

# **Entwicklung einer Standardmethode zur Beurteilung der Abschreckwirkung von Abschrecksystemen**

Vom Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

Dissertation

von  
Dipl.-Phys. Jörg Ohland

Gutachter: Prof. Dr.-Ing habil. P. Mayr  
Prof. Dr.-Ing habil. O. Keßler (Universität Rostock)

Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.2009



Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik  
Bremen

Band 49

**Jörg Ohland**

**Entwicklung einer Standardmethode zur Beurteilung  
der Abschreckwirkung von Abschrecksystemen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8898-3

ISSN 1437-7659

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik in Bremen entstanden. Die beinahe sechs Jahre waren für mich eine lehrreiche und schöne Zeit. Für die freundliche und sehr gute Zusammenarbeit danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern. Eine Arbeit wie diese ist nur mit der Unterstützung vieler Menschen möglich. Ich bedanke mich an dieser Stelle aufrichtig bei allen, die mir geholfen haben und die vielleicht nicht explizit hier aufgeführt sind.

Die Untersuchungen fanden im Rahmen eines durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen. (AiF) geförderten Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit dem Fachausschuss 11 „Abschrecken“ der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik (AWT) statt. Für die Möglichkeit, an diesem Vorhaben teilzuhaben danke ich beiden Organisationen. Genauso danke ich den beteiligten Firmen und ihren Mitarbeitern für ihre Unterstützung und die Durchführung der Betriebsversuche. Im Besonderen bin ich Herrn Rainer Kohlmann für sein fortwährendes Engagement zu Dank verpflichtet.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing habil. P. Mayr, sowohl für die Möglichkeit im IWT zu arbeiten, als auch für die Bereitschaft, als erster Gutachter zu fungieren.

Auch danke ich Prof. Dr.-Ing habil. O. Kessler für die Übernahme des Zweitgutachtens und die Diskussionsbereitschaft bei der Erstellung meiner Arbeit.

Einen großen Dank richte ich an Herrn Dr. Th. Lübben, der mir in meiner gesamten Zeit am Institut als kompetenter Diskussionspartner, hilfreicher Ideengeber und verlässlicher Partner zur Verfügung stand. Seine Unterstützung, gelegentliche „Anstöße“ in die richtige Richtung und die gewährten Freiheiten trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Ebenso danke ich Dr. M. Hunkel für seine Hilfe bei der Simulation und für die Bereitschaft, sie mir immer wieder zu erklären.

Dem unermüdlichen Einsatz meiner studentischen Helfer C. Steinbeck, M. Steinbacher und A. Becker verdanke ich sehr viele der hier gezeigten Härtepunkte. Genauso danke ich allen technischen Mitarbeitern des Institutes, die immer wieder bereit waren, mir zu helfen und somit dazu beizutragen, auch die großen Probleme aus dem Weg zu schaffen. Gute Arbeit!

Allen voran danke ich aber meiner Familie und meinen Freunden, die in all den Jahren des Studiums und darüber hinaus immer zu mir standen und an mich geglaubt haben. Ohne Euch Anne, Carsten, Chrischan, Dani, Ele, Gudrun, Jan, Norbert, Mike, Olli, Rico, Sonja und Tina hätte mir das alles nicht so viel Spaß bereitet und wäre wohl nie fertig geworden. Ganz besonders meiner Mutter, die mich immer fraglos unterstützte und meinem Bruder, dessen Rat mir immer viel bedeutet, danke ich und kann euch Beiden gar nicht sagen wie sehr.



---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ausgangssituation.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Grundlagen des Wärmeübergangs beim Abschrecken.....</b>	<b>2</b>
2.1.1	Wärmeübertrag in Gasen.....	3
2.1.2	Wärmeübertrag in Flüssigkeiten mit Verdampfung.....	4
2.1.3	Wärmeübertrag in wässrigen Polymerlösungen.....	7
<b>2.2</b>	<b>Methoden zur Charakterisierung von Abschreckmedien.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Methoden zur Charakterisierung von Abschrecksystemen.....</b>	<b>13</b>
2.3.1	Messung von Abkühlkurven.....	13
2.3.2	Bestimmung der Abkühlwirkung anhand der Gefügeverteilung.....	14
<b>2.4</b>	<b>Grundlagen der Vorhersage der Gefügeverteilung und der Härteannahme infolge eines Härteprozesses.....</b>	<b>16</b>
2.4.1	Beschreibung der isothermen Umwandlung.....	16
2.4.2	Umwandlung bei kontinuierlicher Abkühlung.....	18
2.4.3	Martensitische Umwandlung.....	19
2.4.4	Berechnung der Härteannahme.....	19
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Lösungsweg.....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Werkstoff und Probenform.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Erschmelzung des Standardwerkstoffs.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Eingangsanalyse.....</b>	<b>29</b>
4.2.1	Chemische Zusammensetzung.....	29
4.2.2	Gefüge.....	32
4.2.3	Härtbarkeit.....	36
<b>4.3</b>	<b>Fazit der Eingangsuntersuchungen.....</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Probenform.....</b>	<b>47</b>
4.4.1	Standardproben.....	47
4.4.2	Q-Probe.....	48
4.4.3	Dilatometerproben.....	48

