

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 DANKSAGUNG</b>	<b>7</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>10</b>
<b>3 STAND DER FORSCHUNG</b>	<b>14</b>
3.1 Materialermüdung	14
3.2 Kurzzeitbeanspruchung – Schwingbeanspruchung	15
3.3 Wöhler- und Hystereseversuche	17
3.4 Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips	22
3.5 Weitere Informationen zum Stand der Forschung	24
Wöhlerversuche an Klebverbindungen und Klebstoffen	24
Hystereseemessung	25
Berechnung der Ermüdung	26
<b>4 KLEBSTOFF, FÜGETEILE UND PRÜFEINRICHTUNGEN</b>	<b>31</b>
4.1 Klebstoff	31
4.2 Verwendete Probekörper	31
4.2.1 Substanzproben	31
4.2.2 Dicke Zugscherproben	35
4.2.3 Dünnblechproben	37
4.2.4 Rohrproben	38
4.2.5 Bauteilähnliche Proben	39
4.3 Prüfmaschinen	41
4.3.1 Forschungsstelle A: IFAM	41
4.3.2 Forschungsstelle B: LWF	42
4.3.2.1 Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)	42
4.3.2.2 Quasistatische Untersuchungen	44
4.3.2.3 Schwingfestigkeitsuntersuchungen	44
4.3.2.4 Zeitstandfestigkeitsuntersuchungen	45
4.3.2.5 Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben	46
4.3.3 Forschungsstelle C: ifw	47
<b>5 VORVERSUCHE</b>	<b>51</b>
5.1 Untersuchungen zur Probenerwärmung	51
5.1.1 Substanzprobe	51
5.1.2 Dicke Zugscherprobe	51
5.2 Ringversuch	54
5.2.1 Quasistatische Beanspruchung	54
5.2.2 Schwingende Beanspruchung	56
<b>6 BESCHLEUNIGTE TESTVERFAHREN DURCH ANWENDUNG VON SUPERPOSITIONSVERFAHREN (LWF)</b>	<b>59</b>
6.1 Ermittlung von Masterkurven zur Beschreibung des Materialverhaltens	61
6.1.1 Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	61
6.1.2 Zugversuch an Klebstoffsubstanzproben	64
6.1.3 Scherzugversuch an der Dicken Scherzugprobe	71
6.1.4 Druckversuch an Klebstoffsubstanzproben	77
6.1.5 Kriechversuch an der Dicken Scherzugprobe	81
6.2 Alternative Modellierung der Geschwindigkeitsabhängigkeit: Eyring-Gleichung	83
6.2.1 Ableitung der Parameter für den Druckversuch	85

6.2.1.1	Ermittlung des Aktivierungsvolumens $U_{flow}$	85
6.2.1.2	Bestimmung der weiteren Parameter	86
6.2.2	<b>Ableitung der Parameter für den Zugversuch</b>	<b>88</b>
6.3	<b>Anwendung des Superpositionsprinzips auf schwingende Beanspruchung</b>	<b>91</b>
6.3.1	Ermittlung des Frequenzeinflusses auf die Schwingfestigkeit	91
6.3.2	Anwendung der Zeit-Temperatur-Superposition auf schwingende Beanspruchung	92
6.4	Diskussion der Ergebnisse	94
<b>7</b>	<b>LEBENSDAUERSCHÄTZUNG FÜR KLEBVERBINDUNGEN AUF GRUNDLAGE DES STRUKTURSPANNUNGSKONZEPTS (IFAM)</b>	<b>96</b>
7.1	Statistische Auswertung von Wöhlerlinien	96
7.2	Ermittlung von Wöhlerlinien an Substanzproben	98
7.2.1	Versuchsdurchführung	98
7.2.2	Ergebnisse	99
7.2.3	R-Abhängigkeit	103
7.2.4	Beschreibung des Mittelspannungseffekts	103
7.2.5	Verifikation der Mittelspannungskorrektur	107
7.3	Ermittlung von Wöhlerlinien an Klebverbindungen	108
7.3.1	Dicke Zugscherprobe P2	110
7.3.2	Doppelrohrprobe	113
