

Festigkeitsmäßige Auslegung von geschweißten Kunststoffkonstruktionen unter Berücksichtigung von Qualitätsmerkmalen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vom Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Lietzmann

aus

Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Januar 2004

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Weiß

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Künne

Dortmund 2004

Berichte aus dem Apparatebau

Andreas Lietzmann

**Festigkeitsmäßige Auslegung von geschweißten
Kunststoffkonstruktionen unter Berücksichtigung
von Qualitätsmerkmalen**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2451-3

ISSN 1437-7667

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Stipendiat der Graduiertenförderung des Landes Nordrhein-Westfalen sowie als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau des Fachbereiches Bio- und Chemieingenieurwesen an der Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Weiß für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit, seine stete Diskussionsbereitschaft, die wertvollen Hinweise, die kritische Durchsicht und seinen persönlichen Einsatz zur Schaffung einer Arbeitsumgebung, in der ich gerne tätig war.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Künne möchte ich für sein Interesse an der Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferates danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fahlenkamp und Herrn Prof. Dr. rer. nat. U. Köster danke ich für Ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau danke ich herzlich für das stets angenehme Arbeitsklima, ihre Hilfsbereitschaft und die gute Zusammenarbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken, die mir das Studium und diese Arbeit ermöglicht hat.

Abstract

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur festigkeitsmäßigen Dimensionierung und Qualitätssicherung von geschweißten Kunststoffkonstruktionen.

Im ersten Teil der Arbeit wird das Materialverhalten der thermoplastischen Kunststoffe dargestellt. Die Ausführungen umfassen die Morphologie, das Schädigungsverhalten und den Einfluss von Medien auf die Langzeitfestigkeit. Experimentelle Methoden zur Ermittlung des Festigkeitsverhaltens werden zusammenfassend dargestellt und kritisch bewertet. Empfehlungen zur optimalen Werkstoffauswahl werden abgeleitet.

Zur Darstellung des Festigkeitsverhaltens von Kunststoffschweißverbindungen werden die im Apparate- und Rohrleitungsbau vorteilhaft einsetzbaren Schweißverfahren mit den festigkeitsrelevanten Randbedingungen beschrieben. Die Ausführungen beinhalten die zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfverfahren für Kunststoffschweißnähte mit einer Bewertung der Nachweisgüte und Aussagefähigkeit. Ausgehend vom Schädigungsverhalten von Schweißnähten bei ein- und mehrachsiger Beanspruchung wird eine neue Bewertungsmethodik abgeleitet, die in einen Nachweis ungeschweißter Bereiche (Nu), einen Nachweis der Schweißnähte gegen Mikrokerben und Bindefehler (Nfl) sowie einen Nachweis gegen die thermische Schädigung des Werkstoffs durch den Schweißprozess (Nfth) aufgeteilt ist. Hinweise zur werkstoffgerechten konstruktiven Ausführung und Fertigung vervollständigen die Ausführungen.

Ausgehend von dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten der polymeren Werkstoffe werden Ansätze zur rechnerischen Beschreibung des zeitabhängigen Verhaltens diskutiert. Durch einen neuartigen Ansatz gelingt es, das nichtlinear-viskoelastische Materialverhalten der Thermoplaste in der Beanspruchungsbewertung durch werkstoffspezifische Faktoren abzubilden. Die Beanspruchungsermittlung kann dadurch näherungsweise auf eine linear-viskoelastische Berechnung reduziert werden.

Die Anwendung der erarbeiteten neuen Nachweisführung wird am Beispiel des stehenden, runden Kunststofftanks dargestellt. Durch detaillierte FE-Berechnungen werden dabei funktionale Abhängigkeiten im Festigkeitsverhalten nachgewiesen, die durch die bisher im Stand der Technik beschriebenen Methoden der Beanspruchungsermittlung nicht erfasst werden. Optimale Konstruktionsformen sind dadurch ableitbar.

Zur Dimensionierung von Kunststoffkonstruktionen in der betrieblichen Praxis wird eine Methodik erarbeitet, wie sich die Ergebnisse detaillierter FE-Reihenuntersuchungen mittels üblicher Bürosoftware in qualitätsgesicherte Berechnungsblätter umsetzen lassen.

