

**Inhaltsverzeichnis**

**Kurzbeschreibung ..... I**

**Abstract ..... II**

**Danksagung ..... III**

**Inhaltsverzeichnis ..... 4**

**1 Einleitung ..... 9**

1.1 Verbindungen im Ingenieurholzbau .....9

1.2 Ausgangssituation .....11

1.3 Ziele und Umsetzung .....12

1.4 Stand der Forschung und Technik.....14

1.4.1 Stand der Forschung ..... 14

1.4.2 Stand der Technik ..... 19

1.4.2.1 Balkenschuhe ..... 19

1.4.2.2 Vollgewindeschrauben..... 23

1.5 Abgrenzung des Forschungsvorhabens .....24

1.6 Hochtemperatureigenschaften von Holz und Stahl .....25

**2 Eigenschaften und Tragverhalten von Haupt-Nebenträger-Verbindungen..... 29**

2.1 Balkenschuhe .....29

2.1.1 Allgemeines ..... 29

2.1.2 Eigenschaften von Balkenschuhen ..... 29

2.1.3 Eigenschaften von Balkenschuhen aus geschweißten Blechen..... 30

2.1.4 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung im Kaltbemessungsfall ..... 31

2.1.4.1 Tragverhalten ..... 31

2.1.4.2 Bemessung ..... 34

2.2 Vollgewindeschrauben .....36

2.2.1 Allgemeines ..... 36

2.2.2 Eigenschaften von Vollgewindeschrauben ..... 36

2.2.3 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung..... 37

2.2.3.1 Tragverhalten unter Raumtemperatur..... 37

2.2.3.2 Bemessung unter Raumtemperatur ..... 40

2.2.3.3 Bemessung von auf Herausziehen beanspruchte Schrauben unter  
Brandbeanspruchung..... 47

**3 Versuche zur Prüfung der temperaturabhängigen Ausziehfestigkeit von  
Vollgewindeschrauben ..... 49**

3.1 Allgemeines .....49

3.2 Notwendigkeit der Versuche .....49

3.3 Versuchsaufbau.....50

3.3.1 Prüfkörperaufbau ..... 50

3.3.2 Aufbau des Versuchstandes ..... 52

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>3.4</b> | <b>Versuchsergebnisse .....</b>   | <b>53</b> |
| 3.4.1      | Allgemeines .....   | 53        |
| 3.4.2      | Versuchsergebnisse .....  | 53        |
| <b>3.5</b> | <b>Auswertung .....</b>   | <b>56</b> |
| 3.5.1      | Auswertung der Versuchsergebnisse aus den Ausziehversuchen an<br>Vollgewindeschrauben ..... | 56        |
| 3.5.2      | Vergleich mit Versuchen an Holzbetonverbundschrauben .....                                  | 58        |
| <b>4</b>   | <b>Unbelastete Brandversuche .....</b>  | <b>62</b> |
| 4.1        | Zweck der Versuche .....  | 62        |
| 4.2        | Versuchsaufbau und -durchführung .....  | 62        |
| 4.2.1      | Aufbau des Versuchstandes für die Prüfung .....   | 62        |
| 4.2.2      | Allgemeiner Aufbau der Prüfkörper .....   | 64        |
| 4.2.2.1    | Balkenschuhe .....  | 66        |
| 4.2.2.1    | Vollgewindeschrauben .....  | 69        |
| 4.2.3      | Versuchsdurchführung .....  | 73        |
| 4.3        | Versuchsergebnisse .....  | 76        |
| 4.3.1      | Versuchsergebnisse der Balkenschuhe .....   | 76        |
| 4.3.1.1    | Prüfkörper 2 .....  | 76        |
| 4.3.1.2    | Prüfkörper 5 .....  | 77        |
| 4.3.1.3    | Prüfkörper 6 .....  | 78        |
| 4.3.1.4    | Prüfkörper 8 .....  | 79        |
| 4.3.1.5    | Prüfkörper 1, 3, 4, 7 .....   | 80        |
| 4.3.2      | Versuchsergebnisse der Vollgewindeschrauben .....   | 83        |
| 4.3.2.1    | Einfluss verschiedener Schraubenparameter .....   | 83        |
| 4.3.2.2    | Einfluss verschiedener seitlicher Randabstände bei gekreuzten<br>Vollgewindeschrauben ..... | 86        |
| 4.4        | Auswertung .....  | 91        |
| 4.4.1      | Schlussfolgerung und Empfehlungen aus Versuchsergebnissen für Balkenschuhe ..               | 91        |
| 4.4.2      | Schlussfolgerung und Empfehlung aus Versuchsergebnissen für Vollgewindeschrauben            | 92        |
| <b>5</b>   | <b>Belastete Brandversuche und zugehörige Ermittlung der Kalttragfähigkeit .....</b>        | <b>94</b> |
| 5.1        | Grundlagen .....  | 94        |
| 5.1.1      | Allgemeiner Versuchsaufbau .....  | 94        |
| 5.1.2      | Aufbau der Prüfkörper .....   | 97        |
| 5.1.2.1    | Allgemeines .....   | 97        |
| 5.1.2.2    | Holzfeuchten und Rohdichten .....   | 99        |
| 5.1.2.1    | Erforderliche Tragfähigkeiten im Brandfall und bei Normaltemperatur .....                   | 100       |
| 5.1.2.2    | Balkenschuhe .....  | 102       |
| 5.1.2.3    | Vollgewindeschrauben .....  | 103       |
| 5.2        | Ermittlung der Tragfähigkeit im Kaltzustand .....   | 105       |
| 5.2.1      | Zweck der Versuche .....  | 105       |
| 5.2.2      | Ermittlung der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit aus Versuchen .....                | 106       |
| 5.2.3      | Versuchsaufbau und -durchführung .....  | 107       |
| 5.2.3.1    | Versuchsaufbau .....  | 107       |
| 5.2.3.2    | Versuchsdurchführung .....  | 107       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.2.1    | Versuchsergebnisse und Beobachtungen .....                            | 108        |
| 5.2.1.1  | Ergebnisse Balkenschuhe .....   | 108        |
| 5.2.1.1  | Ergebnisse Vollgewindeschrauben.....                                  | 112        |
| 5.3      | Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall .....                       | 113        |
| 5.3.1    | Versuchskonzept.....  | 113        |
| 5.3.1.1  | Möglichkeiten der Lastaufbringung .....                               | 113        |
| 5.3.1.2  | Gewähltes Verfahren.....  | 115        |
| 5.3.2    | Versuchsaufbau- und Versuchsdurchführung .....                        | 115        |
| 5.3.2.1  | Aufbau des Prüfofens .....  | 115        |
| 5.3.2.2  | Eigenschaften der Prüfkörper .....                                    | 119        |
| 5.3.2.3  | Anordnung der Temperaturmessstellen in den Prüfkörpern .....          | 120        |
| 5.3.2.4  | Versuchsdurchführung.....   | 123        |
| 5.3.3    | Versuchsergebnisse und Beobachtungen Balkenschuhe .....               | 124        |
| 5.3.3.1  | Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten..... | 124        |
| 5.3.3.2  | Maximale Beanspruchbarkeiten .....                                    | 126        |
| 5.3.3.3  | Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern .....                  | 128        |