7.3.3	Dünnblech-Zugscherprobe mit 12,5 und 25,0mm Überlappung	120
7.4	Methodik der Lebensdauerschätzung	124
7.4.1	FE-Modelle der Klebverbindungen	127
7.4.1.1	Geometrie	127
7.4.1.2	Ort der Spannungsauswertung	127
7.4.1.3	Vernetzung und Netzkonvergenztest	128
7.4.1.4	Krafteinleitung und Randbedingungen	131
7.4.1.5	Materialmodelle	135
7.4.2	Ergebnisse der Spannungsberechnung	136
7.4.2.1	Dicke Zugscherprobe P2	137
7.4.2.2	Doppelrohrprobe	142
7.4.2.3	Dünnblech-Zugscherprobe mit 12,5mm Überlappung	151
7.4.2.4	Dünnblech-Zugscherprobe mit 25,0mm Überlappung	155
7.4.3	Ergebnisse der Lebensdauerschätzung	160
7.4.3.1	Dicke Zugscherprobe P2	160
7.4.3.2	Doppelrohrprobe	166
7.4.3.3	Dünnblech-Zugscherprobe mit 12,5mm Überlappung	170
7.4.3.4	Dünnblech-Zugscherprobe mit 25,0mm Überlappung	176
7.5	Zusammenfassung	186
<b>8</b>	<b>ENTWICKLUNG KONTINUUMSMECHANISCHER MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DER SCHÄDIGUNGSENTWICKLUNG BEI SCHWINGENDER BEANSPRUCHUNG (IFW)</b>	<b>188</b>
8.1	Modellbildung unter schwingender Beanspruchung auf Basis des Zugsversuchs	188
8.1.1	Allgemeines	188
8.1.2	Auswertung der Kraft-Weg-Messung (Rheologische Modelle)	193
8.1.2.1	Mess- und Regelgrößen des Schwingversuchs	193
8.1.2.2	Analytische Auswertung des wechselnden Lastanteils (Hysterese)	195
8.1.2.3	Analytische Auswertung der Kriechverformung	200

8.1.2.4	Berechnung der Hystereseparameter einzelner Schwingspiele	203
8.1.2.5	Vorgehensweise zur Auswertung der einzelnen Versuche	205
8.1.2.6	Ergebnisse der Auswertung der Einzelversuche	210
<b>8.1.3</b>	<b>Auswertung der Schwingspielzahlen (Wöhler- Diagramme)</b>	<b>222</b>
8.1.3.1	Statistische Auswertung von Bruch- und Schädigungsschwingspielzahlen	222
8.1.3.2	Analytisches Modell der Wöhler-Linie für Bruch und Schädigungsbeginn	226
8.1.3.3	Analyse des Zusammenhangs von Bruch- und Schädigungsschwingspielzahl	229
8.1.3.4	Analytisches Modell der Standardabweichung	230
8.1.3.5	Methode zur konsistenten Berechnung von Bruch- und Schädigungswöhlerlinien bei beliebigen Mittelspannungen	232
8.1.3.6	Berechnung von Haigh-Kurven für Bruch und Schädigungsbeginn	237
<b>8.1.4</b>	<b>Analyse der Abhängigkeiten der Parameter der Rheologischen Modelle vom Spannungszustand und der Schwingspielzahl</b>	<b>238</b>
8.1.4.1	Vorbemerkungen	238
8.1.4.2	Regression der Parameter $W_0$ und $W_1$ des Verlaufs $W_V(N)$	240
8.1.4.3	Regression der Parameter $G_0$ und $G_1$ des Verlaufs $G(N)$	253
8.1.4.4	Auswertung der Hystereseparameter bei Schädigungsbeginn	260
8.1.4.5	Auswertung der Hystereseparameter über der Schwingspielzahl	266
8.1.4.6	Auswertung der Hystereseparameter über $\tau_a$ bei festem $N$	272
8.1.4.7	Regression der Parameter der Kriechfunktion	278
8.1.4.8	Auswertung der Kriechparameter	285
8.1.4.9	Auswertung der Kriechfunktion über der Schwingspielzahl	290