Der Auslastungsgrad und das Sicherheitsniveau von Druckkomponenten aus polymeren Werkstoffen kann auf der Basis der Untersuchungsergebnisse erhöht werden.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Formelzeichen	VIII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Einflussfaktoren auf den Schädigungsvorgang	4
3 Morphologie	7
3.1 Amorphe Thermoplaste	7
3.2 Teilkristalline Thermoplaste	7
3.3 Einfluss der Halbzeugherstellung auf die Morphologie	8
4 Schädigungs- und Festigkeitsverhalten	10
4.1 Grundsätze beim Konstruieren mit metallischen Werkstoffen	10
4.2 Zur Rissbildung bei Thermoplasten	11
4.3 Messverfahren zur Ermittlung von Dehngrenzen	13
4.4 Zeitstandfestigkeit von Kunststoffen	14
4.5 Einfluss der Betriebsmedien auf die Zeitstandfestigkeit	16
4.6 Testmethoden zur Ermittlung des Medieneinflusses	18
5 Schweißen von Kunststoffen	22
5.1 Allgemeine Anmerkungen	22
5.2 Schweißen metallischer Werkstoffe im Vergleich	22
5.3 Einflussfaktoren der Kunststoffschweißung	23
5.3.1 Plastifizierte Kontaktflächen	23
5.3.2 Schweißdruck	24
5.3.3 Zeit	24
5.3.4 Sauberkeit	25
5.3.5 Kerben	25
5.4 Schweißverfahren für Kunststoffe	26
5.4.1 Warmgasziehschweißen	26
5.4.2 Warmgasextrusionsschweißen	28
5.4.3 Heizelementstumpfschweißen	29
5.4.4 Heizwendelmuffenschweißen	31
5.5 Morphologie bei Schweißnähten	32

5.6	Schädigungsverhalten von Kunststoffschweißnähten	34
5.6.1	Schädigungsverhalten bei einachsigen Spannungszuständen	34
5.6.1.1	Stumpfnähte	34
5.6.1.2	Kehlnähte	35
5.6.2	Schädigungsverhalten bei zweiachsigen Spannungszuständen	37
5.6.3	Konsequenzen für die Nachweisführung	38
5.7	Überblick über verfügbare Langzeit-Schweißfaktoren	38
5.8	Prüfung von Kunststoffschweißverbindungen	39
5.8.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	40
5.8.2	Zerstörende Prüfverfahren	42
5.9	Empfehlungen zur Schweißnahtfertigung und Konstruktion	43
6	Spannungs-Dehnungs-Verhalten polymerer Werkstoffe	45
6.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten metallischer Werkstoffe im Vergleich	45
6.2	Spannungs-Dehnungs-Verhalten polymerer Werkstoffe	46
6.3	Mathematische Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens	49
6.4	Berücksichtigung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei Festigkeitsnachweisen von Thermoplasten	52
6.5	Einfluss der Querkontraktionszahl	56
6.6	Resümee zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten	57
7	Festigkeitsnachweis für Thermoplaste	58
7.1	Festigkeitsnachweis metallischer Werkstoffe	58
7.1.1	Design by Rule	58
7.1.2	Design by Analysis	58
7.2	Festigkeitsnachweis für Thermoplaste – Stand der Technik	59
7.2.1	Festigkeitshypothese	60
7.2.1.1	Spannungsbasierter Nachweis	60
7.2.1.2	Dehnungsbasierter Nachweis	61
7.2.2	Zeitstandfestigkeit K	62
7.2.3	Langzeit-Schweißfaktoren f_l	62
7.2.4	Abminderung spezifische Zähigkeit A_1	62
7.2.5	Abminderung Medieneinfluss A_{2K}	64
7.2.6	Schadensakkumulation	65
7.3	Der modifizierte Festigkeitsnachweis für Thermoplaste	65

