

Universität Hohenheim

Institut für Agrartechnik

Agrartechnik in den Tropen und Subtropen



## **Abschlußbericht**

Verbundprojekt:

### **Optimierung von Trocknungsverfahren für Arznei- und Gewürzpflanzen hinsichtlich Energieeinsatz, Wirtschaftlichkeit und Produktqualität**

Teilvorhaben 2:

### **Untersuchungen zur Optimierung einer Bandtrocknungsanlage**

Förderkennzeichen:	22013007
Projektlaufzeit:	15.09.2007 – 31.12.2010
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Martin Böhner Dr.-Ing. Albert Heindl Prof. Dr. Joachim Müller

## Gliederung

I.	Kurzdarstellung.....	6
	1 Aufgabenstellung.....	6
	2 Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens.....	6
	3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
	4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	7
	5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
II.	Eingehende Darstellung.....	14
	1 Erzielte Ergebnisse.....	14
	1.1 Gleichmäßigkeit und Energieverbrauch der Bandtrocknung von Petersilie ( <i>Petroselinum crispum</i> ).....	14
	1.1.1 Kurzfassung.....	14
	1.1.2 Einleitung.....	14
	1.1.3 Material und Methoden.....	16
	1.1.3.1 Trocknungstechnik.....	16
	1.1.3.2 Feuchtegehalt und Ölverbrauch.....	18
	1.1.3.3 Messung der Luftzustände.....	19
	1.1.4 Ergebnisse und Diskussion.....	20
	1.1.5 Schlussfolgerung.....	24
	1.1.6 Literatur.....	25
	1.2 Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Luftverteilung im Bandtrockner mittels CFD-Strömungssimulation.....	26
	1.2.1 Kurzfassung.....	26
	1.2.2 Einleitung.....	26
	1.2.3 Material und Methoden.....	27
	1.2.3.1 Aufbau und Funktion des untersuchten Trockners.....	27
	1.2.3.2 Probennahme und Messungen während der Trocknung.....	27
	1.2.3.3 Numerische Simulation.....	28
	1.2.3.4 Randbedingungen für die Simulation ohne Produkt.....	29
	1.2.3.5 Randbedingungen für die Simulation mit Produkt.....	29
	1.2.4 Ergebnisse und Diskussion.....	30
	1.2.4.1 Simulation ohne Produkt für die Einstellung der Zuluftklappe.....	30
	1.2.4.2 Luftverteilung im Trocknungsraum.....	32
	1.2.4.3 Simulation mit Produkt für die Auswahl von Leitblechen.....	33
	1.2.5 Schlussfolgerung.....	35
	1.2.6 Literatur.....	36
	1.3 Reduktion des fossilen Energieverbrauchs der Bandtrocknung durch die Abwärmenutzung eines Biogasblockheizkraftwerkes.....	38
	1.3.1 Kurzfassung.....	38

1.3.2	Einleitung.....	39
1.3.3	Material und Methoden.....	40
1.3.3.1	Trocknungstechnik.....	40
1.3.3.2	Trocknungsmaterial und Betriebsweise.....	42
1.3.3.3	Trocknerleistung und Energieverbrauch.....	43
1.3.3.4	Biogasanlage und BHKW.....	44
1.3.3.5	Biogasertragstest.....	45
1.3.4	Ergebnisse und Diskussion.....	46
1.3.4.1	Trocknerleistung und Energieverbrauch.....	46
1.3.4.2	Hohenheimer Biogasertragstest für Arznei- und Gewürzpflanzen..	50
1.3.5	Schlussfolgerung.....	52
1.3.6	Literatur.....	53
1.4	Online Messung der Produktfeuchte und des ätherischen Ölgehaltes mittels Nahinfrarot-Spektroskopie bei der Bandtrocknung von Petersilie.....	55
1.4.1	Kurzfassung.....	55
1.4.2	Einleitung.....	55
1.4.3	Material und Methode.....	58
1.4.3.1	Untersuchte Pflanzen.....	58
1.4.3.2	Bandtrocknungssysteme.....	58
1.4.3.2.1	Fünfbandrockner.....	58
1.4.3.2.2	Siebenbandrockner.....	59
1.4.3.3	NIR Messinstrumente.....	60
1.4.3.3.1	Thermo Electron NIR-Sensor .....	60
1.4.3.3.1.1	Kalibrationsmethode .....	61
1.4.3.3.2	Mesa NIR Sensor.....	62
1.4.3.3.2.1	Kalibrationsmethode.....	62
1.4.3.4	Referenzmethoden für die Feuchtegehaltsbestimmung.....	63
1.4.3.4.1	Trockenschrankmethode.....	63
1.4.3.4.2	IR-Schnellfeuchtebestimmer .....	64
1.4.3.5	Laboranalyse des ätherischen Ölgehaltes.....	64
1.4.3.6	Statistische Auswertung.....	64
1.4.4	Ergebnisse und Diskussion.....	64
1.4.4.1	Fünfbandrockner.....	64
1.4.4.1.1	Kalibration des Feuchtegehaltes für glatte Petersilie.....	64
1.4.4.1.2	Kalibration des Feuchtegehaltes für krause Petersilie.....	66
1.4.4.1.3	Kalibration des ätherischen Ölgehaltes für glatte/krause Petersilie .....	67
1.4.4.2	Siebenbandrockner.....	68
1.4.4.2.1	Kalibration des Feuchtegehaltes für glatte Petersilie.....	68
1.4.4.3	Anwendung der NIR-Sensoren zur Kontrolle des Trocknungsprozesses.....	70
1.4.5	Zusammenfassung.....	71
1.4.6	Literatur.....	72
2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	74
3	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	74
4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	75

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1-1: Luftführung des Bandrockners.....	17
Abb. 1-2: Querschnitt des Bandrockners mit innerer Luftführung.....	18
Abb. 1-3: Messstellenanordnung im Heizraum und am ersten Band des Trockners (Draufsicht).....	19
Abb. 1-4: Produktfeuchtegehalt über der Bandbreite jeweils am Ende der fünf Bänder; Fehlerbalken = min./ max. Wert .....	20
Abb. 1-5: Produktfeuchtegehalt (Fehlerbalken = min./ max. Wert) und Lufttemperatur (Fehlerbalken = Standardabweichung) über der Bandbreite in der Mitte des ersten Bandes.....	21
Abb. 1-6: Modell der halben Trocknerbreite zur Berechnung der Wandstrahlung auf das Band.....	22
Abb. 1-7: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in den sieben Abluftkanälen; Fehlerbalken = Standardabweichung.....	24
Abb. 2-1: Inhomogene Temperaturverteilung über dem Trocknerquerschnitt .....	30
Abb. 2-2: Simulation der Luftgeschwindigkeit beim seitlichen Einströmen der Luft durch einen Einlassschlitz in den Trocknungsraum.....	31
Abb. 2-3: Leitbleche an einem Einlassschlitz mit Luftführung und Bandlaufrichtung.....	33
Abb. 2-4: Draufsicht auf Temperaturverteilung des obersten Trocknungsbandes ohne Leitbleche (a) und mit 800 mm Leitblechen (b).....	34
Abb. 2-5: Produktfeuchtegehalte über die Bandbreite vor (2008) und nach (2009) der Installation von Leitblechen.....	35
Abb. 3-1: Systemskizze des Bandrockners mit Heizraum .....	41
Abb. 3-2: Systemskizze des Bandrockners & Heizraums nach dem Umbau 2009..	42
Abb. 3-3: Lufttemperatur der Warmlufterhitzer (T1- T3), der Umluft (UL) und der Wärmetauscher 1/2 (WT 1/2) ohne (2008) und mit (2009) Biogasab- wärmennutzung (Fehlerbalken = Standardabweichung).....	49
Abb. 3-4: Biogasertragstest für verschiedene Arznei- und Gewürzpflanzen.....	51
Abb. 4-1: Längsschnitt des Fünfbandrockners mit installierten NIR Sensoren.....	59
Abb. 4-2: Längsschnitt des Siebenbandrockners mit installierten NIR Sensoren....	60
Abb. 4-3: Kalibration des Feuchtegehaltes von glatter Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b).....	65

Abb. 4-4: Kalibration des Feuchtegehaltes von krauser Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b).....	66
Abb. 4-5: Kalibration des ätherischen Ölgehaltes von glatter Petersilie für den Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b).....	67
Abb. 4-6: Kalibration des ätherischen Ölgehaltes von krauser Petersilie für den Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b).....	68
Abb. 4-7: Kalibration des Feuchtegehaltes von glatter Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b).....	69
Abb. 4-8: Wasserverdampfung in Abhängigkeit von Aufgabemenge und Anfangsfeuchte.....	71

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 2-1: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen auf Band 1...31	
Tab. 2-2: Simulationsergebnisse der Geschwindigkeiten und Massenströme an den Einlässen der Druckkammer bei unterschiedlichem Klappenwinkel.....	31
Tab. 3-1: Technische Daten des Blockheizkraftwerks (Herstellerangaben).....	45
Tab. 3-2: Parameter für die Bewertung der Trocknung von Petersilie ohne (2008) und mit (2009) der Nutzung von Biogasabwärme.....	47
Tab. 3-3: Parameter zur Bewertung des Vortrockners für verschiedene Trocknungsprodukte.....	48
Tab 3-4: Hohenheimer Biogasertragstest für Arznei- und Gewürzpflanzen und konventionelle Substrate.....	50
Tab. 4-1: Vergleich zwischen Trockenschrank und Halogentrockner zur Feuchtebestimmung für frische, glatte Petersilie.....	70

## I. Kurzdarstellung

### 1 Aufgabenstellung

Das vorliegende Projekt stellte sich die Aufgabe der Optimierung von Trocknungsverfahren für Arznei- und Gewürzpflanzen hinsichtlich Energieeinsatz, Wirtschaftlichkeit und Produktqualität. Die praktische Umsetzung und beispielhafte Demonstration der Optimierungsmaßnahmen waren für die Bandtrocknung vorgesehen. Hierfür wurden repräsentative Untersuchungen an einem Fünfbandrockner mit neuem Vortrockner der Arzneipflanzen GbR, Groß-Gerau/Hessen, unter Einbeziehung einer in der Nähe errichtenden Biogasanlage durchgeführt.

### 2 Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens

Die Bandtrocknung stellt in der Erzeugung von Arznei- und Gewürzpflanzen einen sehr wichtigen, qualitätsbestimmenden Prozess dar, der einen hohen Anteil an den Gesamtproduktionskosten hat. Gerade wegen steigender Energiekosten und strengen Qualitätsanforderungen ist eine effiziente Trocknungstechnik nötig.

Die Durchführung der Untersuchungen setzte eine solide Messtechnik und begleitende Analytik voraus. Weiterhin war es wichtig Zugang zu einer Praxisanlage und den Parametern wie Energieverbrauch, Leistungsdaten und Produktionsmengen zu erhalten. Hierfür waren auch einige Investitionen auf Seiten des Anlagenbetreibers zur Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen nötig. Gleichzeitig waren die Messungen abhängig von den Erntemengen und Witterungsbedingungen während der Erntesaison.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt erstreckte sich über drei Ernteperioden. Vor der ersten Messkampagne wurden umfangreiche Messtechnik für Luftgeschwindigkeit, Temperaturen und Luftfeuchten und Datenerfassung in den Trockner eingebaut. Während der Erntesaison wurden Messungen und Probennahmen am Praxistrockner durchgeführt. Die Analytik dazu fand parallel im institutseigenen Labor statt. Für bestimmte Analysen wurden Auftragslabore kontaktiert. Parallel zu den Messungen und in der Winterpause wurden CFD-Strömungssimulationen, Auswertungen und

Berechnung für Umbauten an der Trocknungsanlage durchgeführt. Nach der ersten Saison wurde ein mit Biogasabwärme beheizter Vortrockner sowie ein weiterer Wärmetauscher für die Nutzung der Biogas BHKW-Abwärme errichtet. Des Weiteren wurden Luftleitbleche, deren Konstruktion auf den Ergebnissen der Strömungssimulation basierte eingebaut. In der zweiten Messkampagne wurde mit Messungen die Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Trocknung durch die Luftleitbleche validiert. Die Biogasanlage konnte ca. 40% der Wärme für die Trocknung bereitstellen und damit den fossilen Energieverbrauch drastisch reduzieren. In der dritten Erntesaison wurde der Schwerpunkt auf die Feuchtemessung mittels NIR-Sensor gelegt. Dazu wurden umfangreiche Kalibrationen durchgeführt sowie ein Regelungsansatz entwickelt.

#### 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Um den technischen Stand der Bandtrocknung zu erheben war eine Marktanalyse im Bereich Anlagenbauer sowie an Praxisanlagen und der Fachliteratur nötig.

Gerade was die Luftführung in den Mehrbandtrocknern betrifft ist die Analyse der jeweiligen Konstruktionen wichtig, folgende Anlagenbauer sind hier zu nennen:

- Binder GmbH, Marzling
- Heindl GmbH; Mainburg (jetzt Riela, Riesenbeck)
- Jaquet Verfahrenstechnik GmbH, Freising
- Stela Laxhuber GmbH, Massing

Die Fachliteratur wurde über die Literaturdatenbank Scopus (Elsevier, Amsterdam) sowie Universitätsbibliotheken recherchiert. Nach Themen geordnet sind folgende Fachartikel relevant:

Thema: Gleichmäßigkeit und Energieverbrauch der Bandtrocknung von Petersilie (*Petroselinum crispum*):

Bux M, Graf J, Heindl A, Müller J. Erfassung der räumlichen und zeitlichen Gutfeuchte- und Temperaturverteilung durch berührungslose Oberflächentemperaturmessung bei der Trocknung von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Artischocke (*Cynara scolymus* L.) in einem Bandtrockner Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen 2006;11(4):186-190.

Gehrmann D, Esper G, Schuchmann H. Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. Hamburg: Behr's Verlag; 2009. S. 110-134.

Heindl A. Hoppe B. Aufbereitung vor der Trocknung. In: Saluplanta: Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenanbaus, Bernburg, Band 2, 2010, S.226-228

Mellmann J, Füll C. Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen - Spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen 2008;13(3):127-133.

Müller J. Convective drying of medicinal, aromatic and spice plants: a review. Stewart Postharvest Review 2007;4(2):1-6.

Müller J, Heindl A. Drying of medicinal plants. In: Bogers RJ, Craker LE, Lange D, editors. Medicinal and aromatic plants - agricultural, commercial, ecological, legal, pharmacological and social aspects. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2006. p. 237-252.

Müller J, Heindl A. Trocknung von Arzneipflanzen in Praxis des ökologischen Kräuteranbaus. Mainz: Stiftung Ökologie & Landbau, Bioland Verlags GmbH: Mainz; 1999. S. 139-156.

Krischer O, Kast W. Trocknungstechnik - Band 1: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag; 1991. S. 74-80.

#### Thema: Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Luftverteilung im Bandtrockner mittels CFD-Strömungssimulation:

Böhner, M., Barfuss, I., Heindl, A. & Müller, J. (2009), Uniformity and energy consumption of a band drying process of parsley (*Petroselinum crispum*). Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 14 (3), pp. 126-131.

Böhner, M., Barfuss, I., Heindl, A., Müller, J., Graf, H. & Wieninger, M. (2010). Luftleitvorrichtung zur Verbesserung der Luftverteilung über der Bandbreite im Inneren von Bandtrocknern. In Deutsches Patent und Markenamt, 11 (Ed DPMA). Germany.

Bux, M., Graf, J., Heindl, A. & Müller, J. (2006), Detection of spatial and temporal moisture and temperature distribution by contactless surface temperature measurement during drying of red clover (*Trifolium pratense* L.) and artichoke (*Cynara scolymus* L.) on a belt-dryer. Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 11 (4), pp. 186-190.

Fluent Incorporation (2006), FLUENT 6.3 User's Guide, Fluent Incorporation, Lebanon

- Khankari, K. K. & Patankar, S. V. (1999). Performance analysis of a double-deck conveyor dryer – computational approach. *Drying Technology: An International Journal*, 17 (10), pp. 2055 - 2067.
- Margaris, D. P. & Ghiaus, A.-G. (2006). Dried product quality improvement by air flow manipulation in tray dryers. *Journal of Food Engineering*, 75 (4), pp. 542-550.
- Mathioulakis, E., Karathanos, V. T. & Belessiotis, V. G. (1998). Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: Application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 36 (2), pp. 183-200.
- Mirade, P. S. & Daudin, J. D. (2000). A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. *Drying Technology*, 18 (1), pp. 81 - 97.
- Norton, T. and Sun, D.-W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (11), pp. 600-620.
- Patankar, S. V. & Spalding, D. B. (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15 (10), pp. 1787-1806.
- Scott, G. & Richardson, P. (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 8 (4), pp. 119-124.
- Therdthai, N., Zhou, W. & Adamczak, T. (2004). Three-dimensional CFD modelling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process. *Journal of Food Engineering*, 65 (4), pp. 599-608.
- Verboven, P., Scheerlinck, N., De Baerdemaeker, J. & Nicolai, B. M. (2000). Computational Fluid Dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of Food Engineering*, 43 (2), pp. 61-73.
- Yue, X., Zhao, J., Shi, E., Chen, Y. & Liu, X. (2007). Analysis of air velocity distribution in a multilayer conveyor dryer by computational fluid dynamics. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2 (2), pp. 108-117.

Thema: Reduktion des fossilen Energieverbrauchs der Bandtrocknung durch die Abwärmenutzung eines Biogasblockheizkraftwerkes

Bundesanzeiger (2008); Act Revising the Legislation on Renewable Energy Sources in the Electricity Sector and Amending Related Provisions, 49

Fantozzi F; Ferico S D; Desideri U (2000). Study of a cogeneration plant for agro-food industry. *Applied Thermal Engineering*, 20 (11), 993-1017.

Fritzson A; Berntsson T (2006). Energy efficiency in the slaughter and meat processing industry-opportunities for improvements in future energy markets. *Journal of Food Engineering*, 77 (4), 792-802.

Gaderer M; Lautenbach M; Fischer T; Ebertsch G; (2007). Wärmenutzung bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, *LfU Umwelt spezial*

Heindl A (1999). Dryer for Medicinals Herbs and Spice Plants - Overview and Potentialies in Future. *Drogenreport*, 12 (21), 45-53

Helffrich D; Oechsner H (2003). The Hohenheimer Biogas Yield Test - Comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass. *Landtechnik*, 58 (3), 148-149.

Helffrich D; Morar M; Lemmer A; Oechsner H; Steingaß H (2005) Laborverfahren zur Bestimmung der Qualität und Quantität des beim anaeroben Abbau organischer Substanzen entstehenden Biogases im Batch-Verfahren. Patent Nr. DE10227685B4 In Deutsches Patent und Markenamt.

Jelinek D (2001). Energy-sharing arrangement between natural-gas-fired unit-type co-generation plant and a belt-type drying system for vegetables and herbs. *Gaswärme International*, 50 (10), 455-459.

Kusch S; Oechsner H; Jungbluth T (2008). Biogas production with horse dung in solid- phase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99 (5), 1280-1292.

Mellmann J; Fürll C (2008). Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen - Spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 13 (3), 127-133.

Menshutina N V; Gordienko M G; Voynovskiy A A; Kudra T (2004). Dynamic analysis of drying energy consumption. *Drying Technology*, 22 (10), 2281-2290.

Oechsner H; Lemmer A; Neuberg C (2003). Feldfrüchte als Gärsubstrat für Biogasanlagen. *Landtechnik*, 58 (3), 146-147.

Riva G; Palaniappan C (1989). Energy consumption and possible savings in tea processing. *AMA (Agricultural Mechanization in Asia)*, 20 (3), 73-77.

Ruiz Celma A; Lopez-Rodriguez F (2009). Cogeneration plant in an olive sludge industry. *Applied Thermal Engineering*, 29 (16), 3394-3400.

Schiele E (2008). Biogasanlage der ESG Kräuter GmbH - nachhaltige und umweltfreundliche Kräuterproduktion. Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 13 (2), 91-94.

Schröder H (1995). Einsatz von Blockheizkraftwerken auf Pflanzenölbasis für die Arznei- und Gewürzpflanzentrocknung. Herba Germanica, 3 (3), 145-149.

Schulz W; Heitmann S (2007). Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In Schlussbericht zum BMELV/FNR-Projekt 22009505 und 22027205 (pp. 68-71). Bremer Energie Institut, Bremen.

Strumillo C; Jones PL; Zylka R; (2007). Energy Aspects in Drying. In: Mujumdar AS, editor. Handbook of industrial drying. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis. p 1075-1101.

Weiland P (2009). Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, 1-12.

Thema: Online Messung der Produktfeuchte und des ätherischen Ölgehaltes mittels Nahinfrarot-Spektroskopie bei der Bandtrocknung von Petersilie

Büning-Pfaue H (2003) Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. Food Chemistry, 82 (1), 107-115

Cozzolino D (2009) Near Infrared Spectroscopy in Natural Products Analysis. Planta Medica, 75 (7), 746-756

Davies A M C & Grant A (1987) Review: Near infra-red analysis of food. International Journal of Food Science and Technology, 22, 191-207

Heindl A & Heindl T (1998) Application of Continuous Moisture Measurement in Multi-pass Band dryers. Journal of Medicinal and Spice Plants, 3, 146-154

Isaksson T, Nilsen B N, Tøgersen G, Hammond R P, Hildrum K I (1996) On-line, proximate analysis of ground beef directly at a meat grinder outlet. Meat Science, 43 (3-4), 245-253.

Isengard H D (2001) Water content, one of the most important properties of food. Food Control, 12 (7), 395-400.

Isengard H D, Merkh G, Schreib K, Labitzke I, Dubois C (2010) The influence of the reference method on the results of the secondary method via calibration. Food Chemistry, 122 (2), 429-435.

International Organization for Standardization (1984) ISO 6571 Spices, condiments and herbs – Determination of volatile oil content. 1. ed., Geneva, Switzerland

Jensen P D, Hartmann H, Böhm T, Temmerman M, Rabier F, Morsing M (2006) Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass and Bioenergy*, 30 (11), 935-943.

