



## Arbeitsblatt

### **Identifikation von verzugskritischen Strömungen bei der Ölabschreckung von Wellen in industriellen Abschreckbädern**

AiF-Nr.: 22411 N

Obmann: Dr.-Ing. Axel Majorek

beteiligte Unternehmen:

Aichelin Holding GmbH  
ALD Vacuum Technologies GmbH  
Burgdorf GmbH & Co. KG  
Daimler Truck AG  
Heess GmbH & Co. KG  
HTU Härtetechnik Uhldingen-Mühlhofen GmbH  
IHI Machinery and Furnace Co. Ltd  
Volkswagen AG  
Wittmann Härtereie GmbH  
WOW Service

Laufzeit:

01.04.2022 – 30.06.2024

Erstelldatum:

23.12.2024

Forschungseinrichtung:

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien IWT

Projektleiter:

Dr.-Ing. Thomas Lübben

Sachbearbeiter:

M.Sc. Gabriel Ebner

Forschungsvereinigung:

AWT e. V.

Projektbegleitender Fachausschuss

FA 15 (Maß- und Formänderungen)

#### **Zielsetzung und Lösungsweg**

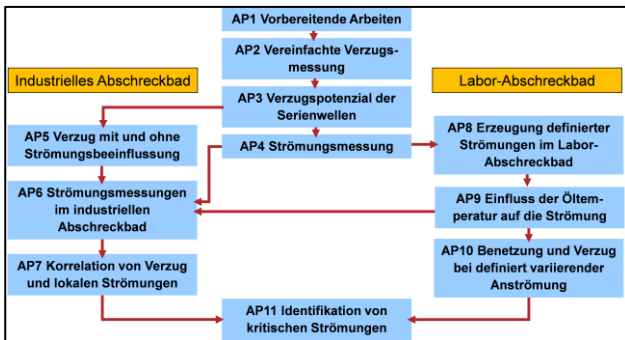
##### **Forschungsziel**

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Zusammenhänge zwischen Ölströmungen im Abschreckbad und der Entstehung von Rundlaufabweichungen an Getriebewellen im Kontext des Einsatzhärtens untersucht. Dabei sollte unter anderem der Frage nachgegangen werden, welche Rolle die Wiederbenetzung während des Abschreckprozesses bei der Entstehung dieser Formänderungen spielt. Nach der Arbeitshypothese, die dieser Untersuchung zugrunde lag, führen Inhomogenitäten in der Strömung zu einer asymmetrischen Wiederbenetzung am Bauteil, die wiederum zu einem asymmetrischen Wärmeübergang führt. Durch die so entstehenden zeitlichen Gradienten bei der Umwandlung des Gefüges werden Spannungen erzeugt, die schließlich zu Maß- und Formänderungen führen. In diesem Zusammenhang wurden folgende Fragen und Teilziele bearbeitet:

- Ermittlung des Einflusses der Umwälzintensität und strömungsbeeinflussender Einbauten in einem industriellen Abschreckbad auf die Rundlaufabweichung von Wellen
- Ermittlung von Strömungsverteilungen in einem industriellen Abschreckbad, die zu besonders großen Rundlaufabweichungen führen
- Evaluation der Rolle der Wiederbenetzung bei der Entstehung von Rundlaufabweichungen anhand definierter Strömungen im Laborversuch
- Identifikationen von verzugskritischen Strömungen bei der Ölabschreckung von Wellen
- Ableitung von Hinweisen zur Gestaltung von Abschrecktanks, Chargiergestellen, Chargierung und zur Prozessführung der Abschreckung

## Lösungsweg

Um das Forschungsziel zu erreichen, wurden Versuchsreihen in einem industriellen Abschreckbad eines Mehrzweckkammerofens und in einem Labor-Abschreckbad durchgeführt. Der Ablauf und die zugehörigen Arbeitspakete sind in Abbildung 1 zu sehen.



