

Inhalt

Inhalt	I
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Überblick	3
2 Ringflanschverbindungen bei Stahlrohtürmen.....	5
2.1 Elastisches Tragverhalten von L-Ringflanschverbindungen.....	6
2.1.1 Schrauben-Berechnungsmodell nach Petersen	7
2.1.2 Schrauben-Berechnungsmodell nach Schmidt/Neuper	8
2.1.3 Schrauben-Berechnungsmodell in der VDI-Richtlinie 2230.....	8
2.1.4 Schrauben-Berechnungsmodell nach Seidel.....	9
2.1.5 Beanspruchung der Schweißnähte.....	10
2.2 Auslegung von L-Ringflanschverbindungen.....	10
2.2.1 Empfohlene Abmessungen.....	10
2.2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit	11
2.2.3 Grenzzustand der Ermüdung.....	13
2.3 Zur Herstellung von turmartigen Stahlbauten.....	14
2.3.1 Herstellverfahren	14
2.3.2 Herstellbedingte Imperfektionen in L-Ringflanschverbindungen.....	14
3 Grundlagen der Ermüdungsfestigkeit von Stahlkonstruktionen.....	17
3.1 Rissentstehung	17
3.2 Kerbwirkung	18
3.3 Wöhlerversuche und Wöhlerlinie.....	19
3.4 Rechnerische Verfahren für den Nachweis ausreichender Ermüdungs- festigkeit	23
3.4.1 Nennspannungskonzept.....	23
3.4.2 Strukturspannungskonzept.....	24

3.4.3	Kerbspannungskonzept	25
3.4.4	Kerbgrundkonzept	26
3.5	Ermüdung unter nichtperiodischer Beanspruchung	27
3.5.1	Auswertung von Beanspruchung-Zeit-Funktionen	27
3.5.2	Lineare Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner	28
3.6	Regelwerke zum Ermüdungssicherheitsnachweis	30
3.6.1	Normen im Bauwesen	30
3.6.2	Regelwerke und Normen im Maschinenbau	33
3.6.3	Kritische Betrachtungen zum Eurocode	34
3.7	Vergleich der Regelungen für Ringflanschverbindungen	35
3.7.1	L-Flansch als Aufschweißflansch (Anschluss der Schale mit zwei Kehlnähten)	36
3.7.2	L-Flansch als Vorschweißflansch ohne Hals (Anschluss der Schale mit K-Naht)	37
3.7.3	L-Flansch als Vorschweißflansch mit Hals (Anschluss der Schale mit Stumpfnah)	39
3.7.4	T-Flansch als Vorschweißflansch ohne Hals (Anschluss der Schale mit K-Naht)	39
3.7.5	Zusammenfassung	40
4	Berechnungen von Ringflanschverbindungen mit Hilfe der Finite- Elemente-Methode (FEM)	41
4.1	Grundlagen der FE-Berechnung	41
4.1.1	Nichtlineare Berechnungen allgemein	41
4.1.2	Das Newton-Raphson-Verfahren	42
4.2	Aufbau des FE-Modells	44
4.2.1	Verwendete Elementtypen	44
4.2.2	Diskretisierung	47
4.2.3	Werkstoffeigenschaften	48
4.2.4	Symmetrien und Randbedingungen	48
4.2.5	Berechnungsablauf	50