8	Zur Methodik der Beanspruchungsermittlung	68
8.1	Allgemeine Anmerkungen	68
8.2	Spannungsermittlung bei FE-Analysen	69
8.2.1	Globale Spannungen	69
8.2.2	Strukturspannungen	70
8.2.3	Kerbspannungen	71
8.3	Elementansatzfunktion	72
8.4	Singularitäten	73
8.5	Eignung von Schalenelementen	75
8.6	Elementierung	76
8.7	Berechnung der ersten Hauptspannung	77
9	Anwendung des Konzeptes auf Konstruktionselemente eines stehenden kreiszyllindrischen Tanks	82
9.1	Die Konstruktion und Fertigung der Tanks	82
9.2	Die kaltverformte Zylinderschale	83
9.3	Wanddickensprung	85
9.4	Der Boden/Zylinder-Übergang	86
9.4.1	Zur Modellbildung	87
9.4.2	Ergebnisse der Untersuchungen	88
9.4.3	Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik	92
9.5	Ausschnittsberechnung	93
9.5.1	Ausschnittsberechnung bei metallischen Werkstoffen	94
9.5.2	Ausschnittsberechnung bei thermoplastischen Werkstoffen	96
9.5.3	Das FEM-Modell	97
9.5.4	Ergebnisse der Berechnungen	98
9.5.5	Alternative Konstruktionsformen	101
10	Beispielhafte Auswertung der Festigkeitsanalyse für eine Tankkonstruktion hinsichtlich der Nutzung für die Berechnungspraxis	106
11	Zusammenfassung und Ausblick	111
12	Literaturverzeichnis	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einflussfaktoren auf den Schädigungsvorgang im Kunststoffapparat- und Rohrleitungsbau	5
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Sphärolithen	8
Abbildung 4-1: Modellvorstellung zum Crazing bei sphärolithischer Morphologie	11
Abbildung 4-2: Scherbandbildung bei Thermoplasten	12
Abbildung 4-3: Zeitstandfestigkeitsdiagramm für PE-HD	15
Abbildung 4-4: Schädigungsvorgang durch Erweichen	17
Abbildung 4-5: Ermittlung des Medieneinflusses auf das Zeitstandverhalten von Kunststoffen	20
Abbildung 5-1: Warmgasziehschweißen - Aufbau der Naht und schematische Darstellung des Verfahrens	26
Abbildung 5-2: Warmgasextrusionsschweißen - Aufbau der Naht und schematische Darstellung des Verfahrens	29
Abbildung 5-3: Heizelementstumpfschweißen - Schematische Darstellung des Verfahrens	30
Abbildung 5-4: Heizwendelmuffenschweißen - Schematische Darstellung des Verfahrens	31
Abbildung 5-5: Temperaturverlauf beim Schweißen von Kunststoffen	32
Abbildung 5-6: Fließrichtung beim Schweißen von Thermoplasten	33
Abbildung 5-7: Bestimmung von Schweißfaktoren bei Kunststoffen	34
Abbildung 5-8: Festigkeitsverhalten von Kehlnähten	36
Abbildung 5-9: Schädigungsverhalten von Schweißnähten bei zweiachsigen Spannungszuständen	37
Abbildung 6-1: Spannungs-Dehnungs-Verhalten metallischer Werkstoffe	45
Abbildung 6-2: Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines polymeren Werkstoffs	46
Abbildung 6-3: Dehnungsverhalten bei konstanter Last (Retardation)	47
Abbildung 6-4: Spannungsverhalten bei konstanter Dehnung (Relaxation)	48

Abbildung 6-5:	Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm für das Retardationsverhalten	49
Abbildung 6-6:	Feder und Dämpfer zur mathematischen Beschreibung der Viskoelastizität	50
Abbildung 6-7:	Bewertung von Biegespannungen bei metallischen Werkstoffen und bei Thermoplasten	52
Abbildung 6-8:	Kraft und Momentaufgabe bei den FE-Berechnungen	54
Abbildung 6-9:	Grenzzustand bei gleichzeitiger Wirkung von Kraft und Moment	55
Abbildung 6-10:	Maximale Hauptspannung σ_1 in der Schweißnaht in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl	56
Abbildung 8-1:	Methoden zu Strukturspannungsermittlung: a) realer Verlauf an der Bauteiloberfläche, b) Extrapolation (Hot-Spot), c) Linearisierung mittels Pfadauswertung	70
Abbildung 8-2:	Abweichungen von Biegespannung und Maximalspannung für einen beidseitig eingespannten Balken	73
Abbildung 8-3:	Beispielhafte Darstellung von Singularitäten	74
Abbildung 8-4:	Relevante Auswertepunkte zur Ermittlung der Beanspruchungen einer geschweißten Kunststoffkonstruktion	79
Abbildung 9-1:	Spannungserhöhungsfaktoren am Waddickensprung, Auswertung für s_{M1} mit σ_N nach Gleichung (9-4), $\sigma_m + \sigma_b$	86
Abbildung 9-2:	Konstruktion der Boden/Zylinder-Verbindung bei stehenden, runden Kunststofftanks	87
Abbildung 9-3:	Verformung der Boden/Zylinderverbindung bei Flüssigkeitsfüllung	89
Abbildung 9-4:	Spannungserhöhungsfaktoren für die Boden/Zylinderverbindung, $\sigma_m + \sigma_b$, $H/D_M = 1$, $a = 0,7 \cdot s_B$, Geometrieinfluss	90
Abbildung 9-5:	Spannungserhöhungsfaktoren für die Boden/Zylinderverbindung, $H/D_M = 1$, $\sigma_m + \sigma_b$, Einfluss der Nahtgeometrie	91
Abbildung 9-6:	Konstruktionsformen für Stutzeinschweißungen	93
Abbildung 9-7:	Definition der Flächen beim Flächenvergleichsverfahren	95

