

**Simulation des mechanischen und thermomechanischen Verhaltens
faserverstärkter thermoplastischer Preßbauteile**

**Simulation of the mechanical and thermomechanical behaviour of
thermoplastic fiber-reinforced compression moulded parts**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Eckart Semmler
aus Kiel

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Haberstroh

Tag der mündlichen Prüfung: 31. August 1998

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Material	3
1.2 Prozeß	5
1.3 Prozeßsimulation	7
1.4 Finite-Elemente-Methode	9
1.5 Zielsetzung	10
2 Stand der Technik	13
2.1 Rheologische Auslegung	13
2.2 Mechanische Auslegung	14
2.2.1 Faserorientierungen	14
2.2.2 Messung der Faserorientierungen	18
2.2.3 Faser-Matrix-Entmischungen	20
2.3 Thermomechanische Auslegung	21
3 Rheologische Auslegung	25
3.1 Überblick über das Fließmodell	25
3.2 Einsatz der Methode des adaptiven Vernetzens	29
4 System zur Faserorientierungsmessung	31
5 Faserorientierungsmechanismen und -berechnung	39
5.1 Analyse von Faserorientierungsmechanismen	39
5.2 Modell zur Berechnung der Faserrotation	43
5.3 Lösung der Differentialgleichung	46
5.4 Schichtdiskrete Berechnung der Faserorientierungen	50
5.5 Berücksichtigung des Fasertransportes	52
5.6 Berücksichtigung der Vororientierungen	53
5.7 Materialdaten	55
5.8 Verifikation: Vergleich der numerischen mit analytischen Lösungen	57
6 Modellierung der Faser-Matrix-Entmischung in Rippen	63
6.1 Analyse von Faser-Matrix-Entmischungen	63
6.2 Modell zur Berechnung der Faser-Matrix-Entmischung	67
6.2.1 Kraft nach DARCY's Gesetz	68
6.2.2 Widerstand der Glasfaser gegen eine Richtungsänderung	70
6.2.3 Modellierung der Faser-Matrix-Entmischung	72
6.3 Anwendung des Modells	73
7 Thermomechanische Auslegung	77
7.1 Analyse der Schwindungs- und Verzugsvorgänge	77
7.2 Temperaturberechnung mit temperaturabhängigen Stoffdaten	79
7.3 Berechnung der mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften	82
7.3.1 Bestimmung der Ingenieurskonstanten	82
7.3.2 Bestimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten	84
7.4 Theoretische Grundlagen der Schwindungs- und Verzugsberechnung	85
7.4.1 Prinzip der virtuellen Arbeit	86

7.4.2 Berechnung der lokalen Steifigkeitsmatrix eines Elements	87
7.4.3 Aufbau des Lastvektors	90
7.4.4 Ermittlung der Verschiebungen und Korrektur der Knotenkoordinaten	91
7.5 Berücksichtigung des Eckenverzugs und des Spring-Forward-Effektes	91
7.5.1 Eckenverzug	92
7.5.2 Spring Forward Effect	93
7.6 Verifikation: Vergleich der numerischen mit analytischen Lösungen	95
7.6.1 Schwindung und Verzug einer quadratischen Platte	95
7.6.2 Verzug einer gewölbten Platte	98
8 Verifikation der Berechnungsmodule	101
8.1 Mercedes Box	101
8.2 Mercedes Instrumententafelträger	110
8.3 BMW Sitzschale	112
9 Ausblick	115
10 Zusammenfassung/ Summary	119
10.1 Zusammenfassung	119
10.2 Summary	121
11 Abkürzungen und Formelzeichen	123
12 Literaturverzeichnis	127
13 Anhang	139
13.1 Materialdaten	139
13.2 Dokumentation der Versuchsreihen	143
13.3 Anhang zur thermomechanischen Auslegung	149