4.3 Validierung des FE-Modells mit Hilfe eines dokumentierten Traglastversuches	51
4.3.1 Beschreibung des Traglastversuchs.....	51
4.3.2 Vergleichsberechnungen zum Diskretisierungsgrad.....	53
4.3.3 Vergleichsberechnungen zur Schweißnahtgeometrie	56
5 Numerische Parameterstudien zur lokalen Schalenbiegebeanspruchung im Bereich einer Ringflanschverbindung.....	59
5.1 Perfekte L-Ringflanschverbindungen mit Hals	59
5.1.1 Berechnete Parametervarianten.....	59
5.1.2 Ergebnisse: Schalenbiegespannungen an der Schweißnaht.....	65
5.1.3 Ergebnisse: Ermüdungsschädigung der Schweißnaht	79
5.2 Imperfekte L-Ringflanschverbindungen mit Hals.....	87
5.2.1 Berechnete Parametervarianten.....	88
5.2.2 Ergebnisse: Schalenbeanspruchung an der Schweißnaht	91
5.2.3 Ergebnisse: Ermüdungsschädigung der Schweißnaht	103
6 Entwicklung eines vereinfachten FE-Modells für Ringflanschverbindungen.....	109
6.1 Aufbau des vereinfachten FE-Modells	109
6.1.1 Vorüberlegungen zur Modellierung.....	109
6.1.2 Einzelheiten des Modellaufbaus.....	110
6.2 Validierung des vereinfachten FE-Modells.....	112
6.2.1 Vergleich der FE-Modelle bei perfekter Ringflanschgeometrie.....	112
6.2.2 Vergleich der FE-Modelle bei imperfekter Ringflanschgeometrie	114
6.3 Beispielhafte Anwendung des vereinfachten FE-Modells: Einfluss der Hauptwindrichtung bei imperfekten L-Ringflanschverbindungen	116
6.3.1 Ergebnisse: Schalenbeanspruchung an der Schweißnaht	117
6.3.2 Ergebnisse: Ermüdungsschädigung der Schweißnaht	118

7 Dauerschwingversuche an Stumpfnähten unter besonderer Berücksichtigung einer Spannungsgradienten über die Blechdicke	121
7.1 Vorbereitung der Versuche	121
7.1.1 Prüfmaschinen und Versuchsaufbau	122
7.1.2 Fertigung der Versuchsproben	127
7.1.3 Ermittlung der Schweißnahtoberflächengeometrie	130
7.1.4 Ermittlung der mechanischen Werkstoffkenngrößen	136
7.1.5 Kalibrierung der exzentrischen Probenaufnahme	138
7.2 Durchführung der Versuche	140
7.3 Auswertung der Versuchsergebnisse.....	142
7.3.1 Lastspielzahlen	142
7.3.2 Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit	145
7.4 Ergänzende Berechnungen zur Kerbwirkung am Nahtübergang der Versuchsproben.....	147
7.4.1 Ermittlung von Kerbformzahlen mit Hilfe einer Näherungsformel	147
7.4.2 Numerische Ermittlung von Kerbformzahlen	149
7.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	153
8 Rissfortschrittsberechnungen an ausgewählten L-Ringflanschverbindungen mit Hilfe der FEM	157
8.1 Bruchmechanische Grundlagen	158
8.1.1 Rissspitzenbeanspruchung.....	158
8.1.2 Bruchkriterium und Rissfortschrittsgesetze.....	163
8.1.3 Einfluss der Mittelspannungsintensität.....	165
8.1.4 Reihenfolgeeffekte	166
8.2 Besonderheiten des verwendeten FE-Modells.....	167
8.2.1 Riss- und Kontaktelemente.....	167
8.2.2 Berechnungsaufwand	168
8.2.3 Substrukturtechnik.....	168

8.3 Ermüdungswirksame Einwirkungen	169
8.3.1 WEA-typische Beanspruchungszeitreihen.....	169
8.3.2 Extrapolation der Zeitreihen auf längere Zeiträume.....	170
8.4 Durchführung der Rissfortschrittsberechnungen	172
8.4.1 Annahmen	172
8.4.2 Berechnungsschritte	175
8.4.3 Berechnete Ringflanschverbindungen und Parametervariationen....	176
8.5 Ergebnisse der Rissfortschrittsberechnungen.....	176
8.5.1 Parameterstudie zur Berechnungstechnik und zur Bruchzähigkeit...	178
8.5.2 Perfekte Ringflanschverbindungen	181
8.5.3 Imperfekte Ringflanschverbindungen	182
8.5.4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	184
9 Zusammenfassung und Ausblick	187
Literaturverzeichnis.....	191
Normen und Richtlinien	199
Anlagen.....	203