

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	3
1.3	Gliederung der Arbeit	5
2	Charakterisierung warmhärtender Strukturklebstoffe auf Epoxidharzbasis	7
2.1	Beschreibung und Abgrenzung der Klebstoffklasse	7
2.2	Vernetzungskinetik und physikalische Eigenschaften	9
2.2.1	Der Aushärtegrad als Größe für den Reaktionsfortschritt	9
2.2.2	Phasen und Phasenübergänge des Strukturklebstoffs	13
2.2.3	Mechanische Eigenschaften	19
3	Aspekte der Kontinuumsmechanik und Theorie der konstitutiven Gleichungen	33
3.1	Kinematik	33
3.2	Kinetik	34
3.2.1	Spannungsvektor und -tensor nach CAUCHY	34
3.2.2	Hauptspannungen und Spannungsinvarianten	34
3.2.3	Impuls- und Drehimpulsbilanz	35
3.2.4	Schwache Form des Gleichgewichts	36
3.3	Konstitutivgleichungen	36
3.3.1	Funktional der Spannung	37
3.3.2	Lineares Gedächtnisfunktional der Viskoelastizität	37
3.3.3	Elastizitätsmodell nach HOOKE	38
3.3.4	Linear viskoelastisches Modell kleiner Deformationen	38
3.3.5	Theorie der internen Variablen	39
3.4	Eindimensionale rheologische Elemente und deren Konstitutivgleichungen	39
3.5	Thermische Dehnung und chemischer Schrumpf	41
3.5.1	Thermische Dehnung	42
3.5.2	Chemischer Schrumpf	43
4	Theorie der linearen Viskoelastizität	45
4.1	Rheologische Körper der Viskoelastizität	45
4.1.1	MAXWELL-Körper	45
4.1.2	Linearer Standardfestkörper vom MAXWELL-Typ	46
4.1.3	Verallgemeinerter Festkörper vom MAXWELL-Typ	47
4.2	Einfluss der Temperatur und des Aushärtegrads	48
4.2.1	Prozessabhängige Viskositäten / Relaxationszeiten – Verschiebungsprinzip	48
4.2.2	Prozessabhängige Gleichgewichtsspannung	50
5	Stand der Technik zur Modellierung thermisch vernetzender Polymere	51

6	Konstitutivmodell für warmaushärtende Strukturlebstoffe	55
6.1	Motivation am rheologischen Netzwerk	55
6.1.1	Viskoelastizitätsmodell	55
6.1.2	Plastizitätsmodell	56
6.2	Thermo-chemo-viskoelastisches Kohäsivzonenmodell	58
6.2.1	Kinematik der Grenzfläche	58
6.2.2	Schwache Form der Gleichgewichtsbeziehung unter Berücksichtigung der Grenzfläche	60
6.2.3	Faltungsintegral der viskoelastischen Spannung	60
6.2.4	Prozessabhängige Spannung	63
6.2.5	Thermorheologisch einfaches Materialverhalten	65
6.2.6	Chemorheologisch einfaches Materialverhalten	67
6.2.7	Steifigkeit in Abhängigkeit des Aushärteprozesses	70
6.2.8	Relaxationsfunktionen im Referenzzustand	73
6.3	Thermochemischer Verschiebungssprung	74
6.3.1	Thermischer Verschiebungssprung	75
6.3.2	Chemischer Verschiebungssprung	75
6.4	Thermo-chemo-plastisches Kohäsivzonenmodell	76
6.4.1	Kontinuumsschädigungsmechanik	76
6.4.2	Fließfunktion und Fließregel	78
6.4.3	Fließspannung mit nichtlinearer isotroper Verfestigung	83
6.4.4	Schädigungsmodell	88
7	Implementierung der Materialgleichungen in LS-DYNA	95
7.1	Diskretisierung der schwachen Form im Sinne der Finite-Elemente-Methode	95
7.1.1	Räumliche Diskretisierung	95
7.1.2	Zeitliche Diskretisierung – Implizite Verfahren	96
7.1.3	Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems aus dem Kräftegleichgewicht	96
7.2	Spannungsalgorithmus	97
7.2.1	Numerische Behandlung des Faltungsintegrals der Überspannung	98
7.2.2	Diskretisierung der Gleichgewichtsspannung	101
7.2.3	Thermo-chemo-viskoelastisch-plastisches Modell – Prädiktor-Korrektor-Verfahren	102
7.3	Diskretisierung des Modells der Vernetzungskinetik	113
7.4	Konsistente tangentielle Steifigkeit	115
8	Parameteridentifikation und Verifikation	123
8.1	FE-Modelle der Grundproben	123
8.1.1	Stumpf verklebte Doppelrohrprobe	123
8.1.2	Scher- und Kopfbzugprobe	124
8.1.3	Untersuchung der Wärmeleitung an der Scher- und Kopfbzugprobe unter thermischer Belastung	126