Abbildung 9-8: Spannungserhöhungsfaktoren für den durchgesteckten Stutzen nach Abbildung 9-6 a, $s_M/D_M = 0,002$, $D_S/D_M = 0,05$, $a = 0,7 \cdot s_S$, $\sigma_m + \sigma_b$	98
Abbildung 9-9: Spannungserhöhungsfaktoren für den durchgesteckten Stutzen nach Abbildung 9-6 a, $s_M/D_M = 0,002$, $a = 0,7 \cdot s_S$, $\sigma_m + \sigma_b$	100
Abbildung 9-10: Vergleich der Schweißnahtbeanspruchungen für den durchgesteckten Stutzen nach Abbildung 9-6 a (100%) und b, $D_S/D_M = 0,05$, $a = 0,7 \cdot s_S$, $\sigma_m + \sigma_b$	101
Abbildung 9-11: Alternative Konstruktionsformen für die Stutzen/Zylinderverbindung, a) durchgesteckter Stutzen, b) durchgesteckter Stutzen mit scheibenförmiger Verstärkung, c) wie b und zusätzlicher Kehlnaht an Schweißnahtwurzel	101
Abbildung 9-12: Spannungserhöhungsfaktoren für den durchgesteckten, einseitig eingeschweißten Stutzen, $\sigma_m + \sigma_b$	103
Abbildung 9-13: Spannungserhöhungsfaktoren für den durchgesteckten, einseitig eingeschweißten Stutzen mit scheibenförmiger Verstärkung, $\sigma_m + \sigma_b$	104
Abbildung 9-14: Spannungserhöhungsfaktoren für den durchgesteckten, einseitig eingeschweißten Stutzen mit scheibenförmiger Verstärkung und zusätzlicher Kehlnaht auf der Innenseite, $\sigma_m + \sigma_b$	105
Abbildung 10-1: Methoden der FEM-gestützten Nachweisführung	107
Abbildung 10-2: Beispiel eines Berechnungsblattes für die betriebliche Praxis	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	Langzeit-Schweißfaktoren	39
Tabelle 6-1:	β_M und $\beta_{M/F}$ für Thermoplaste	54
Tabelle 7-1:	Grenzdehnungen ε_{Fzg} für Thermoplaste	61
Tabelle 7-2:	Kerbschlagzähigkeiten nach ISO 179 in KJ/m ² für U-Kerbe und V-Kerbe (Werte in Klammern)	63
Tabelle 9-1:	Zulässige Randfaserdehnungen ε_{Grenz} bei kaltverformten Zylinderschalen	84

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	/	Spannungserhöhungsfaktor
α_u	/	Spannungserhöhungsfaktor für ungeschweißten Bereich
α_{fl}	/	Spannungserhöhungsfaktor für in die Ebene senkrecht zur Schweißrichtung projizierte Hauptspannungen
α_{fth}	/	Spannungserhöhungsfaktor für Spannungen im thermisch geschädigten Bereich
α^M	/	Durch lineare Interpolation für Parameter ψ_i berechneter Spannungserhöhungsfaktor
α^O	/	Oberer Wert des Spannungserhöhungsfaktors für zwei beieinander liegende Parametersätze
α^U	/	Unterer Wert des Spannungserhöhungsfaktors für zwei beieinander liegende Parametersätze
β	/	Berechnungsbeiwert
β_M	/	Bewertungsfaktor für Biegespannungen
$\beta_{M/F}$	/	Bewertungsfaktor für kombinierte Biege- und Membranspannungen
ε	/	Dehnung allgemein
ε_F	/	Dehnung bei Fliessbeginn von Metallen
ε_{pl}	/	Plastische Dehnung bei Metallen
ε_{irr}	/	Irreversible Dehnung bei Kunststoffen
$\varepsilon_{F\infty}$	/	Dehngrenze bei unendlich langer Belastungszeit
ε_{Grenz}	/	Grenzdehnung für Kaltverformung
ε_{zul}	/	Zulässige Dehnung
η	Pa·s	Viskosität
φ	/	Berechnungsgröße
ν	/	Querkontraktionszahl
ρ_F	g/mm ³	Dichte des Füllmediums
σ	MPa	Spannung allgemein
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	MPa	Hauptspannungen
σ_1	MPa	Erste Hauptspannung
σ_{1_u}	MPa	Erste Hauptspannung im ungeschweißten Bereich
$\sigma_{1_{fl}}$	MPa	Maximalwert der in die Ebene senkrecht zur Schweißnahrichtung projizierten Hauptspannungen
$\sigma_{1_{fth}}$	MPa	Erste Hauptspannung im thermisch geschädigten Bereich

