

**GEF-Schriftenreihe**

herausgegeben von der  
GEF Ingenieur AG

Band 1

**Eugen Besedin**

**Neues Berechnungskonzept  
für ausgehalste T-Stücke in der Fernwärme  
auf Basis von FEM**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1034-3

ISSN 2194-3249

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 des Herausgebers**

Seit 1984 liefert GEF Fachbeiträge, die den Stand von Wissenschaft und Technik in der Energiewirtschaftlichen Beratung und in der Fernwärmeplanung weiterentwickeln. Aufgrund der großen Nachfrage haben wir uns entschlossen, herausragende Arbeiten in der GEF-Schriftenreihe einem größeren Kreis von Interessierten zur Verfügung zu stellen.

In Band 1 veröffentlichen wir die Masterarbeit von Eugen Besedin, die bei der GEF Ingenieur AG erarbeitet, und an der Hochschule Mannheim unter dem Referat von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Weiser zur Erlangung des Grades "Master of Science (M.Sc.)" eingereicht wurde.

Leimen im April 2012

GEF Ingenieur AG  
Dr.-Ing. Andreas Schleyer  
Vorstand

## **DANKSAGUNG**

Die aufwändigen FEM-Berechnungen beim TÜV Süd wurden durch finanzielle Förderungen der KMR-Hersteller Isoplus und Logstor ermöglicht. Der Druck dieses Buches wurde von der Firma Logstor gefördert. Herausgeber und Autor bedanken sich bei den Fördermittelgebern.

GEF Ingenieur AG  
Ferdinand-Porsche-Str. 4a  
69181 Leimen  
06224/971311  
[info@gef.de](mailto:info@gef.de)  
[www.gef.de](http://www.gef.de)

# Kurzreferat

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Übertragung von FEM-Ergebnissen ausgewählter ausgehalster T-Stücke auf vielfältige Nennweitenkombinationen. Dieses Konzept stellt eine nachvollziehbare Statik-Richtlinie einer Ermüdungsanalyse dar. In den aktuellen Normen und Richtlinien sind diese T-Stücke berechenbar, aber die angestrebte Lebensdauer ist kaum nachweisbar. Der Grund dafür sind die Spannungserhöhungsfaktoren, die in aktuellen Berechnungsnormen verwendet werden, aber den Ursprung im Anlagenbau haben. Diese Berechnungen führen zu konservativen Ergebnissen. Die in dieser Arbeit erstellten Ergebnisse basieren auf detaillierten FEM-Berechnungen, in denen realitätsnahe Analysen durchgeführt werden.

Für die T-Stücke gilt der Ermüdungsnachweis für Sekundärbelastungen, der Spannungen weit über der Streckgrenze eines Stahls zulässt. Im vorliegenden Fall sind Spannungsschwingbreiten für einen Stahl P235GH von bis zu 1.785 MPa in einem niedrigen Lastwechselbereich möglich.

Durch die Analyse der T-Stücke in FEM ist es gelungen, ein Konzept zu entwickeln, mit dem man insgesamt 99 T-Stücke berechnen kann, obwohl nur 21 davon aufwendig modelliert wurden. Durch die neue Berechnungsmethode sind höhere Belastungen an den T-Stücken möglich als nach den aktuellen Berechnungsmethoden.

Die in dieser Arbeit entwickelte und für ausgehalste, dickwandige T-Stücke angewendete Methode kann in einem nächsten Schritt genutzt werden, um ähnliche Tragfähigkeitsreserven auch für Anbohr-T-Stücke und vorgefertigte 1/1-T-Stücke nachzuweisen.

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
Formelzeichen.....	IX
Begriffe und Definitionen .....	X
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Aufgabenstellung der Masterarbeit.....	2
1.3 Randbedingungen .....	3
<b>2 Analyse der bisherigen Berechnungsverfahren für T-Stücke.....</b>	<b>4</b>
2.1 Berechnung nach Markl und ASME.....	6
2.2 Berechnung nach EN 13941/AGFW.....	10
<b>3 Spannungsauswertung.....</b>	<b>14</b>
3.1 Primärspannungen .....	14
3.2 Sekundärspannungen .....	15
3.3 Definition der Lastfälle .....	15
3.4 Pfade der Spannungsauswertung .....	17
3.5 Überlagerung der Spannungstensoren .....	18
<b>4 Spannungsnachweis.....</b>	<b>20</b>
4.1 Ermittlung der Spannungsschwingbreiten aus Betriebszuständen.....	20
4.2 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl.....	21
4.2.1 Ungeschweißte Bauteilbereiche (Pfade 1-16).....	21
4.2.2 Geschweißte Bauteilbereiche (Pfade 17-32):.....	22
<b>5 Geometrien von T-Stücken.....</b>	<b>23</b>
5.1 Wanddickenoptimierung.....	23
5.2 Radien und Aushalsungshöhen.....	24
5.3 Mögliche Nennweitenkombinationen.....	26
<b>6 Parameteruntersuchung.....</b>	<b>27</b>
6.1 Abmessungen.....	28
6.2 Auswahl der T-Stücke für die FEM-Berechnung .....	29
6.3 Übertragung der Ergebnisse auf unterschiedliche Nennweitenkombinationen .....	30
6.4 Vergleich der festgelegten Geometrien mit hergestellten T-Stücken .....	32

