

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 1 |
| 1.2 | Problemstellung | 4 |
| 1.3 | Lösungsansatz | 6 |
| 1.4 | Ziel der Arbeit | 9 |
| 1.5 | Gliederungsübersicht | 9 |
| 2 | Bruchmechanische Grundlagen | 11 |
| 2.1 | Vorbemerkungen | 11 |
| 2.2 | Griffithsches Reißmodell | 11 |
| 2.3 | Die drei grundlegenden Reißöffnungsarten | 13 |
| 2.4 | Der Spannungsintensitätsfaktor K | 14 |
| 2.5 | Griffith-Theorie für ideal spröde Körper | 17 |
| 2.6 | Die Energiefreisetzungsrates \mathcal{G} | 19 |
| 2.7 | Das J-Integral | 23 |
| 2.8 | Die „Compliance-Method“ | 25 |
| 3 | Das K-Konzept | 27 |
| 3.1 | Allgemeines | 27 |
| 3.2 | Reißbruchkriterien des K-Konzeptes | 28 |
| 3.2.1 | Mode-1, Mode-2 | 28 |
| 3.2.2 | Mixed-Mode | 28 |
| 3.2.3 | Aufspaltung des J-Integrals | 30 |
| 3.3 | Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren (SIF) | 32 |
| 3.3.1 | Allgemeines | 32 |
| 3.3.2 | Berechnung der SIF mit Hilfe der Finite-Elemente- Methode (FEM) | 33 |
| 3.3.2.1 | Grundlagen der FEM | 33 |
| 3.3.2.2 | Möglichkeiten zur Berechnung der SIF mit Hilfe der FEM | 38 |
| 3.3.2.3 | Energiefreisetzungsrates | 39 |
| 3.3.2.4 | J-Integral | 40 |
| 3.3.2.5 | Der Beanspruchungszustand an der Reißspitze | 42 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Konstitutive Beziehung für Holz | 45 |
| 4.1 | Voraussetzungen | 45 |
| 4.2 | Idealisierungen und Annahmen | 45 |
| 4.3 | Ebene Betrachtungen | 51 |
| 4.3.1 | ESZ in der LR-Ebene | 51 |
| 4.3.2 | ESZ in der LT-Ebene | 51 |
| 4.3.3 | EVZ in der LR-Ebene | 51 |
| 4.3.4 | EVZ in der LT-Ebene | 52 |
| 4.4 | Transformationsbeziehungen | 52 |
| 4.4.1 | Allgemeines | 52 |
| 4.4.2 | Spannungstransformation | 52 |
| 5 | Vergleichsrechnungen | 55 |
| 5.1 | Vorbemerkungen | 55 |
| 5.2 | Isotrope Werkstoffe | 55 |
| 5.2.1 | Mode-1 | 55 |
| 5.2.1.1 | Anmerkungen zur Diskretisierung | 56 |
| 5.2.1.2 | Ergebnisse nach Energiefreisetzungsrates | 59 |
| 5.2.1.3 | Ergebnisse nach J-Integral | 61 |
| 5.2.1.4 | Zusammenfassung der Ergebnisse im Mode-1 und Angaben zur Diskretisierung | 63 |
| 5.2.2 | Mode-2 und Mixed-Mode | 63 |
| 5.3 | Orthotrope Werkstoffe | 67 |
| 5.3.1 | Mode-1 | 68 |
| 5.3.2 | Mode-2 | 77 |
| 5.3.3 | Mixed-Mode | 79 |
| 6 | Entwicklung der LEFM im Holzbau | 83 |
| 6.1 | Allgemeines | 83 |
| 6.2 | Auflistung der wichtigsten Arbeiten | 84 |
| 6.3 | Zusammenfassung der Fremduntersuchungen | 110 |
| 6.3.1 | Bruchzähigkeit | 110 |
| 6.3.1.1 | Einfluß der Temperatur auf die Bruchzähigkeit | 110 |
| 6.3.1.2 | Einfluß der Probenbreite auf die Bruchzähigkeit | 110 |
| 6.3.1.3 | Einfluß der Holzfeuchte auf die Bruchzähigkeit | 111 |
| 6.3.1.4 | Einfluß der Rohdichte auf die Bruchzähigkeit | 111 |