**Abbildung 1: Übersicht der im Forschungsvorhaben bearbeiteten Arbeitspakete**

Zur Vorbereitung dieser Arbeiten wurden zunächst die Methoden zur Verzugs-messung qualifiziert (AP2). Dafür wurde ein Rundlaufprüfstand aufgebaut, in dem mithilfe von Messuhren und einer Winkelskala die Rundlaufabweichungen sowie die Krümmungsrichtungen der untersuchten Wellen vor und nach der Wärmebehandlung aufgezeichnet wurden. Außerdem wurde auf Koordinatenmessungen zurückgegriffen. Das in den Wellen enthaltene Verzugs-potential wurde quantifiziert, um den Einfluss auf die späteren Versuche einzuschätzen (AP3). Für die geplanten Strömungsmessungen wurde ein Flügelradanemometer beschafft und die Messvorrichtungen gebaut, die für die definierte Positionierung im Abschreckbad des Mehrzweckkammerofens notwendig waren (AP4). Bei den Versuchen im industriellen Abschreckbad wurden mehrere Chargen zweier Wellentypen aus dem PKW- und Nutzfahrzeugsektor (NFZ) ein-satzgehärtet. Dabei wurden neben den Referenzchargen unter Normalbedingungen auch Abschreckungen durchgeführt, bei denen strömungsbeeinflussende Maßnahmen im Abschreckbad vorgenommen wurden, um gezielt

extreme Effekte beim Verzug der Wellen zu erzeugen (AP5). Durch das sukzessive Einbringen von Chargengestellten, Strömungsbeeinflussung und ganzen Chargen in das Abschreckbad wurden im kalten Zustand die entstandenen Strömungsverteilungen mit dem Flügelradanemometer detailliert vermessen (AP6). Dies war notwendig, um im späteren Verlauf Korrelationen zwischen den in AP5 beobachteten Phänomenen beim Verzug und den zugrundeliegenden Strömungsbedingungen untersuchen zu können (AP7). Bei den Versuchen im Laborabschreckbad wurden Zylinderproben aus einem Rohrofen in einem Abschreckbad abgeschreckt, an dem zwei Sichtfenster zur Beobachtung der Abläufe beim Abschreckvorgang vorhanden waren. Auf diese Weise wurde der Einfluss einer definiert asymmetrischen Anströmung beim Abschrecken auf die Wiederbenetzung an den Proben untersucht. Im ersten Schritt wurde das Abschreckbad für die Erzeugung von definierten Strömungen umgebaut (AP8). Dafür wurden eine Pumpe und entsprechende Verrohrungen installiert, die eine Abschreckung der Proben in einem Freistrahl von unten und seitlich unter 45° ermöglichten. Über die Pumpe wurde die Anströmgeschwindigkeit variiert und die erzeugten Strömungen über Strömungsmessungen evaluiert. Durch Variation der Öltemperatur und weitere Strömungsmessungen wurde zudem der Temperatureinfluss auf die Strömung untersucht (AP9). Durch Koordinatenmessungen vor und nach der Wärmebehandlung wurde der Betrag und die Richtung der Rundlaufabweichungen in Folge der asymmetrischen Abschreckung an den Proben erfasst. Die Abläufe der Wiederbenetzung bei verschiedenen Abschreckparametern wurden über Videoaufnahmen dokumentiert (AP10). Zuletzt wurden die Ergebnisse beider Versuchsreihen zusammengebracht, um kritische Strömungen zu identifizieren, die sich in besonderem Maße auf die Entstehung von Rundlaufabweichungen an Wellen auswirken (AP11).

## Ergebnisse

### Verzug unter Strömungsbeeinflussung

Zur Untersuchung des Einflusses der Ölströmung beim Abschrecken auf die Rundlaufabweichungen der Wellen (WKN 1.7323, 20MoCrS4)

wurden sowohl Referenzversuche unter Normalbedingungen, als auch Versuche zur Strömungsbeeinflussung durchgeführt. Das Abschreckbad des Mehrzweckkammerofens ist so konzipiert, dass das Öl eine Charge vertikal von unten nach oben durchströmt. Zur Strömungsbeeinflussung wurden unter anderem Bleche unter den Chargenträgern eingesetzt. Die Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Chargenaufbau der NFZ-Wellen in der Draufsicht, bei der die Halbcharge 1 durch ein Blech verblockt wurde, um möglichst große Unterschiede bei der Anströmung der Wellen in beiden Halbchargen zu erreichen.