Kemney G J (2001) Process Analysis. In: Burns D A; Ciurczak E W (ed) *Handbook of Near-Infrared Analysis*, pp 729-782. Marcel Dekker, New York, USA

Lück W (1964) *Die Feuchtigkeit – Grundlagen, Messen, Regeln*, pp 141-187. Oldenbourg, München, Germany

McFarlane I (1995) *Automatic control of food manufacturing processes*, pp 1-21. Blackie Academic and Professional, Glasgow, UK

Mettler Toledo (2009) *Operating Instructions Moisture Analyzer HB43-S*. Mettler Toledo AG, Greifensee, Switzerland

Temple S J & Van Boxtel A J B (2000) Control of fluid bed tea dryers: Controller design and tuning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26 (2), 159-170.

Teuscher E (2003) *Gewürzdrogen: Ein Handbuch der Gewürze, Gewürzkräuter, Gewürzmischungen und ihrer ätherischen Öle*, pp 275-280. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Germany

Thermo Electron (2004) *Spectra-Quad 5400 User's Guide*, Waltham, USA

Togersen G, Arnesen J F, Nilsen B N, Hildrum K I (2003) On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy. *Meat Science*, 63 (4), 515-523.

Raghavan S (2007) *Handbook of Spices, Seasonings and Flavorings*. pp 150-151. CRC press, Boca Raton, USA

Schulz H, Quilitzsch R, Krüger H (2003) Rapid evaluation and quantitative analysis of thyme, oregano and chamomile essential oils by ATR-IR and NIR spectroscopy. *Journal of Molecular Structure* 661-662 (1-3), 299-306.

Schweiggert U, Carle R, Schieber A (2007) Conventional and alternative processes for spice production - a review. *Trends in Food Science & Technology* 18 (5), 260-268.

Scotter C (1990) Use of near infrared spectroscopy in the food industry with particular reference to its applications to on/in-line food processes. *Food Control*, 1 (3), 142-149.

Shenk J S, Workman J J, Westerhaus M O (2001) Application of NIR Spectroscopy to Agricultural Products. In: Burns D A; Ciurczak E W (ed) *Handbook of Near-Infrared Analysis*, pp 419-474. Marcel Dekker, New York, USA

Shiroma C, Rodriguez-Saona L (2009) Application of NIR, MIR spectroscopy in quality control of potato chips, *Journal of Food Composition and Analysis*, 2(6), 596-605.

Soysal Y, Oztekin S, Eren O (2006) Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering* 93(4): 403–413.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit folgenden Einrichtungen wurde im Projekt zusammengearbeitet:

- Arzneipflanzen GbR Ruckelshausen, Wallerstädten/ Groß-Gerau für Praxisuntersuchungen am Trockner
- ATB Potsdam Bornim zur Projektkoordination und für methodische Fragen
- Pharmaplant, Artern und IGV Potsdam- Nuthetal für Laboranalyse
- Saluplanta e.V.: Am Bernburger Winterseminar wurden jährliche die Ergebnisse des Projektes vorgestellt
- Universität Hohenheim, Fachgebiet (FG) Lebensmittelanalytik (Prof. Isengard): Fachliche Beratung zur NIR-Kalibration und Referenzanalytik
- Universität Hohenheim, FG Lebensmittel pflanzlicher Herkunft (Prof. Carle) und FG Lebensmittelverfahrenstechnik (Prof. Kohlus): Fachliche Beratung zum Thema Trocknungstechnik und Pflanzenanalytik
- Gäubodenkräuter, Straubing: NIR-Kalibrationen wurden zum Vergleich mit den Messungen in Groß-Gerau durchgeführt

## **II. Eingehende Darstellung**

Die eingehende Darstellung teilt sich in vier thematische Kapitel. Zu den vier Themen wird jeweils ein Fachartikel veröffentlicht, deshalb werden die Ergebnisse bewusst in einem kumulativen Stil präsentiert.

### **1 Erzielte Ergebnisse**

#### **1.1 Gleichmäßigkeit und Energieverbrauch der Bandtrocknung von Petersilie (*Petroselinum crispum*)**

##### 1.1.1 Kurzfassung

Bandrockner haben einen hohen Durchsatz, mit dem Erntespitzen gut abgedeckt werden können. Allerdings weisen sie häufig eine ungleichmäßige Trocknung über der Bandbreite auf. Diese Ungleichmäßigkeit durch Feuchte- und Temperaturmessung über der Bandbreite zu quantifizieren und den Energieverbrauch des Trockners zu ermitteln, war Ziel der Untersuchung. Das Gut trocknet auf dem durchströmten Band an den Längsseiten stärker als in der Mitte, so dass der Trocknungsfortschritt in der Bandmitte die Verweilzeit des Gutes im Trockner bestimmt. Die Einflussfaktoren auf die Gleichmäßigkeit der Trocknung sind neben der Luftführung und der Temperaturverteilung unter den Bändern die Schwankung der Eingangsfeuchte und die Wärmestrahlung der heißen Trocknerwände. Der Bandabschnitt, der direkt an die Trocknerwand angrenzt, erhält über fünfmal soviel Wärmestrahlung wie der Bandabschnitt in der Mitte des Trockners. Der spezifische Energieverbrauch lag bei dem untersuchten 5-Bandrockner bei 6577 kJ pro kg verdampften Wassers für krause Petersilie und bei 7610 kJ/ kg verdampften Wassers für glatte Petersilie, wobei die Übertrocknung des Gutes und phasenweise der Durchsatz und die Wasserverdampfung nicht an den thermischen Energiezufuhr zum Trockner angepasst war, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führte.

##### 1.1.2 Einleitung

Bandrockner in der Lebensmittelindustrie können bis zu 50 m lang und 5 m breit sein (Gehrmann et al., 2009). Speziell zur Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen werden Bandrockner mit drei, fünf oder sieben Bändern eingesetzt, die einen

Durchsatz an geschnittener Rohware bis zu 3000 kg/h bei einer thermischen Leistung bis 4000 kW erreichen. Basierend auf Betreiberangaben liegen Bandtrockner in den östlichen Bundesländern bei einem spezifischen Energieverbrauch von 5000 bis 6000 kJ pro kg entzogenen Wassers. Bandtrockner für Arzneipflanzen können jedoch auch bis zu 8 100 kJ/kg erreichen. Für heizöl- oder gasbeheizte Flächentrockner wurden in den Ernteperioden 2005 und 2006 Werte zwischen 8500 und 12500 kJ/kg ermittelt (2).

Die Gleichmäßigkeit und der Energieverbrauch der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Produktion. Gleichmäßigkeit und Energieverbrauch stehen in engem Zusammenhang, da bei ungleichmäßiger Trocknung die Verweilzeit des Produktes im Trockner verlängert wird, was zu geringerem Durchsatz, höherem Energieverbrauch und zur Übertrocknung des Produktes führt. Die Zielfeuchte für die Trocknung von Petersilie sind sechs bis sieben Prozent Restfeuchte bezogen auf die Gesamtmasse. Die Übertrocknung verursacht einen Verlust an empfindlichen, wertgebenden Inhaltsstoffen, wie beispielsweise den ätherischen Ölen, und eine Minderung der Farbqualität (Müller, 2007). Auch die Materialstruktur wird negativ beeinflusst, so erhöhen sich bei der Weiterverarbeitung von übertrocknetem Material die Bröckelverluste.

Bei Mehrbandtrocknern werden meist mehrere Warmluftzeuger eingesetzt, so dass die Trocknungstemperatur sowie der Luftvolumenstrom abgestuft werden können. Auf dem ersten Band sind sie, angepasst an die Wasserverdampfung, am höchsten. Die Bandgeschwindigkeit wird von oben nach unten reduziert und somit an den Trocknungsfortschritt angepasst (Müller & Heindl, 1999; 2006). Die kleinere Wasserverdampfung auf den unteren Bändern wird durch eine größere Schütthöhe teilweise kompensiert.

Beim Durchlaufen des Bandtrockners wird das Produkt durch Stachelwalzen gewendet, um eine schnellere und homogenere Trocknung zu erzielen. Bei Mehrbandtrocknern wird zusätzlich bei jeder Übergabe auf das nachfolgende Band eine Mischung und Auflockerung des Produktes erreicht. In einigen Fällen ist auch das erste Band in zwei Bänder unterteilt, um eine zusätzliche Fallstufe auf halber Trocknerlänge zu schaffen. Die Durchmischung der Produktschüttung in Trocknerlängsrichtung ist somit gewährleistet, kann jedoch die Bildung von Feuchtenestern nicht immer verhindern. Durch die ungleichmäßige Trocknung über

der Bandbreite wäre eine Quermischung vorteilhaft, die durch die Übergabe auf das nächste Band nicht erreicht wird.

Ziel der Untersuchung war es, die ungleichmäßige Trocknung über der Bandbreite in einem Fünfbandtrockner im Praxiseinsatz zu quantifizieren und mit einer Modell-Berechnung der Wärmeeinstrahlung der Trocknerwände zu verifizieren. Untersucht wurden dazu die Temperaturverteilung und der Produktfeuchtegehalt. Ebenso sollte der spezifische Energieverbrauch ermittelt werden. Anhand dieser Daten können nachfolgende Optimierungsmaßnahmen, wie Umbauten und Einstellungsänderungen am Trockner, auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich Energieverbrauch und Vergleichmäßigung der Trocknung bewertet werden.

### 1.1.3 Material und Methoden

#### 1.1.3.1 Trocknungstechnik

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in der Trocknungssaison 2008 an einem indirekt ölbefeuerten Fünfbandtrockner (Binder Typ G 301/22-2,9; Marzling) durchgeführt, welcher eine Bandlänge von 20 m und eine Bandbreite von 3 m aufweist, woraus sich bei fünf Bändern eine Trocknungsfläche von 300 m<sup>2</sup> ergibt. Das Versuchsgut Petersilie (*Petroselinum crispum*) wurde unmittelbar nach der Ernte auf eine Länge von 3 bis 5 cm geschnitten, windgesichtet und über ein Dosierband in einer Schütthöhe von 10 cm auf das oberste Trocknungsband aufgebracht. Versuche wurden mit glatter Petersilie 'Gigante d' Italia' und krauser Petersilie 'Mooskrause' durchgeführt.

Die gesamte thermische Leistung der drei Warmluftzeuger (Schmidt-Seeger SIWE 06/18, Beilngries) liegt bei 3 MW, mit einem Wirkungsgrad von 88% bei indirekter Befeuerung. Der Trockner ist in drei Temperaturzonen unterteilt. Die Hochtemperaturzone mit 105°C Warmlufttemperatur umfasst die oberen eineinhalb Bänder, die Mitteltemperaturzone mit 95°C die anschließenden eineinhalb Bänder und die Niedertemperaturzone mit 80°C die letzten beiden Bänder. Diese Temperaturabstufung gilt für die Trocknung von Petersilie und ist optimiert, um durch schnelle Oberflächentrocknung Enzyme zu inaktivieren und dadurch die Produktfarbe zu erhalten.

Sieben in der Trocknerdecke mittig positionierte Abluftventilatoren fördern die feuchte Abluft aus der Trocknungskammer. Die hinteren drei Ventilatoren arbeiten im

Teilumluftbetrieb und führen Abluft zur Ansaugstelle der Warmlufterzeuger zurück. Die Abb. 1-1 zeigt die Zuluftkanäle, die Einteilung der seitlichen Druckkammern sowie die Um- und Ablufführung des Trockners.

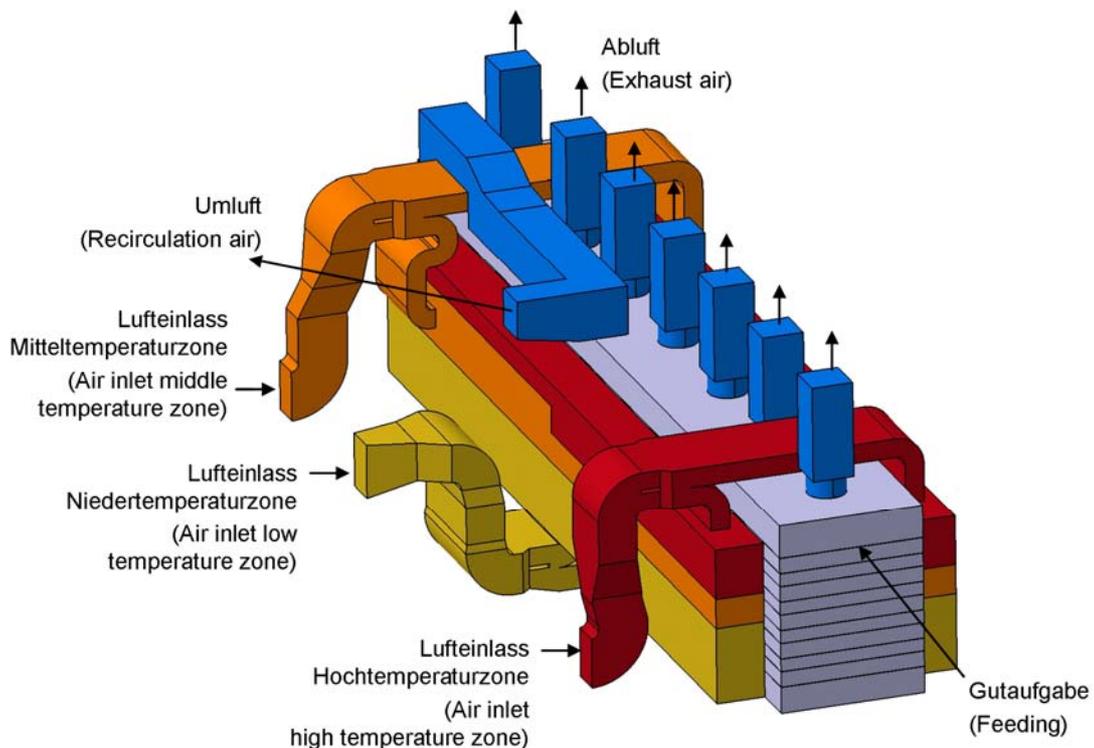


Abb. 1-1: Luftführung des Bandtrockners

Die Bänder werden über drei Zuluftkanäle, die entsprechend der Temperaturzonen in drei Druckkammern auf beiden Seiten des Trockners unterteilt sind, belüftet. Über die Trocknerlänge verteilt befinden sich unmittelbar unter jedem Band insgesamt 20 verstellbare Lufterinlassöffnungen, durch die das seitliche Einströmen der Warmluft reguliert werden kann. In Abb. 1-2 ist die innere Luftführung dargestellt. Der Trockner arbeitet mit additiver Luftmengenmischung, so dass die ursprünglich getrennten Luftströme im Inneren des Trockners vermischt werden und am ersten Band der höchste Luftvolumenstrom anliegt, der dann vom Abluftventilator abgesaugt wird. Das Produkt ist in Abb. 1-2 grün gekennzeichnet und liegt auf dem Obertrum des Bandes. Die Luft strömt zwischen Ober- und Untertrum des umlaufenden Bandes seitlich ein und durchdringt dann die Produktschüttung. Die Strömungsrichtung der Luft ist durch schwarze Pfeile dargestellt.



Über die Feuchteanalyse des Roh- und Trockenproduktes konnte damit auf den Eingangsmassestrom zurückgerechnet werden.

### 1.1.3.3 Messung der Luftzustände

Während der Trocknung wurden die Zustandsänderungen der Trocknungsluft, Temperatur und relative Feuchte, über fest installierte Sensoren kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet.

In *Abb. 1-3* ist die Messstellenanordnung im Heizraum und am ersten Band des Trockners in der Draufsicht gezeigt. Der Trockner ist in 22 Felder eingeteilt. Im Trockner wurde die Lufttemperatur zwischen Ober- und Untertrum des ersten Bandes am Feld 9 mittels Thermoelementen (Ahlborn FT 015L0500, Holzkirchen) gemessen. Die Messstellen werden jeweils vom rechten Rand des Bandes, von der Aufgabeseite aus, benannt.

Abluftfeuchte und -temperatur wurden in den sieben Abluftkaminen mittels kapazitiven Sensoren (Ahlborn FHA646-E1C, Holzkirchen) ermittelt.

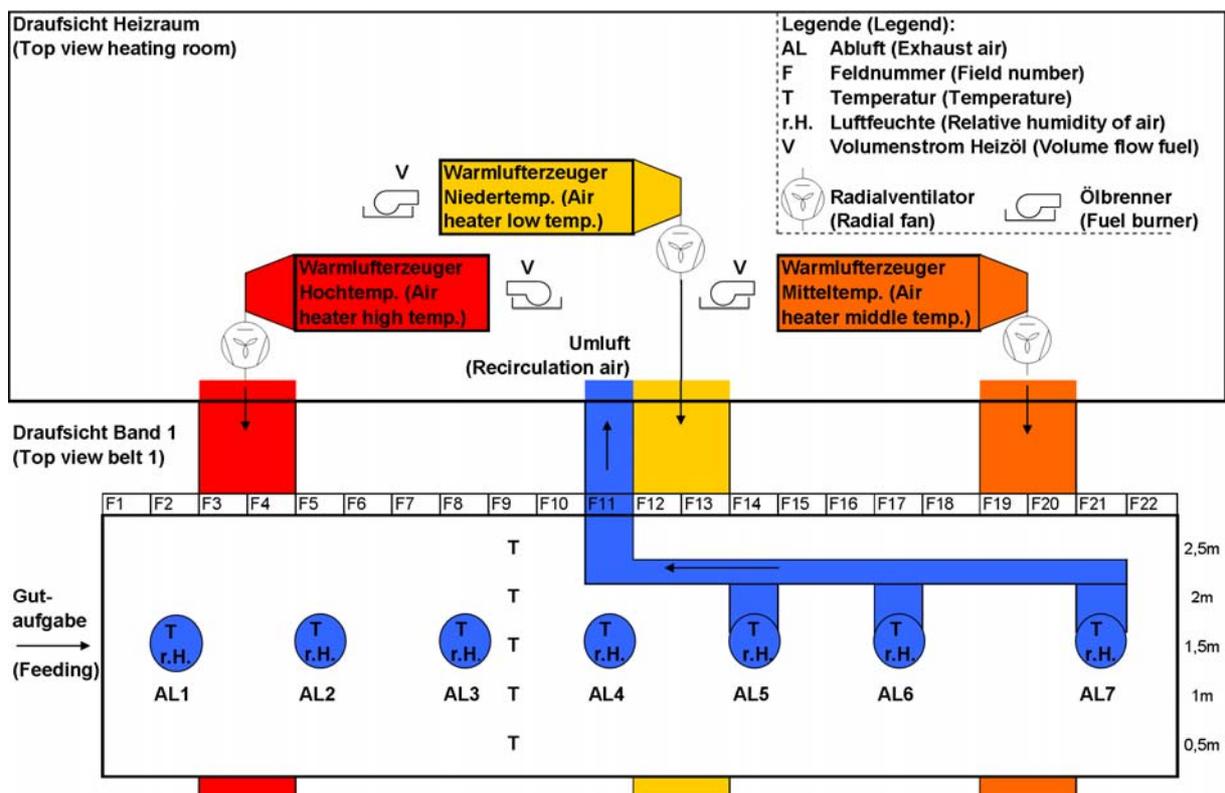


Abb. 1-3: Messstellenanordnung im Heizraum und am ersten Band des Trockners (Draufsicht)

### 1.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Der Trocknungsfortschritt beim Durchlaufen des Gutes durch den Bandrockner verläuft entsprechend der Luftführung von den Bandseiten Richtung Bandmitte. Das Ergebnis der Feuchteanalysen, bei der Proben an jedem Ende der fünf Bänder, zeigt *Abb. 1-4*. Die Schüttung trocknet vom Rand aus schneller, so dass das Produkt 0,5 m vom Rand entfernt bereits nach Durchlaufen von zwei Bändern einen Feuchtegehalt von unter 5% erreicht hat. Um das Produkt in der Bandmitte bis zum Endfeuchtegehalt zu trocknen und Feuchtenester zu beseitigen, werden allerdings alle fünf Bänder benötigt.

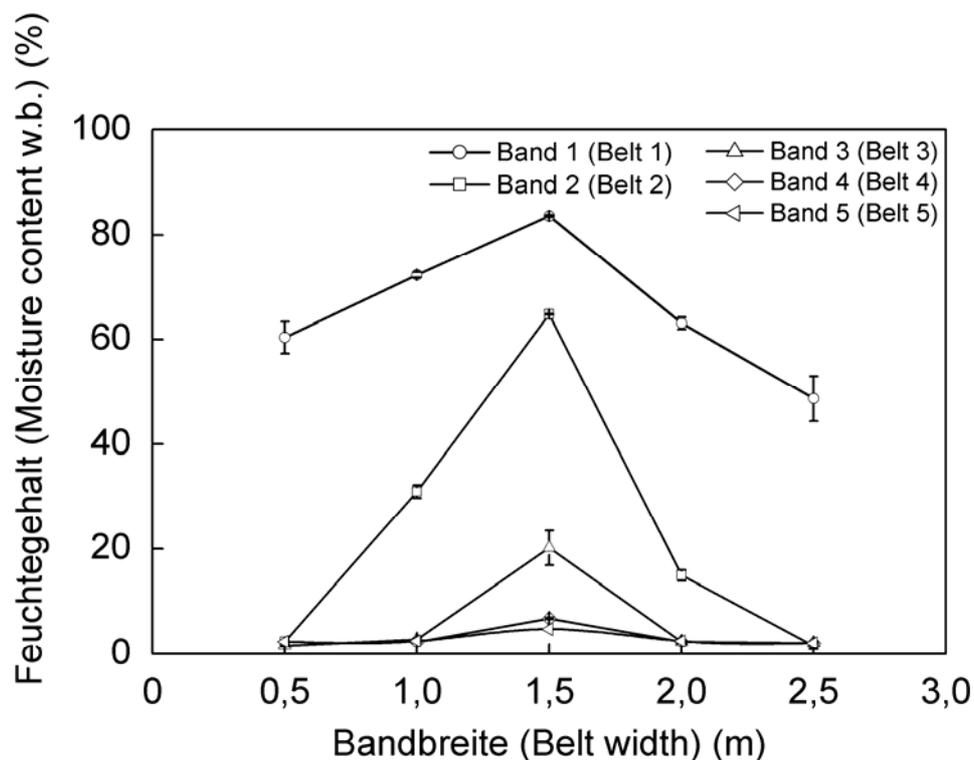


Abb. 1-4: Produktfeuchtegehalt über der Bandbreite jeweils am Ende der fünf Bänder; Fehlerbalken = min./ max. Wert

Die räumlichen Unterschiede des Produktfeuchtegehalts und der Lufttemperatur über der Bandbreite sind in *Abb. 1-5* dargestellt. Als Balken sind die Analysenergebnisse der Doppelbestimmung und der Mittelwert angegeben. Die Messungen wurden auf halber Bandlänge des ersten Bandes (Feld 9) durchgeführt. Sie zeigen eine Temperaturdifferenz von den Seiten zur Bandmitte von über 13 K. Der Gutfeuchtegehalt verhält sich entsprechend umgekehrt, die Schüttung trocknet an

den Seiten schneller. Die Strahlweite ist nicht ausreichend, um die seitlich einströmende heiße Trocknungsluft bis in die Mitte des Bandes zu transportieren. Weiterhin ist die Schütthöhe am Rand meist geringer als in der Bandmitte, was durch die ungleichmäßige Gutaufgabe bedingt ist und die Trocknung an den Rändern zusätzlich beschleunigt.