| 6.4 | Fazit | 112 |
| 7 | Eigene Untersuchungen und Erweiterungen | 113 |
| 7.1 | Voraussetzungen | 113 |
| 7.2 | Versuchsmaterial | 116 |
| 7.3 | Bruchzähigkeit im Mode-1 | 116 |
| 7.3.1 | Vorbemerkungen | 116 |
| 7.3.2 | Untersuchungen an russischer Fichte | 117 |
| 7.3.2.1 | Auswahl und Vorbereitung der Proben | 117 |
| 7.3.2.2 | Versuchsdurchführung | 117 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 7.3.2.3 | Last-Verformungs-Kurven | 118 |
| 7.3.2.4 | Ermittlung der Darr-Rohdichte | 120 |
| 7.3.2.5 | Versuchsergebnisse | 120 |
| 7.3.2.5.1 | Zusammenhang zwischen der Darr-Rohdichte und der kritischen Last | 121 |
| 7.3.2.5.2 | Zusammenhang zwischen der Darr-Rohdichte und der Anzahl der Jahresringe | 121 |
| 7.3.2.6 | Berechnung der Bruchzähigkeit | 124 |
| 7.3.2.6.1 | Allgemeines | 124 |
| 7.3.2.6.2 | Berechnung der Bruchzähigkeit mit Hilfe der FEM | 124 |
| 7.3.2.6.3 | Berechnung der Bruchzähigkeit nach der „Compliance-Method“ | 127 |
| 7.3.2.6.4 | Bewertung | 131 |
| 7.3.3 | Untersuchungen an schwedischer Fichte | 132 |
| 7.3.3.1 | Auswahl und Vorbereitung der Proben | 132 |
| 7.3.3.2 | Versuchsergebnisse | 132 |
| 7.3.3.2.1 | Zusammenhang zwischen der Darr-Rohdichte und der Anzahl der Jahresringe | 132 |
| 7.3.3.2.2 | Abhängigkeit der kritischen Last von der Darr-Rohdichte und vom Winkel zwischen der Tangential- und Rißebeine | 133 |
| 7.3.3.3 | Berechnung der Bruchzähigkeit | 135 |
| 7.3.3.4 | Mikroskopische Untersuchung der Bruchflächen | 137 |
| 7.3.3.4.1 | Vorbemerkungen | 137 |
| 7.3.3.4.2 | Mikroskopischer Aufbau des Nadelholzes | 137 |
| 7.3.3.4.3 | Untersuchung der Bruchflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) | 141 |
| 7.3.3.4.4 | Interpretation der Versuchsergebnisse mit Hilfe der REM-Aufnahmen | 143 |
| 7.3.3.5 | Einfluß der Holzfeuchte in der LT-Ebene | 148 |
| 7.4 | Bruchzähigkeit im Mode-2 | 151 |
| 7.4.1 | Vorbemerkungen | 151 |
| 7.4.2 | Auswahl und Vorbereitung der Proben | 151 |
| 7.4.3 | Last-Verformungs-Kurven | 152 |
| 7.4.4 | Versuchsergebnisse | 153 |
| 7.4.5 | Berechnung der Bruchzähigkeit | 156 |
| 7.4.5.1 | Vorbemerkungen | 156 |
| 7.4.5.2 | Beanspruchung aus Querdruk plus Schub | 158 |
| 7.4.5.2.1 | Kenntnisstand bei „inhomogener Beanspru- chung“ | 158 |
| 7.4.5.2.2 | Kenntnisstand bei „homogener Beanspru- chung“ | 161 |
| 7.4.5.2.3 | Erweiterte Bruchhypothese | 162 |
| 7.4.5.2.4 | Berechnung der Bruchzähigkeit unter Ver- wendung der erweiterten Bruchhypothese | 165 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.5 | Abschließende Bemerkungen | 167 |
| 8 | Beanspruchung aus Querdruck plus Schub | 169 |
| 8.1 | Vorbemerkungen | 169 |
| 8.2 | Auswahl und Vorbereitung der Proben | 169 |