<b>7</b>	<b>FEM-Modellierung .....</b>	<b>35</b>
7.1	Randbedingungen .....	35
7.2	Ergebniserstellung .....	37
7.3	Vergleich der auftretenden Spitzenspannungen mit den erfassten Pfaden.....	38
7.3.1	Einzelne Einheitslasten .....	38
7.3.2	Lastfallkombinationen mit realen Schnittgrößen.....	39
<b>8</b>	<b>Erstellen von Funktionen aus FEM-Ergebnissen .....</b>	<b>42</b>
8.1	Berechnung der Parabelfunktionen .....	43
8.2	Bezeichnung der Diagrammcodes .....	46
<b>9</b>	<b>Auswertung der Ergebnis-Diagramme .....</b>	<b>47</b>
9.1	Prüfung auf Symmetrie .....	48
9.2	Prüfung der Pfade mit max. Einzelspannung .....	50
9.3	Manuelle Korrektur von Funktionen.....	53
9.4	Beispielberechnung der Vergleichsspannungsschwingbreite für den Pfad 1 .....	56
<b>10</b>	<b>Nutzen der neuen Methode.....</b>	<b>61</b>
10.1	Vergleich der Spannungs-Ausnutzungen .....	61
10.2	Mögliche Abzweiglängen.....	65
<b>11</b>	<b>Implementierung in sisKMR .....</b>	<b>67</b>
11.1	Über sisKMR .....	67
11.2	Auswahl des T-Stücks in sisKMR.....	68
11.3	Belastungsschwingbreiten am T-Stück aus sisKMR-Schnittgrößen.....	69
11.4	Ermittlung der Belastungsschwingbreiten.....	71
11.5	Eingabefeld im Standardsystem T-Stück / Parallelabzweig .....	72
11.6	Ergebnisberichte.....	73
11.7	Eingabefeld Allgemeines 3D-System .....	75
11.8	Auftrag und Berechnungsart Allgemeines 3D- System .....	76
11.9	Ergebnisbericht Allgemeines 3D- System .....	77
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>78</b>
	Literaturverzeichnis .....	79

<b>Anhang A</b>	<b>Teil 1: mögliche T-Stück-Kombinationen „ausgehalst dickwandig“ .....80</b>
<b>Anhang B</b>	<b>T-Stück-Parameter mit Wanddickenverhältnissen und Lambda-Werten 82</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Auswahl von T-Stücken für die FEM-Berechnungen .....83</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Darstellung der Maße, Lastfälle und Pfade .....84</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Ausgehalstes T-Stück-Modell.....	3
Abbildung 2.1	T-Stück-Modell mit den Auswertungsstellen A, B, C, D .....	6
Abbildung 2.2:	Flexibilität am T-Stück .....	7
Abbildung 2.3:	Symbole für T-Stücke nach EN 13941 .....	10
Abbildung 2.4:	SN-Kurve für Rohre, Quelle: AGFW 401-10:2007.....	12
Abbildung 3.1:	Lastfälle am T-Stück.....	16
Abbildung 3.2:	Platzierung der 32 Pfade für die Auswertung.....	17
Abbildung 3.3:	Vergleichsspannungen im Lastfall Ng am T-Stück DN 125x100.....	18
Abbildung 5.1:	Position der bestimmten Aushalsungsradien .....	24
Abbildung 5.2:	T-Stück-Maße DN 100x65.....	25
Abbildung 5.3:	Modelle hergestellter ausgehalster dickwandiger T-Stücke (LOGSTOR) ..	26
Abbildung 6.1:	mittragende Breite b .....	28
Abbildung 6.2:	Spannungsbeiwert „Alpha“ für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck.....	31
Abbildung 6.3:	Vergleich der Wanddicke am Stutzen .....	32
Abbildung 6.4:	Vergleich der Radien in Achsrichtung .....	33
Abbildung 6.5:	Vergleich der Radien 90° zur Achsrichtung.....	33
Abbildung 6.6:	Beispielergebnis der Messungen am T-Stück DN 125x100.....	34
Abbildung 7.1:	Isometrische Volumendarstellung eines T-Stücks DN 100x50.....	35
Abbildung 7.2:	Lastanbringung.....	36
Abbildung 7.3:	Lastfälle am T-Stück.....	37
Abbildung 7.4:	Einbausituation des T-Stücks für Ermittlung der Schnittgrößen .....	40
Abbildung 7.5:	FEM-Ergebnis mit realen Belastungsschwingbreiten am T-St. DN 250x125.....	41
Abbildung 8.1:	Spannungspunkte aus FEM-Ergebnissen von 21 T-Stücken.....	44
Abbildung 8.2:	Aus Abbildung 8.1 erstellte Funktionen .....	44
Abbildung 9.1:	Ergebnis-Diagramme der Symmetrieprüfung .....	49
Abbildung 9.2:	Darstellung des Lastfalls Mos und der Schubspannung $\tau_{yz}$ am T-Stück ....	54
Abbildung 9.3:	Vorzeichenwechsel im Diagramm .....	54
Abbildung 9.4:	Korrektur eines Vorzeichenwechsels .....	55
Abbildung 10.1:	Einbausituation des T-Stücks für Ermittlung der Schnittgrößen .....	61
Abbildung 10.2:	Mögliche Abzweiglänge am T-Stück DN 100x65 .....	66
Abbildung 10.3:	Mögliche Abzweiglänge am T-Stück DN 100x20 .....	66
Abbildung 11.1:	Ausschnitt aus dem sisKMR-Ergebnis Lastfall 1, warm .....	70
Abbildung 11.2:	Ausschnitt aus dem sisKMR-Ergebnis Lastfall 2, kalt .....	70
Abbildung 11.3:	Ausschnitt aus dem Ergebnisbericht .....	73
Abbildung 11.4:	Kapitel 2.4 am Ende des Berichts .....	74