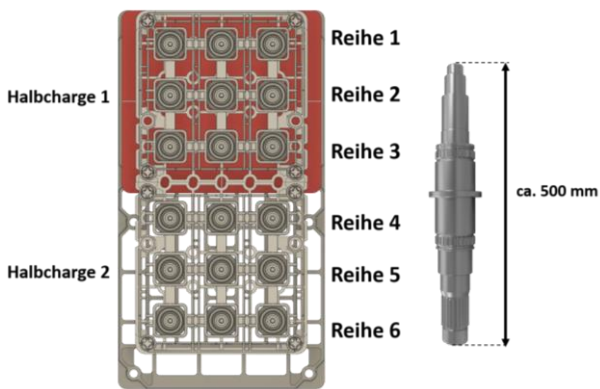


Abbildung 2: Chargenaufbau der NFZ-Wellen mit verblockter Halbcharge 1

Die Beträge und Richtungen der Rundlaufabweichungen, die unter diesen Bedingungen erzeugt wurden (rechts), sind in der Abbildung 3 im Vergleich zu einer Referenzcharge (links) dargestellt.

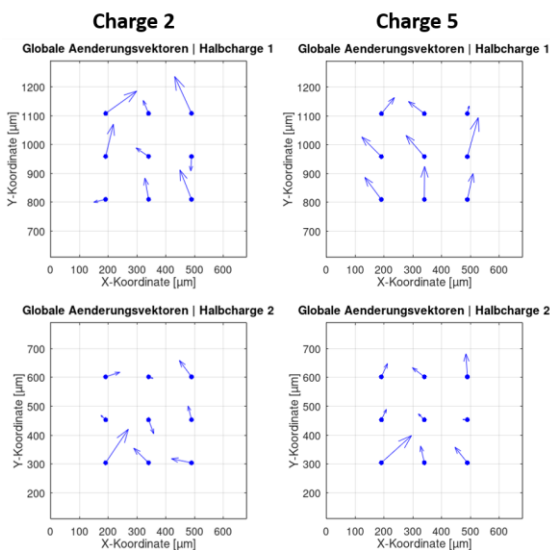


Abbildung 3: Krümmungsamplituden und Krümmungsrichtungen einer Referenzcharge (l.) und von einer unter Strömungsbeeinflussung abgeschreckten Wellencharge (r.)

Insgesamt wurden jeweils drei Versuche für die Referenzkonfiguration sowie für die Versuche mit Strömungsbeeinflussung bei zwei verschiedenen Umwälzerdrehzahlen durchgeführt. Die Referenzchargen zeigten zufällig verteilte Krümmungsrichtungen mit größeren Unterschieden bei den Beträgen der Rundlaufabweichungen. Im Gegensatz dazu ist in den mit der Verblockung abgeschreckten Chargen insbesondere in den Reihen 2 und 3 ein deutlicher Anstieg der Rundlaufabweichungen gemessen worden. Außerdem zeigte sich eine ausgeprägte Vorzugsrichtung bei der Krümmung dieser Wellen. Dieser Effekt wurde in den drei Wiederholungsversuchen sowie bei zwei verschiedenen Umwälzerdrehzahlen reproduziert. Durch die Erhöhung der Umwälzintensität kam es dabei stets zu einer Steigerung der Rundlaufabweichungen.

### Strömungsmessungen im industriellen Abschreckbad

Im industriellen Abschreckbad wurden die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Umwälzerdrehzahlen an umfangreichen Messpunktrastern aufgezeichnet. Dabei wurden verschiedene Eintauchtiefen des Flügelradanemometers verwendet und die Geschwindigkeiten der Zwischenpositionen vom Messraster im Anschluss interpoliert. Der Messaufbau ist in der Abbildung 4 dargestellt.