| 5.3.3.4  | Temperaturmessungen .....   | 129        |
| 5.3.4    | Versuchsergebnisse und Beobachtungen Vollgewindeschrauben .....       | 130        |
| 5.3.4.1  | Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten..... | 130        |
| 5.3.4.2  | Maximale Beanspruchbarkeiten .....                                    | 133        |
| 5.3.4.3  | Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern .....                  | 135        |
| 5.3.4.4  | Temperaturmessungen .....   | 138        |
| <b>6</b> | <b>Bewertung Schutzmaßnahmen .....</b>                                | <b>142</b> |
| 6.1      | Balkenschuhe.....   | 142        |
| 6.1.1    | Untersuchte Schutzmaßnahmen .....                                     | 142        |
| 6.1.2    | Ergebnisse.....   | 143        |
| 6.2      | Vollgewindeschrauben .....  | 144        |
| 6.2.1    | Untersuchte Schutzmaßnahmen .....                                     | 144        |
| 6.2.2    | Ergebnisse.....   | 146        |
| <b>7</b> | <b>Numerische Parameterstudien an Vollgewindeschrauben.....</b>       | <b>149</b> |
| 7.1      | Vorgehensweise .....  | 149        |
| 7.2      | Verwendete Ausgangsparameter .....                                    | 149        |
| 7.2.1    | Allgemeines .....   | 149        |
| 7.2.2    | Rohdichte .....   | 149        |
| 7.2.3    | Spezifische Wärmespeicherkapazität .....                              | 150        |
| 7.2.4    | Wärmeleitfähigkeit.....   | 151        |
| 7.2.5    | Wärmeübertragung .....  | 152        |
| 7.2.6    | Beanspruchung des Modells .....                                       | 152        |
| 7.3      | Validierung des gewählten Simulationsmodells .....                    | 153        |
| 7.3.1    | Allgemeines .....   | 153        |
| 7.3.2    | Vergleich der Schraubentemperaturen .....                             | 153        |
| 7.3.3    | Vergleich der Verkohlungstiefen .....                                 | 154        |
| 7.4      | Parameterstudien .....  | 156        |
| 7.5      | Schlussfolgerung aus den Parameterstudien .....                       | 160        |
| 7.6      | Abschätzung der Ausziehfestigkeiten .....                             | 161        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>8</b>  | <b>Bewertung und Schlussfolgerung .....</b>                               | <b>165</b> |
| 8.1       | Balkenschuhe.....   | 165        |
| 8.1.1     | Typisches Brandverhalten der Verbindungen.....                            | 165        |
| 8.1.2     | Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau .....                      | 165        |
| 8.1.3     | Bemessungsansätze .....   | 166        |
| 8.1.4     | Beurteilung von Balkenschuhen aus dicken verschweißten Stahlblechen ..... | 167        |
| 8.1.5     | Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen.....                            | 168        |
| 8.2       | Vollgewindeschrauben .....  | 169        |
| 8.2.1     | Typisches Brandverhalten der Verbindungen.....                            | 169        |
| 8.2.2     | Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau .....                      | 169        |
| 8.2.3     | Bemessungsansätze .....   | 170        |
| 8.2.4     | Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen.....                            | 171        |
| 8.2.5     | Schlussfolgerung.....   | 173        |
| <b>9</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                 | <b>177</b> |
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>179</b> |
| 10.1      | Zitierte Literatur .....  | 179        |
| 10.2      | Normen und Regelwerke, Software .....                                     | 182        |
| 10.3      | Prüfberichte zum Forschungsvorhaben .....                                 | 183        |
| <b>11</b> | <b>Anhang .....</b>   | <b>184</b> |
| 11.1      | Ausziehversuche an Vollgewindeschrauben .....                             | 184        |
| 11.1.1    | Maximale Ausziehfestigkeit.....   | 184        |
| 11.1.1.1  | Maximale Ausziehfestigkeit senkrecht zur Faser.....                       | 184        |
| 11.1.1.2  | Maximale Ausziehfestigkeit parallel zur Faser .....                       | 185        |
| 11.1.1.3  | Maximale Ausziehfestigkeit unter 45° zur Faser.....                       | 185        |
| 11.1.2    | Auswertung .....  | 186        |
| 11.1.2.1  | Senkrecht zur Faser .....   | 186        |
| 11.1.2.2  | Parallel zur Faser.....   | 187        |
| 11.1.2.3  | Unter 45° zur Faser .....   | 188        |
| 11.2      | Temperaturmesswerte Balkenschuhe.....                                     | 189        |
| 11.2.1    | Unbelastete Brandversuche.....  | 189        |
| 11.2.2    | Belastete Brandversuche .....   | 192        |
| 11.3      | Temperaturmesswerte Schrauben.....  | 195        |
| 11.3.1    | Unbelastete Brandversuche.....  | 195        |
| 11.3.2    | Belastete Brandversuche .....   | 204        |
| 11.4      | Bilder Schnitte unbelastete Brandversuchskörper.....                      | 208        |
| 11.4.1    | Schraubenverbindung 6.1- 30 Minuten .....                                 | 208        |
| 11.4.2    | Schraubenverbindung 6.3- 30 Minuten .....                                 | 209        |
| 11.4.3    | Schraubenverbindung 6.5- 30 Minuten .....                                 | 209        |
| 11.4.4    | Schraubenverbindung 12.1- 30 Minuten .....                                | 210        |
| 11.4.5    | Schraubenverbindung 12.3- 30 Minuten .....                                | 211        |
| 11.4.6    | Schraubenverbindung 12.5- 30 Minuten .....                                | 212        |
| 11.4.7    | Schraubenverbindung 6.1- 60 Minuten .....                                 | 213        |
| 11.4.8    | Schraubenverbindung 6.2- 60 Minuten .....                                 | 213        |
| 11.4.9    | Schraubenverbindung 6.3- 60 Minuten .....                                 | 214        |