σ_{ax}	MPa	Axialspannung
σ_b	MPa	Biegespannung
σ_{b_u}	MPa	Biegespannung im ungeschweißten Bereich
σ_{b_ref}	MPa	Biegespannung als Referenzlösung
σ_{calc}	MPa	Berechnungsgröße einer mechanischen Beanspruchung
σ_D	MPa	Druckspannung
σ_m	MPa	Membranspannung
σ_{m_u}	MPa	Membranspannung im ungeschweißten Bereich
σ_N	MPa	Nennspannung, Bezugsspannung
σ_{max}	MPa	Maximale Knotenspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	MPa	Spannung in x-, y-, z-Richtung
σ_V	MPa	Vergleichsspannung
σ_ϕ	MPa	Umfangsspannung
$\bar{\sigma}_\phi$	MPa	Gleichmäßig verteilte Umfangsspannung
$\sigma_{\phi m}$	MPa	Membranspannung in Umfangsrichtung
$\sigma_{\phi max}$	MPa	Maximale Spannung in Umfangsrichtung
σ_{zul}	MPa	Zulässige Spannung allgemein
σ_{zul_u}	MPa	Zulässige Spannung im ungeschweißten Bereich
σ_{zul_fl}	MPa	Zulässige Spannung für die Schweißnaht beim Nachweis gegen Bindefehler
σ_{zul_flth}	MPa	Zulässige Spannung im thermisch geschädigten Bereich
$\sigma_{zul_fl_red}$	MPa	Reduzierte zulässige Spannung der Schweißnaht
τ	MPa	Schubspannung allgemein
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	MPa	Schubspannung richtungsbezogen
ψ_i	/	Parameter allgemein
ψ^U	/	Unterer Wert des Parameters, der durch eine Serienrechnung abgedeckt ist
ψ^O	/	Oberer Wert des Parameters, der durch eine Serienrechnung abgedeckt ist
ψ^M	/	Parameter der nicht durch eine Serienrechnung abgedeckt ist
ψ_{SN}	°	Winkel der Schweißnaht

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	mm	Schweißnahtdicke
a_i	%	Anteil der Zeitdauer der Einzellast an der Gesamtstandzeit
a_s	mm	Abstand der Bodenplatte zur Mitte der Stützenachse
A	%	Bruchdehnung
A_M	/	Auslastung der zulässigen Werte für Membran- spannungen
A_{M+B}	/	Auslastung der zulässigen Werte die Summe aus Membran- und Biegespannungen
A_p	mm ²	Druckbeaufschlagte Fläche bei Ausschnitten
A_σ	mm ²	Drucktragende Fläche für Ausschnitte
A_{Sp}	mm ²	Spannungsquerschnitt
A_1	/	Abminderungsfaktor für die spezifische Zähigkeit
A_{2K}	/	Abminderungsfaktor für den Einfluss des Betriebsmediums auf die Zeitstandfestigkeit
b	mm	Mittragende Breite des Mantels
b_v	mm	Breite der scheibenförmigen Verstärkung
D_M, D_{M1}, D_{M2}	mm	Außendurchmesser des Mantels
D_S	mm	Außendurchmesser des Stützens
e	mm	Wegkoordinate über der Wanddicke
E	MPa	Elastizitätsmodul
E_c	MPa	Kriechmodul
F	N	Kraft
F^{el}	N	Grenzkraft bei elastischer Rechnung
F^*	N	Grenzkraft bei nichtlinearer Rechnung
f_{CRt}	/	Zeitbezogener Einflussfaktor des Mediums
$f_{CR\sigma}$	/	Spannungsbezogener Einflussfaktor des Mediums
f_l	/	Langzeit-Schweißfaktor
f_s	/	Kurzzeit-Schweißfaktor
f_{th}	/	Faktor für die thermische Schädigung durch den Schweißprozess
f_{SN}	mm	Überhöhung der Schweißnaht
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
H	mm	Füllhöhe
h_b	mm	Höhe des Biegebalkens
h_2	mm	Höhe der unteren Schale
I	(MPa) ³	Invariante
X		