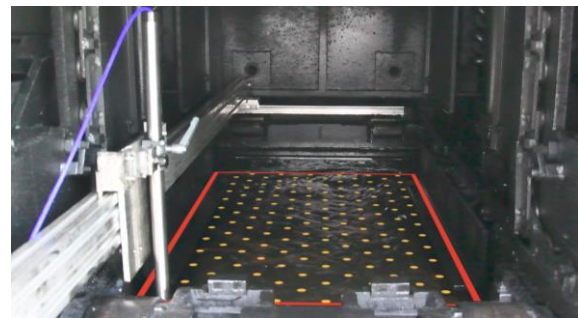
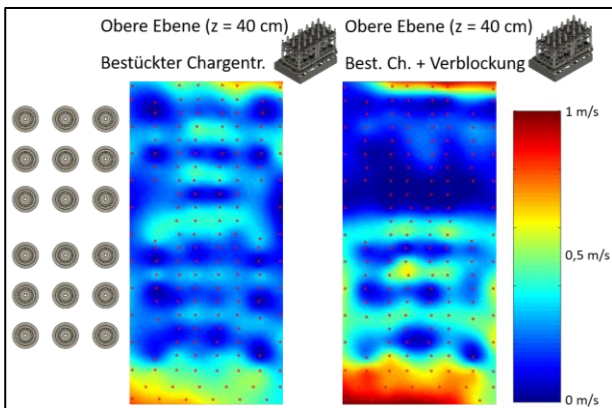


Abbildung 4: Flügelradanemometer und Positioniervorrichtung über dem Abschreckbad mit schematischem Messpunktraster

Dabei befanden sich zunächst verschiedene Aufbaustufen der Chargenträger der Wellen im Abschreckbad, um deren Einfluss auf die Grundströmung des Abschreckbads zu evaluieren. Zuletzt wurden bestückte Chargenträger inklusive der oben beschriebenen Verblockung einer Halbcharge in das Abschreckbad eingefahren und die entstandenen Strömungsverteilungen gemessen. Dafür wurde die Vertikalkomponente

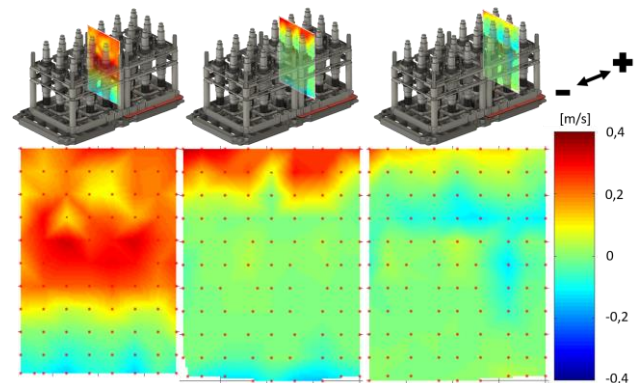
der Strömung durch horizontale Messraster oberhalb der Charge gemessen. Für die horizontale Strömungskomponente wurden hingegen vertikal orientierte Messebenen zwischen den Wellenreihen im Chargenträger aufgezeichnet. Die Abbildung 5 zeigt die Strömungsverteilung in vertikaler Richtung bei einem bestückten Chargenträger mit und ohne Verblockung einer Halbcharge. Zu sehen ist, wie sich Wellenposition als Bereiche niedriger Strömungsgeschwindigkeit in der Strömungsverteilung abbilden. Durch die Verblockung einer Halbcharge von unten wurde in dem betroffenen Bereich in der Vertikalrichtung erwartungsgemäß nur eine sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Wie zuvor beschrieben, waren an den Wellen in diesem Bereich allerdings die höchsten Rundlaufabweichungen und eine ausgeprägte Vorzugsrichtung bei den Krümmungsrichtungen gemessen worden. Durch den verringerten Querschnitt war die Intensität der Strömung im nicht verblockten Teil der Charge deutlich höher.



