

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 Fluidodynamik	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	Ausgangsschichtdicke 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