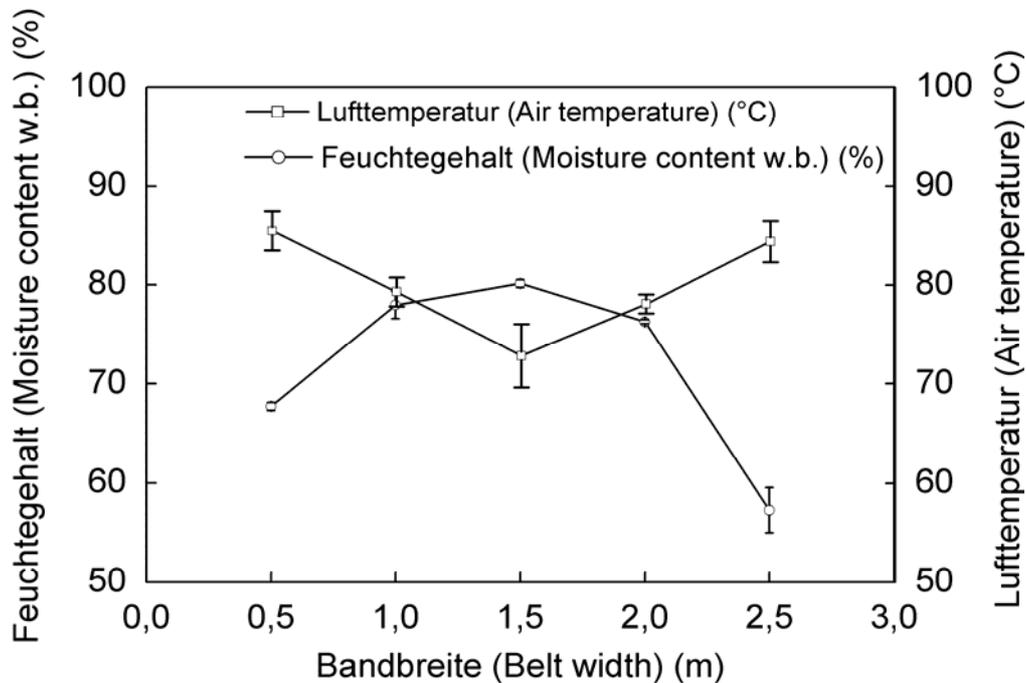


Abb. 1-5: Produktfeuchtegehalt (Fehlerbalken = min./ max. Wert) und Lufttemperatur (Fehlerbalken = Standardabweichung) über der Bandbreite in der Mitte des ersten Bandes

Ein weiterer Grund für die schnellere Randtrocknung ist konstruktiv bedingt und liegt in der Wärmeabstrahlung der heißen Seitenwand. Die Angaben für die folgenden Modell-Berechnungen beziehen sich auf das oberste Band. Zieht man die halbe Breite des Trockners wie in *Abb. 1-6* zur Berechnung der Wärmeabstrahlung von der Trocknerwand  $A_1$  auf das Trocknungsband heran und betrachtet drei Bandabschnittsflächen  $A_2, A_3, A_4$  mit unterschiedlichem Abstand zur Wand, so lässt sich der Wärmestrom  $\dot{Q}_R$  von der Wandfläche  $A_1$  als Wärmestromdichte  $\dot{q}_n$  bezogen auf die horizontale Fläche  $A_n$ , die an der Trocknerwand angrenzt, wie folgt berechnen:

$$\dot{q}_n = \frac{\dot{Q}_R}{A_n}$$

und

$$\dot{Q}_R = A_1 \cdot C_{1n} \cdot \Phi_{1n} \left\{ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right\}$$

$$\text{mit } C_{1n} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_n \cdot C_s$$

In die dimensionslose Einstrahlzahl  $\Phi$  geht der Abstand und Winkel der Flächen zueinander mit ein (Krischer & Kast, 1991). Mit einem Strahlungskoeffizienten  $C_s$  von  $5,67 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ , der Einstrahlzahl  $\Phi_{12}$  mit  $0,43$  ( $\Phi_{13}=0,165$ ;  $\Phi_{14}=0,083$ ), Temperatur und Emissionskoeffizient der Stahlseitenwand  $T_1=353,15 \text{ K}$  und  $\varepsilon_1=0,26$  ergeben sich für eine Produkttemperatur  $T_2$  von  $308,15 \text{ K}$  und einem Emissionskoeffizient  $\varepsilon_2$  von  $0,95$  mit zunehmenden Abstand zur Seitenwand abnehmende Wärmestromdichten von  $\dot{q}_{12}=354 \text{ W/m}^2$  über  $\dot{q}_{13}=136 \text{ W/m}^2$  bis  $\dot{q}_{14}=68 \text{ W/m}^2$ . Das bedeutet, dass Bandabschnitt  $A_2$ , der direkt an die Wand angrenzt, über fünfmal soviel Wärmestrahlung erhält wie der Bandabschnitt  $A_4$  in der Mitte des Trockners.

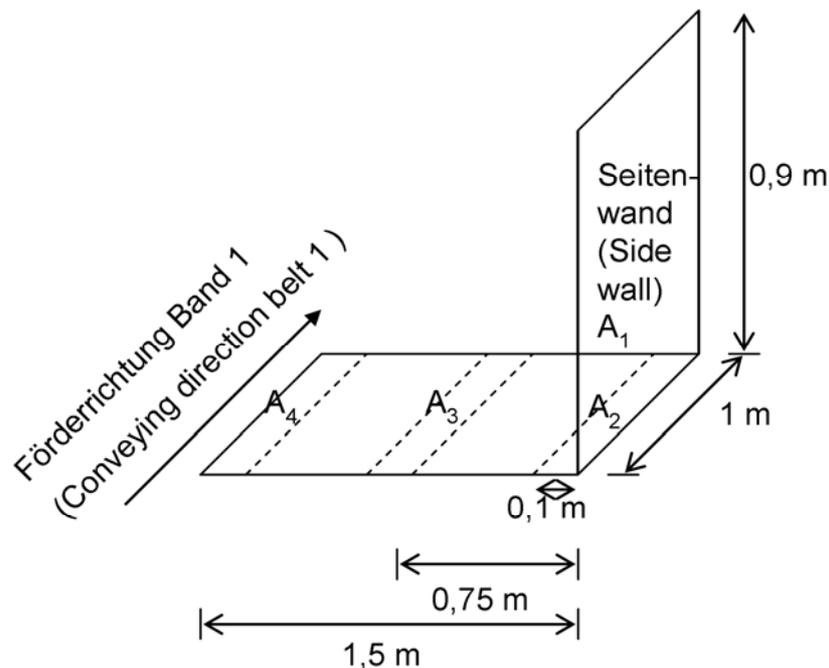


Abb. 1-6: Modell der halben Trocknerbreite zur Berechnung der Wandstrahlung auf das Band

Der Energieverbrauch für die Trocknung von krauser Petersilie 'Mooskrause' lag im Durchschnitt bei  $0,84 \text{ l Heizöl pro kg Trockenware}$  oder  $6577 \text{ kJ pro kg verdampften Wassers}$ . Der Durchsatz betrug dabei bei  $217,6 \text{ kg Trockenware pro Stunde}$ , was einem Durchsatz bezogen auf die Trocknungsfläche von  $0,73 \text{ kg pro Stunde und m}^2$

entspricht. Die Probeziehung zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergab einen stark schwankenden Eingangsfeuchtegehalt zwischen 80,0% und 87,1%. Dabei stellt diese Schwankung eine wesentliche Störgröße dar, welche eine manuelle Anpassung der Bandgeschwindigkeit und der Zuluftmenge durch den Betreiber erfordert und erschwert. Der Endfeuchtegehalt schwankte zwischen 2,1% und 2,9%, was eine deutliche Unterschreitung der Zielfeuchte von 5 bis 7 % bedeutet. Das Eintrocknungsverhältnis, der Quotient der Massenströme von Frischgut zu Trockengut, lag zwischen 4,9 und 7,5.

Der Heizölbedarf für glatte Petersilie 'Gigante d' Italia' betrug 1,09 l Heizöl pro kg Trockenware oder 7610 kJ pro kg verdampften Wassers. Der Schwankungsbereich der Eingangsfeuchte war geringer und lag zwischen 82,6% und 85,5%, der Endfeuchtegehalt lag zwischen 1,3% und 1,8%. Das Eintrocknungsverhältnis ergab somit Werte zwischen 5,7 und 6,7. Allerdings wurde das Produkt stärker übertrocknet, wodurch sich auch der höhere Heizölverbrauch bezogen auf die Trockenware erklären lässt. Der Durchsatz an Trockengut war deshalb mit 154 kg/h, bzw. 0,51 kg/h pro m<sup>2</sup> Bandfläche, geringer als bei der Sorte 'Mooskrause'. Die Bedienungsmannschaft des Trockners fährt den Trockner auf Sicherheit, d.h. es wird eine Übertrocknung in Kauf genommen, um ein Überschreiten des Grenzwertes von 5-7% und damit nachfolgende starke Qualitätsprobleme, u.a mit Schimmelpilzbildung im Trockengut oder Selbsterwärmung in den Pressballen sicher zu vermeiden. Allerdings geht dies stark auf Kosten der Wirtschaftlichkeit der Trocknung, da die spezifischen Energieverbrauchswerte überdurchschnittlich hoch ansteigen.

In *Abb. 1-7* sind die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur in den sieben Abluftkanälen dargestellt. Die Sättigung der Abluft ist an der Rohwarenaufgabe am größten und nimmt in Richtung Trocknerende ab, die Temperatur hingegen nimmt zu. Durch den hohen Feuchtegehalt der Rohware kommt es zu einer intensiven Wasserverdampfung, wodurch sich die Trocknungsluft entsprechend abkühlt. Die Differenz zwischen Produkttemperatur, die gleich der Kühlgrenztemperatur ist, solange die Produktoberfläche feucht bleibt, und Lufttemperatur ist aufgrund der Trocknungsgeschwindigkeit groß. Im Laufe des Prozesses gleicht sich die Produkttemperatur immer stärker an die Lufttemperatur an da sich die Trocknung verlangsamt (Heindl & Hoppe, 2010). Das Potential der Abluft zur Wasseraufnahme ist noch hoch, sodass sich ein stärkerer Umluftbetrieb in Frage kommt.

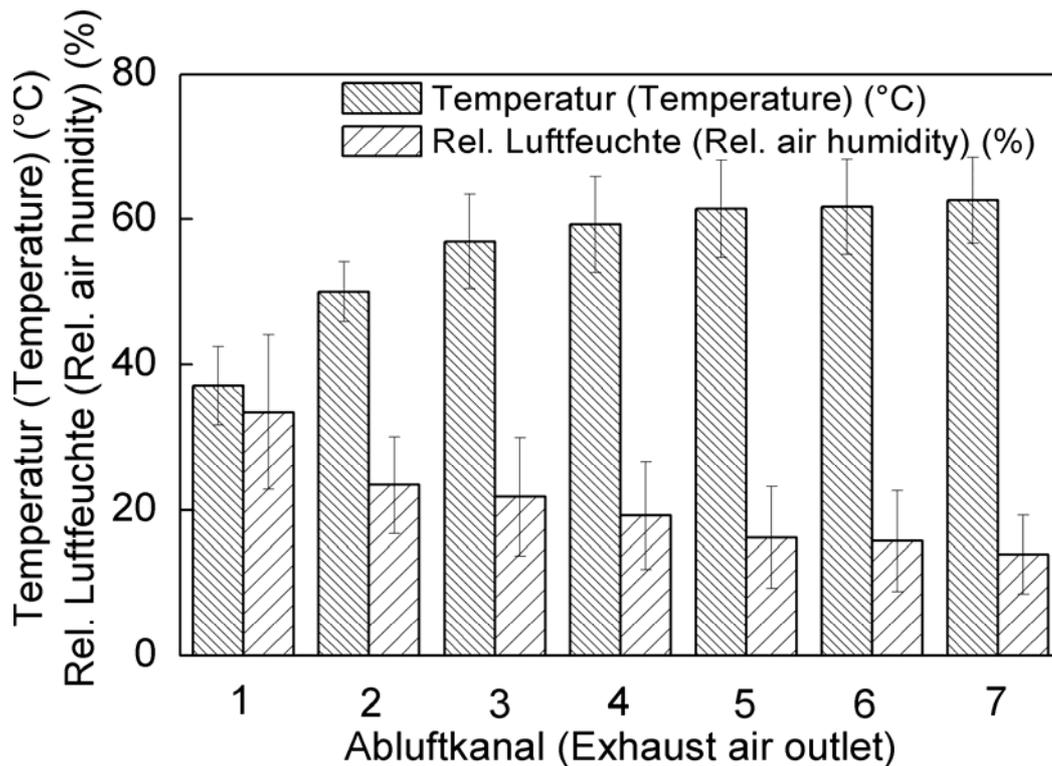


Abb. 1-7: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in den sieben Abluftkanälen; Fehlerbalken = Standardabweichung

### 1.1.5 Schlussfolgerung

Die Messung der Produktfeuchte über der Bandbreite hat die Ungleichmäßigkeit der Trocknung gezeigt und als Ursache die Art der seitlichen Warmluftzuführung erkennen lassen. Ansätze zur Verbesserung lassen sich durch den Einbau von Strömungsleitblechen, welche die Luft mehr in die Bandmitte transportieren, realisieren. Eine gleichmäßigere Verteilung des Trocknungsgutes über der Bandbreite kann mit einer horizontalen Gutaufgabe erreicht werden, da das Produkt bei schrägem Aufgabeband nach unten rutscht und ungleichmäßig verteilt wird. Zur Überwachung der Dosierung empfiehlt sich der Einsatz einer Bandwaage am Trocknereingang. Darüber hinaus sollte der Feuchtegehalt des Produktes am Trocknereingang und –ausgang kontinuierlich gemessen werden, um die Bandgeschwindigkeit und die Luftzufuhr elektronisch zu regeln. In weiteren Untersuchungen soll hierbei der Einsatz von Nah-Infrarot-Spektroskopie Sensoren zur Produktfeuchtemessung erprobt werden.

### 1.1.6 Literatur

**Bux M, Graf J, Heindl A, Müller J.** Erfassung der räumlichen und zeitlichen Gutfeuchte- und Temperaturverteilung durch berührungslose Oberflächentemperaturmessung bei der Trocknung von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Artischocke (*Cynara scolymus* L.) in einem Bandtrockner Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen 2006;11(4):186-190.

**Gehrmann D, Esper G, Schuchmann H.** Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. Hamburg: Behr's Verlag; 2009. S. 110-134.

**Heindl A, Hoppe B.** Aufbereitung vor der Trocknung. In: Saluplanta: Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenanbaus, Bernburg, Band 2, 2010, S.226-228

**Mellmann J, Fürll C.** Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen - Spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen 2008;13(3):127-133.

**Müller J.** Convective drying of medicinal, aromatic and spice plants: a review. Stewart Postharvest Review 2007;4(2):1-6.

**Müller J, Heindl A.** Drying of medicinal plants. In: Bogers RJ, Craker LE, Lange D, editors. Medicinal and aromatic plants - agricultural, commercial, ecological, legal, pharmacological and social aspects. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2006. p. 237-252.

**Müller J, Heindl A.** Trocknung von Arzneipflanzen in Praxis des ökologischen Kräuteraanbaus. Mainz: Stiftung Ökologie & Landbau, Bioland Verlags GmbH: Mainz; 1999. S. 139-156.

**Krischer O, Kast W.** Trocknungstechnik - Band 1: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag; 1991. S. 74-80.

## **1.2 Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Luftverteilung im Bandtrockner mittels CFD-Strömungssimulation**

### 1.2.1 Kurzfassung

Um die ungleichmäßige Trocknung in Bandtrocknern zu verstehen, wurden Messungen und Probenahmen zur Produktfeuchte am Trockner vorgenommen. Besonders die Bandränder weisen eine erhöhte Trocknungsrate auf, was zu Übertrocknung, vermindertem Materialdurchsatz und erhöhtem Energieverbrauch führt. Es wurden zwei unterschiedliche Simulationen durchgeführt, eine mit Produkt, die andere ohne. Messungen für Luftgeschwindigkeit und –temperatur wurden zum Vergleich der gemessenen und mit CFD berechneten Werte durchgeführt.

Die Erkenntnisse dieser Studie führten zu einer optimierten Luftführung mit homogener Temperaturverteilung über die Trocknungsfläche. Eine wesentliche Verbesserung wird durch die Installation von Leitblechen erreicht, welche die Luft zur Trocknermitte leiten.

### 1.2.2 Einleitung

Aufgrund stetiger Weiterentwicklungen in der Informationstechnologie und der numerischen Strömungssimulation gewinnt CFD (Computational Fluid Dynamics) immer mehr an Bedeutung als Entwicklungswerkzeug im Ingenieurwesen. Seit der Einführung der finiten Volumenmethode von Patankar und Spalding (1972) wurden viele CFD-Softwareprogramme und Werkzeuge entwickelt. In der Lebensmittelindustrie sind diverse CFD Anwendungen verfügbar, zur Simulation von Kühlungs-, Erwärmungs-, Back- und Trocknungsprozessen (Norton & Sun, 2006; Scott & Richardson, 1997). Mit Hilfe von CFD kann die Trocknung von Lebensmittel simuliert werden und das damit verbundene Problem der ungleichmäßigen räumlichen Luftverteilung (Mathioulakis et al., 1998; Mirade & Daudin, 2000) sichtbar gemacht werden. Betriebsparameter, wie Verweildauer des Produkts im Trockner und Feuchteverteilung über die Bandlänge und –breite, können mit CFD simuliert werden (Khankari & Patankar, 1999). Simulationen der sich zeitlich verändernden Zustände während eines Backvorgangs durch ein bewegtes Gitter helfen dabei, Qualitätsänderungen besser zu verstehen (Therdthai et al., 2004). Die ungleichmäßige Trocknung von Gewürzpflanzen in Bandtrocknern ist ein bekanntes

Problem (Bux et al., 2006). Ähnliche Probleme treten auch in Backvorgängen auf (Verboven et al., 2000). Um Feuchtenester zu vermeiden, wird oft übertröcknet, was zu vermindertem Materialdurchsatz und erhöhtem Energieverbrauch führt. Besonders die Bandränder weisen eine erhöhte Trocknungsrate auf, welche durch die zusätzliche Abstrahlung der Trocknerwände (Böhner et al., 2009) und einem schlechten Übergang zwischen Band und Wand (Yue et al., 2007) begründet ist. Im Gegensatz dazu ist das Produkt in der Bandmitte deutlich feuchter. Dies ist neben einer höheren Schüttung auf die seitlich einströmende Luft zurückzuführen, welche die Bandmitte meistens nicht erreicht. Ein entscheidendes Kriterium für einen optimalen Trocknungsprozess ist der gleichmäßige Feuchtegehalt des Endprodukts (Margaris & Ghiaus, 2006). Um die ungleichmäßige Trocknung in Bandtrocknern zu verstehen, wird die Luftgeschwindigkeits- und Temperaturverteilung mit Hilfe von CFD simuliert und untersucht.

### 1.2.3 Material und Methoden

#### 1.2.3.1 Aufbau und Funktion des untersuchten Trockners

Am Fünfbandtrockner (Kap 1.1.3.1) wurde das oberste Band, welches mit der höchsten Temperatur versorgt wird, in CFD simuliert. Dort treten die höchsten Trocknungsraten auf. Zusätzlich stellt es den Entstehungsort der ungleichmäßigen Feuchteverteilung dar. Die Luftführung und die Lage der verstellbaren Klappe, welche die Zuluft auf die linke und rechte Druckkammer aufteilt, sind in Abbildung 1-2 dargestellt. Die Zuluftklappe stellt einen wichtigen Faktor für die gleichmäßige Luftverteilung dar.

#### 1.2.3.2 Probennahme und Messungen während der Trocknung

Um die Feuchtegehalte des Produkts in den verschiedenen Stufen der Trocknung zu bestimmen, wurden in der Erntesaison 2008 und 2009 Produktproben gezogen. Die Probennahme erfolgte an der Aufgabe, in der Mitte des ersten Bandes und am Ende jeden Bandes über die Bandbreite verteilt, alle 0,5 m. Mit Hilfe der Trockenschrankmethode wurden die Proben dann bei  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  bis zur Massenstabilität getrocknet, um deren Feuchte zu bestimmen.