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Spannungserhöhungsfaktoren für unterschiedliche T-Stück-Bauarten .....	8
Tabelle 2.2:	Vollastwechselzahlen von erdverlegten Fernwärmeleitungen.....	9
Tabelle 2.3:	Spannungserhöhungsfaktoren für Membranspannungen in Punkt B.....	11
Tabelle 2.4:	Spannungserhöhungsfaktoren für resultierende Spannungen in Punkt B..	11
Tabelle 4.1	Zulässige Spannungsschwingbreiten für unterschiedliche Vollastwechselzahlen .....	22
Tabelle 5.1:	Wanddicken von T-Stücken und Anschlußrohren .....	23
Tabelle 5.2:	Wanddicken und Aushalsungshöhen der T-Stücke.....	25
Tabelle 5.3:	Mögliche Nennweitenkombinationen T-Stück ausgehalst dickwandig .....	27
Tabelle 6.1	Ausgewählte T-Stücke für die Untersuchung .....	30
Tabelle 7.1:	Erfasste Vergleichsspannung bei einzelnen Einheitslasten am T-St. DN 250x125.....	38
Tabelle 7.2:	Vergleichsspannungsschwingbreite bei realen Lasten am T-St. DN 250x125.....	40
Tabelle 7.3:	Ergebnisse von unterschiedlichen Lastfallkombinationen .....	42
Tabelle 9.1:	Berechnete T-Stücke sortiert nach $s_A/s_H$ .....	47
Tabelle 9.2:	Übersicht der Prüfungen auf Symmetrie .....	48
Tabelle 9.3:	Zusammenfassung der Pfade mit maximaler Spannung bei einem einzelnen Lastfall. Hervorhebung der einzelnen Spannungen mit dem größten Betrag.....	50
Tabelle 9.4	Zusammenfassung der Pfade mit maximaler Spannung bei einem einzelnen Lastfall. Hervorhebung der Einzelspannungen mit dem größten Einfluss auf die Vergleichsspannung. ....	52
Tabelle 9.5	Tabelle mit Randbedingungen (Ausschnitt).....	55
Tabelle 9.6:	Ergebnisse der realen Lasten am T-Stück .....	57
Tabelle 9.7:	Ermittelte Funktionen.....	58
Tabelle 9.8:	Ergebnisse der Spannungen für Pfad 1 an der Innenseite des T-Stücks...	59
Tabelle 10.1:	Vergleich der Ausnutzungen nach ASME und FEM.....	63

