

---

**Inhaltsverzeichnis****Abkürzung und Formelzeichen****Zusammenfassung****Abstract**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Eigenschaften des Natrium-Cellulosesulfats und der Kapseln</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	Allgemeines.....	5
2.1.2	Viskosität.....	6
2.1.3	Verkapselungsverhalten.....	7
2.1.4	Toxizität.....	8
2.1.5	Stabilität.....	9
2.1.6	Diffusionsverhalten.....	11
<b>2.2</b>	<b>Verfahren zur Herstellung von Cellulosesulfat</b> .....	<b>11</b>
2.2.1	Homogene Reaktion mit DMF-SO <sub>3</sub> als Reaktionsmittel.....	12
2.2.2	Heterogene Reaktion mit Alkohol und Schwefelsäure als Reaktionsmittel..	13
<b>2.3</b>	<b>Feststoff-Fluid-Reaktionstechnik</b> .....	<b>15</b>
2.3.1	Feststoff-Fluid-Reaktor.....	15
2.3.2	Mathematische Beschreibung von Feststoff-Fluid-Reaktion.....	15
<b>2.4</b>	<b>Trennung von fest-flüssig Systemen</b> .....	<b>19</b>
2.4.1	Filtrieren.....	19
2.4.2	Zentrifugieren.....	20
<b>3</b>	<b>Problemstellung und Ziel der Arbeit</b> .....	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Cellulosesulfatierung</b> .....	<b>24</b>
4.1.1	Analyse des Reaktionsmechanismus der Cellulosesulfatierung.....	24
4.1.2	Mathematische Beschreibung der Cellulosesulfatierungskinetik.....	26
4.1.3	Regenerierung des Reaktionsgemisches .....	32
<b>4.2</b>	<b>Diffusion von Glukose durch die Polymermembran einer Hohlkugel</b> ...	<b>37</b>

---

<b>5</b>	<b>Materialien und experimentelle Methoden</b> .....	43
<b>5.1</b>	<b>Ausgangsmaterialien</b> .....	43
<b>5.2</b>	<b>Bestimmung der Reaktionswärme</b> .....	43
5.2.1	Veresterungswärme.....	43
5.2.2	Sulfatierungswärme.....	44
<b>5.3</b>	<b>Bestimmung der Eigenschaften von Cellulose und Na-Cellulosesulfat</b>	44
5.3.1	Durchmesser der Cellulosefaser und Dichte der Cellulose.....	44
5.3.2	Sulfatierungsgrad.....	45
5.3.3	Fließverhalten.....	46
5.3.4	NaCS-Löslichkeit im EtOH-Wasser-Gemisch.....	46
<b>5.4</b>	<b>Verkapselungsverhalten</b> .....	47
5.4.1	Verkapselungsverfahren.....	47
5.4.2	Festigkeitbestimmung.....	48
<b>5.5</b>	<b>Diffusionsverhalten von Glukose durch die NaCS-PDADMAC-Kapseln</b>	48
<b>6</b>	<b>Herstellung von NaCS und Aufbau der Versuchsanlage</b> .....	49
<b>6.1</b>	<b>Beschreibung des Verfahrens zur Herstellung von Na-Cellulosesulfat</b>	49
<b>6.2</b>	<b>Cellulosesulfatierungskinetik</b> .....	53
6.2.1	Versuchsanlage.....	53
6.2.2	Bestimmung des Umsatzes.....	54
<b>6.3</b>	<b>Herstellung des Cellulosesulfats</b> .....	54
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Auswertungen</b> .....	57
<b>7.1</b>	<b>Reaktionswärme</b> .....	57
7.1.1	Veresterungswärme.....	57
7.1.2	Sulfatierungswärme.....	58
<b>7.2</b>	<b>Durchmesser der Cellulosefaser und Dichte der Cellulose</b> .....	59
7.2.1	Durchmesser der Cellulosefaser.....	59
7.2.2	Dichte der Cellulose.....	60
<b>7.3</b>	<b>Cellulosesulfatierungskinetik</b> .....	60
7.3.1	Berechnung der Cellulosesulfatierungskinetik mit dem entwickelten Modell	60
7.3.2	Kinetik der Cellulosesulfatierung mit dem Wiederverwendeten Reaktionsgemisch.....	62
<b>7.4</b>	<b>Ausbeute an Na-Cellulosesulfat</b> .....	64
<b>7.5</b>	<b>Eigenschaften von Na-Cellulosesulfat</b> .....	67