Messpunkte, zum Vergleich der gemessenen und mit CFD berechneten Werte für Luftgeschwindigkeit und –temperatur, wurden sowohl unterhalb des ersten, dritten

und vierten Bandes positioniert, als auch im Zuluftkanal. An diesen Stellen wurden Thermoanmometer (Ahlborn Typ MT8635TH4, Holzkirchen) und NiCr-Ni Thermoelemente (Ahlborn Typ FT015L0500, Holzkirchen) im Trockner montiert. Permanent installierte Lufttemperatur- und Geschwindigkeitssensoren wurden jeweils fünf an einem Stativ im Abstand von 0,5 cm zueinander befestigt und zwischen Ober- und Untertrum (Ober- und Unterseite des umlaufenden Endlosbandes) quer über die Bandbreite angebracht. Solche Messstative wurden am Anfang, in der Mitte und am Ende des ersten Bandes fixiert. Zudem wurde jeder Abluftkamin mit einem Feuchte- und Temperatursensor (Ahlborn Typ FHA646-E1C, Holzkirchen) ausgestattet. Messungen wurden kontinuierlich während des Trocknungsbetriebes durchgeführt.

### 1.2.3.3 Numerische Simulation

Die Computersimulationen wurden mit dem Programm FLUENT (Ansys, Canonsburg, USA) durchgeführt. Alle Simulationen basieren auf der Annahme von Luft als ein Newtonsches Fluid.

Es wurden zwei unterschiedliche Simulationen durchgeführt, eine mit Produkt, die andere ohne. Das Produkt wurde auf einen „porous jump“ reduziert, d.h. auf ein poröses Medium ohne Veränderung der Gutfeuchte, um die Komplexität einer mehrphasigen Simulation mit Berücksichtigung einer variierender Luftfeuchte zu vermeiden. diesem Grund stimmten die Ergebnisse der Simulation nicht vollkommen mit den Messungen überein. Daher wurden zusätzlich Messungen und Simulationen am leeren Trockner durchgeführt, um die Ergebnisse vollständig vergleichen zu können. Um die gemessenen und simulierten Ergebnisse zu vergleichen, wurden in FLUENT Punkte definiert, die der Lage der Temperatur- und Geschwindigkeitssensoren im Trockner entsprachen und die dort berechneten Werte darstellt. Zuerst erfolgte die Erstellung des Luftführungssystems mit der CAD-Software CATIA (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich). Die Grundgleichungen der Strömungsmechanik, wie die Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie dienten als Basis für die Berechnungen (Norton & Sun, 2006). Für die Berechnungen wurde das realisierbare k- $\epsilon$ -Model gewählt, da es sich für geteilte und Sekundärströmungen eignet, wie sie im Trockner auftreten (Fluent Inc., 2006). Zudem ist es genauer als andere Modelle bei der Berechnung der Ausbreitungsrate von Luft hinter den Schlitzen, welche sie in Form von Luftstrahlen durchströmt.

#### 1.2.2.4 Randbedingungen für die Simulation ohne Trocknungsgut

Die Modellierung ohne Trocknungsgut erfolgte mit den Originaleinstellungen des Trockners, aber mit verschiedenen Winkelstellungen ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  abwärts der Horizontalen) der Klappe im Zuluftkanal. Die Öffnung des Zuluftkanals direkt hinter dem Radialventilator des Warmlufterhitzers wurde als „Luftreinlass“ definiert. Mit einer Geschwindigkeit von 9 m/s bei  $60^\circ\text{C}$  wurde die Luft in diese Öffnung (hydraulischen Durchmesser von 807,5 mm) geblasen. Als weiterer „Luftreinlass“ diente die Unterseite des zweiten Bandes. Um die Motoren der Abluftventilatoren vor Überhitzung zu schützen musste der leere Trockner mit niedrigeren Temperaturen als normal gefahren werden. Die aufwärts strömende Luft am „Luftreinlass“ unterhalb des zweiten Bandes wurde mit einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s und einer Temperatur von  $48^\circ\text{C}$  definiert. Für die Lufttemperatur an den Abluftventilatoren mit einem Durchmesser von 800 mm wurden  $49,5^\circ\text{C}$  angesetzt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Trocknerwände keine relevanten Wärmeverluste aufweisen, da diese mit einer 100 mm Schicht Mineralwolle wärmegeklämmt waren. Die Luftreinströmung von der Druckkammer und in den Trocknungsraum wurde zweidimensional über den Querschnitt des Trockners simuliert. Nach dem Erstellen von Geometrie und Gitter mit 3684 Zellen mittels der CAD-Software GAMBIT, wurde das laminare Strömungsmodell in FLUENT gewählt. Als Ausgangsbedingung wurde die seitlich einströmende Luft am Einlassschlitz zu 2,6 m/s bei  $90^\circ\text{C}$  gesetzt und die aufwärts strömende Luft zu 0,4 m/s bei  $72^\circ\text{C}$ . Der Luftauslass an der Decke wurde als gleichmäßiger Druckauslass simuliert.

#### 1.2.3.5 Randbedingungen für die Simulation mit Trocknungsgut

Die Modellierung der Hochtemperaturzone mit Trocknungsgut wurde ausschließlich mit Originaleinstellungen durchgeführt. Nur der Anfang des ersten Bandes, welcher die ersten vier Einlassschlitze und zwei Abluftventilatoren mit einer Ablufttemperatur von  $55^\circ\text{C}$  umfasst, wurde simuliert. Die Simulationen dienten dazu, den Einfluss verschiedener Arten und Längen von Leitblechen auf die Wurfweite der seitlich einströmenden Luft zu erkennen. Dazu blieben nur die Randbedingungen an den Abluftventilatoren unverändert. Jeder Schlitz wurde als „Luftreinlass“ mit einer Temperatur von  $85^\circ\text{C}$  und einer Geschwindigkeit von 3,8 m/s definiert, dessen Werte von vorausgegangenen Simulationen der gesamten Hochtemperaturzone stammten. Weiterhin dienten die Messungen unter dem ersten Band als Richtlinie für die

Lufteinlassbedingungen von unten. An den Seiten wurde dabei eine Temperatur von 88°C bei 0,43 m/s erlangt, während die Bandmitte nur 60°C bei 0,2 m/s erreichte.

## 1.2.4 Ergebnisse und Diskussion

### 1.2.4.1 Simulation ohne Trocknungsgut für die Einstellung der Zuluftklappe

Die Luft war im seitherigen Betrieb nicht gleichmäßig auf die linke und rechte Druckkammer des Trockners verteilt, da bei horizontaler Grundeinstellung der Zuluftklappe ein größerer Luftstrom in die linke Druckkammer gelangt, was zu einer höheren Temperatur und damit zu einer schnelleren Trocknung auf der linken Trocknerseite führt. Die räumliche Temperaturverteilung konnte durch CFD-Simulation in dargestellt werden (Abbildung 2-1).

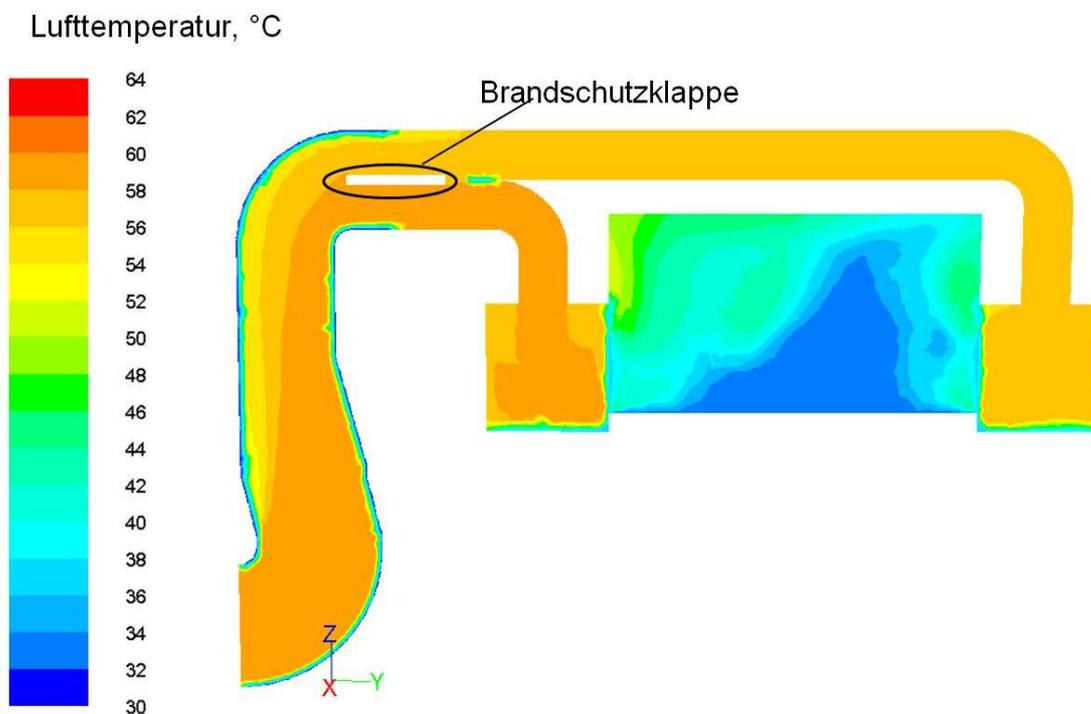


Abb. 2-1: Inhomogene Temperaturverteilung über dem Trocknerquerschnitt

Jedoch können die Temperaturen verglichen werden. Der Vergleich ist in Tab. 2-1 für die Messungen am Bandanfang und -ende über die Bandbreite dargestellt. Die Werte stammen aus der Simulation des leeren Trockners. Die Abweichung liegen in einem Bereich von -3,0 bis 8,5%.

Tab. 2-1: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen auf Band 1

Band1 (Anfang)					
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m
Gemessene Temp., °C	50,7	49,5	46,0	49,1	50,7
Berechnete Temp., °C	55,1	49,5	48,5	52,3	55,4
Relative Diff., %	8,0	0,0	5,2	6,1	8,5
Band1 (Ende)					
Gemessene Temp., °C	51,5	51,3	51,6	51,6	51,8
Berechnete Temp., °C	53,6	50,5	50,1	52,5	52,3
Rel. Diff., %	3,9	-2,0	-3,0	1,7	1,00

Der Teilmassenstrom von 4,61 kg/s (61%) des Gesamtmassenstrom von 7,57 kg/s Luft, welcher durch den gesamten Zuluftkanal strömen, erreicht die linke Druckkammer. Das bedeutet eine schnellere Trocknung auf der linken Bandseite, welche durch die Produktfeuchtebestimmungen über die Bandbreite bestätigt wurde. Durch das Verstellen der Zuluftklappe auf einen 45° Winkel konnte eine wesentlich gleichmäßigere Luftverteilung erreicht werden. Die Luftaufteilung auf die beiden Druckkammern je nach Klappenwinkel ist in Tabelle 2-2 dargestellt. Sie zeigt die Geschwindigkeiten und Massenströme an den Eingängen der Druckkammern mit der relativen Abweichung zwischen beiden Seiten.

Tab. 2-2: Simulationsergebnisse der Geschwindigkeiten und Massenströme an den Einlässen der Druckkammer bei unterschiedlichem Klappenwinkel

Klappenwinkel	0°	15°	30°	45°
Geschwindigkeit linke Öffnung, m/s	5.29	5.06	4.85	4.38
Geschwindigkeit rechte Öffnung, m/s	3.40	3.62	3.83	4.29
Relative Abweichung, %	55.45	39.94	26.75	1.99
Massenstrom linke Öffnung, kg/s	4.61	4.41	4.22	3,82
Massenstrom rechte Öffnung, kg/s	2.96	3.16	3.34	3,75
Relative Abweichung, %	55.74	39.56	26.35	1,87

### 1.2.4.2 Luftverteilung im Trocknungsraum

Die Ergebnisse der 2D-Simulation der Luftführung im Trocknungsraum sind in Abbildung 2-2 zu sehen. Dafür wurde die Geometrie des Trocknungsraums oberhalb des oberen Bandes bis zu Decke in 2D erstellt. Geschwindigkeit und Temperatur der durch die Einlassschlitze einströmenden Luft konnte dann basierend auf der Simulation der Druckkammern übernommen werden. Die Eigenschaften der unterhalb des Bandes vertikal aufwärts strömenden Luft sind näherungsweise durch die Messungen bekannt. In der Berechnung ist deutlich zu sehen, dass die Luft, die unterhalb des Bandes durch die Einlassschlitze einströmt, die Bandmitte nicht erreicht und nahe an der Wandung nach oben abströmt. Dabei ist zu beachten, dass die Abbildung nur die halbe Trocknerbreite zeigt.

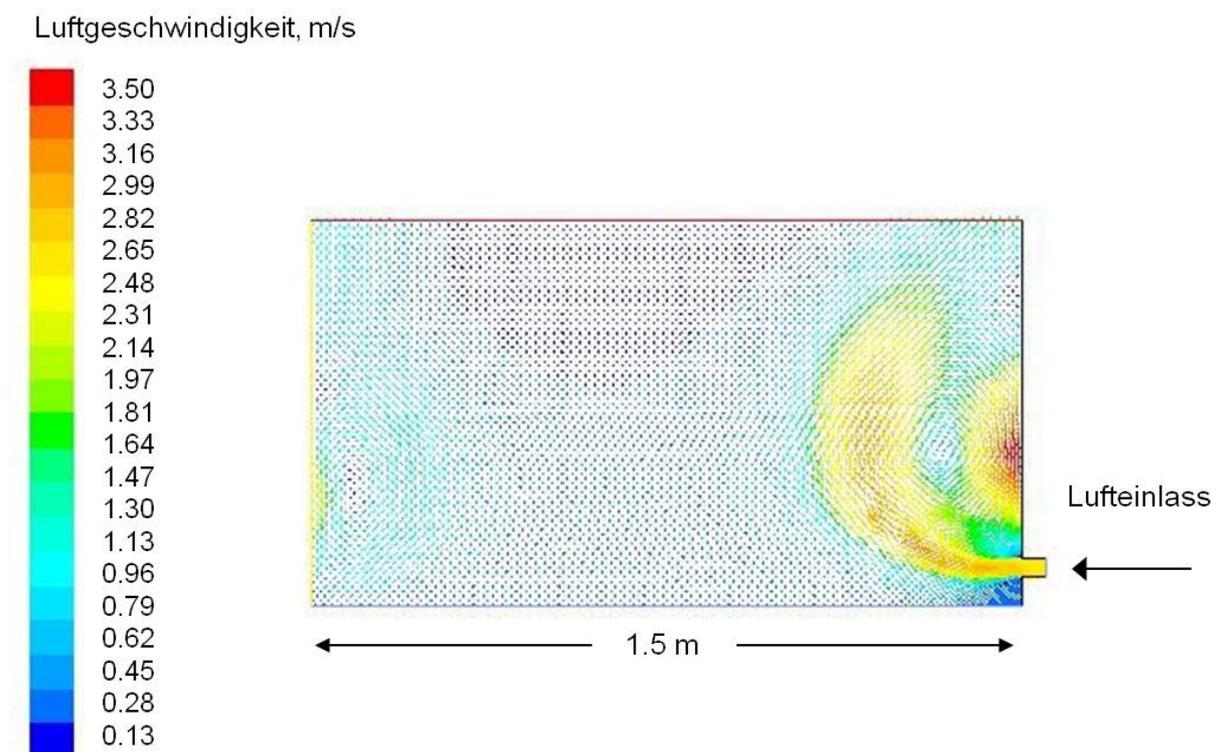


Abb. 2-2: Simulation der Luftgeschwindigkeit beim seitlichen Einströmen der Luft durch einen Einlassschlitz in den Trocknungsraum

### 1.2.4.3 Simulation mit Produkt für die Auswahl von Leitblechen

Die Ergebnisse der 2D-Simulation führten zur Konstruktion von Luftleitblechen. Abbildung 2-3 zeigt die Geometrie und die Anordnung der Bleche im Trockner. Die Länge der Bleche ist variabel und kann je nach Bandbreite angepasst werden (Böhner et al. 2010). Fünf dachförmige Bleche wurden mit gleichmäßigen Abständen zueinander am oberen Ende eines Einlassschlitzes befestigt. Die Dachneigung wurde so gewählt, dass sich keine Gutpartikel ablagern können, welche gelegentlich durch die Trocknungsbänder fallen.

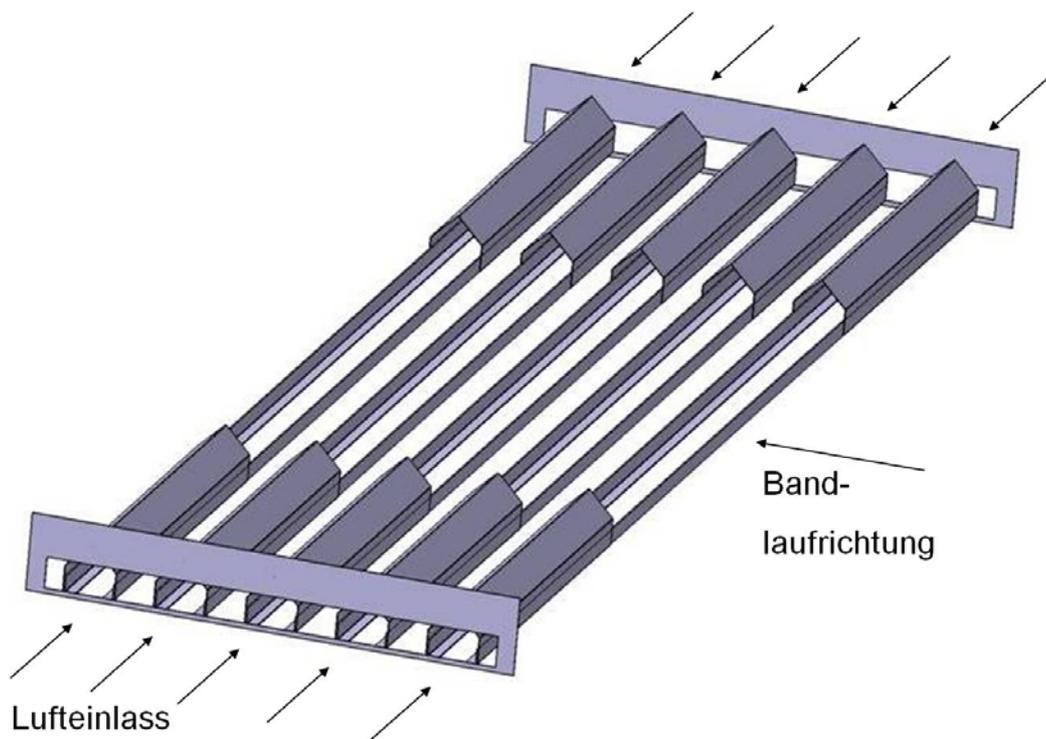


Abb. 2-3: Leitbleche an einem Einlassschlitz mit Luftführung und Bandlaufrichtung

Zusätzliche Simulationen eines Ausschnittes der Hochtemperaturzone wurden durchgeführt, um die Geometrie der Leitbleche bezüglich einer gleichmäßigen Luftverteilung über die Bandbreite zu optimieren. Die Varianten umfassten unterschiedliche Blechezahl und Dachlängen. Dabei wurde das beste Ergebnis mit einer Dachlänge von 800 mm beidseitig an jedem Einlassschlitz erreicht (Abb.2-4).

Air temperature, °C

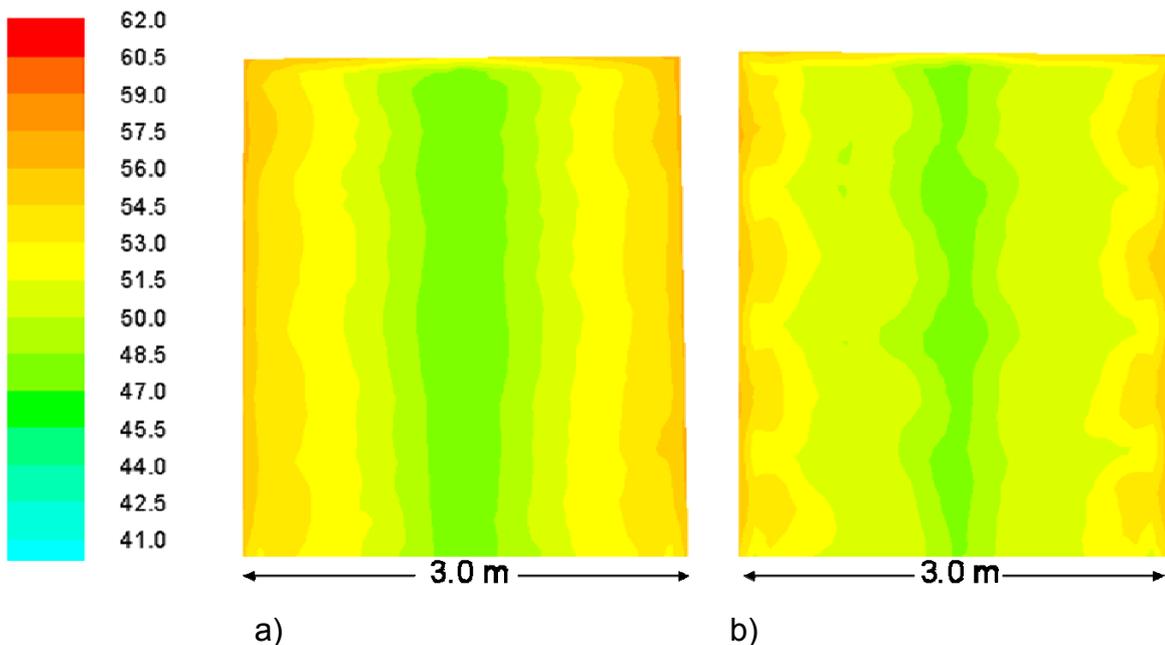


Abb. 2-4: Draufsicht auf Temperaturverteilung des obersten Trocknungsbandes ohne Leitbleche (a) und mit 800 mm Leitblechen (b)

Den Produktfeuchtegehalt über der Bandbreite an unterschiedlichen Stellen des Trockners vor (2008) und nach der Installation der Luftleitbleche (2009) zeigt Abb. 2-5. Ohne Luftleitbleche verlief die Trocknung sehr ungleichmäßig. Am Ende des ersten Bandes betrug die Gutfeuchte 48,7% an den Rändern und 83,6% in der Bandmitte. Diese Unterschiede konnten bis zum Ende des Trocknungsvorgangs nicht völlig ausgeglichen werden. Nach Installation der dachförmigen Leitbleche unter dem ersten Band, gelangte die warme Trocknungsluft von den Seiten bis zur Bandmitte und erzielte eine verbesserte Trocknung und gleichmäßigere Feuchteverteilung über die Bandbreite. Die Feuchtegehalte 2009 reichten von 65,4-74,1% am Ende des ersten Bandes und von 3,7-4,2% am Ende des fünften Bandes. Durch die Leitbleche wurde die Trocknung verbessert und eine gleichmäßigere Endfeuchte erreicht. Es wird angemerkt, dass 2009 ein zusätzlicher Vortrockner installiert wurde.

