

Dipl.-Ing. Norbert Kockmann, Krefeld

Belagbildung bei Suspensionsströmung im vertikalen Fallfilm

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **477**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung und Überblick	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Die Filmströmung	3
2.1.1 Die Fluidodynamik der Filmströmung	3
2.1.1.1 Die laminare Filmströmung	3
2.1.1.2 Die wellig-laminare Filmströmung	5
2.1.1.3 Die turbulente Filmströmung	8
2.1.2 Wärmeübergang bei der Filmströmung	12
2.1.2.1 Wärmeübergang mit Phasenwechsel	13
2.1.2.2 Wärmeübergang ohne Phasenwechsel	14
2.1.2.3 Verschiedene Einflüsse auf den Wärmeübergang	16
2.1.3 Stoffübergang bei der Kristallisation aus der Filmströmung	17
2.1.4 Fallfilmverdampfer	20
2.2 Belagbildung	23
2.2.1 Charakterisierung der Belagbildung	24
2.2.2 Belagbildung durch Kristallisation	26
2.2.3 Belagbildung im Fallfilmverdampfer	27
2.2.4 Verhinderung der Belagbildung	29
2.3 Suspensionsströmung	30
3 Die Versuchsanlagen	32
3.1 Die Laboranlage	32
3.1.1 Der Versuchsaufbau	32
3.1.2 Die Versuchsdurchführung	35
3.1.3 Die Versuchsauswertung	36
3.2 Die Verdampferanlage	37
3.2.1 Der Lösungskreislauf	37
3.2.2 Die Zusatzapparate	39
3.2.3 Meßgeräte und Regelungstechnik	40
3.2.4 Die Versuchsdurchführung	41
3.2.5 Die Versuchsauswertung	42
3.3 Partikeln	43
4 Partikeln in der welligen Filmströmung	45
4.1 Die mittlere Filmdicke	45
4.2 Filmströmung mit Partikeln	48
4.3 Wechselwirkung zwischen Partikeln und Wand	52
4.3.1 Abtrag eines Belags durch suspendierte Partikeln im Film	52
4.3.2 Kräfte auf eine Partikel in der Filmströmung	55
4.3.3 Kraft auf die Wand von einer Partikel in der Filmströmung	57
5 Wärmeübergang bei der Filmströmung von Suspensionen	60
5.1 Wärmeübergang bei Abkühlung	60

5.1.1	Wärmeübergang bei der Abkühlung eines turbulenten Wasserfilms	60
5.1.2	Wärmeübergang einer Suspension in der Filmströmung	63
5.1.3	Wärmeübergang bei der Abkühlung hochviskoser Fluide	66
5.2	Wärmeübergang bei der Verdampfung	68
5.2.1	Wärmeübergang bei der Verdampfung von Wasser	68
5.2.2	Wärmeübergang mit Partikeln	70
6	Belagbildung in der Filmströmung	73
6.1	Kristallisation bei der Abkühlung	73
6.1.1	Kristallisation einer Na_2HPO_4 -Wasser-Lösung	73
6.1.2	Kristallisation unter dem Einfluß suspendierter Partikeln	76
6.1.3	Kristallisation aus hochviskosen Lösungen	82
6.2	Kristallisation bei der Verdampfung	83
6.2.1	Kristallisation im Fallfilmverdampfer	84
6.2.2	Kristallisation unter dem Einfluß suspendierter Partikeln	87
6.3	Analytische Beschreibung der Belagbildung durch Kristallisation	90
6.3.1	Belagbildung im Verdampfer mit konstanter Temperaturdifferenz	90
6.3.2	Belagbildung und Stofftransport in der Filmströmung	92
6.3.3	Vergleich mit Meßdaten	93
6.3.4	Belagbildung bei konstanter Wärmestromdichte	94
6.3.5	Belagbildung unter Einfluß von Partikeln	96
7	Industrieller Einsatz	98
7.1	Die Umwälzpumpe	98
7.2	Der Verdampferapparat	99
7.3	Die Gestaltung des Lösungskreislaufs	99
7.4	Auswahl und Einbau der Meßgeräte	100
7.5	Partikeln	100
7.6	Betrieb von Verdampferanlagen	101
8	Zusammenfassung	103
9	Literaturverzeichnis	106