

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Publikationen</b>	<b>ix</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Industrielle Bedeutung aushärtender und vernetzter Materialien . . . . .	1
1.1.1 Klebstoffe . . . . .	1
1.1.2 Vernetztes Polyethylen . . . . .	2
1.2 Qualitätskriterium: Aushärte- bzw. Vernetzungsgrad . . . . .	2
1.3 Bedarf für zerstörungsfreie Prüfung . . . . .	3
1.4 Zielsetzung dieser Arbeit . . . . .	5
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Klebstoffe und Klebeverbindungen . . . . .	7
2.1.1 Vor- und Nachteile des Klebens . . . . .	7
2.1.2 Chemischer Aufbau und Einteilung der Klebstoffe . . . . .	7
2.1.3 2K-Epoxidharz-Klebstoffe . . . . .	8
2.1.4 2K-Polyurethan-Klebstoffe . . . . .	9
2.1.5 Strahlungshärtende und -aktivierbare 1K-Klebstoffe . . . . .	10
2.1.6 Einflussfaktoren bei Klebeverbindungen . . . . .	10
2.2 Vernetzung von Polyethylen zu PE-X . . . . .	12
2.3 Unilaterale magnetische Kernspinresonanz . . . . .	13
2.3.1 Grundlagen der magnetischen Kernspinresonanz . . . . .	13
2.3.2 Bestimmung der Relaxationszeiten $T_1$ und $T_2$ . . . . .	15
2.3.3 Messtechnische Nutzung der NMR . . . . .	17
2.3.4 Zerstörungsfreie Prüfung mit unilateraler NMR . . . . .	17
2.3.5 Auswertung der Messsignale der NMR-Relaxometrie . . . . .	20
<b>3 Stand der Technik und Wissenschaft</b>	<b>23</b>
3.1 Nasschemische Vernetzungsgradbestimmung . . . . .	23
3.2 Dynamische Differenzkalorimetrie . . . . .	24
3.3 Rheologische Prüfung . . . . .	25
3.4 Dielektrische Analyse . . . . .	26
3.5 Zugscherprüfung und Zentrifugal-Adhäsionsprüfung . . . . .	28
3.6 Kernspinresonanz . . . . .	29
	xiii

3.7	Weitere zerstörungsfreie Prüfverfahren im Forschungsstadium . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>33</b>
4.1	Verwendete Materialien . . . . .	33
4.1.1	Strahlenvernetztes UHMWPE . . . . .	33
4.1.2	Klebstoffe und Klebeverbindungen . . . . .	33
4.2	Verwendete Prüfmethoden und Messsysteme . . . . .	37
4.2.1	Nasschemische Vernetzungsgradbestimmung von UHMWPE-Xc . . . . .	37
4.2.2	Dynamische Differenzkalorimetrie . . . . .	37
4.2.3	Rheologische Untersuchung . . . . .	38
4.2.4	Dielektrische Analyse . . . . .	39
4.2.5	Zugscherprüfung . . . . .	41
4.2.6	Zentrifugal-Adhäsionsprüfung . . . . .	42
4.2.7	Unilaterale Kernspinresonanz . . . . .	42
4.2.8	Temperaturüberwachung von NMR-Mouse und Proben . . . . .	46
4.2.9	Verwendete Software zur Auswertung der NMR-Daten . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Temperatureffekte bei uNMR-Messungen und LED-Belichtung</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>Vernetzungsgradbestimmung von UHMWPE-Xc</b>	<b>57</b>
6.1	Nasschemische Untersuchung . . . . .	57
6.2	Dynamische Differenzkalorimetrie . . . . .	58
6.3	Unilaterale Kernspinresonanz . . . . .	60
6.3.1	$T_1$ -Zeiten . . . . .	60
6.3.2	$T_{2eff}$ -Zeiten und Amplitudenverhältnisse . . . . .	61
6.3.3	Binning von Echos . . . . .	67
6.3.4	Echosummen und Echosummenverhältnisse . . . . .	69
6.3.5	Homogenität der Vernetzung und Tiefenprofile . . . . .	72
6.4	Modell zur Überwachung und Vorhersage des Vernetzungsgrades . . . . .	74
6.5	Bewertung der Vernetzungsgradbestimmung von UHMWPE-Xc mit unilateraler NMR . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Bestimmung des Aushärtegrades von Klebstoffen in Klebeverbindungen</b>	<b>77</b>
7.1	Dynamische Differenzkalorimetrie . . . . .	77
7.2	Platte/Platte-Rheometer . . . . .	78
7.3	Dielektrische Analyse . . . . .	81
7.4	Zugscherprüfung und Zentrifugal-Adhäsionsprüfung . . . . .	85
7.5	Unilaterale Kernspinresonanz . . . . .	88
7.5.1	$T_1$ -Zeiten . . . . .	89
7.5.2	$T_{2eff}$ -Zeiten und Amplitudenverhältnisse . . . . .	90
7.5.3	Binning von Echos . . . . .	96
7.5.4	Echosummen und Echosummenverhältnisse . . . . .	100
7.5.5	Profilmessungen . . . . .	109
7.6	Modelle zur Überwachung und Vorhersage des Aushärtegrades . . . . .	110
7.6.1	uNMR-Aushärtemodell auf Basis von Echosummen . . . . .	110
7.6.2	DSC-basierte Vergleichsmodelle . . . . .	115

7.6.3 Rheologiebasierte Vergleichsmodelle . . . . .	117
7.6.4 DEA-basierte Vergleichsmodelle . . . . .	120
7.7 Bewertung der Aushärtegradbestimmung von Klebstoffen mit unilateraler NMR	124
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>127</b>
<b>A DSC-Messungen</b>	<b>129</b>
<b>B Rheometer-Messungen</b>	<b>137</b>
<b>C DEA-Messungen</b>	<b>139</b>
<b>D uNMR-Messungen</b>	<b>147</b>
<b>E Fitparameter der uNMR-Modelle</b>	<b>153</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>171</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>179</b>
<b>Danksagung</b>	<b>181</b>