

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 DANKSAGUNG | 7 |
| 2 EINLEITUNG | 10 |
| 3 STAND DER FORSCHUNG | 14 |
| 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 |
| 4 KLEBSTOFF, FÜGETEILE UND PRÜFEINRICHTUNGEN | 31 |
| 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 |
| 5 VORVERSUCHE | 51 |
| 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 |
| 6 BESCHLEUNIGTE TESTVERFAHREN DURCH ANWENDUNG VON SUPERPOSITIONSVERFAHREN (LWF) | 59 |
| 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 | Ableitung der Parameter für den Zugversuch | 88 |
| 6.3 | Anwendung des Superpositionsprinzips auf schwingende Beanspruchung | 91 |
| 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 |
| 7 | LEBENSDAUERSCHÄTZUNG FÜR KLEBVERBINDUNGEN AUF GRUNDLAGE DES STRUKTURSPANNUNGSKONZEPTS (IFAM) | 96 |
| 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 |
| 8 | ENTWICKLUNG KONTINUUMSMECHANISCHER MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DER SCHÄDIGUNGSENTWICKLUNG BEI SCHWINGENDER BEANSPRUCHUNG (IFW) | 188 |
| 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 |
| 8.1.3 | Auswertung der Schwingspielzahlen (Wöhler- Diagramme) | 222 |
| 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 |
| 8.1.4 | Analyse der Abhängigkeiten der Parameter der Rheologischen Modelle vom Spannungszustand und der Schwingspielzahl | 238 |
| 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 τ_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 |
| 8.2 | Modellbildung unter einachsiger und kombinierter gleichfrequenter und gleichphasiger schwingender Beanspruchung auf Basis von Versuchen an stumpf geklebten Rohrproben | 293 |
| 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 |
| 8.3 | Spannungsbezogenes Versagenskriterium für beliebige Amplituden- und Mittelspannungszustände auf Basis von gleichfrequenten und gleichphasigen Torsions- und Längskraft-Wöhlerversuchen | 403 |
| 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 |
| 9 | VERIFIKATION AM REALBAUTEIL: T-STOß | 436 |
| 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 |
| 10 | ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE | 465 |
| 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 |
| 11 | LITERATURVERZEICHNIS | 469 |