**Abbildung 5: Strömungsverteilung oberhalb vom bestückten Chargenträger der NFZ-Wellen ohne und mit Verblockung einer Halbcharge von unten (Vertikalkomponente)**

Erst durch die Messung der Horizontalkomponente ergab sich ein vollständigeres Bild über die im Abschreckbad vorherrschenden Strömungsbedingungen in Folge der Strömungsbeflussung. Die Abbildung 6 zeigt die Strömungsverteilung in horizontaler Richtung, die im verblockten Teil des Chargenträgers zwischen den Wellenreihen gemessen wurde. Anhand der Darstellung wird ersichtlich, dass durch die halbseitige Verblockung des Chargenträgers eine Umlenkung der Ölströmung stattgefunden hat. Die Verblockung führte somit zur Bildung einer

starken Horizontalkomponente, wodurch die betroffenen Wellen seitlich von unten angeströmt wurden. Aufgrund der überwiegenden Abwesenheit einer weiteren Strömungskomponente im verblockten Teil der Charge, musste demnach die seitliche Anströmung für die Ausprägung des auffälligen Effekts beim Verzug verantwortlich sein und wurde deshalb im Folgenden weiter untersucht.

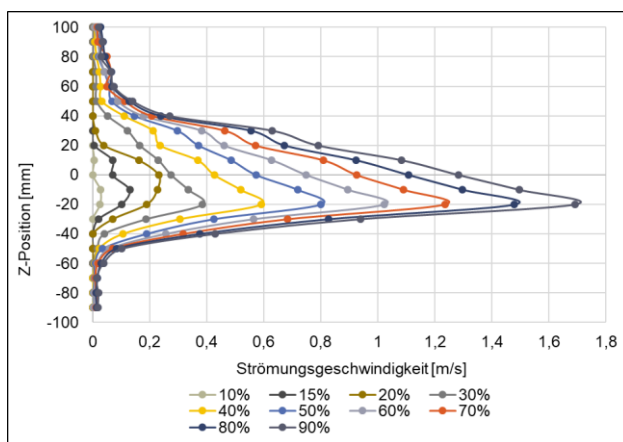


**Abbildung 6: Strömungsverteilung im Chargenträger zwischen den Wellenreihen in horizontaler Richtung bei verblockter Halbcharge**

### Abschreckversuche im Laborabschreckbad

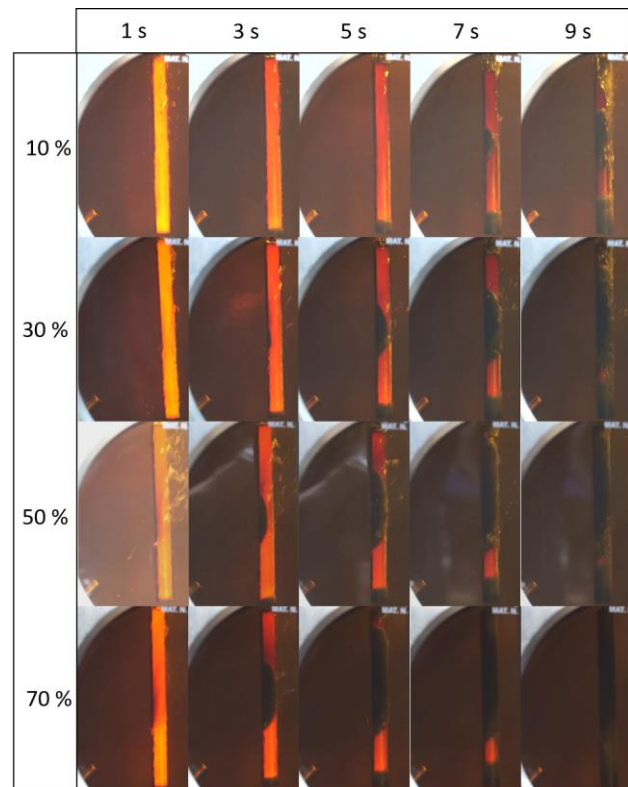
Neben den Untersuchungen an den Serienwellen wurden zur Beobachtung von Abschreckvorgängen in einem Laborabschreckbad Abschreckversuche an Zylinderproben aus 20MnCr5 (WKN 1.7147) durchgeführt. Dabei wurden die Strömungsbedingungen aus dem industriellen Abschreckbad in kleinerem Maßstab nachgebildet. Ziel war es die Auswirkungen der zuvor gezeigten asymmetrischen Abschreckung auf die Abläufe bei der Wiederbenetzung zu untersuchen. Dazu wurde die Krümmung der Proben in Folge dieser Abschreckung ausgewertet. Die Zylinderproben wurden zunächst in einem Rohrofen erwärmt und anschließend in das darunterliegende Abschreckbad abgeschreckt. Das Abschreckbad verfügte über zwei Sichtfenster zur Aufzeichnung der Abschreckungen mit einer Kamera. Die Anströmung der Proben mit Öl erfolgte über einen Freistrahler, der unter 45° seitlich von unten auf die Probenmitte ausgerichtet war. Diese Konfiguration bildete die Situation aus dem industriellen Abschreckbad nach, die im Übergangsbereich zwischen den Halbchargen vorlag. Durch eine Pumpe konnte die Anströmungsgeschwindigkeit stufenlos variiert werden. Durch Strömungsmessungen in unmittelbarer