| 8.3 | Last-Verformungs-Kurven | 170 |
| 8.4 | Versuchsergebnisse | 172 |
| 8.5 | Berechnung der kritischen Last | 174 |
| 8.5.1 | Allgemeines | 174 |
| 8.5.2 | Abschätzung der Rißlängenkorrektur a_{pl} | 174 |
| 8.5.2.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 174 |
| 8.5.2.2 | Isotrope Werkstoffe | 175 |
| 8.5.2.3 | Orthotrope Werkstoffe | 176 |
| 8.5.3 | Ergebnisse der Berechnungen | 183 |
| 8.5.4 | Bewertung | 185 |
| 9 | Anwendungen und Ergänzungen | 187 |
| 9.1 | Vorbemerkungen | 187 |
| 9.2 | Vollholz | 188 |
| 9.2.1 | Zapfenträger | 188 |
| 9.2.1.1 | Normalzapfen | 188 |
| 9.2.1.1.1 | Versuchsergebnisse | 188 |
| 9.2.1.1.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 189 |
| 9.2.1.1.3 | Zusammenfassung | 191 |
| 9.2.1.2 | Einfluß der Zapfenhöhe ($h_z = 4cm$) | 192 |
| 9.2.1.2.1 | Versuchsergebnisse | 192 |
| 9.2.1.2.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 192 |
| 9.2.1.2.3 | Zusammenfassung | 193 |
| 9.2.1.3 | Einfluß der Zapfenlänge | 194 |
| 9.2.1.3.1 | Versuchsergebnisse | 195 |
| 9.2.1.3.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 195 |
| 9.2.1.3.3 | Zusammenfassung | 195 |
| 9.2.1.4 | Einfluß einer Zapfenbrust | 195 |
| 9.2.1.4.1 | Versuchsergebnisse | 195 |
| 9.2.1.4.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 196 |
| 9.2.1.4.3 | Zusammenfassung | 196 |
| 9.2.2 | Zapfenlochträger | 197 |
| 9.2.2.1 | Versuchsergebnisse | 197 |
| 9.2.2.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 198 |
| 9.2.2.3 | Zusammenfassung | 199 |
| 9.2.3 | Unten ausgeklinkte Träger | 199 |
| 9.2.3.1 | Versuchsergebnisse | 200 |
| 9.2.3.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 202 |
| 9.2.3.3 | Zusammenfassung | 202 |
| 9.2.3.4 | Einfluß der Holzfeuchte | 203 |
| 9.2.4 | Oben ausgeklinkte Träger | 204 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.2.4.1 | Versuchsergebnisse | 205 |
| 9.2.4.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 205 |
| 9.2.4.3 | Zusammenfassung | 206 |
| 9.3 | Brettschichtholz | 207 |
| 9.3.1 | Besonderheiten | 207 |
| 9.3.1.1 | Einfluß der Verleimung auf die Bruchzähigkeit | 209 |
| 9.3.1.2 | Einfluß einer Kerbausrundung | 211 |
| 9.3.2 | Unten ausgeklinkte Träger | 213 |
| 9.3.2.1 | Versuchsergebnisse | 214 |
| 9.3.2.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 214 |
| 9.3.2.3 | Zusammenfassung | 215 |
| 9.3.3 | Rechteckige Trägerdurchbrüche | 216 |
| 9.3.3.1 | Versuchsergebnisse | 216 |
| 9.3.3.2 | Ergebnisse der Berechnungen | 217 |
| 9.3.3.3 | Zusammenfassung | 218 |
| 10 | Schlußbetrachtung | 221 |
| 10.1 | Zusammenfassung | 221 |
| 10.2 | Ausblick | 225 |
| | Literaturverzeichnis | 227 |
| | Anhang | 240 |