

<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Summary</b>	<b>4</b>
<b>2. Allgemeiner Teil</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Elastomere: Herstellung, Verwendung und Verbleib</b>	<b>8</b>
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
<b>2.3 Chemisches Recycling durch Pyrolyse</b>	<b>29</b>
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
<b>2.4 Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie</b>	<b>38</b>
<b>3. Problemstellung</b>	<b>40</b>
<b>4. Hauptteil</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Die Einsatzmaterialien</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Pyrolyse von Reifengummi</b>	<b>44</b>
4.2.1 Einleitung	44

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

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