

Dipl.-Ing. Armin Prasch, Freiburg

**Vakuum-Wirbelschicht
mit integrierter Mikrowelle
zum kombinierten Trocknen
thermisch labiler Produkte:
Entwicklung und
Modellierung**

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **513**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens und physikalische Grundlagen	4
2.1	Einführung in Trocknungsprozesse	4
2.2	Hydrodynamische Grundlagen der Wirbelschichttechnik	6
2.2.1	Konische Bauformen	8
2.2.2	Mathematische Beschreibung	10
2.2.3	Vakuum-Wirbelschicht	12
2.3	Physikalische Grundlagen der Trocknung durch Mikrowellen	13
2.3.1	Wechselwirkungsmechanismen	14
2.3.2	Elektromagnetische Feldstärkeverteilung	16
2.3.2.1	Feldstärkeverteilung im Trockner	16
2.3.2.2	Feldstärkeverteilung im Dielektrikum	17
2.3.3	Dielektrische Eigenschaften feuchter Produkte	18
2.4	Kombinierte Trocknungsverfahren	22
2.4.1	Modellvorstellungen	22
2.4.2	Anwendungsbeispiele	27
3	Problemstellung und Ziel der Arbeit	31
4	Modellierung des kombinierten Trocknungsverfahrens	33
4.1	Integrales Modell	34
4.1.1	Leistungseintrag durch die Mikrowelle in der Wirbelschicht	34
4.1.2	Bilanzgleichungen	36
4.1.3	Wärme- und Stoffübergang in der Wirbelschicht	37
4.2	Differentielles Modell	38
4.2.1	Grundgleichungen für den Transport von Wasser	39
4.2.1.2	Transportgleichung für freies Wasser	39
4.2.1.2	Transportgleichung für Wasserdampf	41
4.2.1.3	Transportgleichung für gebundenes Wasser	42
4.2.2	Wärme- und Stoffbilanzen	42
4.2.2.1	Feuchter Kern	43
4.2.2.2	Trockene Schale	45
4.2.2.3	Koppelung der Wärme- und Stoffbilanzen mit den Übergangsbedingungen	46
4.2.2.4	Bestimmen des Trockenspiegelradius	47
4.2.3	Leistungseintrag durch die Mikrowelle im Einzelpartikel	48
4.3	Diskussion beider Modelle	51

5	Material und Methoden	54
5.1	Versuchsanlage	54
5.1.1	Meßtechnik	56
5.1.2	Aufbau der Mikrowelleneinheit	58
5.1.2.1	Ermitteln der Mikrowellenleistung	59
5.2	Untersuchte Produkte	61
5.2.1	Kartoffelstärkegranulat	61
5.2.2	Bäckerhefe (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	61
5.3	Messen der Sorptionsisothermen	62
5.4	Messen dielektrischer Eigenschaften	63
5.5	Bestimmen der Viabilität und der Aktivität der Hefe	65
5.5.1	Viabilität (Überlebensrate)	65
5.5.2	Aktivität	65
6	Ergebnisse und Diskussion	67
6.1	Wasserbindung und Wasserbeweglichkeit	67
6.1.1	Desorptionsisotherme für Hefe und Kartoffelstärke	67
6.1.2	Mathematische Beschreibung der Desorptionsisothermen	69
6.2	Dielektrische Eigenschaften	71
6.2.1	Kartoffelstärkegranulat	71
6.2.1.1	Einfluß der Temperatur	71
6.2.1.2	Einfluß von Wassergehalt und Wasserbindung	72
6.2.2	Hefe	74
6.2.2.1	Einfluß der Temperatur	74
6.2.2.2	Einfluß von Wassergehalt und Wasserbindung	75
6.2.3	Diskussion	78
6.3	Leistungseintrag durch die Absorption der Mikrowelle	79
6.3.1	Leistungseintrag und Leistungsverteilung	79
6.3.2	Gütegrad des Wirbelschichttrockners	84
6.3.3	Diskussion	87
6.4	Hydrodynamisches Betriebsverhalten der Vakuum-Wirbelschicht	88
6.4.1	Ausdehnung, Lockerungspunkt und Lockerungsgeschwindigkeit	88
6.4.2	Diskussion	93
6.5	Wärme- und Stoffübergang in der Vakuum-Wirbelschicht	95
6.6	Trocknungsversuche	97
6.6.1	Versuchsdurchführung und Versuchsplan	97
6.6.2	Kartoffelstärkegranulat	100
6.6.2.1	Produkttemperaturen	100
6.6.2.2	Trocknungsverlauf	107
6.6.3	Hefe	113

6.6.3.1	Produkttemperaturen und Trocknungsverhalten	113
6.6.3.2	Aktivitätserhalt beim Trocknen in der Vakuum-Wirbelschicht	119
6.6.4	Absorbierte Mikrowellenleistung: Vergleich Modell und Experiment	126
6.6.5	Diskussion	131
6.6.5.1	Produkttemperaturen und Trocknungscharakteristik	131
6.6.5.2	Trocknungsverlauf und absorbierte Mikrowellenleistung	133
6.6.5.3	Aktivitätserhalt durch schonendes Trocknen	135
7	Schlußfolgerungen	136
8	Zusammenfassung	138
9	Anhang	142
9.1	Skizze des Arbeitsturmes und technische Daten	142
9.2	Wichtige Stoffdaten	143
9.2.1	Trockene Luft	143
9.2.2	Wasser und gesättigter Dampf	144
9.2.3	Stoffwerte von Kartoffelstärkegranulat	144
9.2.4	Stoffwerte von Hefe	145
9.3	Dielektrische Eigenschaften	148
9.4	Bestimmen der Desorptionsisothermen	149
9.5	Mollier h-x-Diagramm	151
9.6	Trocknungskurve und Produkttemperatur der Hefetrocknung	153
9.7	Druckabhängigkeit der Kühlgrenz- und der Beharrungstemperatur	153
9.8	Kartoffelstärkegranulat: Absorbierte MW-Leistung	154
9.9	Berechnungen	154
9.9.1	Programm für das differentielle Modell (Turbo Pascal)	154
9.9.2	Dielektrische Energiedichteverteilung im Einzelpartikel (MathCAD)	157
10	Literaturverzeichnis	167