Nähe zur Probenoberfläche mittels Flügelradanemometer wurde die lokale Geschwindigkeit der Strömung entlang der Probe gemessen. Koordinatenmessungen ermöglichten zudem die Bewertung der Maß- und Formänderungen der Zylinder in Folge der Abschreckung. Die Abbildung 7 zeigt die gemessenen Anströmgeschwindigkeiten entlang der Längsachse einer Zylinderprobe bei verschiedenen Einstellungen der Pumpenleistung. Es ist zu erkennen, dass die höchsten Geschwindigkeiten im angeströmten, mittleren Bereich der Probe gemessen wurden. Die Maximalgeschwindigkeit stieg bei Erhöhung der Pumpenleistung linear auf bis zu 1,7 m/s an.



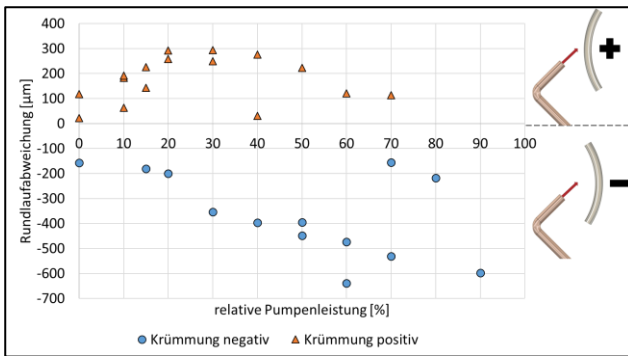
**Abbildung 7: Anströmgeschwindigkeit entlang der Zylinderprobe bei verschiedenen Pumpenleistungen**

Die Folge dieser Anströmung auf die Benetzung ist der Abbildung 8 zu entnehmen. In ihr sind Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Eintauchen der Proben in das Öl sowie bei unterschiedlichen Pumpenleistungen dargestellt. Es ist zu sehen, dass die asymmetrische Anströmung der Proben zu einer beschleunigten Benetzung im betroffenen Bereich geführt hat. Die Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit führte dabei zu einer Beschleunigung dieses Vorgangs, sodass die Benetzung immer früher erfolgte. Der Zusammenbruch der Dampfhaut führte somit im benetzten Bereich im Gegensatz zur strömungsabgewandten Probenseite im Allgemeinen zu einer schnelleren Abkühlung.



**Abbildung 8: Entwicklung der Benetzung bei Abschreckvorgängen unter asymmetrischer Anströmung, verschiedenen relativen Pumpenleistungen und nach unterschiedlichen Zeitpunkten**

Die Rundlaufabweichungen der unter diesen Bedingungen abgeschreckten Zylinderproben wurden im Anschluss ausgewertet. Die Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang mit der eingestellten Pumpenleistung. Bei den Versuchen sind zwei Krümmungsrichtungen aufgetreten, die beide entlang der Strömungsrichtung orientiert waren. Bei den positiv gekrümmten Proben kam es dabei zunächst zu einem Anstieg der Rundlaufabweichungen mit steigender Pumpenleistung. Bei weiter steigender Pumpenleistungen nahm der Betrag wieder ab, bis schließlich eine negative Krümmung vorlag. Es ist davon auszugehen, dass alle abgeschreckten Proben zu Beginn des Abschreckvorgangs aufgrund der Kontraktion der zuerst abkühlenden Seite eine negative Krümmung aufwiesen. Die bei hohen Pumpenleistungen abgeschreckten Proben vollzogen demnach eine zweifache Änderung der Krümmungsrichtung im Laufe der Abschreckung. Die negativ gekrümmten Proben zeigten hingegen ein anderes Verhalten. Die initial durch die einseitige Abkühlung vorhandene negative Krümmung wurde bei diesen Proben mit steigender Pumpenleistung stets verstärkt und betrug bis zu 600  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 9: Rundlaufabweichungen in Folge der seitlichen Anströmung bei unterschiedlichen relativen Pumpenleistungen**

