

**Beitrag zum Ratcheting-Verhalten  
von Komponenten der  
Druckbehälter- und Kraftwerkstechnik**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Dr.-Ing.**  
vom Fachbereich Chemietechnik der Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Benedikt Postberg**

aus

Bottrop

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Mai 2000

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Weiß

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K. Thermann

**Dortmund 2000**



Berichte aus dem Apparatebau

**Benedikt Postberg**

**Beitrag zum Ratcheting-Verhalten von Komponenten  
der Druckbehälter- und Kraftwerkstechnik**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Postberg, Benedikt:*

Beitrag zum Ratcheting-Verhalten von Komponenten  
der Druckbehälter- und Kraftwerkstechnik/Benedikt Postberg.

Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus dem Apparatebau)

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-7581-4

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7581-4

ISSN 1437-7667

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

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

## **Danksagung**

*Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Stipendiat der Graduiertenförderung des Landes Nordrhein-Westfalen in der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau des Fachbereiches Chemietechnik an der Universität Dortmund.*

*Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Weiß für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit, sein Interesse an deren Fortgang, die wertvollen Hinweise, die kritische Durchsicht und seinen persönlichen Einsatz zur Schaffung einer Arbeitsumgebung, in der ich gerne wissenschaftlich tätig war. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Thermann möchte ich für die Übernahme des Korreferates danken.*

*Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau und der mechanischen Werkstatt sowie den von mir betreuten Studenten möchte ich für die konstruktiven Diskussionen und die geleistete Arbeit danken.*

## Abstract

In der Chemie- und Kraftwerkstechnik kann es bei zyklisch beanspruchten Apparaten zum Versagen aufgrund von Ratcheting (Fortschreitender Plastischer Deformation) kommen. Als Grundvoraussetzung zur Berechnung dieses bisher zumeist unerwartet auftretenden Versagens wurde das nichtlinear kinematische Werkstoffmodell von Ohno&Wang aus dem Jahr 1993 erstmals in eine kommerzielle und weltweit verfügbare Finite-Elemente-Software implementiert.

Dazu war die Weiterentwicklung eines Algorithmus zur numerischen Integration der bisher analytisch nicht lösbaren, nichtlinearen Differentialgleichung des Modellansatzes notwendig. Die programmierte implizite Vorgehensweise reduziert die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems auf die Lösung einer einzigen nichtlinearen Gleichung, so dass der Rechenaufwand reduziert wird und eine systematische Verifizierung und ein praktischer Einsatz des Modells von Ohno&Wang erstmals möglich ist.

In der umfangreichen Verifizierung anhand von zwei experimentellen Untersuchungen der internationalen Ratcheting-Forschung erfüllte der Modellansatz von Ohno&Wang alle aufgrund von theoretischen Voruntersuchungen postulierten Erwartungen und zeigte sich anderen aktuellen Ansätzen gegenüber eindeutig überlegen.

In eigenen Experimenten wurde ein linearer Einfluss unterschiedlicher Hauptspannungsverhältnisse bei gleicher Vergleichsspannung nach von Mises auf das Ratcheting-Verhalten nachgewiesen. Darüber hinaus zeigte sich, dass der Modellansatz von Ohno&Wang auch ein neues Hilfsmittel in der Ratcheting-Forschung ist, da die Suche nach weiteren Einflussfaktoren jetzt durch vorgeschaltete Simulationen effizienter erfolgen kann.

Dass das Modell von Ohno&Wang zur Berechnung von Ratcheting in der Praxis sehr gut geeignet ist, wurde am Beispiel des axial geneigten Stutzens auf zylindrischem Grundkörper präsentiert. Trotz komplexer Geometrie und eines 3D-FE-Modells mit über 22.000 Elementen konnte das Ratcheting-Verhalten mit akzeptablen Zeitaufwand vorausberechnet werden.

Eine Analyse aller durchgeführten Simulationen ergab, dass zur Gewährleistung einer notwendigen Genauigkeit der Berechnungsergebnisse die in einem Lastschritt akkumulierte plastische Dehnung einen Wert von 0,1 % nicht überschreiten sollte.

Mit der Simulation einer zyklisch instationären Temperaturbelastung eines dickwandigen Rohres wurden die derzeit noch bei der Berechnung von thermischem Ratcheting bestehenden Grenzen im Hard- und Softwarebereich aufgezeigt.