<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtungen und -durchführung .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten.....</i></b>	<b>49</b>
5.1.1	Rohrofen.....	50
5.1.2	Abschreckbad.....	50
5.1.3	Flüssige Abschreckmedien.....	51
5.1.4	Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	52
5.1.5	Versuchsdurchführung .....	52
<b>5.2</b>	<b><i>Ermittlung des Umwandlungsverhaltens.....</i></b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b><i>Betriebsversuche.....</i></b>	<b>55</b>
5.3.1	Abschrecksysteme in den Betriebsversuchen .....	56
5.3.2	Furnace-Tracker zur Temperaturaufzeichnung.....	58
5.3.3	Härteprüfung .....	58
<b>5.4</b>	<b><i>Bestimmung und Aufbereitung der Eingangsdaten für die Gefügevorhersage und Berechnung der Härteverläufe.....</i></b>	<b>60</b>
5.4.1	Adaption des Wärmeübergangskoeffizienten .....	61
5.4.2	Adaption des Umwandlungsverhaltens .....	65
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Simulation.....</b>	<b>66</b>
<b>6.1</b>	<b><i>Betrachtung des Streubands der gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten .....</i></b>	<b>66</b>
6.1.1	Einfluss der Wechselbeziehung zwischen Wärmeübergangsstreuband und Temperaturintervall auf die simulierten Härtewerte .....	66
6.1.2	Einfluss des Wärmeübergangsstreubands auf die simulierten Härtewerte .....	76
6.1.3	Fazit.....	79
<b>6.2</b>	<b><i>Zuordnung der Probendurchmesser zu verschiedenen Abschrecksystemen .....</i></b>	<b>80</b>
6.2.1	Festlegung bei gasförmigen Abschreckmedien .....	81
6.2.2	Festlegung bei Ölen.....	82
6.2.3	Festlegung bei wässrigen Polymerlösungen .....	85
6.2.4	Fazit.....	87
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Betriebsversuche .....</b>	<b>89</b>
<b>7.1</b>	<b><i>Oberflächennahe Härteverläufe .....</i></b>	<b>89</b>



---

7.1.1	Gasförmige Abschreckmedien .....	90
7.1.2	Öle .....	95
<b>7.2</b>	<b>Radiale Härteverläufe in der Mittelebene .....</b>	<b>99</b>
7.2.1	Gasförmige Abschreckmedien .....	99
7.2.2	Öle .....	107
7.2.3	Wässrige Polymerlösungen .....	114
<b>7.3</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse der Betriebsversuche .....</b>	<b>116</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>118</b>
<b>8.1</b>	<b>Vergleich zwischen Simulation und Betriebsversuchen .....</b>	<b>118</b>
8.1.1	Gasförmige Abschreckmedien .....	118
8.1.2	Öle .....	122
<b>8.2</b>	<b>Verwendungsempfehlung und Anwendungsbereich der Standardproben .....</b>	<b>125</b>
8.2.1	Prüfverfahren .....	125
8.2.2	Prüfstrategien .....	126
8.2.3	Auswahl der Probenabmessungen .....	128
8.2.4	Probleme bei der Verwendung der Proben .....	132
<b>8.3</b>	<b>Abschätzung des Beurteilungsaufwandes .....</b>	<b>132</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>134</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>138</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Bestimmung und Aufbereitung der Materialdaten .....</b>	<b>144</b>
	<b>des Stahls 55Cr1 für die Wärmebehandlungssimulation .....</b>	<b>144</b>
<b>A.1</b>	<b>Adaption des Umwandlungsverhaltens .....</b>	<b>144</b>
A.1.1	Isothermes Umwandlungsverhalten .....	144
A.1.2	Kontinuierliches Umwandlungsverhalten .....	150
<b>A.2</b>	<b>Umwertung von Härtewerten .....</b>	<b>152</b>
<b>A.3</b>	<b>Adaption der thermophysikalischen Daten .....</b>	<b>153</b>
<b>A.4</b>	<b>Überprüfung der Adaption anhand des Jominy-Versuchs .....</b>	<b>153</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Symbolliste .....</b>	<b>155</b>