## Abkürzungsverzeichnis

AGFW	Arbeitsgemeinschaft Fernwärme
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
DN	Nennweite
FDBR	Fachverbandes Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau
FEM	Finite Elemente Methode
FP	Festpunkt
FSE	Freies Systemende
KMR	Kunststoffmantelrohr
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LCF	Low Cycle Fatigue
LF	Lastfall
Mig	Moment in plane Grundrohr
Mis	Moment in plane Stutzen
Mog	Moment out of plane am Grundrohr
Mos	Moment out of plane am Stutzen
Mtg	Moment Torsion am Grundrohr
Mts	Moment Torsion am Stutzen
NFP	Natürlicher Festpunkt
Ng	Normalkraft am Grundrohr
Ns	Normalkraft am Stutzen
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
Qig	Querkraft in plane am Grundrohr
Qis	Querkraft in plane am Stutzen
Qog	Querkraft out of plane am Grundrohr
Qos	Querkraft out of plane am Stutzen
TG	T-Stück im Grundrohrbereich
TT	T-Stück im Stutzenbereich
WRC	Welding Research Council

## Formelzeichen

b	mittragende Breite bei Verschwächung durch Ausschnitte	$\tau_{xy}(S_{xy})$	Schubspannung in xy-Ebene
E	Elastizitätsmodul	$\tau_{yz}(S_{yz})$	Schubspannung in yz-Ebene
i	Spannungserhöhungsfaktor	$\tau_{xz}(S_{xz})$	Schubspannung in xz-Ebene
M	Biegemoment	$S_c$	Zulässige Spannung im Lastfall kalt
D	Rohrdurchmesser außen	$S_h$	Zulässige Spannung im Lastfall warm
d	Rohrdurchmesser innen	T	Temperatur
$d_{Am}$	Mittlerer Rohrdurchmesser am Stutzen/Abzweig	$T^*$	Berechnungstemperatur für Wechselbeanspruchung
$d_{Hm}$	Mittlerer Rohrdurchmesser am Stutzen/Abzweig	u, v, w	lokale Richtungen am Rohr
$f_O$	Kerbwirkfaktor der Oberflächenrauheit	x, y, z	Globale Richtungen
$f_{T^*}$	Temperatureinflussfaktor	$\alpha$	Spannungsbeiwert nach KTA
G	Schubmodul	$\square$	Neigungswinkel eines Abzweigs
I	Flächenträgheitsmoment 2. Grades	$2\sigma_{a,zul}$	zulässige Vergleichsspannungsschwingbreite
ke	Vergrößerungsfaktor für mechanische Spannungen im überelastisch beanspruchten Bereich	$2\sigma_v$	Vergleichsspannungsschwingbreite
N	Anzahl der Volllastwechsel	$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
$N_s$	Axialkraft am freien Stutzenende	$\sigma_{ges}$	Spannungstensor
$N_g$	Axialkraft am freien Grundrohrende	$\sigma_v$	Vergleichsspannung
p	Innendruck	$\lambda$	Schalenparameter für Affinitätsbedingungen
Q	Querkraft	$\gamma_{fat}$	Zeitsicherheit gegen Ermüdung
R	Radius	$\nu$	Querkontraktionszahl
$R_{P0,2}$	Streckgrenze	$\tau$	Schubspannung
$R_m$	Zugfestigkeit		
$s_A$	Wanddicke am Stutzen		
$s_H$	Wanddicke am Grundrohr		
$\sigma_x(S_x)$	(Normalspannung in x-Richtung)		
$\sigma_y(S_y)$	Normalspannung in y-Richtung		
$\sigma_z(S_z)$	Normalspannung in z-Richtung		

# Begriffe und Definitionen

## **Gleitbereich**

Unter dem Gleitbereich versteht man den Bereich, in welchem die Wärmedehnungen (Dehnung = Verschiebungsänderung pro Längeneinheit) größer sind als die Stauchungen aus Reibungs- und Bettungskräften, d. h. das Rohr verschiebt sich in Richtung der Dehnzonen. Die Länge dieses Bereiches ist die Gleitbereichslänge  $l_0$ .

## **Haftbereich**

Im Haftbereich heben sich die Dehnungen aus Wärme und die Stauchungen aus Reibungs- und Bettungskräften gegenseitig auf, d. h. das Rohr bleibt in Ruhe.

## **Kunststoffmantelrohr (KMR)**

Ein KMR besteht aus einem Mediumrohr aus Stahl, das mit einer Dämmung aus Polyurethan-Hartschaumstoff und einem Polyethylen-Mantel werkmäßig umhüllt ist.

## **Low Cycle Fatigue (LCF)**

Da die Lastwechselzahlen im Fernwärmebetrieb (Teillastwechsel umgerechnet auf Vollastwechsel) in der Regel unter  $N=1000$  liegen, spricht man von Ermüdung im Niedrig-Lastwechselbereich.

## **Spannungsschwingbreite**

Für den Ermüdungsnachweis wird die Spannungsschwingbreite benötigt. Die Spannungsschwingbreite ist die Differenz der Spannungen zwischen dem Betriebszustand „warm“ und dem Betriebszustand „kalt“ nach dem ersten Hochfahren.