# Inhaltsverzeichnis

Seite

INHALTSVERZEICHNIS .....	I
SYMBOLVERZEICHNIS.....	IV
<b>1 EINLEITUNG UND MOTIVATION .....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN ZUM MATERIALVERHALTEN BEI ZYKLISCHEN BELASTUNGEN.....</b>	<b>5</b>
2.1 FESTIGKEITSNACHWEISE IM APPARATEBAU .....	5
2.2 ERMÜDUNGSVERHALTEN METALLISCHER WERKSTOFFE .....	7
2.3 PLASTISCHES MATERIALVERHALTEN ZYKLISCH BELASTETER BAUTEILE.....	8
2.4 SHAKEDOWN .....	10
2.5 RATCHETING .....	15
2.5.1 Einteilung von Ratcheting .....	15
2.5.1.1 Allgemeine Einteilung.....	15
2.5.1.2 Mechanisches Werkstoff-Ratcheting .....	17
2.5.1.3 Thermisches Ratcheting .....	18
2.5.2 Berücksichtigung von Ratcheting in den technischen Regelwerken .....	18
2.6 ZUR KLASSISCHEN THEORIE DES ELASTISCH-PLASTISCHEN MATERIALVERHALTENS.....	20
2.6.1 Voraussetzungen.....	20
2.6.2 Grundlagen der Plastizitätstheorie .....	21
2.6.2.1 Die Fließbedingung .....	22
2.6.2.2 Die Verfestigungsregeln.....	24
2.6.2.3 Das elastische Formänderungsgesetz.....	25
2.6.2.4 Die Fließregel .....	25
2.7 NICHTLINEAR KINEMATISCHE MODELLANSÄTZE.....	26
2.7.1 Allgemeine Einführung .....	26
2.7.2 Der nichtlinear kinematische Modellansatz von Ohno&Wang.....	28
2.7.2.1 Entwicklung der Evolutionsgleichung .....	28
2.7.2.2 Temperaturberücksichtigung.....	34
2.7.2.3 Isotropes Materialverhalten.....	36
2.7.2.4 Ermittlung der Modellparameter.....	36
2.7.2.5 Erfahrungen anderer Wissenschaftler mit dem Modellansatz Ohno&Wang.....	38

<b>3 DER INTEGRATIONALGORITHMUS ALS GRUNDLAGE FÜR DIE PROGRAMMIERUNG.....</b>	<b>39</b>
3.1 ENTWICKLUNG UND PROGRAMMIERUNG .....	39
3.1.1 Beschreibung des zu lösenden DGL-Systems .....	39
3.1.2 Möglichkeiten zur Lösung des Gleichungssystems.....	41
3.1.3 Der „radial return“-Algorithmus.....	42
3.1.4 Der weiterentwickelte problemorientierte Spannungsalgorithmus.....	44
3.2 PROGRAMMIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG IN ANSYS.....	47
3.3 UNTERSUCHUNG DER NUMERISCHEN EIGENSCHAFTEN DES ALGORITHMUS .....	48
3.3.1 Numerischer Iterationsfehler des Algorithmus .....	49
3.3.2 Festlegung des Iterationsabbruchkriteriums der äußeren Iteration .....	51
<b>4 VERIFIZIERUNG DES MODELLANSATZES VON OHNO&amp;WANG.....</b>	<b>53</b>
4.1 RATCHETING BEI EINACHSIGER, PROPORTIONALER BELASTUNG.....	53
4.1.1 Beschreibung der Experimente von Haupt.....	54
4.1.2 Simulation der Experimente mittels FEM .....	55
4.1.3 Besonderheiten der Lastaufgabe bei Einsatz eines nichtlinearen Werkstoffmodells.....	56
4.1.4 Einfluss unterschiedlicher Werte für die Modellparameter $m^{(k)}$ des Modellansatzes von Ohno&Wang.....	59
4.1.5 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten .....	64
4.1.6 Beurteilung der Voraussagequalität des Modellansatzes von Ohno&Wang .....	69
4.2 RATCHETING BEI ZWEIACHSIGER, NICHT-PROPORTIONALER BELASTUNG .....	74
4.2.1 Beschreibung der Experimente von Hassan et al.....	74
4.2.2 Simulation der Experimente mittels FEM .....	76
4.2.3 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten .....	78
4.2.4 Beurteilung der Voraussagequalität der untersuchten Modellansätze .....	82
<b>5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES UNTERSCHIEDLICHER HAUPTSPANNUNGSVERHÄLTNISSE AUF DAS RATCHETING-VERHALTEN .....</b>	<b>85</b>
5.1 MOTIVATION .....	85
5.2 AUFBAU DES VERSUCHSSTANDES .....	86
5.2.1 Probekörpergeometrie.....	86
5.2.2 Der eingesetzte Werkstoff 12CrMo9-10.....	88
5.2.3 Versuchsplan.....	89
5.2.4 Beschreibung des Versuchsstandes und der eingesetzten Messtechnik .....	90
5.3 AUSWERTUNG DER EXPERIMENTE .....	95
5.4 SIMULATION DER EXPERIMENTE MIT DEM MODELL VON OHNO&WANG .....	100

