

Inhalt

Inhalt	i
Zusammenfassung	vii
Abstract	viii
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	4
1.3 Inhaltliche Gliederung der Arbeit	5
2 Kleben im Bauwesen – Anwendungen und Forschung	8
2.1 Allgemeines	8
2.2 Brückenbau	8
2.3 Bauwerksertüchtigung mit aufgeklebten Stahl-, CFK- und GFK-Lamellen	16
2.3.1 Anwendungen	16
2.3.2 Klebstoffe	18
2.3.3 Verbundansätze	18
2.3.4 Nachweisführung	19
2.4 Strukturelles Kleben im konstruktiven Glasbau	20
2.4.1 Allgemeines	20
2.4.2 Anwendungen	20
2.4.3 Klebstoffe	24
2.4.4 Nachweisführung	26
2.5 Leichtbau	27
2.6 Verbundbau	29
2.7 Holzbau	30
2.8 Zwischenfazit	35
3 Aufbau, Eigenschaften und Auswahl von Klebstoffen	36
3.1 Allgemeines und Klassifizierung	36
3.2 Einteilung nach dem Aushärtungsmechanismus	37
3.3 Aufbau der Klebstoffe	38
3.3.1 Chemischer Aufbau der Monomere	38
3.3.2 Reaktionsmechanismen der Polyreaktion	39
3.3.3 Struktur der Polymere	39
3.4 Zweikomponentenklebstoffe	40
3.5 Klebstoffauswahl	41
3.6 Epoxidharzklebstoffe	42

3.6.1	Chemie der Epoxidharze	42
3.6.2	Additionspolymerisation von Epoxidharzen	44
3.6.3	Eigenschaften von Epoxidharzklebstoffen	45
3.7	Polyurethanklebstoffe	45
3.7.1	Chemie der Polyurethane	45
3.7.2	Additionspolymerisation von Polyurethanen	47
3.7.3	Eigenschaften von Polyurethanklebstoffen	47
3.8	Eigenschaften des untersuchten Epoxidharzklebstoffes	48
3.9	Eigenschaften des untersuchten Polyurethanklebstoffes	49
4	Mechanische Werkstoffeigenschaften der untersuchten Klebstoffe	50
4.1	Allgemeines und Grundversuche	50
4.2	Einachsige Zugversuche nach <i>DIN EN ISO 527-2</i>	51
4.2.1	Allgemeines	51
4.2.2	Versuchskörper nach <i>DIN EN ISO 527-2</i>	52
4.2.3	Durchführung der Zugversuche nach <i>DIN EN ISO 527-2</i>	52
4.2.4	Ergebnisse der Zugversuche nach <i>DIN EN ISO 527-2</i>	54
4.3	Zugscherversuche nach <i>DIN EN 14869-2</i>	57
4.3.1	Allgemeines	57
4.3.2	Versuchskörper nach <i>DIN EN 14869-2</i>	58
4.3.3	Durchführung der Zugscherversuche nach <i>DIN EN 14869-2</i>	59
4.3.4	Ergebnisse der Zugscherversuche nach <i>DIN EN 14869-2</i>	61
4.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	66
4.4	Torsionsversuche nach <i>DIN EN 14869-1</i>	67
4.5	Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern	68
4.5.1	Allgemeines	68
4.5.2	Versuchskörper der stumpf verklebten Stahlzylinder	69
4.5.3	Durchführung der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern	70
4.5.4	Ergebnisse der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern	71
4.6	Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern auf Beton	73
4.6.1	Allgemeines	73
4.6.2	Versuchskörper stumpf verklebter Stahlzylinder auf Beton	73
4.6.3	Durchführung der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern auf Beton	77
4.6.4	Ergebnisse der Zugversuche stumpf verklebter Stahlzylinder auf Beton	78
4.7	Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben	82
4.7.1	Allgemeines	82
4.7.2	Versuchskörper der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben	83
4.7.3	Durchführung der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben	87
4.7.4	Ergebnisse der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben	88
4.8	Schubversuche an geschlitzten Rohrproben	95

4.8.1	Allgemeines	95
4.8.2	Versuchskörper der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben	95
4.8.3	Durchführung der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben	97
4.8.4	Ergebnisse der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben	98
4.9	Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	101
5	Großmaßstäbliche Bauteilversuche	106
5.1	Allgemeines	106
5.2	Materialeigenschaften der Verbundpartner	107
5.2.1	Beton	107
5.2.2	Stahl	108
5.3	Push-out-Versuche	110
5.3.1	Probekörper der Push-out-Versuche	110
5.3.2	Oberflächenvorbehandlung der Versuchskörper	110
5.3.2.1	Allgemeines	110
5.3.2.2	Vorbehandlung der Betonoberflächen	111
5.3.2.3	Vorbehandlung der Stahloberflächen	112
5.3.2.4	Herstellung der Push-out-Körper	113
5.3.2.5	Materialeigenschaften der Push-out-Körper am Versuchstag	115
5.3.3	Durchführung der Push-out-Versuche	115
5.3.4	Ergebnisse der Push-out-Versuche	117
5.3.4.1	Betrachtung der Bruchbilder der Push-out-Körper	117
5.3.4.2	Auswertungen der Messungen	120
5.4	Verbundträgerversuche	122
5.4.1	Probekörper der Verbundträgerversuche	122
5.4.2	Oberflächenvorbehandlung der Versuchskörper	123
5.4.2.1	Allgemeines	123
5.4.2.2	Vorbehandlung der Betonoberflächen	123
5.4.2.3	Vorbehandlung der Stahloberflächen	124
5.4.2.4	Herstellung der Verbundträger	125
5.4.2.5	Materialeigenschaften der Verbundträger am Versuchstag	127
5.4.2.6	Momententragfähigkeiten der Verbundträger am Versuchstag	128
5.4.3	Durchführung der Verbundträgerversuche	130
5.4.4	Ergebnisse der Verbundträgerversuche	137
5.4.4.1	Betrachtung der Bruchbilder der Verbundträger	137
5.4.4.2	Auswertungen der Messungen	142
6	Mechanische Werkstoffeigenschaften von Normalbeton	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Materialverhalten und Werkstoffeigenschaften von Beton	147
6.2.1	Allgemeines	147