8.2	Parameter des Thermo-chemo-viskoelastischen Teilmodells	132
8.2.1	Dynamisch-mechanische Analyse – Zeit-Temperatur-Verschiebungs- prinzip	132
8.2.2	Zeit-Aushärtegrad-Verschiebungsprinzip	136
8.2.3	Steifigkeiten der Relaxationsfunktionen des Kohäsivzonenmodells	138
8.2.4	Verifikation der Relaxation ausgehärteter Klebschichten in Scher- zugproben bei Raumtemperatur	139
8.2.5	Anpassung der instantanen Steifigkeiten der Relaxationsfunktionen an Warmfließkurven	141
8.2.6	Anpassung der Materialparameter der Zeit-Aushärtegrad-Verschie- bungsfunktionen an Fließkurven teilgehärteter Proben	144
8.3	Thermochemischer Verschiebungssprung	148
8.4	Plastizität ausgehärteter Klebschichten	155
8.4.1	Identifikation bei Raumtemperatur	155
8.4.2	Identifikation an Warmfließkurven	159
8.4.3	Modellverifikation an Warmfließkurven	162
8.5	Plastizität teilgehärteter Klebschichten	163
8.5.1	Identifikation an Fließkurven teilgehärteter Klebschichten	163
8.5.2	Modellverifikation an Fließkurven teilgehärteter Klebschichten	164
9	Validierung des Konstitutivmodells	167
9.1	Bi-Metall-Probe	167
9.1.1	Versuchsaufbau	167
9.1.2	FE-Modell	170
9.1.3	Ergebnis der Validierung	172
9.2	Brückenprobe	177
9.2.1	Versuchsaufbau	177
9.2.2	FE-Modell	179
9.2.3	Untersuchung der Blechbiegung der Probe ohne Klebschicht	181
9.2.4	Ergebnis	182
9.3	Scherzugprobe unter thermomechanischer Klebschichtbeanspruchung	187
9.3.1	Versuchsaufbau	187
9.3.2	FE-Modell	189
9.3.3	Ergebnis	190
10	Zusammenfassung und Ausblick	193
A	Anhang	199
A.1	Versuchsmessdaten für den Klebstoff BETAMATE TM 1496 V	199
A.1.1	Dynamische-Differenz-Kalorimetrie und Rheometerversuche	199
A.1.2	Dynamisch-mechanische Analysen	200
A.1.3	Thermomechanische Analysen – IfM München	201
A.1.4	Anpassung des TAPO Modells an Messdaten aus Versuchen an der Doppelrohrprobe	202

A.2	Materialparameter des Kohäsivzonenmodells	203
A.2.1	Viskoelastisches Teilmodell	203
	Normalbeanspruchung der Klebschicht	203
	Schubbeanspruchung der Klebschicht	204
A.2.2	Plastisches Teilmodell	205
A.3	Herleitungen	206
A.3.1	Nichtlineare isotrope Verfestigung	206
A.3.2	Chemischer Schrumpf nach [Lion und Höfer, 2007]	206
A.3.3	Thermochemische Dehnung nach [Liebl, 2014]	207
A.3.4	Verzerrungstensoren	207
A.4	Zur Validierung	209
A.4.1	Brückenprobe	209
A.4.2	Scherzugprobe unter thermomechanischer Klebschichtbeanspruchung	210
A.5	Thermomechanische Konsistenz	211