Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **I**

Inhaltsverzeichnis ..... **III**

Kurzfassung ..... **VI**

Abstract **7**

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis ..... **VIII**

1 Einleitung **1**

2 Stand des Wissens **4**

2.1 Cleaning-in-Place 4
2.1.1 Grundlagen der CIP-Reinigung in geschlossenen Systemen 5
2.1.2 Reinigungskinetik beim Cleaning-in-Place 6
2.1.3 Stofftransportmechanismen beim Cleaning-in-Place 9

2.2 Strömende Fluide und Partikelbewegung 12
2.2.1 Grundlagen der Fluiddynamik 13
2.2.2 Partikelabtrag und -transport in Wandnähe 16

2.3 Diffusion 18
2.3.1 Partikeldiffusion durch Flüssigkeiten 19
2.3.2 Diffusion von Flüssigkeiten in Feststoffen 20

2.4 Partikelgrößenmessung mittels Laserbeugung 20

2.5 Modellverschmutzungen für Reinigungsuntersuchungen 23
2.5.1 Eigelb 26
2.5.2 Stärke 28

3 Konzeptentwicklung **32**

3.1 Wissenslücke 32

3.2 Modellvorstellung des Stofftransports bei der Abreinigung 33

3.3 Abgeleitete Untersuchungen 34

3.4 Wahl der Modellverschmutzungen 36

4 Experimentelle Untersuchungen **38**

4.1 Reinigungsanlage ... 38
4.2 Modellverschmutzungen und Probenherstellung ... 42
4.2.1 Eigelbverschmutzung ... 42
4.2.2 Stärkeverschmutzung ... 44
4.3 Bestimmung der Partikeleigenschaften ... 44
4.3.1 Partikelgrößenmessung ... 44
4.3.2 Dichte der Partikel ... 45
4.3.3 Realer Brechungsindex ... 45
4.3.4 Absorptionskoeffizient ... 46
4.3.5 Mikroskopie ... 47
4.4 Schichtdickenmessung mittels Fluid Dynamic Gauging ... 47
4.4.1 Bestimmung der Ausgangsschichtdicke ... 49
4.4.2 Quellverhalten der Verschmutzungsschicht ... 50
4.5 Bestimmung der Verschmutzungskonzentration im Reinigungsmittel ... 52
4.6 Messung der Partikeldiffusion ... 55
4.7 Statistische Versuchsauswertung und Modellbildung ... 57

5 Experimentelle Ergebnisse ... 64
5.1 Ausgangschichtdicke der Verschmutzungsschicht ... 64
5.2 Eigenschaften der Verschmutzungspartikel ... 65
5.2.1 Partikeldichte ... 65
5.2.2 Realer Brechungsindex der Partikel ... 66
5.2.3 Absorptionskoeffizient der Partikel ... 69
5.2.4 Partikelgröße ... 71
5.3 Größe der abgetragenen Verschmutzungspartikel ... 76
5.3.1 Veränderung der Partikelgröße über die Reinigungszeit ... 76
5.3.2 Einfluss der Reinigungsparameter auf die Partikelgröße ... 80
5.3.3 Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus der Partikelgröße ... 85
5.4 Quellverhalten der Verschmutzungsschicht ... 87
5.4.1 Modellierung des Quellverhaltens ... 88
5.4.2 Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzungsschicht ... 97
5.5 Diffusionskoeffizienten der Verschmutzungspartikel ... 103
5.5.1 Einfluss der Diffusionszeit ... 103
5.5.2 Einfluss der Konzentration an Natronlauge ... 107
5.6 Kinetik der Reinigung ... 109
5.6.1 Weibull-Modell der Reinigungskurven ... 109
5.6.2 Einflussfaktoren auf die Reinigungszeit ... 112

6 Simulation des Partikeltransports durch die viskose Unterschicht 121

6.1 Grundlagen zur Berechnung des Partikeltransports 121
6.1.1 Annahmen und Kräftegleichgewicht am Partikel 121
6.1.2 Konvektiver Partikeltransport senkrecht zur Wand 124
6.1.3 Diffusiver Partikeltransport 126
6.1.4 Konvektiver Partikeltransport in Strömungsrichtung 127
6.1.5 Numerisches Lösen des Differentialgleichungssystems 128

6.2 Einflüsse auf den Partikeltransport bei der Reinigung 129
6.2.1 Einfluss der einzelnen Reinigungsparameter 131
6.2.2 Einfluss der Eigenschaften der Verschmutzungspartikel 136

6.3 Diffusiver und konvektiver Partikeltransport 139

6.4 Partikeltransport bei der Reinigung von Eigelb 142

7 Übertragung auf die Reinigung von Stärke 147

7.1 Benötigte Reinigungszeit für die Stärkeverschmutzung 147

7.2 Partikelgröße der abgereinigten Stärkepartikel 150

7.3 Partikeltransport bei der Reinigung von Stärke 152

7.4 Vergleich der Reinigung von Stärke und Eigelb 155

8 Zusammenfassung und Ausblick 157

Literaturverzeichnis 161

Anhang 171

Lebenslauf 179

Veröffentlichungen 180