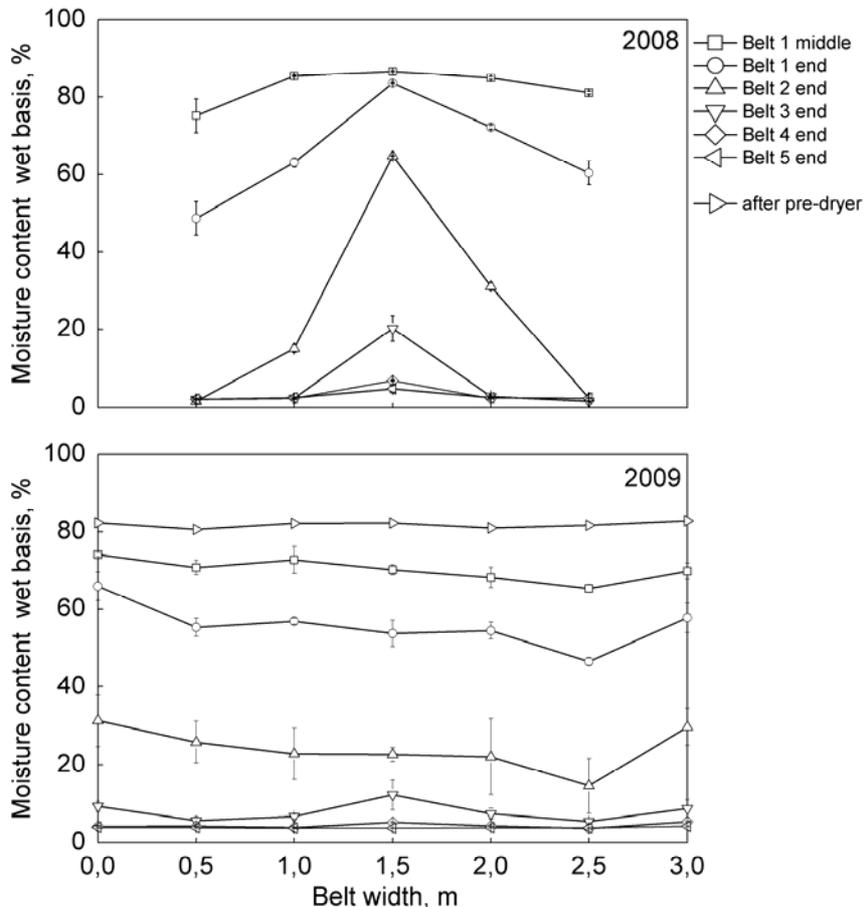


Abb. 2-5: Produktfeuchtegehalte über die Bandbreite vor (2008) und nach (2009) der Installation von Leitblechen

### 1.2.5 Schlussfolgerung

Da eine ungleichmäßige Luftverteilung in Bandtrocknern ein beachtliches und häufig auftretendes Problem darstellt, sollte ihre Entstehung durch CFD Simulationen lokalisiert und mit Messungen unterstützt werden. Weitere Simulationen mit veränderten Einstellungen und zusätzlichen Modifikationen machten es möglich, deren Auswirkung auf die Luftführung zu visualisieren und ihre Eignung für zukünftige Optimierungen zu prüfen.

Die Erkenntnisse dieser Studie führten zu einer optimierten Luftführung mit homogener Temperaturverteilung über die Trocknungsfläche. Konstruktive Änderungen des Bandtrockners waren dafür notwendig.

Eine wesentliche Verbesserung wurde durch die Installation von Leitblechen erreicht, welche die Luft zur Trocknermitte leiten. Dachförmige Bleche sind zu empfehlen, um Partikelablagerungen zu vermeiden.

#### 1.2.6 Literatur

**Böhner, M., Barfuss, I., Heindl, A. & Müller, J.** (2009), Uniformity and energy consumption of a band drying process of parsley (*Petroselinum crispum*). Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 14 (3), pp. 126-131.

**Böhner, M., Barfuss, I., Heindl, A., Müller, J., Graf, H. & Wieninger, M.** (2010). Luftleitvorrichtung zur Verbesserung der Luftverteilung über der Bandbreite im Inneren von Bandrocknern. In Deutsches Patent und Markenamt, 11 (Ed DPMA). Germany.

**Bux, M., Graf, J., Heindl, A. & Müller, J.** (2006), Detection of spatial and temporal moisture and temperature distribution by contactless surface temperature measurement during drying of red clover (*Trifolium pratense* L.) and artichoke (*Cynara scolymus* L.) on a belt-dryer. Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 11 (4), pp. 186-190.

**Fluent Incorporation** (2006), FLUENT 6.3 User's Guide, Fluent Incorporation, Lebanon

**Khankari, K. K. & Patankar, S. V.** (1999). Performance analysis of a double-deck conveyor dryer – computational approach. Drying Technology: An International Journal, 17 (10), pp. 2055 - 2067.

**Margaris, D. P. & Ghiaus, A.-G.** (2006). Dried product quality improvement by air flow manipulation in tray dryers. Journal of Food Engineering, 75 (4), pp. 542-550.

**Mathioulakis, E., Karathanos, V. T. & Belessiotis, V. G.** (1998). Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: Application for the drying of fruits. Journal of Food Engineering, 36 (2), pp. 183-200.

**Mirade, P. S. & Daudin, J. D.** (2000). A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. Drying Technology, 18 (1), pp. 81 - 97.

- Norton, T. and Sun, D.-W.** (2006). Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (11), pp. 600-620.
- Patankar, S. V. & Spalding, D. B.** (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15 (10), pp. 1787-1806.
- Scott, G. & Richardson, P.** (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 8 (4), pp. 119-124.
- Therdthai, N., Zhou, W. & Adamczak, T.** (2004). Three-dimensional CFD modelling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process. *Journal of Food Engineering*, 65 (4), pp. 599-608.
- Verboven, P., Scheerlinck, N., De Baerdemaeker, J. & Nicolai, B. M.** (2000). Computational Fluid Dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of Food Engineering*, 43 (2), pp. 61-73.
- Yue, X., Zhao, J., Shi, E., Chen, Y. & Liu, X.** (2007). Analysis of air velocity distribution in a multilayer conveyor dryer by computational fluid dynamics. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2 (2), pp. 108-117.

## **1.3 Reduktion des fossilen Energieverbrauchs der Bandtrocknung durch die Abwärmenutzung eines Biogasblockheizkraftwerkes**

### 1.3.1 Kurzfassung

Herkömmliche Mehrbandtrockner haben einen hohen Energieverbrauch, der hauptsächlich durch fossile Energiequellen gedeckt wird. Ziel dieser Studie war es, die Abwärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) einer Biogasanlage für die Trocknung von Petersilie (*Petroselinum crispum*) in einem Bandtrockner nutzbar zu machen. Nach dem Schneiden des Frischmaterials wurden Stiele und Blätter durch Windsichtung abgetrennt. Die Stiele wurden neben den herkömmlichen Gärsubstraten zur Biogasproduktion genutzt. Ein standardisierter Fermentationstest im Batchverfahren (Hohenheimer Biogasertragstest) wurde durchgeführt, um den potentiellen Biogasertrag von Petersilienstielen zu bestimmen.

Die Energieversorgung des Trockners erfolgte mit Heizölbrennern und der BHKW-Abwärme.

Der Trockner setzt sich aus einem Vortrockner, bestehend aus einem Band und einem Fünfbandtrockner zusammen. Dieser ist in drei Temperaturzonen unterteilt und besitzt eine Gesamttrocknungsfläche von 316 m<sup>2</sup>. Für die Trocknung von Petersilie wurde ein Temperaturprofil von 90/80/75°C für die drei Zonen angewendet. Sowohl der Energieverbrauch der Ölbrenner als auch die thermische Energie des BHKW wurden gemessen. Das Temperaturniveau des Vortrockner betrug maximal 75°C in der Zuluft.

Der spezifische Energieverbrauch zur Trocknung von Petersilie betrug 7 158 kJ (1.99 kWh) pro kg verdampftes Wasser, 47% der Energie wurden aus dem BHKW bereitgestellt. Der Durchsatz belief sich auf 150 kg/h getrocknete Ware. Das Ergebnis des Biogasertragstests lieferte einen Ertrag von 0,331 m<sup>3</sup> Methan pro kg organischer Trockenmasse. Die Abwärme des BHKW ermöglichte eine Erhitzung der Trocknungsluft im Vortrockner auf 75°C. Jedoch werden 90°C empfohlen, um die optimale Produktfarbe zu erlangen. Daher muss noch ein hoher Anteil an fossiler Energie (Heizöl) für die Trocknung der Petersilie bereitgestellt werden. Weitere Untersuchungen sind nötig, mit dem Ziel der Reduktion des fossilen Energieeinsatzes und der CO<sub>2</sub> Emissionen.

### 1.3.2 Einleitung

Der jährliche Energieverbrauch von Trocknern in der deutschen Lebensmittelindustrie liegt bei 20 000 GWh mit einem Anteil an Erdgas von 34% (Jelinek, 2001). Trockner für Arznei- und Gewürzpflanzen haben einen hohen Energieverbrauch von 5 000 bis 12 500 kJ/kg verdunstetem Wasser, welcher hauptsächlich durch fossile Energieträger wie Erd- und Flüssiggas und Leichtöl bereitgestellt wird (Mellmann et al., 2008). Um den Energieverbrauch eines Trockners zu untersuchen, wurden verschiedene Parameter zur Beurteilung der Trocknung und der angewandten Technologien vorgeschlagen (Strumillo et al.; 2006, Menshutina et al., 2004).

Große Anstrengungen wurden unternommen, um den fossilen Energieverbrauch durch den Einsatz effizienterer Technologien und erneuerbaren Energien zu reduzieren. Der Einsatz von BHKWs mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 bis 40% und einem Gesamtwirkungsgrad von über 80% findet immer mehr Anklang in der Lebensmittelindustrie (Fantozzi et al., 2000; Fritzon et al., 2005; Ruiz et al., 2009). Ein vielversprechender Ansatz ist die Biogasproduktion mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung durch einen Verbrennungsmotor. Dieser generiert Wärme bei Niedertemperaturen (90-120°C) aus dem Mantel (25% der Wärme ist verfügbar zur Rückgewinnung), dem Motorenöl (12%) und dem Nachkühler (13%) und bei Hochtemperaturen (450-550°C) aus den Abgasen (50%) (Fantozzi et al., 2000).

Kraft-Wärme-Kopplung durch Verwendung von Verbrennungsmotoren wird in Trocknungsanlagen unter Einsatz verschiedener Brennstoffe durchgeführt. So werden z.B. Diesel-BHKWs zur Trocknung von Tee (Riva et al., 1989), Rapsöl-BHKWs zur Trocknung von Arzneipflanzen und Kräutern in Flachbettrocknern (Schröder, 1995), Erdgas-BHKWs zur Trocknung von Gemüse und Kräutern in Einbandrocknern (Jelinek, 2001) und Biogas-BHKWs zur Kräutertrocknung in Mehrbandrocknern eingesetzt (Schiele, 2008).

Die deutsche Gesetzgebung fördert den Einsatz von Erneuerbaren Energien mit einem im Jahr 2000 erstmals erschienenen Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG), welches feste Preise für aus erneuerbaren Energien gewonnenen Strom garantiert. Im Jahr 2008 war Deutschland mit mehr als 4 000 landwirtschaftlichen Biogasanlagen, das Land mit dem größten Biogasanlagenbestand (Weiland, 2009). Die weitere Entwicklung im Biogasbereich konzentriert sich besonders auf BHKWs zur Stromerzeugung mit gleichzeitiger Abwärmenutzung. Um die produzierte

Wärmeenergie zu nutzen, werden verschiedene Technologien angewandt, wie die Einspeisung in Nahwärmenetze, der Einsatz in Adsorptionskälteanlagen und den Transport in mobilen Latentwärmespeichern (Gaderer et al., 2007; Schulz et al., 2007). Diese Studie beschäftigt sich mit dem Einsatz von BHKW-Abwärme in einem Bandrockner für Arznei- und Gewürzpflanzen.

Die neueste Auflage des deutschen EEG erlaubt die Nutzung abgetrennter Teile von Arznei- und Gewürzpflanzen in Biogasfermentern, obwohl normalerweise nur Pflanzen, die speziell für den Einsatz in Biogasanlagen angebaut wurden, verwendet werden dürfen. Daher können die Nebenprodukte des Trocknungsprozesses von Petersilie als Substrat in der Biogasanlage eingesetzt werden.

Das EEG berechnet den Biogasertrag abgetrennter Teile von Arznei- und Aromapflanzen mit einer Stromproduktion von 220 kWh/t Frischmasse (Bundesanzeiger 2008).

Ziel dieser Studie war, den Energieverbrauch des untersuchten Bandrockners und die Auswirkung einer zusätzlichen Energiequelle in Form von Abwärme einer Biogasanlage auf den Trocknungsprozess zu bestimmen. Weiterhin sollte der Einsatz abgetrennter Teile von Arznei- und Aromapflanzen in der Biogasproduktion untersucht werden.

### 1.3.3 Material und Methoden

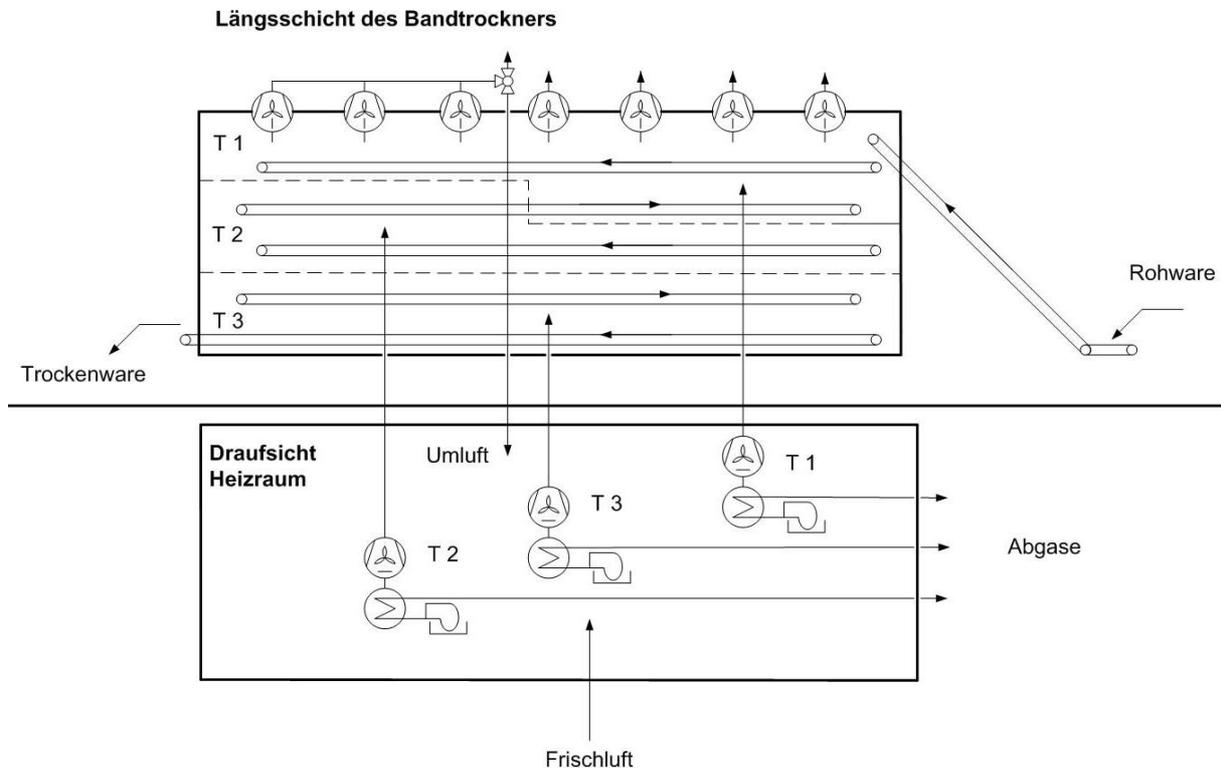
#### 1.3.3.1 Trocknungstechnik

Die beiden Verfahrensschemen mit der Wärmeerzeugung vor und nach dem Umbau zur Integration der Biogasabwärme sind zum Vergleich in Abb. 3-1 und 3-2 dargestellt.

Jede Temperaturzone wird durch einen Radialventilator mit Warmluft aus einem indirekt arbeitenden Warmluftherhitzer versorgt, wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist. Die thermische Leistung der indirekten Warmluftherhitzer, die mit Leichtöl arbeiten liegt bei jeweils max. 990 kW.

Die Luft wird nach dem Durchströmen des Produkts teilweise zurück in den Heizraum geleitet. Das Trocknungsgut wird über ein Schwenkband auf das oberste Band befördert und durchläuft den Trockner von oben nach unten, indem es immer am

Bandende auf das nächst tiefer gelegene Band fällt. Nach dem Verlassen des Trockners wird das Produkt gewogen und verpackt.



**Legend:**

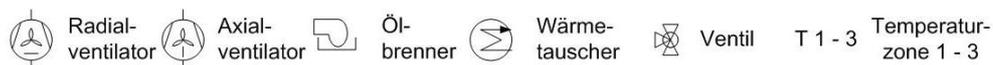


Abb. 3-1: Systemskizze des Bandtrockners mit Heizraum

Eine Änderung erfolgte nach der Erntesaison 2008 mit dem Anbau eines einbändigen Vortrockners mit einer Trocknungsfläche von 18 m<sup>2</sup>. Die Modifikationen sind in Abb. 3-2 dargestellt, die Änderungen sind in der Abbildung jeweils eingerahmt. Dieser wird mit der Abwärme einer Biogasanlage betrieben. Zusätzlich wurde ein Wärmetauscher im Heizraum installiert, um die Temperatur der Zuluft zu erhöhen.

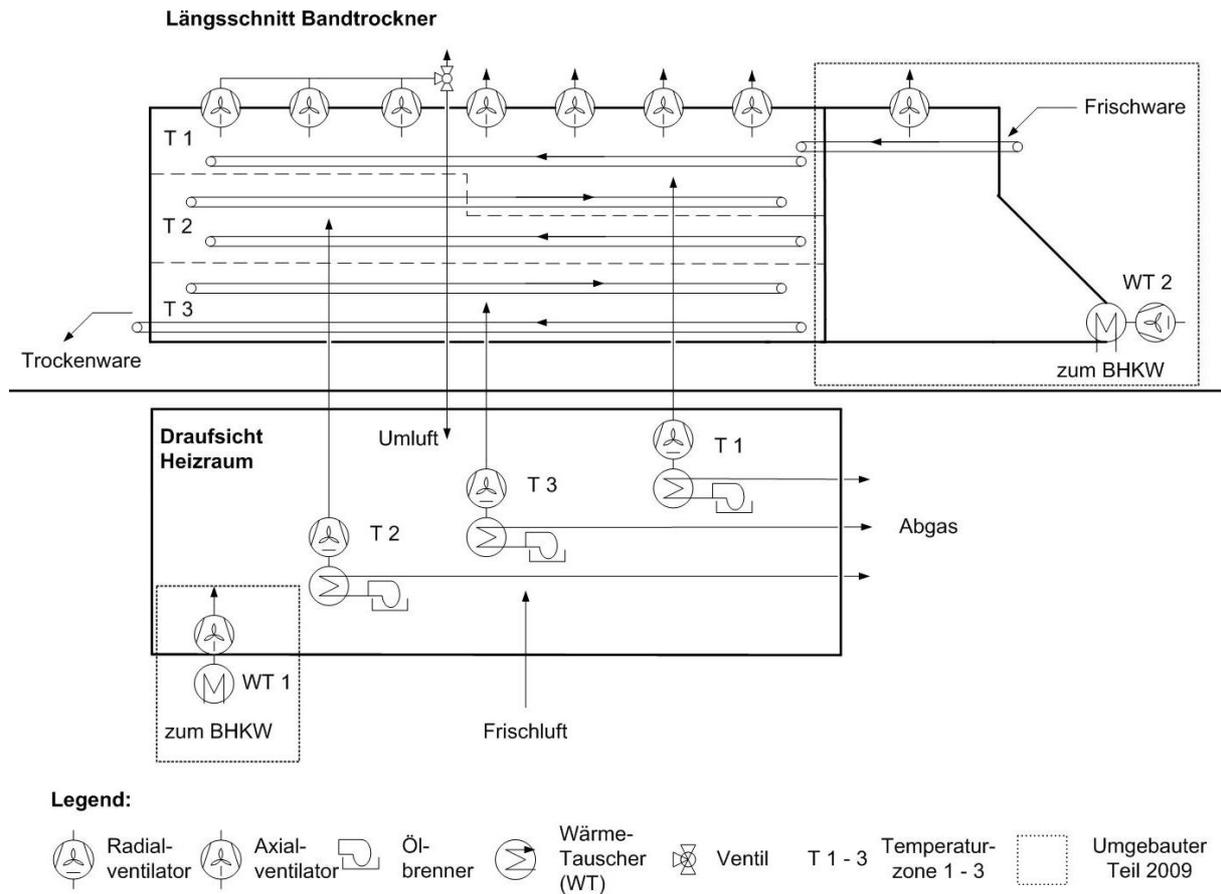


Abb. 3-2: Systemskizze des Bandtrockners und Heizraums nach dem Umbau 2009

### 1.3.3.2 Trocknungsmaterial und Betriebsweise

Direkt nach der Ernte werden die Gewürzkräuter vom Feld zur Trocknungshalle transportiert. Über ein Förderband gelangen die Pflanzen vom Transporthänger zu einer Schneidemaschine. Blätter und Stiele werden durch Windsichtung getrennt. Die Stiele werden gesammelt und als Substrat in der Biogasanlage eingesetzt. Die Blätter werden über ein Schwenkband in den Bandtrockner gefördert und durchlaufen den Trockner von oben nach unten, indem sie immer auf das nächst tiefer gelegene Band fallen. Die Trocknungszeit des Produkts belief sich auf 180 bis 400 Minuten, je nach Trocknungsgut sowie Anfangs- und Endfeuchte.