Die zwei Krümmungsrichtungen ließen sich überwiegend zwei Fertigungslosen mit etwas unterschiedlicher Zusammensetzung der Schmelze zuordnen. Die Ausprägung der beiden Richtungen trat bei ansonsten konstanten Abschreckbedingungen auf. Aus diesem Grund ist denkbar, dass durch die Schmelzenunterschiede zeitlich verschobene Gefügeumwandlungen stattgefunden haben, die jeweils die Ausprägung einer bestimmten Krümmungsrichtung begünstigten. Festzuhalten ist, dass für in technischen Anlagen üblichen Strömungsgeschwindigkeiten in beiden Fällen ein starker Anstieg der Rundlaufabweichungen in Folge des durch die seitliche Anströmung asymmetrischen Abschreckvorgangs aufgetreten ist.

### Zusammenfassung

An Getriebewellen wurden Einsatzhärteversuche im Abschreckbad eines Mehrzweckkammerofens durchgeführt. Die Abschreckung im Öl erfolgte dabei teilweise unter Beeinflussung der Strömung, um gezielt extreme Effekte beim Verzug hervorzurufen. Durch Strömungsmessungen in Chargenaufbauten konnte gezeigt werden, dass durch die Strömungsbeeinflussung

eine Horizontalkomponente im Abschreckbad erzeugt wurde, die zu einer asymmetrischen Abschreckung von den im betroffenen Bereich vorhandenen Wellen geführt hat. Genau an diesen Wellen zeigten Rundlaufmessungen einen auffälligen Anstieg der maximalen Rundlaufabweichungen sowie eine ausgeprägte Vorzugsrichtung der Krümmungen entlang der Richtung der Horizontalkomponente der Strömung. Zusätzlich wurden Versuche in einem Laborabschreckbad durchgeführt, um Benetzungsvorgänge während Abschreckprozessen näher zu untersuchen. Dafür wurde die beschriebene Strömungssituation aus dem industriellen Abschreckbad in Form eines seitlichen Freistrahls zur Abschreckung von Zylinderproben nachgebildet. Strömungsmessungen entlang einer solchen Zylinderprobe offenbarten die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten. Durch Videoaufnahmen der Abschreckvorgänge konnte gezeigt werden, wie die Benetzung der Probe von der Art und der Intensität der vorherrschenden Strömung beeinflusst wurde. Das Resultat der asymmetrischen Abschreckung waren auch hier stark gesteigerte Rundlaufabweichungen und eine Ausrichtung der Krümmungen entlang der Strömungsrichtung. Die Untersuchungen in diesem Projekt haben gezeigt, dass sich Strömungskomponenten quer zur Längsachse von Wellen und länglichen Bauteilen bei der Ölabschreckung in hohem Maße nachteilig auf die Entstehung von Rundlaufabweichungen auswirken können. Für eine verzugsärmere Abschreckung sollte dies bei der Abschreckung solcher Teile und bei der Konzipierung von Abschreckbädern berücksichtigt werden. Außerdem sollte die Umwälzintensität nur so hoch wie nötig gewählt werden, da auch sie maßgeblich zu einer Steigerung geführt hat.

### Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 22411 N Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz mit den Mitteln der IGF gefördert.



### Kontakt:

#### Forschungseinrichtung:

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Hauptabteilung Werkstofftechnik  
Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen  
M.Sc. Gabriel Ebner, [ebner@iwt-bremen.de](mailto:ebner@iwt-bremen.de), Tel.: +49 421 218 51407