

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
2. MEHRKOMONENTENWERKSTOFFE	2
2.1 TECHNISCHE RELEVANZ VERSTÄRKTER MEHRPHASENMATERIALIEN	2
2.2 BEANSPRUCHUNG UND SCHÄDIGUNG	2
3. MODELLBILDUNG UND PROBLEMSTELLUNG	4
3.1 PROBLEMATIK DER THERMISCHEN EIGEN- SPANNUNGEN	4
3.2 THERMISCH BELASTETE VERBUNDSTRUKTUR	5
3.2.1 GEOMETRIE UND ERSATZMODELL	6
3.2.2 STRUKTUREN UND ZUGEHÖRIGE DEFINITIONEN	8
3.2.3 MODELLVERSAGEN UNTER THERMISCHER BELASTUNG	10
3.3 FORMULIERUNG DES ZUGEHÖRIGEN RANDWERTPROBLEMS	13
4. LINEAR-ELASTISCHE BRUCHMECHANIK	17
4.1 SPANNUNGSINTENSITÄTSFAKTOREN	17
4.2 ENERGIEFREISETZUNGSRATEN	23

5.	NUMERISCHE BEHANDLUNG BRUCHMECHANISCHER PROBLEME	26
5.1	FINITE ELEMENTE METHODE	26
5.2	ERMITTLUNG BRUCHMECHANISCHER KENNWERTE	28
5.2.1	GLOBALE ENERGIEMETHODE	31
5.2.2	LOKALE ENERGIEMETHODEN	32
5.2.2.1	RISSCHLIESSUNGSINTEGRAL	32
5.2.2.2	MODIFIZIERTES RISSCHLIESSUNGSINTEGRAL	36
6.	OPTISCHE VERFAHREN DER EXPERIMENTELLEN SPANNUNGSANALYSE	37
6.1	EBENE SPANNUNGSOPTIK	37
6.1.1	PRINZIP DER SPANNUNGSOPTIK	38
6.1.2	SPANNUNGSOPTIK IN DER BRUCHMECHANIK	42
6.2	SCHATTENOPTISCHES KAUSTIKENVERFAHREN	46
6.2.1	PHYSIKALISCHES PRINZIP	46
6.2.2	VERFAHREN ZUR ELEKTRO-OPTISCHEN ERFASSUNG DES SPANNUNGSINTENSITÄTSFAKTORS	52
6.2.2.1	SCHATTENOPTISCHER AUFBAU	52
6.2.2.2	STANDARDPROBE DER BRUCHMECHANIK	55
6.2.2.3	STEUERUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	57
6.2.2.4	MODIFIZIERTE STANDARDPROBE	61

7.	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM VERSAGENSVERHALTEN VON MEHRKOMONENTENMODELLEN	64
7.1	MODELLHERSTELLUNG UND VERARBEITUNGSPROZEDUR	66
7.2	MODELLBELASTUNG UND APPARATIVER AUFBAU	67
7.3	MODELLMATERIALIEN UND DEREN TEMPERATUR- VERHALTEN	69
7.3.1	APPARATIVE ENTWICKLUNGEN	70
7.3.2	TEMPERATURVERHALTEN SPEZIFISCHER WERKSTOFF- KENNWERTE SPANNUNGSOPTISCHER MATERIALIEN	75
7.3.3	SPRÖDBRUCHEIGENSCHAFTEN DES EPOXIDHARZES ARALDIT F	80
7.4	UNGERISSENE VERBUNDSTRUKTUR	83
7.4.1	EIGENSPANNUNGSZUSTAND IN EBENEN VERBUNDMODELLEN	83
7.4.2	SPANNUNGSVERTEILUNGEN ENTLANG RADIALER SCHNITTE	91
7.4.2.1	REGULÄRE STRUKTUR MIT SIEBEN FASERN; TYP A	93
7.4.2.2	STRUKTUR MIT FEHLENDER MITTELFASER; TYP B	96
7.4.2.3	STRUKTUR MIT KLEINER MITTELFASER; TYP C	99
7.4.2.4	STRUKTUR MIT ZENTRISCHER BOHRUNG; TYP D	100
7.5	VERSAGEN EBENER VERBUNDMODELLE MIT STRUKTURFEHLERN	101
7.5.1	VERSAGENSVERHALTEN UND SPANNUNGS- OPTISCHE UNTERSUCHUNGEN	101