<b>6</b>	<b>EINSATZ DES OHNO&amp;WANG-MODELLS ZUR BERECHNUNG DES RATCHETINGS EINER BEHÄLTER-STUTZEN-VERBINDUNG.....</b>	<b>105</b>
6.1	DAS EINGESETZTE FE-MODELL .....	105
6.2	LASTAUFGABE UND SIMULATION .....	106
6.3	ERGEBNISSE DER BERECHNUNGEN .....	107
<b>7</b>	<b>HINWEISE ZUR BERECHNUNG VON RATCHETING IN DER PRAXIS .....</b>	<b>113</b>
7.1	BESTIMMUNG DER MODELLPARAMETER $H^{(k)}$ UND $R^{(k)}$ .....	113
7.2	BESTIMMUNG DER MODELLPARAMETER $M^{(k)}$ .....	114
7.3	BEGRENZUNG DER MAXIMAL IN EINEM BERECHNUNGSSCHRITT AUFTRETENDEN DEHNUNGSAKKUMULATION .....	117
<b>8</b>	<b>AUSBLICK AUF DIE BERECHNUNG VON THERMISCHEM RATCHETING.....</b>	<b>122</b>
8.1	VORAUSSETZUNGEN ZUR SIMULATION VON THERMISCHEM RATCHETING .....	122
8.1.1	<i>Bestimmung der instationären Temperaturverteilung im Bauteil.....</i>	<i>123</i>
8.1.2	<i>Werkstoffmodell zur Berechnung von thermischem Ratcheting.....</i>	<i>124</i>
8.1.3	<i>Ermittlung des Werkstoffverhaltens über den gesamten Temperaturbereich .....</i>	<i>124</i>
8.1.4	<i>Geeignete Modelle zur Beschreibung des Kriechens mittels FEM.....</i>	<i>125</i>
8.2	BERECHNUNG VON THERMISCHEM RATCHETING.....	127
8.2.1	<i>Beschreibung der simulierten Experimente.....</i>	<i>127</i>
8.2.2	<i>Ermittlung des instationären Temperaturfeldes im dickwandigen Rohr.....</i>	<i>128</i>
8.2.3	<i>Bestimmung der Temperaturfunktion <math>\Theta(T)</math>.....</i>	<i>130</i>
8.2.4	<i>Kombinierte Kriech- und Ratcheting-Berechnung.....</i>	<i>132</i>
8.2.5	<i>Simulation von thermischem Ratcheting mit dem Ohno&amp;Wang-Modell .....</i>	<i>132</i>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>141</b>

## Symbolverzeichnis

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$a$	-	Konstante in Funktionsansätzen für $\Theta(T)$
$c_1$	N/mm <sup>2</sup>	Parameter des Modells von Armstrong&Frederick
$c_2$	-	Parameter des Modells von Armstrong&Frederick
$c_{iso}$	-	Koeffizient in isotroper Verfestigung
$c_{temp}$	K	Koeffizient in der Temperaturfunktion
$d$	mm	Plattendicke im Bree-Modell
$e$	mm	Wanddicke des Probekörpers
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$f^{(k)}$	-	Grenzfläche im Modell von Ohno&Wang
$F$	N	konstante Axialkraft
$g$	-	Potentialfunktion
$G$	N/mm <sup>2</sup>	Schubmodul
$h^{(k)}$	-	Parameter des Modells von Ohno&Wang
<b>H</b>	-	Heavyside-Sprungfunktion
$\mathbf{I}_{ij}, \mathbf{I}_{ijkl}$	-	Einheitstensor 2. Ordnung, Einheitstensor 4. Ordnung
$k$	-	Konstante in Funktionsansätzen für $\Theta(T)$
$k_0$	N/mm <sup>2</sup>	Radius der Ausgangsfließfläche
$k_\infty$	N/mm <sup>2</sup>	Endwert der isotropen Verfestigung
$k(\epsilon_p)$	N/mm <sup>2</sup>	Radius der Fließfläche
$k_i^{(k)}$	-	Richtung des backstress-Terms $\alpha_{ij}^{(k)}$
$K$	N/mm <sup>2</sup>	Kompressionsmodul
$K_0$	(N/mm <sup>2</sup> ) <sup>n</sup> ·s <sup>m</sup>	Kriechkonstante bei Bezugstemperatur
$l_{krit}$	mm	kritische Abklinglänge
$m, m^{(k)}$	-	Exponent und Parameter im Modell von Ohno&Wang
$m$	1/s	Konstante im Kriechgesetz von Garofalo
$M$	-	Anzahl der backstress-Terme
$n_{ij}$	-	Normalenrichtung der Fließfläche
$Q_c$	kJ/mol	Aktivierungsenergie
$r^{(k)}$	N/mm <sup>2</sup>	Parameter des Modells von Ohno&Wang