---

7.5.1	Sulfatierungsgrad.....	67
7.5.2	Fließverhalten der NaCS-Lösung.....	69
7.5.3	NaCS-Löslichkeit im Ethanol-Wasser-Gemisch.....	75
<b>7.6</b>	<b>Festigkeit der Kapseln.....</b>	<b>76</b>
7.6.1	Abhängigkeit von der NaCS-Konzentrationen.....	77
7.6.2	Abhängigkeit vom Sulfatierungsgrad.....	78
7.6.3	Abhängigkeit von den verschiedenen PDADMAC-Arten.....	78
7.6.4	Abhängigkeit von der Anzahl der Autoklavierzyklen.....	80
<b>7.7</b>	<b>Diffusionsverhalten von Glukose durch die NaCS-PDADMAC-Kapseln</b>	<b>81</b>
<b>7.8</b>	<b>Herstellung des NaCS durch das entwickelte Verfahren.....</b>	<b>82</b>
7.8.1	Temperatureinfluß auf der Sulfatierung.....	82
7.8.2	Bestimmung der Betriebsparameter des Herstellungsverfahrens.....	83
7.8.3	Herstellung von NaCS unter optimierten Bedingungen .....	85
<b>7.9</b>	<b>Herstellung von NaCS mit regeneriertem Reaktionsgemisch .....</b>	<b>86</b>
7.9.1	Regenerierung des verbrauchten Reaktionsgemisches.....	86
7.9.2	Herstellung von NaCS mit regeneriertem Reaktionsgemisch.....	90
<b>8</b>	<b>Scale-up des Verfahrens zur Herstellung von Na-Cellulosesulfat .....</b>	<b>91</b>
<b>8.1</b>	<b>Prinzip des Scale-up.....</b>	<b>91</b>
8.1.1	Ähnlichkeitstheorie/Dimensionsanalyse.....	91
8.1.2	Regimeanalyse.....	91
<b>8.2</b>	<b>Ausbau der Pilotanlage zur Herstellung von Na-Cellulosesulfat.....</b>	<b>92</b>
<b>8.3</b>	<b>Auswertung.....</b>	<b>96</b>
8.3.1	Veresterung.....	96
8.3.2	Sulfatierung.....	98
8.3.3	Aufarbeitung.....	102
8.3.4	Betriebsablauf der NaCS-Herstellung.....	105
8.3.5	Vergleich der Ergebnisse von Labor-/Pilotanlage.....	105
<b>9</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>107</b>
<b>9.1</b>	<b>Auswahl des Reaktionsgemisches.....</b>	<b>107</b>
<b>9.2</b>	<b>Verschiedene Cellulosearten und ihre Reaktionsprodukte.....</b>	<b>107</b>
<b>9.3</b>	<b>Sulfatierungskinetik.....</b>	<b>108</b>
<b>9.4</b>	<b>Aufarbeitung des Produkts.....</b>	<b>110</b>
<b>9.5</b>	<b>Recycling der Abfälle.....</b>	<b>113</b>

---

<b>9.6</b>	<b>Festigkeit der NaCS-PDADMAC-Kapseln.....</b>	<b>115</b>
<b>9.7</b>	<b>Anwendungen für NaCS.....</b>	<b>117</b>
<b>9.8</b>	<b>Produktionskosten von NaCS-Herstellung.....</b>	<b>118</b>
<b>9.9</b>	<b>Industrielle Potentiale der Cellulosesulfatierung.....</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>122</b>