

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XIII
Tabellenverzeichnis	XXI
Nomenklatur	XXIII
Kurzfassung	XXIX
Abstract.....	XXXI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzungen.....	2
2 Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Beschreibung von elastisch-plastischem Materialverhalten in der FEM-Berechnung	3
2.1.1 Elastisch-plastische Modellbeschreibungen	4
2.1.2 Isotropes Verfestigungsmodell.....	4
2.1.3 Kinematisches Verfestigungsmodell.....	5
2.1.4 Das Materialmodell nach Lemaitre und Chaboche von 1990 (isotrop-kinematisch)	7
2.1.5 Plastisches Fließen in dickwandigen Rohren.....	10
2.2 Kennwerte der Bruchmechanik	11
2.2.1 Das J-Integral	12
2.2.2 Der Spannungsintensitätsfaktor K.....	13
2.2.3 Schwellwerte für Spannungsintensitätsfaktoren	15
2.3 Eigenspannungen.....	16
2.3.1 Grundsätzliches zu Eigenspannungen.....	16
2.3.2 Messung von Eigenspannungen	17
2.4 Ermüdung bei Metallen	19
2.4.1 Ermüdungsversagen durch Risswachstum	19
2.4.2 Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit mit Rissfortschritt	20
2.4.3 Das Wöhlerdiagramm	21
2.5 Validierung von Berechnungsergebnissen	21
2.5.1 Grundbegriff der Validierung	22
2.5.2 Methoden zur ergebnisbezogenen Validierung von Berechnungsergebnissen	22

3	Stand der Technik	27
3.1	Hochdrucktechnik im Diesel-Einspritzsystem	27
3.2	Das Common-Rail System	27
3.3	Beschreibung des Autofrettageprozesses	30
3.4	Messung von Eigenspannungen an autofrettierten Bauteilen	32
3.5	Berechnungskonzepte zur Abschätzung der Dauerfestigkeit unter Berücksichtigung von Druckeigenspannungen	35
3.5.1	Berechnungskonzept im Druckeigenspannungsfeld aus [LEC07]	35
3.5.2	Berechnungskonzept im Druckeigenspannungsfeld aus [THU09]	39
4	Experimentelle Untersuchungen für die FEM-Berechnungen	45
4.1	Charakterisierung der Versuchswerkstoffe und der Halbzeuge	45
4.1.1	Mechanische Eigenschaften des 32MnCrMo6-4-3	47
4.1.2	Untersuchungen zum Einfluss der Fertigungsprozesse auf den Bauteilwerkstoff	48
4.2	Herstellung der Proben für die Validierung der FEM-Berechnung und zur Durchführung von Innendruckschwellversuchen	52
4.2.1	Hourglassproben und Rundzugproben aus Railrohteilen	52
4.2.2	Proben für röntgenographische Eigenspannungsmessungen	54
4.2.3	Proben für Innendruckschwellversuche	55
4.3	Identifikation der Werkstoffparameter für das isotrop-kinematische Materialmodell nach Lemaitre und Chaboche von 1990	55
4.3.1	Dehnungskontrollierte Zug-Druck-Versuche	56
4.3.2	Parameteranpassung des isotrop-kinematischen Materialmodells an die Versuchsdaten	57
4.4	Röntgenographische Eigenspannungsmessungen an Versuchsbauteilen	61
4.4.1	Messkonzept für die röntgenographischen Eigenspannungsmessungen	63
4.4.2	Ergebnisse der röntgengraphisch gemessenen Eigenspannungen	66
4.5	Innendruckschwellversuche	76
4.5.1	Auswertung der Innendruckschwellversuche	76
4.6	Fraktographische Untersuchungen an Bauteilproben aus Innendruckschwellversuchen	77
4.6.1	Analyseablauf und Präparation der fraktographischen Proben	78
4.6.2	Ergebnis der Fraktographie: Detektion von Rissstoppkonturen	80

5 FEM-Berechnungen	83
5.1 FEM-Berechnung des Autofrettageprozesses für die Validierung des isotrop-kinematischen Verfestigungsmodells	83
5.1.1 Allgemeine Beschreibung des FE-Modells für die Berechnung des Autofrettageprozesses	85
5.1.2 Plausibilitätstests bezüglich Netzfeinheit und Lagerung des Rails.....	85
5.1.3 FEM-Berechnung der Eigenspannungen mit und ohne Austrennen des Probenstücks für die Röntgenographie.....	88
5.1.4 Vergleich der Eigenspannungen nach dem Austrennen mit isotropen und isotrop-kinematischen Verfestigungsmodell.....	90
5.1.5 FEM-Berechnungen zur Überprüfung der Ausdehnung des Messflecks der Röntgenographie auf die FE-Spannungen	91
5.1.6 Bedingungen für das FE-Modell für die experimentelle Validierung ...	93
5.1.7 Vergleich der Spannungen von FE-Modell und Röntgenographie an ausgewählten Messstellen	94
5.2 Experimentelle Validierung der FEM-Berechnung des Autofrettageprozesses.....	96
5.2.1 Formulierung des Akzeptanzkriteriums für die experimentelle Validierung.....	96
5.2.2 Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Validierung	97
5.3 FEM-Berechnung des Spannungsintensitätsfaktorfeldes im Druckeigenspannungsfeld	99
5.3.1 Beschreibung des FE-Modells für die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren im Druckeigenspannungsfeld	101
5.3.2 Überprüfungen der FE-Analyse für die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors	105
5.3.3 Erstellung des Spannungsintensitätsfaktor-Feldes und Ermittlung der virtuellen Rissstoppkontur	111
5.3.4 Diskussion zum Spannungsintensitätsfaktor-Feld und den virtuellen Rissstoppkonturen	124
6 Zusammenfassung und Ausblick	133
6.1 Zusammenfassung	133
6.2 Ausblick	134
Literaturverzeichnis.....	137