<b>8.2</b>	<b>Modellbildung unter einachsiger und kombinierter gleichfrequenter und gleichphasiger schwingender Beanspruchung auf Basis von Versuchen an stumpf geklebten Rohrproben</b>	<b>293</b>
8.2.1	Allgemeines	293
8.2.2	Auswertung der Kraft-Weg-Messung	296
8.2.2.1	Mess- und Regelgrößen des Schwingversuchs	296
8.2.2.2	Analytische Modelle zur Auswertung des wechselnden Lastanteils (Hysterese) bei mehrachsiger Beanspruchung	299
8.2.2.3	Analytisches Modell zur Auswertung der Kriechverformung bei mehrachsiger Beanspruchung	329
8.2.2.4	Auswertung von Versuchen mit Torsionsschubbeanspruchung	354
8.2.2.5	Auswertung von Versuchen mit Längskraftbeanspruchung	364
8.2.2.6	Auswertung von Versuchen mit kombinierter Beanspruchung	375
8.2.3	Auswertung der Schwingspielzahlen	387
8.2.3.1	Auswertung von Bruch- und Schädigungsschwingspielzahlen für Torsionsschubbeanspruchung	387
8.2.3.2	Auswertung von Bruch- und Schädigungsschwingspielzahlen für Längskraftbeanspruchung	394
8.2.3.3	Auswertung von Bruch- und Schädigungsschwingspielzahlen für kombinierte Beanspruchung	399
<b>8.3</b>	<b>Spannungsbezogenes Versagenskriterium für beliebige Amplituden- und Mittelspannungszustände auf Basis von gleichfrequenten und gleichphasigen Torsions- und Längskraft-Wöhlerversuchen</b>	<b>403</b>
8.3.1	Erweiterte Haigh-Diagramme für Schub- und Längsspannungsamplituden	403
8.3.2	Versagensbedingung für Spannungszustände an der Rohrprobe	407
8.3.3	Grundlagen für verallgemeinerte Versagensbedingungen	410
8.3.4	Versagensbedingung auf Basis des größten Mohrschen Spannungskreises	414
8.3.5	Versagensbedingung auf Invariantenbasis	419

8.3.6	Vorschläge zur Transformation eines beliebigen Mittelspannungszustandes auf einen Mittelspannungszustand der Rohrprobe mit gleicher Werkstoffanstrengung	423
8.4	Zusammenfassung	431
<b>9</b>	<b>VERIFIKATION AM REALBAUTEIL: T-STOß</b>	<b>436</b>
9.1	Experimentelle Untersuchungen	436
9.1.1	Untersuchungen unter quasistatischer Belastung	436
9.1.2	Untersuchungen unter zyklischer Belastung	438
9.2	Bauteilberechnung	444
9.2.1	Modellerstellung	444
9.2.1.1	Geometrie und Vernetzung	444
9.2.1.2	Randbedingungen und Krafteinleitung	449
9.2.1.3	Materialmodelle	451
9.2.2	Optimierung des Modells	451
9.2.2.1	Netzkopplung	451
9.2.2.2	Netzverfeinerung	452
9.2.3	Ergebnisse	454
9.2.3.1	Vergleich mit quasistatischen Prüfungen	454
9.2.3.2	Lebensdauerschätzung	457
9.3	Diskussion der Ergebnisse	462
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE</b>	<b>465</b>
10.1	Beurteilung der Ergebnisse der Vorversuche und der Anwendbarkeit des Zeit-Temperatur-Superpositionsverfahrens	465
10.2	Abschließende Bemerkungen zur Anwendung des Strukturspannungskonzepts für Klebverbindungen	466
10.3	Darstellung des erreichten Standes bei der Entwicklung kontinuumsmechanischer Modelle zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung bei schwingender Beanspruchung	467
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>469</b>