j	/	Berechnungsgröße
K	MPa	Zeitstandfestigkeit für Betriebsmedium Wasser
K_{fl}	MPa	Zeitstandfestigkeit für geschweißte Probe
K_{fth}	MPa	Zeitstandfestigkeit nach thermischer Schädigung
K_{Medium}	MPa	Zeitstandfestigkeit für Betriebsmedium
K_M	MPa	Festigkeitskennwert für metallischen Werkstoff
KV	J	Kerbschlagarbeit
K_1, K_2, K_3	(MPa) ²	Berechnungsgrößen einer orientierten mechanischen Beanspruchung
l_b	mm	Länge des Biegebalkens
l_S	mm	Mittragende Breite des Stutzens
M	N-mm	Moment
M_b	N-mm	Biegemoment
M^{el}	N-mm	Grenzmoment bei elastischer Rechnung
M^*	N-mm	Grenzmoment bei nichtlinearer Rechnung
p_F	MPa	Hydrostatischer Druck durch das Füllmedium
R_e	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2%-Dehngrenze
S	/	Sicherheitsfaktor
S_0	MPa	Berechnungsgröße einer mechanischen Beanspruchung
S_x, S_y, S_z	MPa	Berechnungsgrößen einer orientierten mechanischen Beanspruchung
S_F	/	Sicherheitsfaktor für Dehngrenze
s_B	mm	Wanddicke des Bodens
s_M, s_{M1}, s_{M2}	mm	Wanddicken des Mantels
s_S	mm	Wanddicke des Stutzens
s_V	mm	Wanddicke der scheibenförmigen Verstärkung
t	h, a	Beanspruchungszeit
t_H	min	Wärmeeinwirkungszeit (Kontaktzeit)
t_i	h	Einwirkdauer der Einzellast
t_{iB}	h	Bruchzeit bei Einwirkung der Einzellast
t_l	h	Beanspruchungszeit im Langzeitbereich
t_{Medium}	h	Beanspruchungszeit bei Einwirkung von Betriebsmedium
t_{Wasser}	h	Beanspruchungszeit bei Betriebsmedium Wasser
t_x	h	Berechnete Gesamtstandzeit

T	°C	Betriebstemperatur
T _e	°C	Erweichungstemperatur
T _G	°C	Glasübergangstemperatur
T _H	°C	Heizelementtemperatur
T _m	°C	Kristallitschmelztemperatur
U	V	Elektrische Spannung
ü	mm	Überstand am Boden
v _A	/	Verschwächungsbeiwert eines Ausschnitts
W _b	mm ³	Widerstandsmoment gegen Biegung
X ₁ , X ₂ , X ₃	(MPa) ²	Berechnungsgrößen einer orientierten mechanischen Beanspruchung
Y ₁ , Y ₂ , Y ₃	(MPa) ²	Berechnungsgrößen einer orientierten mechanischen Beanspruchung
Z ₁ , Z ₂ , Z ₃	(MPa) ²	Berechnungsgrößen einer orientierten mechanischen Beanspruchung
α-PP	/	α-Kristallform des PP
β-PP	/	β-Kristallform des PP
FNCT	/	Full Notch Creep Test
GfK	/	Glasfaserverstärkter Kunststoff
i-PP	/	Isotaktisches Polypropylen
MFR	g/min	Schmelzrate (Melt-Flow-Rate)
Nu	/	Nachweis für ungeschweißten Bereich
Nfl	/	Nachweis gegen Bindefehler der Schweißnaht
Nfth	/	Nachweis für thermisch geschädigten Bereich
OIT	min	Oxidationsinduktionszeit
PE	/	Polyethylen
PE-LD	/	Polyethylen niedriger Dichte
PE-HD	/	Polyethylen hoher Dichte
PP	/	Polypropylen
PP-B	/	Polypropylen Blockcopolymerisat
PP-H	/	Polypropylen Homopolymerisat
PP-R	/	Polypropylen Random Copolymerisat
PVC	/	Polyvinylchlorid
PVC-NI	/	Polyvinylchlorid normal schlagzäh