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$R$	J/(mol·K)	allgemeine Gaskonstante
$R$	mm	mittlerer Radius des Probekörpers
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Dehngrenze
$R_{p0,2RT}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Dehngrenze bei Raumtemperatur
$R_{p0,2T}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Dehngrenze bei der Temperatur T
$R_{mT}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit bei der Temperatur T
$R_{mRT}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit bei Raumtemperatur
$s_{ij}$	N/mm <sup>2</sup>	deviatorischer Spannungstensor
$s_n$	N/mm <sup>2</sup>	deviatorischer Spannungszustand des letzten konvergenten Iterationsschrittes
$s_{n+1}^{trial}$	N/mm <sup>2</sup>	fiktiv elastischer, deviatorischer Spannungszustand
$S_m$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungsvergleichswert nach KTA
$S'_1, S'_2, S'_3$	N/mm <sup>2</sup>	Invarianten des deviatorischen Spannungstensors
$S_1, S_2, S_3$	N/mm <sup>2</sup>	Invarianten des Spannungstensors
$t$	s	Zeit
$T$	s	Zykluszeit
$\Delta T$	K	Temperaturdifferenz
$V$	mm <sup>3</sup>	Körpervolumen
$Z_T$	-	dimensionsloser Parameter des Modells von Bree
$Z_p$	-	dimensionsloser Parameter des Modells von Bree
$\alpha$	1/K	linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\alpha_{ij}$	N/mm <sup>2</sup>	total backstress Tensor
$\alpha_{ij}^{(k)}$	N/mm <sup>2</sup>	k-ter Einzelterm des total backstress Tensors
$\bar{\alpha}$	N/mm <sup>2</sup>	Betrag des backstress Tensors
$\beta$	-	Hauptspannungsverhältnis
$\delta_{ij}$	-	Kronecker-Symbol
$\epsilon_0$	%	Konstante im Kriechgesetz von Garofalo
$\epsilon_t$	%	Konstante im Kriechgesetz von Garofalo
$\dot{\epsilon}(t)$	1/s	Kriechgeschwindigkeit

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_m$	1/s	minimale Kriechgeschwindigkeit
$\boldsymbol{\epsilon}_{a,b,c}$	%	Dehnung des DMS-Messgitters a, b oder c
$\boldsymbol{\epsilon}_{I,II}$	%	Dehnung in Hauptachsenrichtung I und II
$\boldsymbol{\epsilon}_{(n)}^{pl}$	%	plastische Dehnung der n-ten Stützstelle
$d\boldsymbol{\epsilon}_p$	%	plastische Vergleichsdehnung nach Odquist
$\Delta\boldsymbol{\epsilon}_{n+1}$	%	Dehnungszunahme im aktuellen Iterationsschritt
$\boldsymbol{\epsilon}_n$	%	Dehnungszustand des letzten konvergenten Iterationsschrittes
$\boldsymbol{\epsilon}_{n+1}$	%	Dehnungszustand im aktuellen Iterationsschritt
$d\boldsymbol{\epsilon}_{ij}$	%	gesamtes Dehnungsinkrement (Tensor 2. Ordnung)
$d\boldsymbol{\epsilon}_{ij}^{el}$	%	elastischer Anteil des gesamten Dehnungsinkrementes
$d\boldsymbol{\epsilon}_{ij}^{pl}$	%	plastischer Anteil des gesamten Dehnungsinkrementes
$\varrho_{ij}$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannungszustand
$\sigma_{b,max}$	N/mm <sup>2</sup>	maximale lokale Biegespannung am Stutzen
$\sigma_F$	N/mm <sup>2</sup>	Fließspannung
$\sigma_{ax\_Grundkörper}$	N/mm <sup>2</sup>	Membranspannung des Grundkörpers in axialer Richtung
$\sigma_{I,II,III}$	N/mm <sup>2</sup>	Spannung in Hauptachsenrichtung I, II oder III
$\sigma_{(n)}$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungswert zur n-ten Stützstelle
$\sigma_{ij}^{el}$	N/mm <sup>2</sup>	elastischer Anteil des Gesamtspannungszustandes
$\boldsymbol{\sigma}_n$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungszustand des letzten konvergenten Iterationsschrittes
$\boldsymbol{\sigma}_{n+1}$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungszustand im aktuellen Iterationsschritt
$\sigma_{ij}$	N/mm <sup>2</sup>	Gesamtspannungszustand
$\lambda$	-	plastic multiplier
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\Theta(T)$	-	Temperaturfunktion für das Modell von Ohno&Wang
$\Phi$	-	Fließfunktion
$\zeta^{(k)}$	N/mm <sup>2</sup>	Quotient der Modellparameter $h^{(k)}$ und $r^{(k)}$
:		Doppelskalarprodukt