Das Trocknungsverhalten zweier Petersilienarten (glatte und krause) wurde untersucht. Die Schütthöhe des in den Trockner geförderten Materials wurde mittels Stachelwalzen auf etwa 0,1 m eingestellt. In der Saison 2008 betragen die Trocknungstemperaturen 105°C in Temperaturzone T1, 95°C in Zone T2 und 80°C in Zone T3. Aufgrund der zusätzlichen Wärme vom Vortrockner und lokaler begrenzter Frischwarenverfügbarkeit wurden die Temperaturen im Jahr 2009 gesenkt

(Temperaturabstufung 90/80/70°C). Die Lufttemperatur im Vortrockner war durch die maximale Vorlauftemperatur der Wärmeleitung von 85°C auf ein Maximum von 75°C begrenzt.

### 1.3.3.3 Trocknerleistung und Energieverbrauch

Um die Effizienz des Trockners zu bewerten, wurden der Feuchtegehalt vor und nach der Trocknung mit Hilfe der Trockenschrank-Methode (103±2°C, Dreifachbestimmung, jede Probe 25 g) bestimmt. Der Massenstrom an Trockenprodukt aus dem Bandtrockner wurde mit der Waage der Packstation (Reith, Typ 2000, Wolnzach, Germany) gewogen, um den Durchsatz des trockenen Endprodukts zu bestimmen. Zur Berechnung des Massenstroms des verdampften Wassers wurde Gleichung 3-1 verwendet, unter Berücksichtigung des Durchsatzes des Endprodukts, des Anfangs- und Endfeuchtegehalts bezogen auf die Frischmasse.

$$\dot{m}_{evaporation} = \frac{\dot{m}_{fin} \cdot (MC_{ini} - MC_{fin})}{100 - MC_{ini}} \quad (3-1)$$

Der Brennstoffverbrauch wurde mit einem Öl-Durchlaufmengenähler (Aquametro VZO 8, Therwil, Switzerland) an jedem der drei Brenner gemessen. Die Wärmezufuhr von den Ölbrennern wurde mit der Gleichung 3-2 berechnet unter Einbeziehung des gemessenen Brennstoffverbrauchs, des Wirkungsgrads des Lufterhitzers mit 89% und dem unteren Heizwert von Leichtöl (LHV=36 MJ/l).

$$\dot{Q}_1 = LHV \cdot \dot{m}_{fuel} \cdot \eta_{heater} \quad (3-2)$$

Die Wärmezufuhr vom BHKW zu den beiden Wärmetauschern wurde über Gleichung 3-3 und 3-4 berechnet. Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgte mit einem Flügelradanemometer (Ahlborn FV A915 S220, Holzkirchen, Germany). Temperaturen der Luft vor und nach dem Wärmetauscher wurde mit Thermoelementen des Typs K (Greisinger GTT 1150 OK, Regenstauf, Germany) erfasst. Weiterhin wurde die spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck ( $c_p=1,005 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ) in Gleichung 3-3 verwendet. Der Massenstrom der Luft wurde für einen Luftdruck berechnet, der vom Landesamt für Umwelt und Geologie

Hessen (Darmstadt, Deutschland) aufgezeichnet wurde. Zudem wurden die gemessene Luftgeschwindigkeit, die Wärmetauscherfläche, die spezifische Gaskonstante von Luft ( $R_{air} = 287,058 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und die Lufttemperatur vor dem Wärmetauscher mit in die Gleichung einbezogen.

$$\dot{Q}_2 = c_p \cdot \dot{m}_{air} \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3-3)$$

mit:

$$\dot{m}_{air} = \frac{p_0 \cdot v_{air} \cdot A}{R_{air} \cdot T_{in}} \quad (3-4)$$

Der spezifische Energieverbrauch der Wasserverdampfung wird in Gleichung 3-5 ausgedrückt.

$$q_{ev} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{\dot{m}_{ev}} \quad (3-5)$$

#### 1.3.3.4 Biogasanlage und BHKW

Das BHKW der Biogasanlage wurde über ein Wärmenetz mit dem Trockner verbunden. Die Biogasanlage besteht aus zwei Fermentern mit jeweils einem Volumen von 2 218 m<sup>3</sup>. Der Gärrestspeicher hat ein Volumen von 3 924 m<sup>3</sup>. Als Gärsubstrate werden Maissilage, Grünroggen, Hirse und Zuckerrüben eingesetzt, welche von 50 Landwirten angebaut werden. Als BHKWs kommen zwei Otto-Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Die technischen Daten sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Die gesamte thermische Leistung von 1 031 kW wird für die Trocknung (80%) und den Eigenwärmebedarf der Biogasanlage (20%) eingesetzt, etwa 20% der thermischen Leistung werden der Fermenterheizung zugeführt.

Tab 3-1: Technische Daten des Blockheizkraftwerks (Herstellerangaben)

Motortyp	MTU MB 3042 L5	Deutz TCG 2016 V16
Gesamtverbrennungsleistung, kW	955	1 734
Elektrische Leistung, kW	370	716
Elektrischer Wirkungsgrad, %	38,7	41,3
Thermische Leistung, kW	426	605
Thermischer Wirkungsgrad, %	44,6	34,9
Gesamtleistung, kW	796	1 320
KWK Wirkungsgrad, %	83,4	76,2

#### 1.3.3.5 Biogasertragstest

Das Methanpotential der Ausschussprodukte des Windsichters wurde mit dem patentierten Hohenheimer Biogasertragstest (Helffrich et al., 2005; Patent Nr. DE10227685B4), nach der VDI Richtlinie 4630 bestimmt. Die Proben, welche großteils aus Stielen bestanden, wurden nach dem Schneiden und Windsichten aus der Verfahrenslinie entnommen. Untersucht wurden Mooskrause und Glatte Petersilie (*Petroselinum crispum*), Dill (*Anethum graveolens*), Rotklee (*Trifolium pratense*) und Artischocke (*Cynara cardunculus*). Sie wurden auf Trockenmasse (TM), organische Trockenmasse (OTM) und den Aschegehalt untersucht.

Von dem Testsubstrat wurden 500mg über einen Zeitraum von 48h bei 60°C getrocknet, gemahlen und gesiebt (<1 mm) und mit 30 ml Inokulum (vorgefauter flüssiger Dung) in einer 100 ml Glasspritze bei 37°C mit drei Wiederholungen fermentiert. Volumen und Methangehalt des entstandenen Biogases wurden über 35 Tage hinweg regelmäßig erfasst. Zusätzlich wurde Inokulum als Vergleichsvariante in dreifacher Ausführung ohne Substrat fermentiert (Helffrich et al., 2003; Kusch et al., 2008).

## 1.3.4 Ergebnisse und Diskussion

### 1.3.3.1 Trocknerleistung und Energieverbrauch

Messungen am Trockner fanden im Jahr 2008, als nur Heizöl als Energiequelle eingesetzt wurde und 2009/2010 mit BHKW-Abwärme als zusätzlicher Energiequelle, statt. Die Datenerhebung wurde während des normalen Betriebs durchgeführt. Aufgrund schwankender Produktverfügbarkeit änderte sich der Materialdurchfluss während der Messungen, wie in Tabelle 3-2 zu sehen ist. Im Jahr 2008 wurde eine Übertrocknung der Kräuter festgestellt, welche auf eine ungleichmäßige Luftverteilung über die Bandbreite zurück zu führen sind. Dieses Problem wurde 2009 mit Hilfe spezieller Leitbleche im Trockenraum gelöst.

Der stündliche Energiebedarf für Mooskrause Petersilie betrug 1827,8 kWh/h im Jahr 2008 und 1879 kWh/h im Jahr 2009 und wurde von drei Ölbrennern und zwei Wärmetauschern, die durch ein BHKW beheizt wurden, geliefert. Der Anteil der Energie vom Biogas-BHKW, welche durch die beiden Wärmetauscher in den Trocknungsprozess eingeschleust wurde, betrug 46,7%. Trotz der geringeren Verdampfungsleistung 2008 war der spezifische Energieverbrauch in der Saison 2008 niedriger, was auf die bessere Auslastung bei höherem Durchsatz zurückzuführen ist.

Der stündliche Energiebedarf für glatte Petersilie war niedriger und lag zwischen 1678,6 kWh/h im Jahr 2008 und 1615,2 kWh/h im Jahr 2009. Der Anteil der Energie vom BHKW lag 2009 bei 38,6%.

Tab 3-2: Parameter für die Bewertung der Trocknung von Petersilie ohne (2008) und mit (2009) der Nutzung von Biogasabwärme

Parameter	Mooskrause Petersilie		Glatte Petersilie		
	2008	2009	2008	2009	2010
Messsaison	2008	2009	2008	2009	2010
Anfangsfeuchte, % w.b.	82,6	87,0	84,1	83,0	83,0
Endfeuchte, % w.b.	2,6	5,1	1,7	4,3	7,0
Durchsatz Endprodukt, kg/h	217,6	150,0	154,0	186,0	112,0
Wasserverdampfung, kg/h	1000,5	945,0	795,3	861,0	493,0
Energiebedarf der 3 Öl- brenner, kWh	1827,8	1001,0	1678,6	992,0	701,0
Energiebedarf der Wärmetauscher WT 1&2, kWh	-	878,0	-	623,2	199,0 (nur WT1)
Anteil des Energiebe- darfes an erneuerbaren Energien, %	-	46,7	-	38,6	22,1 (nur WT1)
Spez. Energieverbrauch, kWh/kg verd. Wasser	1,83	1,99	2,11	1,88	1,81
Spez. Energieverbrauch, kJ/kg verd. Wasser	6,577,0	7157,9	7610,0	6753,4	6507,0

In Tabelle 3-3 sind Messdaten zur Bewertung des Vortrockners für drei Kulturen dargestellt. Es zeigt sich, dass der Vortrockner zwischen 15 und 27% zur Wasserverdampfung beiträgt. Dies bedeutet, dass bei gleichen Parametern für den Bandrockner die Leistung bis zu 27% gesteigert werden kann. Die Luftmenge schwankte bei den Messungen zwischen 15100 m<sup>3</sup>/h (Petersilie) und 19000 m<sup>3</sup>/h (Rotklee). Je nach Trocknungstemperaturen betrug der Anteil an der thermischen Leistung bis zu 39%. Die Wasserverdampfung im Vortrockner lag bei maximal 118,1 kg/h.

Tab. 3-3: Parameter zur Bewertung des Vortrockners für verschiedene Trocknungsprodukte

Parameter	Kultur		
	Glatte Petersilie	Rotklee	Artischocke
Temperatur Bandrockner, °C	90/70/60	70/64/50	46/42/41
Temperatur Vortrockner, °C	73,9	68,1	71,8
Anfangsfeuchte, % w.b.	83,5	82,8	82,0
Feuchte nach Vortrockner, % w.b.	79,7	80,3	77,1
Endfeuchte, % w.b.	7,0	10,3	12,3
Durchsatz, kg/h	112,2	66,6	112,6
Thermische Leistung, kW	900,2	916,6	754,2
Anteil therm. Leistung Ölbrenner/WT1/ Vortrockner, %	78/0/22	36/35/29	36/25/39
Wasserverdampfung Gesamt/Vortrockner, kg/h	498,6/101,1	280,6/43,1	435,8/118,1
Spez. Energieverbrauch, kJ/kg Wasser	6507	11761	6231

Die Luftzustände im Heizraum sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Grundsätzlich war das Temperaturniveau im Bandrockner für die Trocknung 2009 geringer, um Übertrocknung vorzubeugen, da zusätzliche Wärme am Vortrockner zur Verfügung stand. Der Durchsatz konnte nicht erhöht werden, da nur begrenzt Material zur Verfügung stand. Wärmetauscher 1 im Heizraum hatte die Aufgabe die Zuluft für die Warmluftthermischer auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen um geringere Ölverbräuche zu erzielen. Höhere Umlufttemperaturen 2009 waren das Ergebnis

einer geringeren Beladung des Trockners und damit einer kleineren stündlichen Wasserverdampfung.

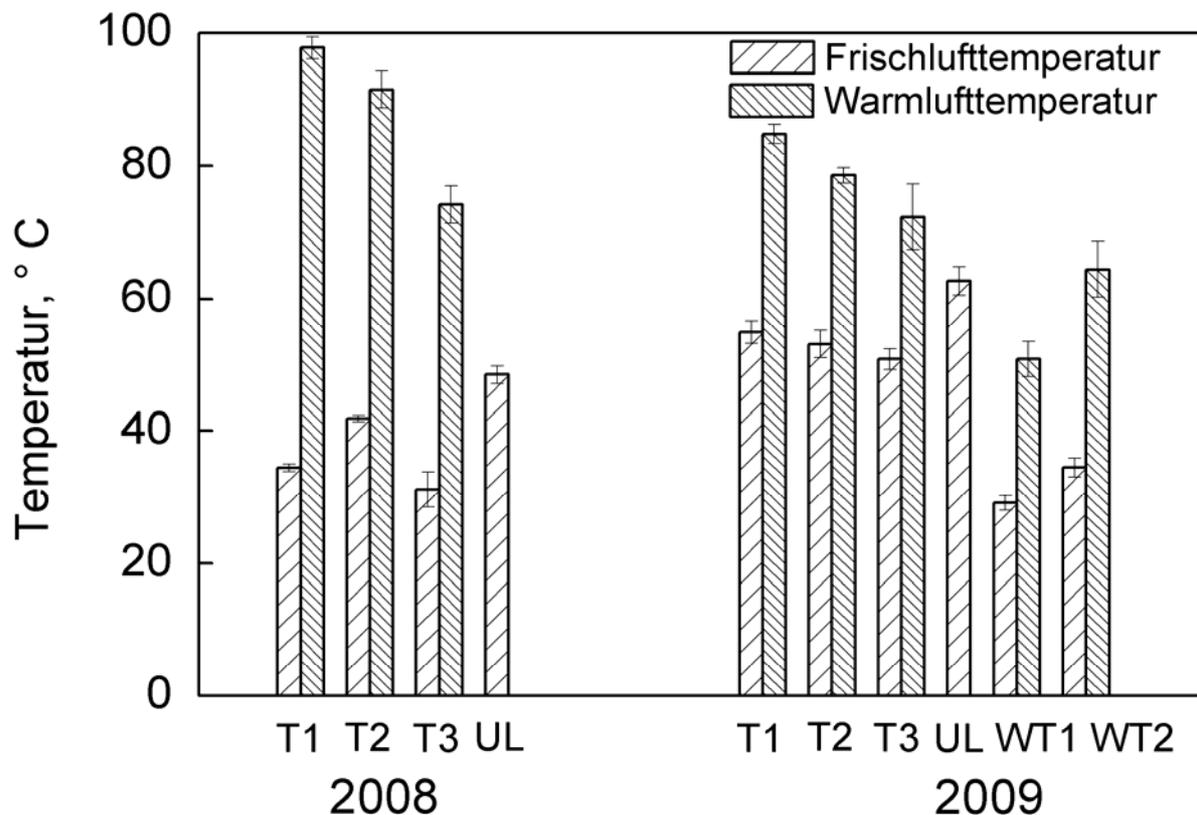


Abb. 3-3: Lufttemperatur der Warmlufterhitzer (T1- T3), der Umluft (UL) und der Wärmetauscher 1/ 2 (WT 1/2) ohne (2008) und mit (2009) Biogasabwärmenutzung (Fehlerbalken = Standardabweichung)

Ein Massen- und Wärmestrombilanzierung der Luft im Heizraum konnte nicht durchgeführt werden, da die Messung der Zuluft aus der Umgebung nicht möglich war. Dies ist eine Schwachstelle des offenen Heizraumes, welcher nicht kontrolliert werden kann. Die zusätzliche Zuluft ist auf Grund des Unterdrucks im Heizraum nötig.

### 1.3.4.2 Hohenheimer Biogasertragstest für Arznei- und Gewürzpflanzen

Die Ergebnisse des Hohenheimer Biogasertragstests für Arznei- und Gewürzpflanzen sind in Tabelle 3-4 dargestellt. Nur der Stielanteil, der im Windsichten aussortiert wurde, war Ausgangsmaterial für die Analyse. Für Dill und glatte Petersilie konnten, aufgrund von Substratverlusten während der Gasmessungen, nur zwei Wiederholungen bewertet werden. Besonders glatte und krause Petersilie hatten einen hohen Methanertrag. Bei ihnen handelt es sich um einer der am meisten angebauten Gewürzpflanzen in Deutschland.

Tab 3-4: Hohenheimer Biogasertragstest für Arznei- und Gewürzpflanzen und konventionelle Substrate

Substrate	Standardmethanertrag, $m_n^3/kg$ oTS	Standardabweichung
Rotklee (n = 3)	0,262	0,008
Mooskrause Petersilie (n = 3)	0,331	0,004
Dill (n = 3)	0,306	0,008
Glatte Petersilie (n = 2)	0,354	-
Artischocke (n = 2)	0,274	-
Konventionelle Substrate:		
Mais	0,40*	-
Hirse	0,31*	-

\*(Oechsner et. al., 2003)

Die Methanertragskurve in Abbildung 3-5 zeigt eine schnelle Gasbildung mit exponentiellem Anstieg. Nur Artischocke weist einen verzögerten Anstieg zu Beginn auf.

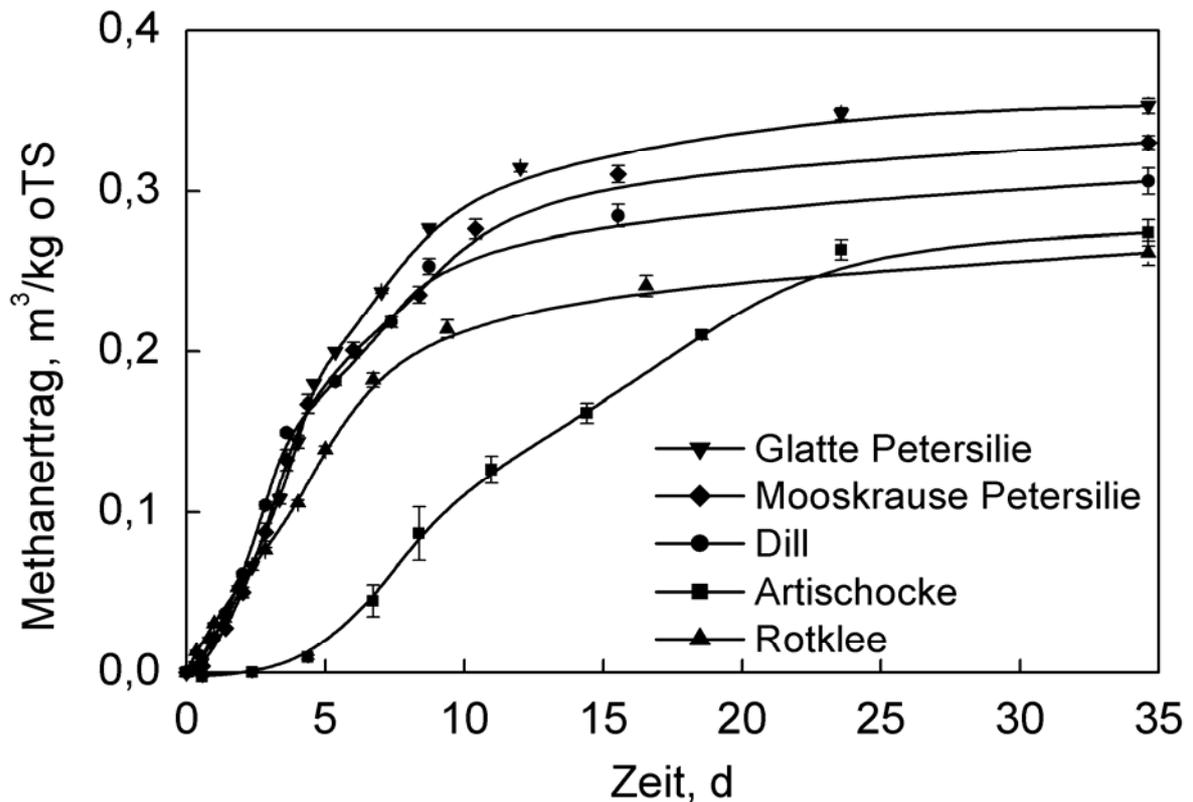


Abb. 3-5: Biogasertragstest für verschiedene Arznei- und Gewürzpflanzen

Um das Potential der Biogasmenge, welcher mit den abgetrennten Teilen von Arznei- und Gewürzpflanzen erzeugt werden kann, zu bewerten, fand eine Untersuchung anhand von krauser Petersilie statt.

Der Methanertrag von frischem Material der krausen Petersilie beträgt  $62 \text{ m}_n^3/\text{t}$ . Dieser hat einen Energiegehalt von  $618,1 \text{ kWh/t}$  Frischmaterial, wenn mit dem unteren Heizwert von Methan ( $9.97 \text{ kWh/m}_n^3$ ) gerechnet wird.

Wird diese Biogasmenge in einem BHKW, wie das installierte MTU MB 3042 L5 (siehe Tabelle 3-1) verbrannt, werden eine elektrische Energie von  $239,2 \text{ kWh}_{el}/\text{t}$  (elektrischer Wirkungsgrad von  $38,7\%$ ) und eine thermische Energie von  $275,7 \text{ kWh}_{therm}/\text{t}$  (thermische Wirkungsgrad von  $44,6\%$ ) erzeugt.