6.2.2	Einaxiales Materialverhalten von Beton unter Zugbeanspruchung	147
6.2.3	Einaxiales Materialverhalten von Beton unter Druckbeanspruchung	152
6.2.4	Querdehnungsverhalten von Beton	154
6.2.5	Zweiachsiges Materialverhalten von Beton	155
6.2.6	Dreiachsiges Materialverhalten von Beton	157
7	Mechanische Modelle zur Beschreibung des Klebstoffes und der Verbundpartner Stahl und Beton	160
7.1	Allgemeines	160
7.2	Elastische Modelle	161
7.3	Elastoplastische Modelle	162
7.3.1	Allgemeines	162
7.3.2	Fließtheorie (inkrementelle Plastizitätstheorie)	163
7.4	Modelle nach der Schädigungstheorie	163
7.5	Konzepte zur Rissmodellierung	164
7.5.1	Allgemeines	164
7.5.2	Diskrete Rissmodellierung	164
7.5.3	Versmierte Rissmodellierung	164
7.6	Grundlagen des ratenunabhängigen elasto-plastischen Materialverhaltens	165
7.6.1	Allgemeines	165
7.6.2	Anstrengungskriterien und Fließbedingungen	167
7.6.3	Fließflächen	168
7.6.4	Mechanische Grundlagen zur Formulierung von Anstrengungs-kriterien und Fließbedingungen	168
7.6.5	Ver- und Entfestigungsgesetz	173
7.6.6	Fließregel	176
7.6.7	Thermodynamische Grundlagen	178
7.7	Numerische Modelle und Anstrengungskriterien zur Beschreibung von Klebstoffen	182
7.7.1	Allgemeines	182
7.7.2	Allgemeine Formulierung der Spannungs-Dehnungs-Verläufe nach Schlimmer	183
7.7.3	Drucker Prager und Extended Drucker Prager	188
7.7.4	Ansatz nach Schlimmer	190
7.7.5	Interfacemodell nach Alfano und Crisfield	192
7.7.6	Ansatz zur Beschreibung der Delamination nach Ortiz und Pandolfi	197
7.8	Numerische Modelle und Anstrengungskriterien zur Beschreibung von Beton	200
7.8.1	Allgemeines	200
7.8.2	Rankine Kriterium	200

7.8.3	Zylinderpotential	201
7.8.4	Drucker Prager (DP)	201
7.8.5	Extended Drucker Prager (EDP)	202
7.8.6	Paraboloidansatz nach Chen	203
7.8.7	William und Warnke	204
7.8.8	Ottosen	206
7.8.9	Rogge	207
7.8.10	Cap-Modelle	208
7.9	Numerische Modelle und Äquipotentialbedingungen zur Beschreibung von Stahl	210
8	Modellierung des Materialverhaltens von Beton und Klebstoff	212
8.1	Allgemeines	212
8.2	Vorstellung des Materialmodells für Beton in allgemeiner Form	212
8.2.1	Grundlagen	212
8.2.2	Konstitutive Gleichungen	213
8.2.3	Fließbedingung	214
8.2.4	Approximation der Ver- und Entfestigung	218
8.2.5	Projektionsalgorithmus	219
8.2.6	Konsistente elasto-plastische Materialtangente	223
8.3	Parameteridentifikation für die untersuchten Betone	225
8.4	Modellierung des Materialverhaltens der untersuchten Klebstoffe	228
8.4.1	Allgemeines	228
8.4.2	Darstellung des Modells	228
8.4.3	Die konsistente Tangentensteifigkeit	229
8.4.4	Weitere Anpassungen	232
8.5	Überprüfung der Implementierung	234
8.5.1	Allgemeines	234
8.5.2	Vergleich mit dem Standardmodell	234
8.5.3	Berechnungen an einem Element	234
8.5.4	Fazit	236
8.6	Alternative Modellierung des Materialverhaltens der untersuchten Klebstoffe	237
8.6.1	Allgemeines	237
8.7	Parameteridentifikation für die untersuchten Klebstoffe	237
8.7.1	Allgemeines	237
8.7.2	Parameteridentifikation für den untersuchten EP-Klebstoff	239
8.7.3	Parameteridentifikation für den untersuchten PU-Klebstoff	240
9	Numerische Simulation durchgeführter Versuche	242
9.1	Allgemeines	242
9.2	Grundversuche	242

9.2.1	Allgemeines	242
9.2.2	Simulation der EP-Bulkproben	243
9.2.3	Simulation der PU-Bulkproben	246
9.2.4	Zugscherproben – EP	249
9.2.5	Zugscherproben – PU	253
9.2.6	Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern	256
9.3	Geklebte Stahl-Beton-Verbundstrukturen	259
9.3.1	Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben	259
9.3.2	Verbundträger	264
10	Zusammenfassung und Ausblick	274
	Literatur	277
	Lebenslauf	287