|  |            |
|--|------------|
| 11.4.10 Schraubenverbindung 6.4- 60 Minuten .....              | 215        |
| 11.4.11 Schraubenverbindung 6.5- 60 Minuten .....              | 216        |
| 11.4.12 Schraubenverbindung 12.1- 60 Minuten .....             | 217        |
| 11.4.13 Schraubenverbindung 12.3- 60 Minuten .....             | 218        |
| 11.4.14 Schraubenverbindung 12.4- 60 Minuten .....             | 219        |
| 11.4.15 Schraubenverbindung 12.5- 60 Minuten .....             | 220        |
| <b>11.5 Bilder Schnitte belastete Brandversuchskörper.....</b> | <b>221</b> |
| 11.5.1 Balkenschuhe.....                                       | 221        |
| 11.5.1.1 B1.....   | 221        |
| 11.5.1.2 B2.....   | 225        |
| 11.5.1.3 B3.....   | 228        |
| 11.5.1.4 B3a.....  | 232        |
| 11.5.1.5 B4.....   | 235        |
| 11.5.2 Schrauben.....  | 239        |
| 11.5.2.1 S1.....   | 239        |
| 11.5.2.2 S2.....   | 242        |
| 11.5.2.3 S3.....   | 245        |
| 11.5.2.4 S4.....   | 248        |
| <b>11.6 Lastdiagramme Prüfungen im Kaltzustand .....</b>       | <b>252</b> |
| 11.6.1 Balkenschuhe.....                                       | 252        |
| 11.6.2 Schrauben .....   | 255        |
| <b>11.7 Lastdiagramme belastete Brandversuche .....</b>        | <b>256</b> |
| 11.7.1 Balkenschuhe.....                                       | 256        |
| 11.7.2 Schrauben .....   | 258        |
| <b>11.8 Schutzmaßnahmen .....</b>                              | <b>260</b> |
| 11.8.1 Vollgewindeschrauben.....                               | 260        |