

# Inhalt

<b>0 Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Zusammenfassender Überblick .....	4
<b>2 Wissensstand .....</b>	<b>7</b>
2.1 Herstellung von Stahlrohrtürmen.....	7
2.2 Geometrische Imperfektionen .....	9
2.2.1 Definition.....	9
2.2.2 Baupraktische Imperfektionen und Ermüdungsschäden .....	12
2.2.3 Fertigungstoleranzen .....	15
2.2.4 Sanierungsmaßnahmen .....	17
2.3 Experimentelle Untersuchungen.....	20
2.3.1 Perfekte Flanschverbindungen .....	20
2.3.2 Imperfekte Flanschverbindungen .....	22
2.4 Theoretische Untersuchungen .....	25
2.4.1 Perfekte Flanschverbindungen .....	25
2.4.2 Imperfekte Flanschverbindungen .....	26
2.5 Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Schraubenbeanspruchung .....	28
2.5.1 Elastisches Tragverhalten .....	28
2.5.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (Traglastzustand).....	34
2.5.3 Grenzzustand der Ermüdung.....	36
2.6 Alternative Flanschverbindungen .....	39
<b>3 Vorversuche an Einschraubensegmenten .....</b>	<b>41</b>
3.1 Allgemeines.....	41
3.2 Versuchskörper und Versuchsprogramm.....	41
3.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	43
3.4 Versuchsergebnisse.....	44
3.4.1 Zugversuche an ganzen Schrauben.....	44
3.4.2 Zugversuche an L-Flansch-Segmenten.....	45

<b>4 Rohrbiegeversuche</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1 Allgemeines</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2 Versuchsprogramm</b> .....	<b>51</b>
4.2.1 Zugrundegelegte Ringflanschverbindungen .....	51
4.2.2 Versuchsparameter Flanschimperfektion .....	54
<b>4.3 Versuchskörper</b> .....	<b>55</b>
4.3.1 Herstellung der Prüfkörper .....	55
4.3.2 Begleitende Materialprüfung.....	56
4.3.3 Vermessung der Prüfkörper .....	62
<b>4.4 Versuchsaufbau</b> .....	<b>69</b>
4.4.1 Belastungsvorrichtung .....	69
4.4.2 Messeinrichtungen .....	71
<b>4.5 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>74</b>
4.5.1 Aufbringen der Vorspannung.....	74
4.5.2 Ablauf der Belastungsversuche .....	75
<b>4.6 Versuchsergebnisse</b> .....	<b>77</b>
4.6.1 Darstellung der Versuchsergebnisse.....	77
4.6.2 Messungenauigkeiten und Messfehler .....	82
4.6.3 Ergebnisse der Vorspannphase .....	83
4.6.4 Ergebnisse der Schwellbelastungsphase .....	95
4.6.5 Ergebnisse der Traglastversuche .....	116
<b>4.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Versuchen</b> .....	<b>119</b>
<b>5 Numerische Vergleichsberechnungen zu den Rohrbiegeversuchen</b> .....	<b>123</b>
<b>5.1 Grundlagen der nichtlinearen Berechnung</b> .....	<b>123</b>
<b>5.2 Aufbau des FE-Modells</b> .....	<b>127</b>
5.2.1 Elementtypen.....	127
5.2.2 Diskretisierung der Schrauben und Flansche.....	129
5.2.3 Werkstoffeigenschaften.....	134
5.2.4 Symmetrie- und Randbedingungen .....	135
5.2.5 Modellierung der Flanschimperfektionen.....	138
5.2.6 Aufbringen der Vorspannung.....	141
5.2.7 Gesamtablauf der FE-Simulation eines Rohrbiegeversuches .....	143
<b>5.3 Validierung des FE-Modells</b> .....	<b>143</b>
5.3.1 Vorspannphase .....	144
5.3.2 Schwellbelastungsphase .....	149
5.3.3 Zusammenfassung .....	156

---

<b>5.4 Weitere FE-Vergleichsberechnungen .....</b>	<b>156</b>
5.4.1 Schraubenschnittgrößen unter stetig ansteigender Rohrbiegebelastung ..	156
5.4.2 Vorspannverluste bei wiederholter Belastung .....	159
<b>5.5 Reduktion des FE-Modells .....</b>	<b>160</b>
<b>6 Numerische Parameterstudie zum Einfluss von Flanschimperfectionen .....</b>	<b>165</b>
<b>6.1 Eingangparameter .....</b>	<b>165</b>
6.1.1 FE-Modell und Randbedingungen .....	165
6.1.2 Untersuchte Flanschstöße .....	166
6.1.3 Werkstoffe .....	168
6.1.4 Imperfektionsgeometrie .....	169
6.1.5 Berechnungsaufwand .....	169
6.1.6 Beanspruchungsdaten .....	169
<b>6.2 Einfluss der Imperfektionen auf die Beanspruchungen .....</b>	<b>171</b>
6.2.1 Schraubenbeanspruchungen .....	171
6.2.2 Rohrbeanspruchungen .....	178
<b>6.3 Einfluss der Imperfektionen auf die Ermüdungsschädigung .....</b>	<b>180</b>
6.3.1 Vorgehensweise .....	180
6.3.2 Ergebnisse L-Flanschstöße .....	182
6.3.3 Ergebnisse T-Flanschstoß .....	186
<b>7 Weiterführende theoretische und numerische Betrachtungen... 189</b>	
<b>7.1 Entwicklung eines verbesserten FE-Segmentmodells .....</b>	<b>189</b>
7.1.1 Schalenverformungen bei rotationssymmetrischen Imperfektionen .....	189
7.1.2 Schalenverformungen bei nicht-rotationssymmetrischen Imperfektionen .	196
7.1.3 FE-Segmentmodell zur Erfassung von Imperfektionen .....	199
<b>7.2 Erfassung von Flanschimperfectionen in vereinfachten Berechnungsmodellen .....</b>	<b>208</b>
7.2.1 Implementierung einer Ersatzimperfektion im Berechnungsmodell nach VDI-Ri2230 .....	210
7.2.2 Zur Validierung des modifizierten VDI-Ri2230-Modells .....	211
<b>7.3 Untersuchung möglicher Teilursachen für Flanschimperfectionen .....</b>	<b>214</b>

---

<b>8 Überlegungen zur praktischen Umsetzung der Ergebnisse .....</b>	<b>219</b>
<b>8.1 Überprüfung der vereinfachten Berechnungsmodelle anhand der Versuchsergebnisse .....</b>	<b>219</b>
8.1.1 Schraubenbeanspruchung in L-Flanschstößen .....	219
8.1.2 Schraubenbeanspruchung in T-Flanschstößen .....	223
8.1.3 Traglasten von Flanschstößen .....	226
<b>8.2 Überprüfung der vereinfachten Berechnungsmodelle anhand der Ergebnisse der Parameterstudie .....</b>	<b>229</b>
8.2.1 Axialkraftfunktionen der Schrauben .....	229
8.2.2 Ermüdungsschädigungssummen der Schrauben .....	232
<b>8.3 Zum Nachweis der Ermüdungssicherheit .....</b>	<b>235</b>
<b>8.4 Zum Nachweis der Tragsicherheit .....</b>	<b>238</b>
<b>8.5 Zur Sanierung imperfekter Flanschstöße mit Hilfe von Futterblechen....</b>	<b>238</b>
8.5.1 Sanierungskonzept .....	238
8.5.2 Schraubenbeanspruchung in sanierten Flanschstößen .....	242
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>245</b>
<b>10 Literatur.....</b>	<b>249</b>