

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Elastomerbauteile in der Automobilindustrie .....	1
1.2	Zielsetzung, Zieldefinition .....	3
1.3	Gliederung der Arbeit.....	4
2	Stand der Technik, Grundlagen .....	7
2.1	Eigenschaften von Elastomeren .....	7
2.1.1	Einteilung und globales mechanisches Verhalten .....	7
2.1.2	Herstellprozess von Naturkautschuk .....	8
2.1.3	Füllstoffe .....	10
2.1.3.1	Hydrodynamische Verstärkung .....	11
2.1.3.2	Füllstoff-Elastomer-Kopplung .....	11
2.1.3.3	Füllstoff-Füllstoff-Kopplung.....	12
2.1.4	Verformungsverhalten von Gummi .....	12
2.1.4.1	Quasistatisches Spannungs-Dehnungsverhalten .....	13
2.1.4.2	Inkompressibilität .....	16
2.1.4.3	Dehnungskristallisation.....	16
2.1.4.4	Viskoelastizität .....	17
2.1.4.5	Temperatureinflüsse .....	21
2.2	Materialmodelle zur Beschreibung der hyperelastischen Eigenschaften .....	23
2.2.1	Simulation großer Verformungen mittels FEM .....	23
2.2.2	Phänomenologische Modelle.....	25
2.2.3	Molekular-statistische Basis .....	27
2.3	Modelle zur Beschreibung des Mullins-Effekts.....	31
2.3.1	Physikalisch motivierte Modelle.....	31
2.3.1.1	Bruch von Bindungen .....	31
2.3.1.2	Kettengleiten .....	32
2.3.1.3	Füllstoffbruch.....	32
2.3.2	Phänomenologische Modelle.....	32
2.3.2.1	2-Phasen Netzwerk Ansatz .....	32
2.3.2.2	Kontinuums-Schädigungsmechanik Ansatz (CDM) .....	33
3	Stand der Forschung auf dem Gebiet der Lebensdaueruntersuchungen .....	36
3.1	Schwingfestigkeit und Alterung .....	36
3.2	Konzepte zur Berechnung der Schwingfestigkeit .....	37
3.2.1	Kollektiv-Wöhlerlinien-Konzepte .....	37
3.2.1.1	Grundsätzlicher Ablauf.....	37
3.2.1.2	Schadensakkumulation.....	38
3.2.1.3	Zählverfahren.....	39
3.2.1.4	Methoden zur Lebensdauerrechnung bei multiaxialer Belastung .....	40
3.2.2	Bruchmechanikkonzept .....	41
3.2.2.1	Linear-elastische Bruchmechanik .....	41
3.2.2.2	Nichtlineare Bruchmechanik .....	43
3.2.2.3	Dynamisch-zyklische Belastung .....	44
3.3	Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit .....	46
3.3.1	Mittellasteinfluss .....	46
3.3.2	Temperatureinfluss.....	48
3.3.3	Alterungszustand .....	49
3.3.4	Überlast, Unterbrechungen und Verformungsgeschwindigkeit .....	50

3.3.5	Beanspruchungszustand und Mehrachsigkeit .....	50
3.4	Anwendungsbeispiele .....	51
3.4.1	Nennspannungskonzept .....	51
3.4.2	Örtliches Konzept .....	51
3.4.3	Bruchmechanikkonzept .....	53
3.5	Konzeptentscheidung unter Berücksichtigung des Entwicklungsprozesses .....	55
4	Materialparameter für die FEM-Simulation .....	57
4.1	Vorgehensweise zur Materialparameterbestimmung .....	57
4.2	Versuche zur Materialparameterabstimmung .....	59
4.2.1	Probekörper .....	59
4.2.1.1	Uniaxial .....	59
4.2.1.2	Planar (Pure Shear).....	62
4.2.2	Messplan .....	63
4.2.3	Ergebnisse .....	64
4.2.3.1	Raumtemperatur .....	64
4.2.3.2	Temperatureinfluss .....	65
4.2.3.3	Einfluss der Wärmealterung .....	66
4.3	Auswahl von geeigneten hyperelastischen Materialmodellen .....	67
4.4	Berücksichtigung des Mullins-Effekts .....	71
4.4.1	Motivation .....	71
4.4.2	Umsetzung .....	71
4.4.3	Vorgehensweise.....	72
4.4.4	Schädigungsparameter .....	73
4.4.4.1	Unterscheidung des Beanspruchungszustands.....	75
4.4.4.2	Ermittlung von $\varepsilon^M$ .....	77
4.4.5	Vergleich Messung - Simulation .....	79
5	Lebensdauersimulation auf Basis eines örtlichen Konzepts.....	82
5.1	Methode.....	82
5.1.1	Ablauf .....	82
5.1.2	Festigkeitshypothese.....	83
5.1.3	Methode der kritischen Schnittebene .....	85
5.1.4	Kanalbasierte Lebensdaueranalyse.....	86
5.1.5	Schadensakkumulation und Zählverfahren.....	87
5.1.6	Reduktion von Belastungszeitverläufen.....	87
5.2	Bestimmung der Beanspruchbarkeit durch Einstufenversuche.....	88
5.2.1	Probekörper, Prüfstand, Prüfmethodik.....	88
5.2.2	Versuchsergebnisse .....	89
5.3	Ermittlung der Beanspruchung.....	93
5.3.1	Kurze und einfache Belastungen .....	94
5.3.2	Lange stochastische Belastungsverläufe .....	95
5.3.2.1	Lineare Interpolation des Verformungszustandes.....	95
5.3.2.2	Methode zur Interpolation des lokalen Beanspruchungsverlaufs .....	97
6	Verifikation an Motorlagern mit 1K-Belastung.....	100
6.1	Beschreibung der Motorlager.....	100
6.2	Schwingfestigkeitsversuche.....	102
6.2.1	Versuchsaufbau .....	102
6.2.2	Versuchsdurchführung .....	103
6.3	Versuchsergebnisse .....	104
6.4	Lebensdauersimulation .....	105

6.4.1	Simulation der Verformungen .....	105
6.4.2	Ermittlung der Betriebsfestigkeit und Vergleich mit Versuchsergebnissen ....	107
6.4.2.1	Ergebnisse Lager A .....	108
6.4.2.2	Ergebnisse Lager B .....	109
6.4.2.3	Ergebnisse Lager C .....	109
7	Anwendung der Lebensdauersimulation an einem Fahrwerkslager .....	111
7.1	Beschreibung des Fahrwerkslagers .....	111
7.2	Prüfstandsversuche .....	111
7.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	111
7.2.2	Ergebnisse .....	112
7.3	Lebensdauersimulation .....	115
7.3.1	Simulation der Verformungen .....	115
7.3.2	Ermittlung der Betriebsfestigkeit .....	118
8	Anwendung an Motorlagern mit 3K-Belastungskollektiv.....	120
8.1	Versuchsaufbau .....	120
8.2	Ergebnisse als Referenz für die Lebensdauersimulation .....	122
8.3	Lebensdauersimulationen .....	124
8.3.1	Vorgehensweise .....	124
8.3.2	Ergebnisse .....	125
9	Fazit.....	129
9.1	Zusammenfassung .....	129
9.2	Ausblick .....	130