7.5.2	EIGENSPANNUNGSVERTEILUNGEN ENTLANG RADIALER SCHNITTE ZWISCHEN ZWEI FASERN FÜR GERISSENE VERBUNDMODELLE MIT STRUKTURFEHLERN	102
7.5.2.1	STRUKTUR MIT FEHLENDER MITTELFASER; TYP B	103
7.5.2.2	STRUKTUR MIT KLEINER MITTELFASER; TYP C	106
7.5.2.3	STRUKTUR MIT ZENTRISCHER BOHRUNG; TYP D	107
7.5.3	REDUKTION AUF EINE EINZELRISSKONFIGURATION	108
7.5.3.1	MODELLIERUNG UND RISSINITIIERUNG	108
7.5.3.2	HAUPTSPANNUNGSTRAJEKTORIENFELD FÜR EINE EINZELRISSKONFIGURATION	109
7.5.3.3	EIGENSPANNUNGSVERTEILUNG IN EINER EINZEL- RISSKONFIGURATION	110
7.5.4	EIGENSPANNUNGSZUSTAND FÜR EINEN ARRETIERTEN MATRIXRISS	113
7.6	VERSAGEN RÄUMLICHER VERBUNDMODELLE	115
8.	NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM EIGENSPANNUNGSVERHALTEN EBENER FASERVERBUNDWERKSTOFFMODELLE	118
8.1	TOPOLOGISCHE UMSETZUNG DER GEOMETRIE EBENER VERBUNDMODELLE	120
8.2	GLOBALE MODELLSTUDIEN	124
8.2.1	SPANNUNGSVERTEILUNG ENTLANG RADIALER SCHNITTE	124
8.2.2	SPANNUNGSVERTEILUNG AM FASERUMFANG	132

8.2.3	EBENE MODELLBETRACHTUNGEN	137
8.2.3.1	FUNKTIONSWERTVERDICHTUNG UND ISOLINIENDARSTELLUNG	137
8.2.3.2	EBENE SPANNUNGSVERTEILUNG	137
8.2.3.3	VERZERRUNGSENERGIEDICHTEVERTEILUNG	140
8.3	LOKALE MODELLSTUDIEN	143
8.3.1	SPANNUNGSVERTEILUNG ENTLANG RADIALER SCHNITTE	145
8.3.1.1	UNGERISSENE VERBUNDSTRUKTUR	145
8.3.1.2	GERISSENE VERBUNDSTRUKTUR	147
8.3.2	BERECHNUNG BRUCHMECHANISCHER KENNWERTE	155
8.3.2.1	EIGENSPANNUNGSMATRIXRISS	155
8.3.2.2	RISSAUSBILDUNG ENTLANG DER FASER/MATRIX- GRENZFLÄCHE	157
8.3.2.3	ABSCHÄTZUNG DER RISSFOLGE	160
8.3.3	EINFLUSS DES ELEMENTTYP UND DER RISSGEOMETRIE AUF BRUCHMECHANISCHE KENNWERTE	160
8.3.4	MODELLUNTERSUCHUNGEN FÜR EINE STRUKTUR MIT ZWEI MATRIXRISSEN	163
9.	UNTERSUCHUNGEN ZUR RISSINITIIERUNG	168
9.1	SPANNUNGSZUSTAND ENTLANG DER FASER/MATRIX- GRENZFLÄCHE	169
9.2	SPEZIFISCHE VERZERRUNGSENERGIE IN DER UMGEBUNG EINES EINSCHLUSSES	171

10.	AUSBILDUNG VON KOMBINATIONEN AUS MATRIX/FASER- GRENZFLÄCHENRISSEN	174
10.1	FORMULIERUNG EINES GEEIGNETEN RISS- FOLGEKRITERIUMS	174
10.2	PROGRAMMTECHNISCHE REALISIERUNG	176
10.3	RISSFOLGESIMULATION	178
10.3.1	SIMULATION DER RISSFOLGE FÜR EINE STRUKTUR MIT SECHS FASERN UND FEINER ELEMENTEINTEILUNG	182
10.3.2	SIMULATION DER RISSFOLGE FÜR EINE STRUKTUR MIT SECHS FASERN UND ZENTRISCHER FEHLFASER, TYP C	190
10.3.3	SIMULATION DER RISSFOLGE FÜR EINE STRUKTUR MIT SECHS FASERN UND ZENTRISCHER BOHRUNG, TYP D	195
10.4	GEGENÜBERSTELLUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE	199
10.4.1	RISSUFERVERSCHIEBUNGEN	199
10.4.2	ENERGIEFREISETZUNG ENTLANG GEKRÜMMTER RISS- KONFIGURATIONEN	202
10.4.3	SPANNUNGSINTENSITÄTSFAKTOREN ENTLANG GEKRÜMMTER MATRIXRISSE	204
10.5	EXPERIMENTELLE ABSCHÄTZUNG DER RISSFOLGE	206
11.	UNTERSUCHUNGEN ZUR MATRIXRISSAUSBILDUNG	210
11.1	RISSFORTSCHRITT INFOLGE THERMISCHER EIGENSPANNUNGSFELDER	210

11.2	EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES SPANNUNGS- INTENSITÄTSFAKTORS FÜR EINEN GEKRÜMMTEN EIGENSPANNUNGSMATRIXRISS	211
11.2.1	MODELLHERSTELLUNGS- UND BELASTUNGSPROZEDUR	211
11.2.2	SPANNUNGSOPTISCHE MODELLUNTERSUCHUNGEN	215
11.2.3	SCHATTENOPTISCHE MODELLUNTERSUCHUNGEN	222
11.2.3.1	TRANSMISSIONSSCHATTENOPTIK	222
11.2.3.2	REFLEXIONSSCHATTENOPTIK	229
11.2.3.3	VERGLEICH DER NUMERISCH UND EXPERIMENTELL ERMITTELTEN SPANNUNGSINTENSITÄTSFAKTOREN	235
12.	ZUSAMMENFASSUNG	237
	LITERATURVERZEICHNIS	242