

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VII

Tabellenverzeichnis XIII

Formelzeichen und Abkürzungen XV

Kurzfassung XXI

Abstract XXIII

1 Einleitung 1

2 Stand der Forschung und Technik 3

 2.1 Gewerke des Fahrzeugproduktionsprozesses 3

 2.2 Inhomogenitäten in Klebschichten 6

 2.3 Viskose Fingerbildung 7

 2.3.1 Verdrängungseffekte 8

 2.3.2 Normaldehnung 9

 2.4 Rheologische Grundlagen 12

 2.4.1 Mikrorheologische Betrachtungsweise 12

 2.4.2 Makrorheologische Phänomene in der Klebtechnik 16

 2.4.3 Rheologische Beschreibung viskoelastischer Stoffe 18

 2.5 Numerische Berechnung im Fahrzeugbau 20

 2.5.1 Simulationsumfänge im Presswerk 20

 2.5.2 Simulationsumfänge im Karosseriebau 20

 2.5.3 Simulationsumfänge in der Lackiererei 22

3 Wissenschaftliche Fragestellung und Zielsetzung 24

4 Experimentelles 28

 4.1 Vorgehensweise 28

 4.2 Analysemethoden 29

 4.2.1 Gelpermeationschromatographie (GPC) 29

 4.2.2 Rheologische Untersuchungen 30

 4.2.3 Dynamische Wärmestrom-Differenzkalorimetrie (DDK) 33

 4.2.4 Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) 34

 4.2.5 Kopfzugversuch 36

4.2.6	Quasistatischer Zugscherversuch	37
4.2.7	Untersuchung zum Alterungsverhalten von Klebverbindungen.....	39
4.2.8	Untersuchung der viskosen Fingerbildung	39
4.2.9	Optische Bewertung der viskosen Fingerbildung	44
4.3	Verwendete Materialien	46
4.3.1	Epoxidharzsysteme.....	46
4.3.2	Füllstoffe	47
4.3.2.1	Hydrophobe pyrogene Kieselsäure.....	47
4.3.2.2	Glasperlen.....	47
4.3.3	Härter	48
4.3.4	Reaktionsbeschleuniger.....	48
4.3.5	1K-EP Serienklebstoffe.....	48
4.3.6	Modellklebstoffe zur Untersuchung des Einflusses der Klebstoffbestandteile auf die viskose Fingerbildung.....	50
5	Viskose Fingerbildung im Fahrzeugbau	52
5.1	Voraussetzungen für viskose Fingerbildung im Fahrzeug- produktionsprozess.....	52
5.2	Thermo-mechanische Belastungen auf Klebstoffe während des Fahrzeugproduktionsprozesses.....	55
5.2.1	Belastung auf Klebstoffe im Karosseriebau.....	55
5.2.1.1	Beschleunigungskräfte beim Transport	55
5.2.1.2	Blechrückfederung beim Fügeprozess	55
5.2.1.3	Taschenbildung bei der Einbringung mechanischer Verbindungstechnik	56
5.2.2	Belastung auf Klebstoffe in der Lackiererei	57
5.2.2.1	Delta-Alpha Effekt	58
5.2.2.2	Delta-T Effekt	59
5.2.3	Belastungen auf Klebstoffe in der Montage.....	59
5.3	Ursachenanalyse der viskosen Fingerbildung im Fahrzeugbau.....	60
5.3.1	Reaktionsschwindung.....	60
5.3.2	Deformation im pastösen Zustand	62
5.3.2.1	Scherdeformation.....	62

5.3.2.2	Normaldeformation	64
5.3.3	Zusammenfassung der Ursachen.....	66
5.4	Auswirkung der viskosen Fingerbildung auf Klebverbindungen	67
5.4.1	Verbindungsfestigkeit.....	68
5.4.2	Alterungsstabilität.....	72
6	Einflussgrößen auf die viskose Fingerbildung	75
6.1	Einfluss von Prozessgrößen.....	75
6.1.1	Dehnungsamplitude	76
6.1.2	Dehngeschwindigkeit	85
6.1.3	Initiale Klebfläche.....	88
6.1.4	Temperatur	92
6.2	Einfluss von Klebstoffgrößen	96
6.2.1	Modellvorstellung	96
6.2.2	Viskosität.....	98
6.2.2.1	Einstellung der Viskosität durch die molekulare Zusammensetzung des Harzes	99
6.2.2.2	Einstellung der Viskosität durch den Thixotropiermittelanteil	104
6.2.3	Füllstoffanteil.....	107
6.3	Zusammenfassung der Einflussgrößen auf viskose Fingerbildung	111
7	Maßnahmen zur Reduzierung der viskosen Fingerbildung im Fahrzeugproduktionsprozess	115
7.1	Prozessseitige Optimierungsmaßnahmen.....	115
7.2	Klebstoffseitige Optimierungsmaßnahmen.....	116
8	Numerische Vermeidung der viskosen Fingerbildung im Lacktrocknungsprozess.....	119
8.1	Ermittlung der Kennwerte für die Klebstoffmodellierung	119
8.1.1	Reaktionskinetik.....	119
8.1.2	Gelpunkt.....	125
8.1.3	Glasübergangstemperatur	127
8.1.4	Viskoelastische Materialkennwerte.....	129

8.2	Vorhersage der viskosen Fingerbildung auf Probenebene	132
8.2.1	Bimetallprobe	133
8.2.2	Aufbau des Simulationsmodells.....	135
8.2.3	Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen.....	136
8.3	Vorgehen zur Ermittlung eines Grenzwerts für die numerische Vorhersage der viskosen Fingerbildung im Fahrzeugbau	139
8.4	Zusammenfassung der numerischen Vorhersage der viskosen Fingerbildung	140
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	141
10	Literaturverzeichnis.....	145
11	Anhang	155