Der Anteil der abgetrennten Pflanzenteile der Petersilie beträgt etwa  $40\%$  der Gesamtmenge des geernteten Materials (Heindl, 1998).

Für Mooskrause Petersilie beläuft sich der Gesamtdurchsatz im Jahr 2009 auf  $1825 \text{ kg/h}$ , wovon  $730 \text{ kg/h}$  ( $40\%$ ) aus abgetrennten Pflanzenteilen und  $1095 \text{ kg/h}$  ( $60\%$ ) aus Trocknungsmaterial bestehen.

Mit einem Beitrag von  $730 \text{ kg/h}$  Petersilie am Biogasprozess kann das BHKW  $201,3 \text{ kWh}_{therm}$  an thermischer Energie erzeugen, was einen Anteil von  $10,7\%$  am

erforderlichen Energiebedarf für die Trocknung ausmacht. Dieser Anteil kann nur während der Erntesaison erbracht werden. Das System aus Bandtrocknung und Biogasprozess stellt einen geschlossenen Kreis dar, mit einer hohen thermischen Energieausnutzung des BHKWs und kurzen Wegen für die Verwendung der abgetrennten Pflanzenteile.

### 1.3.5 Schlussfolgerung

Die Kombination von Biogasanlage und Bandtrockner erweist sich als energieeffiziente Variante mit reduzierten CO<sub>2</sub> Emissionen. Es zeigt sich, dass der Vortrockner zwischen 15 und 27% zur Wasserverdampfung beiträgt. Dies bedeutet, dass bei gleichen Parametern für den Bandtrockner die Leistung bis zu 27% gesteigert werden kann. Je nach Trocknungstemperaturen betrug der Anteil an der thermischen Leistung bis zu 39%, die Wasserverdampfung lag bei maximal 118,1 kg/h. Der Wärmebedarf des Trockners kann durch das BHKW gedeckt werden, wobei der Anteil der erzeugten Energie abhängig vom Temperaturniveau der Trocknungsluft ist. Zusätzlich erforderliche Energie zum Erreichen der Trocknungstemperatur kann durch Ölbrenner bereitgestellt werden. Ein anderer Ansatz wäre der Einsatz von Thermoöl anstatt Wasser als Wärmeträger. Höhere Temperaturen können erreicht werden ohne den Druck in den Leitungen zu erhöhen. Allerdings wäre die Wärmeübergang am Wärmetauscher geringer. Dies würde größeren Wärmetauscherflächen am Motor benötigen, um thermische Leistung zu erreichen. Weiterhin hat Thermoöl höhere Auflagen bezüglich der Verhinderung von Leckagen im Wärmenetz. Außerhalb der Erntezeiten von Arznei- und Gewürzpflanzen (April bis Oktober) sollte die Abwärme durch andere Verbraucher genutzt werden.

### 1.3.6 Literatur

- Bundesanzeiger** (2008); Act Revising the Legislation on Renewable Energy Sources in the Electricity Sector and Amending Related Provisions, **49**
- Fantozzi F; Ferico S D; Desideri U** (2000). Study of a cogeneration plant for agro-food industry. *Applied Thermal Engineering*, **20** (11), 993-1017.
- Fritzson A; Berntsson T** (2006). Energy efficiency in the slaughter and meat processing industry-opportunities for improvements in future energy markets. *Journal of Food Engineering*, **77** (4), 792-802.
- Gaderer M; Lautenbach M; Fischer T; Ebertsch G;** (2007). Wärmenutzung bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, *LfU Umwelt spezial*
- Heindl A** (1999). Dryer for Medicinals Herbs and Spice Plants - Overview and Potentialies in Future. *Drogenreport*, **12** (21), 45-53
- Helfrich D; Oechsner H** (2003). The Hohenheimer Biogas Yield Test - Comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass. *Landtechnik*, **58** (3), 148-149.
- Helfrich D; Morar M; Lemmer A; Oechsner H; Steingaß H** (2005) Laborverfahren zur Bestimmung der Qualität und Quantität des beim anaeroben Abbau organischer Substanzen entstehenden Biogases im Batch-Verfahren. Patent Nr. DE10227685B4 In Deutsches Patent und Markenamt.
- Jelinek D** (2001). Energy-sharing arrangement between natural-gas-fired unit-type co-generation plant and a belt-type drying system for vegetables and herbs. *Gaswärme International*, **50** (10), 455-459.
- Kusch S; Oechsner H; Jungbluth T** (2008). Biogas production with horse dung in solid- phase digestion systems. *Bioresource Technology*, **99** (5), 1280-1292.
- Mellmann J; Fürll C** (2008). Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen - Spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, **13** (3), 127-133.
- Menshutina N V; Gordienko M G; Voynovskiy A A; Kudra T** (2004). Dynamic analysis of drying energy consumption. *Drying Technology*, **22** (10), 2281-2290.
- Oechsner H; Lemmer A; Neuberg C** (2003). Feldfrüchte als Gärsubstrat für Biogasanlagen. *Landtechnik*, **58** (3), 146-147.
- Riva G; Palaniappan C** (1989). Energy consumption and possible savings in tea processing. *AMA (Agricultural Mechanization in Asia)*, **20** (3), 73-77.

- Ruiz Celma A; Lopez-Rodriguez F** (2009). Cogeneration plant in an olive sludge industry. *Applied Thermal Engineering*, **29** (16), 3394-3400.
- Schiele E** (2008). Biogasanlage der ESG Kräuter GmbH - nachhaltige und umweltfreundliche Kräuterproduktion. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, **13** (2), 91-94.
- Schröder H** (1995). Einsatz von Blockheizkraftwerken auf Pflanzenölbasis für die Arznei- und Gewürzpflanzentrocknung. *Herba Germanica*, **3** (3), 145-149.
- Schulz W; Heitmann S** (2007). Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In *Schlussbericht zum BMELV/FNR-Projekt 22009505 und 22027205* (pp. 68-71). Bremer Energie Institut, Bremen.
- Strumiłło C; Jones PL; Zylła R;** (2007). Energy Aspects in Drying. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of industrial drying*. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis. p 1075-1101.
- Weiland P** (2009). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1-12.

## 1.4 Online Messung der Produktfeuchte und des ätherischen Ölgehaltes mittels Nahinfrarot-Spektroskopie bei der Bandtrocknung von Petersilie

### 1.4.1 Kurzfassung

Der Bedarf an getrocknete Petersilie (*Petroselinum crispum*) mit optimalem Feuchtegehalt ist in der Lebensmittelindustrie sehr hoch. Die Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie bietet die Möglichkeit die schonende Trocknung von Petersilie im Prozess zu kontrollieren.

Für die Untersuchung wurden zwei Mehrbandtrockner für Gewürz- und Arzneipflanzen genutzt. Ziel war es die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der NIR-Sensoren für eine zerstörungsfreie Online-Messung der Produktfeuchte und des ätherischen Ölgehaltes von Petersilie zu ermitteln. Dazu wurden je zwei Sensoren an den Trocknern installiert, einer in der Bandmitte am Trocknereingang für die Produktfeuchte von 50-90% (bezogen auf Gesamtmasse, wet basis w.b.) und ein weiterer am Trocknerausgang für den Feuchtebereich von 2-40% w.b. An einem Trockner wurden am Ein- und Ausgang zusätzlich die ätherischen Öle im Bereich von 0 bis 0,4 ml/ 100g Produkt gemessen. Die Kalibration wurde für den Feuchtegehalt bei einer Wellenlänge 1450 nm und 1950 nm durchgeführt. Die ätherischen Öle wurden bei einer Wellenlänge von 2300 nm kalibriert. Die Genauigkeit der NIR-Messung war bei der Trockenschrankmethode als Referenz hoch und niedriger beim Halogentrockner.

### 1.4.2 Einleitung

Getrocknete Petersilie mit optimalem Feuchtegehalt wird in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie zur Herstellung von Gewürzmischungen, ätherischen Ölen und Arzneimitteln verwendet (Soysal et al., 2006). Petersilie ist reich an Calcium, Phosphor, Magnesium und Vitamin C. Darüber hinaus enthalten die Blätter zwischen 0,02 und 0,9% ätherisches Öl, das aus 80% Phenylpropanderivaten, Myristicin bei krauser Petersilie und Apiol bei glatter Petersilie, besteht. Krause Petersilie hat ein schwächeres Aroma als glatte Petersilie, beide werden zum Würzen und Garnieren von Speisen eingesetzt (Teuscher, 2003; Raghavan, 2007).

Die Feuchtemessung der Frisch- und Trockenware ist von besonderer Bedeutung. Der Eingangsfeuchtegehalt variiert je nach Erntebedingung, deshalb können die Trocknungsparameter wie Durchlaufzeit, Massenstrom der Frischware und die

Trocknungstemperatur eingestellt werden. Auf der anderen Seite muss das Endprodukt auf einen optimalen Feuchtegehalt getrocknet werden, um Übertrocknung und damit einen Qualitätsverlust wie Farbveränderung, Verlust an ätherischen Ölen und Produktstruktur zu verhindern. Ein zu hoher Endfeuchtegehalt verhindert eine sichere Lagerung und führt zu mikrobiologischen Problemen, die zusätzliche Entkeimungsmaßnahmen nötig machen (Schweiggert et al., 2007).

In der Lebensmittelverarbeitung können komplexe Verfahrensschritte durch verbesserte Computertechnik, Netzwerke und Sensoren leichter beherrscht werden. Mit dem Einsatz von NIR Sensoren können konstante Produktqualität und höhere Effizienz mit geringerem Energieverbrauch erzielt werden (McFarlane, 1995). Für dieses Ziel können gleichzeitig mehrere Inhaltsstoffe, wie Feuchte-, Fett- und Proteingehalt ohne Probenvorbereitung gemessen werden (Torgersen et al., 2003; Shiroma & Rodriguez-Saona, 2008). Die Herausforderung bei Echtzeit-Messungen in Nachernteprozessen wie der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen ist die Variabilität in der Größenverteilung, Form und Oberflächenstruktur der Schüttung je nach Erntebedingung.

Die NIR Methode basiert auf dem Prinzip, dass elektromagnetische Wellen mit der Probe, in Form von Absorption, Reflexion, Transmission und Streuung interagiert. Diese Wechselwirkungen hängen von den Atombindungen in der Probe ab, wobei die stärkste Wechselwirkung bei Bindungen mit hohem Dipolmoment, wie O-H, C-H, N-H, verursacht wird. In Zusammenhang mit biologischem Material sind Atombindungen mit Wasserstoff verantwortlich für die meisten Lichtabsorptionen im NIR-Bereich. Das Spektrum beinhaltet alle chemischen und physikalischen Informationen der äußeren Schicht der Probe. Es kann dadurch für die qualitative Analyse verwendet werden, da Absorptionen durch unterschiedliche Bindungen bei verschiedenen Wellenlängen auftreten. Die Stelle des Peaks im gemessenen Wellenlängenbereich (in Nanometern) charakterisiert den Inhaltsstoff und die Amplitude des Peaks gibt die Menge in der Probe an (Scotter, 1990; Davies & Grant, 1987).

Die Eindringtiefe der NIR-Strahlung in die Probe beträgt wenige Millimeter, das Produkt muss daher an der Oberfläche die gleiche Konzentration des Inhaltstoffes wie im ganzen Material aufweisen. Dies macht die Auswahl des Messorts im Prozess sehr wichtig (Kemney, 2001).

Grundsätzlich gibt es zwei Konfigurationen für NIR Geräte, die abhängig von der Art des Monochromators sind. Spektrometer mit Fouriertransformation arbeiten mit einem Gitter oder Prisma und zerlegen die Wellenlängen des Lichtes, mit denen die Probe bestrahlt wird. Die reflektierte Strahlung die am Detektor ankommt, wird zu einem Spektrum konvertiert. Mittels chemometrischen Techniken können Einzelkomponenten in der Probe gemessen werden (Cozzolino, 2009).

Im Gegensatz dazu sind NIR Sensoren mit festem Filter auf eine bestimmte Wellenlänge voreingestellt und können daher nur bestimmte Inhaltsstoffe messen. Für die Messung von hohen Feuchtegehalten werden Filter mit 1400-1450 nm und für niedrige Feuchten 1900–1945 nm verwendet (Shenk et al., 2001; Büning–Pfaue, 2003). Ein Referenzstrahl, der eine etwas andere Wellenlänge als der Messwellenlänge besitzt, wird von der Probe nicht absorbiert und stabilisiert die Messung. Die Referenzwellenlänge für die Messung von Wasser bei 1945 nm ist z.B. 1700 nm, da diese Wellenlänge von Wasser nicht absorbiert wird (Lück, 1964).

Für die schnelle Analyse von ätherischen Ölkomponenten aus Thymian, Oregano und Kamille wurde ein Peak bei 2300 nm gefunden, der durch die C-H Bindung in Terpenoiden und phenolischen Komponenten verursacht wird (Schulz et. al, 2003).

Anwendungen von NIR Sensoren mit festen Filter finden sich bei der Feuchtemessung von Hackschnitzeln (Jenson et al., 2007). Für die Bestimmung von Feuchte-, Protein- und Fettgehalt in der Fleischverarbeitung wurde diese Messtechnik von Isaksson et al. (1996) und Torgsson et al. (2003) verwendet. Heindl & Heindl (1998) evaluierten die Anwendung von NIR Sensoren in einem Mehrbandtrockner zur Hopfentrocknung. Der Feuchtegehalt von Hopfendolden wurde mittels NIR Sensor gemessen und mit der Analyse im Trockenschrank verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass der NIR Sensor für die Bestimmung der Feuchte im Bereich von 5-30% (w.b.) und 50-85% (w.b.) geeignet war. Andere Methoden wie die Messung der Ablufttemperatur zur Kontrolle von Teetrocknern wurden von Temple & van Boxtel (2000) simuliert, allerdings wurde auch hier die NIR Messung für die Endfeuchte vorgeschlagen.

Es gibt direkte und indirekte Methoden zur Bestimmung des Wasser- und ätherischen Ölgehaltes in Lebensmitteln. Direkte Methoden sind im Allgemeinen genau und verlässlich, in der Durchführung häufig komplex, zeitaufwändig und zerstören die Probe. Sie werden für die Qualitätskontrolle in der Lebensmittelindustrie eingesetzt und auch als Referenzmethode für die Kalibration

von indirekten Bestimmungsmethoden herangezogen. Indirekte Methoden, wie die NIR-Spektroskopie, sind schnell, zerstörungsfrei und können als Online-Messung in der Prozesskontrolle verwendet werden. Ein Nachteil dieser Methoden ist, dass sie eine genaue, produktspezifische Kalibration mittels direkter Bestimmungsmethode benötigen (Isengard, 2001). Die Referenzmethode ist abhängig vom untersuchten Lebensmittel und deren Inhaltsstoffen, welche die Ergebnisse bei ungünstiger Methodenwahl verfälschen können (Isengard et al., 2010). Ein Pulver mit einer engen Partikel- und Feuchteverteilung kann mittels Karl-Fischer Titration sehr genau bestimmt werden. Zur repräsentativen Untersuchung der Frischware eines geschnittenen Gewürzes wie Petersilie wird eine größere Probenmenge benötigt. Der Feuchtegehalt kann je nach Anteil der Blätter und Stängel in der Schüttung schwanken. Als Referenzmethode wurden in dieser Studie zwei thermogravimetrischen Messverfahren eingesetzt, die Trockenschrankmethode und der Infrarot (IR)-Schnellfeuchtebestimmer.

Das Ziel dieser Studie war die Kalibration von NIR Sensoren mit fester Wellenlänge zur Online-Bestimmung von Feuchtegehalt und ätherischem Ölgehalt während der Trocknung von Petersilie.

#### 1.4.3 Material und Methode

##### 1.4.3.1 Untersuchte Pflanzen

Die Untersuchungen wurden mit zwei Arten von Petersilie durchgeführt, glatte Petersilie [*Petroselinum sativum*] Sorte „Gigante d'Italia“ und krause Petersilie [*Petroselinum crispum*] Sorte „Mooskrause“.

##### 1.4.3.2 Bandtrocknungssysteme

###### 1.4.3.2.1 Fünfbandtrockner

Am Fünfbandtrockner (Kap. 1.1.3.1) wurden zwei NIR Sensoren installiert, die Position ist in Abb. 4-1 dargestellt. Nach den zwei Stachelwalzen am Vortrockner ist der erste NIR-Sensor angebracht. Am Ende des fünften Bandes sitzt der zweite NIR Sensor zur Messung der Ausgangsfeuchte. Die Bandgeschwindigkeiten können einzeln geregelt werden. Die normale Durchlaufzeit für Petersilie (Temperaturabstufung 90/80/70°C) beträgt 180 min und kann bei unterschiedlichen Erntebedingungen variieren.

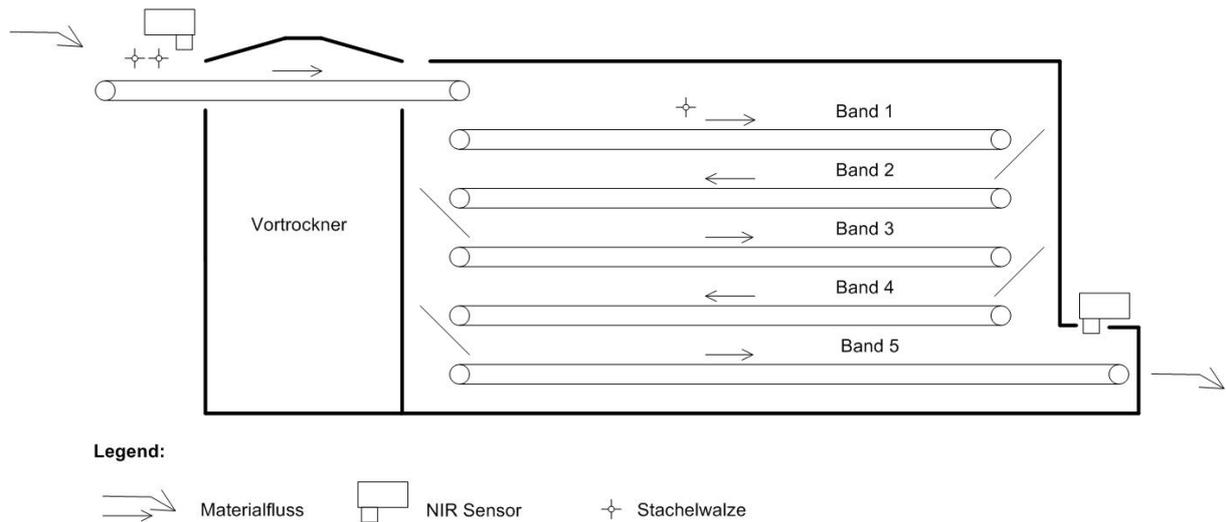


Abb. 4-1: Längsschnitt des Fünfbandtrockners mit installierten NIR Sensoren

#### 1.4.3.2.2 Siebenbandtrockner

Der untersuchte Siebenbandtrockner (Jaquet Typ UNT 180-27-10E 13E-2, Freising) hat eine Trocknungsfläche von 295 m<sup>2</sup>. Der Trockner umfasst sieben Bänder, wobei das erste Band in zwei Einheiten unterteilt ist, um die Produktvermischung durch die zusätzliche Fallstufe zu erhöhen. Abb. 4-2 zeigt einen Längsschnitt des Trockners mit den eingebauten NIR Sensoren.

Die Vorbehandlung erfolgt analog zu dem des Fünfbandtrockners. Nach dem Schneiden in 40-60 mm lange Stücke, werden die Stängel und Blätter durch den Windsichter getrennt. Bevor das Produkt in den Trockner gelangt, wird es mittels Bandwaage gewogen. Der Trockner wird durch ein Schwenkband beladen, dieses verteilt das Produkt gleichmäßig über das drei Meter breite Band. Über zwei Stachelwalzen wird die Schütthöhe konstant gehalten. Der erste NIR Sensor für die Frischware wurde zwischen den Stachelwalzen und mit einem Abstand von 310 mm zur Schüttung installiert. Fünf Gasbrenner versorgen den Trockner mit Warmluft. Das erste Band wurde mit Warmluft von 125°C durch einen Gasbrenner beheizt.

Band 2-4 wurde mit 90°C und Band 5-7 mit 80°C durch je zwei Gasbrenner beheizt. Die Trocknungszeit für glatte Petersilie lag bei 120 min und konnte durch die Bandgeschwindigkeit eingestellt werden. Nach Band 7 verlässt das Produkt den Trockner, dort ist der zweite NIR Sensor zur Messung der Endfeuchte, in einem Abstand von 290 mm, installiert.

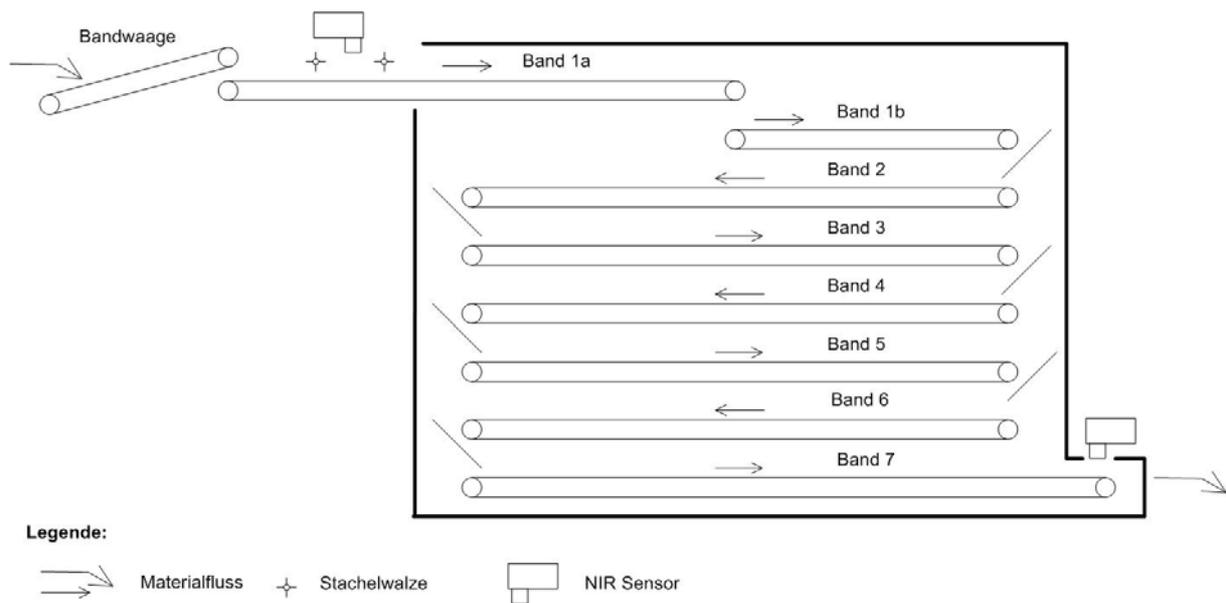


Abb. 4-2: Längsschnitt des Siebenbandtrockners mit installierten NIR Sensoren

### 1.4.3.3. NIR Messinstrumente

#### 1.4.3.3.1 Thermo Electron NIR-Sensor

Die zwei NIR-Sensoren am 5-Bandtrocker sind vom Typ Thermo Electron Spectra-Quad 5400 (Waltham, USA). Das System besteht aus einem Sensorkopf und einer Datenbox mit eingebautem Display sowie Dateneingabemodul.

