

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 ε^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