Eingeschränktes Prozessfenster für C56E2 bei Berücksichtigung von Druckeigenspannungen

**Zusammenfassung**

Aus den experimentell und simulativ gewonnenen Ergebnissen lassen sich konkrete Anhaltspunkte für den sinnvollen Einsatz der Hochgeschwindigkeits-Abschreckung ableiten. Um sicher Druckeigenspannungen am Rand zu erzeugen, eignen sich unlegierte Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt unterhalb von 0,45 Masse-%. Sollte dies nicht möglich sein, weil z.B. die erreichbare Härte am Rand für diese Werkstoff nicht ausreicht, muss sichergestellt sein, dass die Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Bauteilgrößen ausreichend groß sind, damit sicher Druckeigenspannungen am Rand erzeugt werden.

**„Das Ziel dieses Vorhabens wurde erreicht.“**

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 17384 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Projekt wurde vom Fachausschuss 11 (Abschrecken) der AWT betreut.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literatur

Friedhelm Frerichs, Thomas Lübben, Franz Hoffmann, Hans-Werner Zoch:

### **Shell hardening of unalloyed steel cylinders due to high speed quenching**

Proceedings of the European Conference on Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress, Mai 2014, München, Deutschland

F. Frerichs, Th. Lübben:

### **Simulation of shell hardening of unalloyed steel cylinders due to high speed quenching**

Proceedings of the 5th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, Juni 2014, Orlando, USA

F. Frerichs, S. Sander, Th. Lübben, S. Schüttenberg, U. Fritsching

### **Determination of Heat Transfer Coefficients in High Speed Quenching Processes**

DOI 10.1520/MPC20130112

Friedhelm Frerichs, Thomas Lübben, Franz Hoffmann, Hans-Werner Zoch

### **Shell hardening of unalloyed steel cylinders by high speed quenching**

Zur Veröffentlichung angenommen durch *Journal of Heat Treatment & Surf. Eng.*, London, UK

Friedhelm Frerichs, Sören Sander, Thomas Lübben, Udo Fritsching, Franz Hoffmann, Hans-Werner Zoch:

### **Randschichthärtung mittels Hochgeschwindigkeits-Abschreckung**

Veröffentlichung geplant in HTM, Carl Hanser Verlag, München, Deutschland

Kontakt:

Stiftung Institut für Werkstofftechnik

Friedhelm Frerichs

Badgasteiner Straße 3

D-28359 Bremen

Tel.: +(49)-421-218-51338

mail: frerichs@iwt-bremen.de