

1. Zusammenfassung	1
1.1 Zusammenfassung	1
1.2 Summary	4
2. Allgemeiner Teil	7
2.1 Einleitung	7
2.2 Elastomere: Herstellung, Verwendung und Verbleib	8
2.2.1 Kautschuk und Gummi	8
2.2.1.1 Isopren	11
2.2.1.2 Chloropren und Chloroprenkautschuk	12
2.2.1.3 Weltkautschukverbrauch	16
2.2.2 Füllstoffe in Gummiartikeln	17
2.2.2.1 Ruße	17
2.2.3 Verwendung von Kautschuken in Reifen und anderen Produkten	20
2.2.4 Altgummi – ein Entsorgungsproblem	22
2.2.4.1 Entsorgungsmöglichkeiten	24
2.2.4.1.1 Deponierung	24
2.2.4.1.2 Produktrecycling	25
2.2.4.1.3 Recycling von Reifen durch Runderneuerung	25
2.2.4.1.4 Werkstoffliches Recycling nach Vermahlung	25
2.2.4.1.5 Chemisches Recycling von Gummiabfällen	27
2.2.4.1.6 Thermische Nutzung bei der Zementherstellung u. zur Energiegewinnung	28
2.3 Chemisches Recycling durch Pyrolyse	29
2.3.1 Pyrolyse	29
2.3.2 Pyrolysemechanismen von Kohlenwasserstoffen	30
2.3.2.1 Primärreaktionen	31
2.3.2.2 Sekundärreaktionen	32
2.3.3 Wirbelschichttechnik	32
2.3.4 Pyrolyse nach dem Hamburger Verfahren	34
2.4 Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie	38
3. Problemstellung	40
4. Hauptteil	42
4.1 Die Einsatzmaterialien	42
4.2 Pyrolyse von Reifengummi	44
4.2.1 Einleitung	44

4.2.2 Versuchsergebnisse	45
4.2.3 Vergleich mit den Versuchen aus der Literatur	57
4.2.4 Diskussion	60
4.2.4.1 Verteilung der Pyrolyseprodukte auf die Fraktionen	60
4.2.4.2 Monomereengewinnung	62
4.2.4.3 Ruß	66
4.2.4.3.1 Verwendung als Füllstoff	66
4.2.4.3.2 Aktivierung	68
4.2.4.4 Wasserfraktion	69
4.2.4.5 Ökonomische Bewertung	70
4.3 Pyrolyse von Naturkautschuk	71
4.3.1 Einleitung	71
4.3.2 Ergebnisse der Vorversuche	73
4.3.3 Ergebnisse des Pyrolyseversuchs	77
4.3.4 Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit denen anderer Versuche	81
4.4 Pyrolyse von Chloroprenkautschuk	89
4.4.1 Einleitung	89
4.4.2 Versuchsergebnisse	90
4.4.3 Vergleich mit anderen Versuchen	100
4.4.4 Diskussion	102
5. Experimenteller Teil	108
5.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche	108
5.1.1 Die Pyrolyseanlage und der Heißdampfzeuger	108
5.1.2 Bestimmung des Wirbelpunktes	110
5.1.3 Aufnahme von Förderkurven	111
5.1.4 Durchführung der Pyrolyseversuche	112
5.2 Aufarbeitung der flüssigen Pyrolyseprodukte	113
5.3 Produktanalytik	114
5.3.1 Gasfraktion	114
5.3.1.1 Berechnung der Responsefaktoren	115
5.3.2 Ölfraction	117
5.3.3 Destillationsrückstand	118
5.3.4 Zusätzliche spurenanalytische Untersuchungen des Öls aus der Polychloropren-Pyrolyse	118

5.3.4.1 Bestimmung der PAK	118
5.3.4.2 Bestimmung der PCB	119
5.3.5 Wasserfraktion	119
5.3.6 Feststoffe	120
5.4 Erstellung der Massenbilanzen	121
5.5 Berechnung der Gasverweilzeit	121
5.6 Extraktion des Keilriemengummi	122
5.7 Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie	122
5.8 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	123
5.9 Einarbeitung des Pyrolyserußes in eine Gummimischung	123
5.10 Allgemeine Analytik	123
5.10.1 Bestimmung des Glührückstandes	123
5.10.2 Elementaranalyse	124
5.10.3 Wasserbestimmung nach Karl Fischer	124
5.10.4 Bestimmung der pH-Werte	124
5.10.5 Untersuchung der Wasserfraktionen auf Schwefel und Stickstoff	124
5.10.6 Chlorbestimmung nach Wickbold	124
6. Literatur	125
7. Anhang	131
7.1 Beispielchromatogramme	131
7.2 Sicherheitsdaten	133
7.3 Übersicht über einige Verfahren zum rohstofflichen Recycling von Altreifen	134
7.4 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Vorträge	135