Nach der Kalibration wurden die zwei Sensoren installiert, einer am Eingang des Vortrockners und der andere am Ausgang des Bandtrockners, jeweils zur Messung der Feuchte und des ätherischen Ölgehaltes. Der optimale Abstand zwischen Sensor und Produkt soll 100–360 mm betragen. Um die Schwankung des Abstandes zwischen Sensor und Produkt zu minimieren, wurde der Sensor direkt nach den beiden Stachelwalzen installiert.

Die verwendeten NIR Sensoren basieren auf dem sogenannten “Quadra-Beam“ Prinzip um die Stabilität der Messung zu erhöhen. Dies beinhaltet, dass es neben Mess- und Referenzstrahl zwei weitere Strahlen gibt, die aus derselben Lichtquelle stammen und dieselben Filter bzw. Wellenlängen haben wie der Mess- und Referenzstrahl. Sie werden auf denselben Detektor projiziert, bleiben aber intern und werden nicht auf die Probe geleitet (Thermo, 2004).

Im Sensor befindet sich eine Quartz-Halogenlampe, die NIR Licht emittiert, das ein rotierendes Filterrad passiert. Dieses enthält fünf Filter, die für die Messung von Feuchte und ätherischem Ölgehalt ausgewählt wurden. Für ätherische Öle gibt es zwei Filter. Die Messwellenlänge ist 2300 nm und wird von den ätherischen Ölen der Probe absorbiert. Die Referenzfilter haben eine Wellenlänge von 2200 nm bzw. 2180 nm. Zur Messung des Feuchtegehaltes werden drei Filter verwendet. Am Trocknereingang ist die Messwellenlänge 1440 nm mit Referenzwellenlängen bei 1230 nm und 1600 nm. Am Trocknerausgang wird bei 1945 nm gemessen, als Referenzwellenlängen dienen hier 1720 nm und 1820 nm.

Die NIR Strahlung wird auf das Filterrad projiziert, welches bei 20 Hz rotiert. Nach dem Filter wird die NIR Strahlung durch Spiegel auf die Probe konzentriert. Das vom Produkt reflektierte Licht gelangt zurück in den Sensor und wird mittels eines konvexen Spiegels auf den Bleisulfiddetektor fokussiert. Dieser konvertiert die Intensität jedes Lichtimpulses in ein elektrisches Signal, welches von einem analog-digital Konverter digitalisiert wird. Ein Mikroprozessor berechnet aus dem Signal über die Kalibration Werte für die Feuchte in Prozent bezogen auf die Frischmasse und den Gehalt an ätherischen Ölen in ml pro 100 g Probe.

Die verwendeten Sensoren wurden mit einem Luftspülsatz für die Linsen ausgerüstet. Der Sensor am Trocknerausgang hat zusätzlich eine Luftkühlung für Temperaturen bis 70°C.

#### 1.4.3.3.1.1. Kalibrationsmethode

Für eine genaue Kalibration, die repräsentativ für die Bedingungen während des Trocknens ist, wurden Proben im laufenden Prozess und an verschiedenen Stellen genommen, um die ganze Schwankungsbreite der Feuchte und des ätherischen Ölgehaltes abzudecken. Diese Methode wurde auch bei einer anderen Studie mit breitem Feuchtebereich verwendet (Heindl & Heindl, 1998).

Zur Kalibration des Sensors am Trocknereingang wurden 15 Proben von verschiedenen Positionen am Vortrockner und am ersten Band im Feuchtebereich von 50-90% w.b. entnommen. Am Trocknerausgang mit ebenfalls 15 Proben im Feuchtebereich von 5-25% w.b. kalibriert. Der Bereich für die Kalibration des Gehaltes an ätherischen Ölen war 0-0,4 ml pro 100g Probe. Wegen des geringen Ölgehaltes von Petersilie wurden für die beiden NIR Sensoren nur eine gemeinsame Kalibration erstellt.

Nach der Probenahme wurde jede Probe in eine Box gefüllt und gemischt. Zehn NIR Messungen wurden von jeder Probe durchgeführt. Um den Online Betrieb bei der Kalibration zu simulieren war der Abstand zwischen Probe und Sensor 180 mm. Danach wurde die Probe tiefgefroren und im Labor auf Feuchtegehalt und ätherische Öle untersucht.

#### 1.4.3.3.2 Mesa NIR Sensor

Der NIR Messkopf vom Typ Mesa MM 55 plus (Mesa GmbH, Geretsried) muss im Abstand von 150-300 mm von der Produktoberfläche angebracht sein. Hierbei beträgt der Durchmesser der Messfläche auf dem Produkt 38 mm. Der Messkopf enthält ebenfalls eine Quartz-Halogenlampe, ein rotierende Filterrad mit fünf Wellenlängen und zwei Bleisulfiddetektoren. Das Messprinzip ist mit dem des Thermo Electron Sensors ähnlich.

Die Wellenlängen für die Messung betragen 1940 nm im Niederfeuchtebereich und 1450 nm im Hochfeuchtebereich. Die Referenzwellenlängen waren vom Hersteller nicht spezifiziert. Der verwendete Sensor war nicht mit einer permanenten Luftreinigung der Linse ausgerüstet. Die maximale Betriebstemperatur lag bei 50°C. Das Messintervall lag bei fünf Sekunden während der Probenahme.

Durch einen Referenzstrahl der nicht von der Probe absorbiert wird, können Schwankungen durch Umgebungsbedingungen wie der Abstand zum Produkt oder Farbveränderungen der Probe eliminiert werden. Ein Korrekturstrahl folgt dem Messtrahl ohne den Sensor zu verlassen, um Abweichungen durch die Alterung der Lampe oder Temperaturveränderungen zu kompensieren (Jenson et al., 2007).

##### 1.4.3.3.2.1 Kalibrationsmethode

Zur Entnahme von Proben für die NIR-Messung der Frischware am ersten Band wurde der Trockner angehalten, weil die Proben zwischen zwei Stachelwalzen entnommen werden mussten. Direkt nachdem der Sensor den Wert für die Probe unterhalb des Messkopfes erfasst hatte, wurde die Probe, an der Stelle des Messfläche entnommen. Zur Kalibration der Sensoren wurden je zehn Proben analysiert. Am ersten Band wurde alle 30 min eine Probe gezogen. Die Probenmenge für den Halogentrockner waren drei bis vier Gramm, die für den Trockenschrank 70 g. Die Proben zum Vergleich von Trockenschrank und Halogentrockner wurden zur Analyse im Labor tiefgefroren.

Wegen der benötigten Probenmenge konnte die Messfläche der Sensoren nicht die ganze Probe erfassen, jedoch wurde die Sensorposition so gewählt, dass eine möglichst homogene Feuchteverteilung im Produkt vorlag.

Am Sensor am Ende des siebten Bandes konnten die Proben während des laufenden Betriebes gezogen werden. Der Sensor war in der Bandmitte angebracht. Wenn die Probe entnommen wurde, wurde der NIR-Wert notiert. Vereinfacht wurde dies durch eine „Stop“ Funktionstaste an der NIR-Datenbox. Von der Trockenware wurde im Intervall von 15 min eine Probe entnommen werden. Kürzere Zeitabstände waren nicht möglich, da die Feuchtebestimmung im Halogentrockner ca. 10 min benötigte. Proben wurden nur an den zwei NIR-Sensorpositionen genommen, so dass der Kalibrationsbereich sehr eng war.

#### 1.4.3.4 Referenzmethoden für die Feuchtegehaltsbestimmung

##### 1.4.3.4.1 Trockenschrankmethode

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes wurde die thermo-gravimetrische Bestimmung mittels Trockenschrank durchgeführt. Für eine dreifache Bestimmung wurde eine Probe auf drei Schalen aufgeteilt. Eingewogen wurden die Proben mit einer Präzisionswaage (Sartorius Extend ED 2245, Göttingen), mit einer Messgenauigkeit von 0,1 mg. Nach Bestimmung der Gesamtmasse ( $m_W + m_{DM}$ ) wurden die Proben 18h bei  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  im Trockenschrank getrocknet, bis ein konstantes Gewicht erreicht war. Zur Abkühlung wurden die Proben in den Exsikkator gegeben und anschließend durch Auswiegen die Trockenmasse  $m_{DM}$  bestimmt. Der Feuchtegehalt  $MC_{w.b.}$  bezogen auf die Frischmasse wurde wie folgt berechnet:

$$MC_{w.b.} = \frac{m_W}{m_W + m_{DM}} * 100 \quad (4-1)$$

##### 1.4.3.4.2. IR-Schnellfeuchtebestimmer

Als Referenzmethode am Siebenbandtrockner wurde ein IR-Schnellfeuchtebestimmer, Mettler Toledo Typ HB43-S (Greifensee, Switzerland), der ebenfalls nach dem thermo-gravimetrischen Prinzip arbeitet verwendet. Die Trocknungstemperatur waren  $105^\circ\text{C}$ . Nachdem die Probe von 3-4 g eingewogen

wurde, wurde die Probe durch Infrarotstrahlung bis zur Massenkonstanz getrocknet. Ähnlich dem Trockenschrank erfasst der IR-Schnellfeuchtebestimmer neben Wasser auch andere flüchtige Komponenten (Mettler Toledo Operating Instructions, 2010).

#### 1.4.3.5 Laboranalyse des ätherischen Ölgehaltes

Die Bestimmung des ätherischen Ölgehaltes wurde mittels Wasserdampfdestillation nach ISO 6571 durchgeführt. Die Einwaage für die Destillation war für luftgetrocknete Proben 25 g und für Frischware 100 g. Es wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Die Messung erfolgte volumetrisch und wurde in ml pro 100 g Probe angegeben. Im Gegensatz zur gebräuchlichen Angabe in ml/100 g Trockenmasse, erfolgt der Bezug auf die Probe da der NIR Sensor den Feuchtegehalt nicht intern verrechnet.

#### 1.4.3.6 Statistische Auswertung

Um eine Kalibrationsgrade für die NIR Messungen zu erstellen wurde lineare Korrelation und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  mit Origin 8 (Origin Lab, Northampton, USA) berechnet. Die Kombination von mittlerer Abweichung MD und Standardabweichung der Differenzen SDD zeigt wie genau die Messungen waren.

### 1.4.4 Ergebnisse und Diskussion

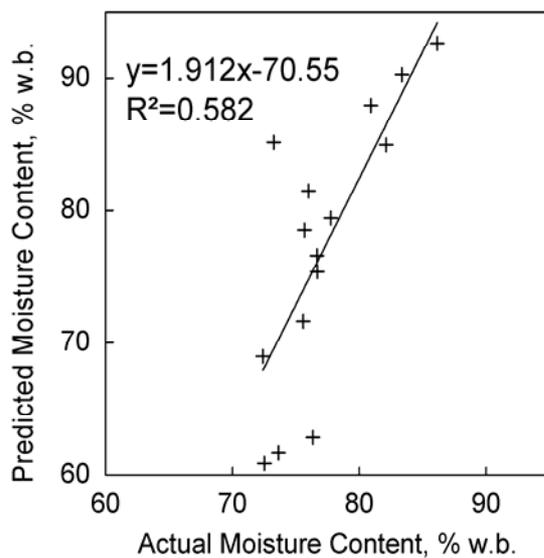
#### 1.4.4.1 Fünfbandtrockner

##### 1.4.4.1.1 Kalibration des Feuchtegehaltes für glatte Petersilie

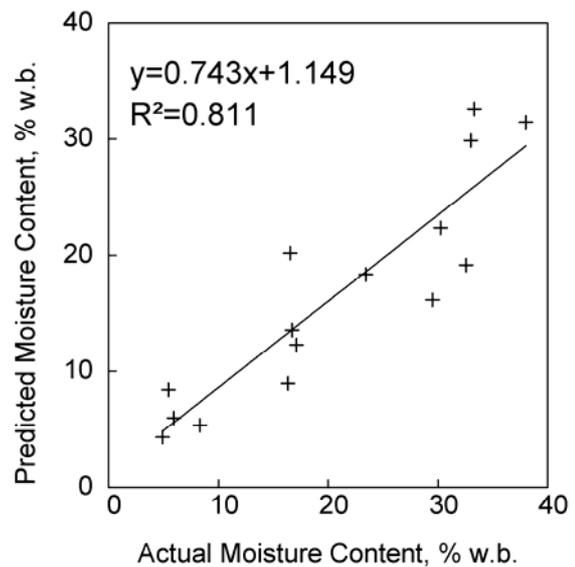
Für die Messung des Feuchtegehaltes von glatter Petersilie am Trocknereingang wurde eine niedrige Korrelation ( $R^2 = 0,582$ ) erreicht (Abb. 4-3a). Die mittlere Abweichung betrug 4,4% w.b. mit einer niedrigen SSD von 3,4. Dies könnte aus der Beschaffenheit der Frischware, welche nass und sandig war, resultieren. Die Oberflächenfeuchte würde die steile Steigung und eine hohe Empfindlichkeit des NIR-Sensors erklären. Dies belegt, dass der Sensor bei den Proben mit über 80% w.b. Feuchte nur die Oberflächenfeuchte gemessen hat und die NIR-Messwerte immer höher als die Laborwerte waren. Abweichende Werte zeigen sich auch bei den Proben mit niedrigerer Feuchte, die an Band 1 entnommen wurden und an denen die Oberflächenfeuchte bereits verdunstet war. Dies kann auf die Sandpartikel

zurückgeführt werden, die im Trockenschrank als Trockensubstanz erkannt werden und höhere Referenzwerte als die NIR-Messung ergeben. Dies zeigt die Limitierung die gerade bei den Sensoren für die Frischware besteht.

Die Genauigkeit der Kalibration des Sensors für die Trockenware war besser. Die Steigung in Abb. 4-3b war u.a. aufgrund der Sandpartikel kleiner als eins, das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,811. Die mittlere Abweichung lag bei 4.2%, jedoch mit einem SDD von 11.1.



a)



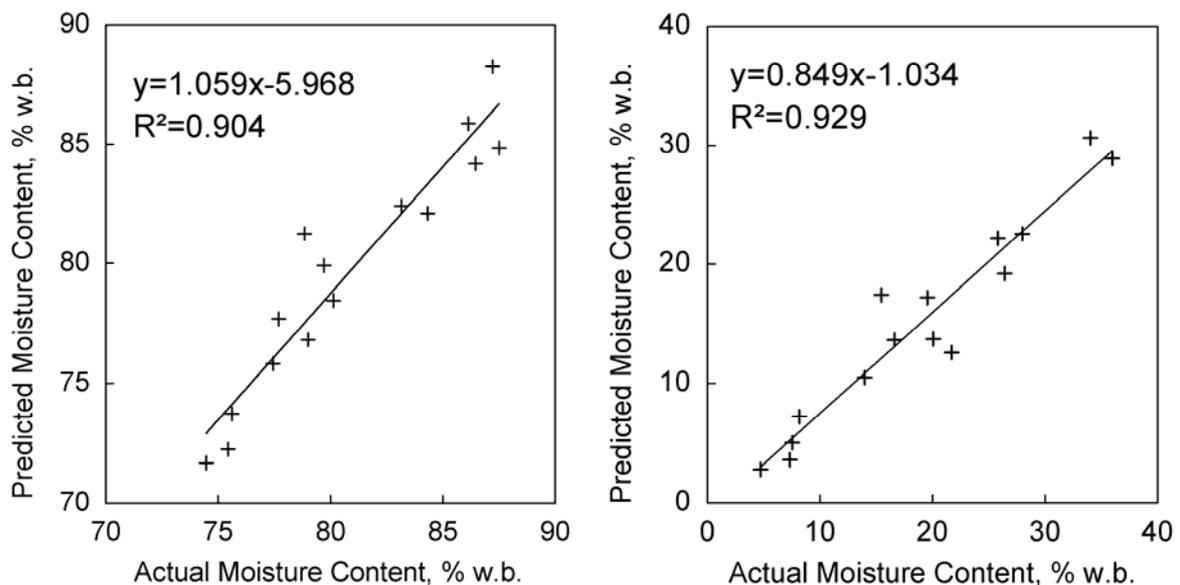
b)

Abb. 4-3: Kalibration des Feuchtegehaltes von glatter Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b)

Ein weiteres Problem ist der hohe Stengelanteil in den Proben. Stengel zeigen ein anderes Trocknungsverhalten als Blätter und trocknen langsamer. Daraus können hohe Schwankungen bei den einzelnen NIR Messungen resultieren. Die Schnitthöhe bei der Ernte kann variieren und damit auch das Verhältnis von Stengeln zu Blättern. Der NIR-Sensor erfasst jeweils einen kleinen Bereich der Probe zur Feuchtemessung. Je inhomogener eine Probe ist umso höher muss die Anzahl der Messungen sein. Eine mögliche Lösung wäre den Anteil an Stengeln in der Probe zu reduzieren und eine gleichmäßigere Blattschüttung zu haben. Dies könnte durch eine bessere Trennung im Windsichter erreicht werden. Auf der anderen Seite führen weniger Stengel zu einer anderen Struktur, Dichte und Luftwiderstand der Schüttung mit einer möglicherweise schlechteren Durchströmung.

#### 1.4.4.1.2 Kalibration des Feuchtegehaltes für krause Petersilie

Gute Ergebnisse wurden für die Kalibration von krauser Petersilie erreicht (Abb. 4-4), dabei waren normale Verhältnisse der Rohware, ohne hohen Sandgehalt bzw. Oberflächenfeuchte, gegeben. Der Sensor für die Rohware zeigte niedrige Werte für die mittlere Abweichung (MD=1,2% w.b.) und einem SSD von 4,4. Der Sensor für die Trockenware hatte ein noch höheres Bestimmtheitsmaß von 0,929 mit einer mittleren Abweichung von 3,9% w.b. und einem SSD von 9,4.



a)

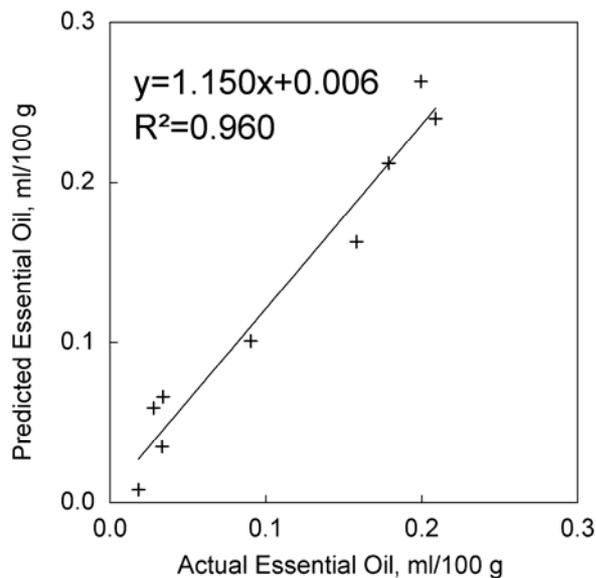
b)

Abb. 4-4: Kalibration des Feuchtegehaltes von krauser Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b)

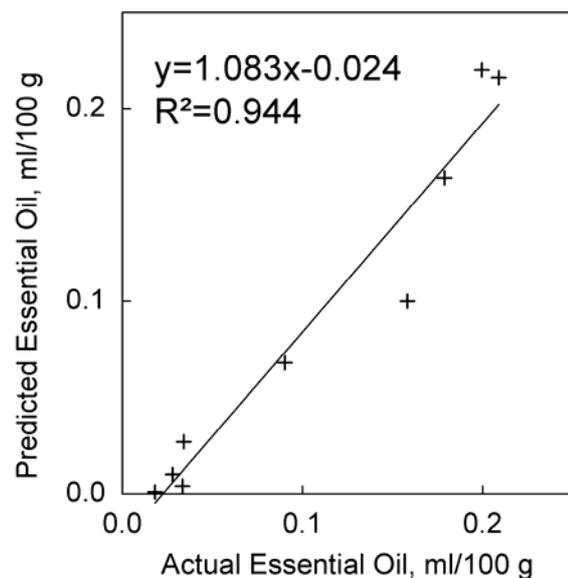
Einen wesentlichen Anteil an der Genauigkeit der NIR-Kalibration hat die Probenahme. Es zeigte sich, dass bei Proben zwischen 35 bis 70% w.b. eine gute Relation zwischen den NIR-Werten und der Referenzmessung im Trockenschrank nicht hergestellt werden konnte. Dies lag an der inhomogenen Feuchteverteilung in diesem Feuchtebereich. Die Oberfläche der Schüttung war trocken, wobei im Kern noch Feuchtigkeit vorhanden war, die nur bei der Trockenschrankmethode, nicht aber mit dem NIR-Sensor, erfasst wurde. Dies ließ sich gerade bei hohen Schütthöhen am Ende des ersten Bandes beobachten.

#### 1.4.4.1.3 Kalibration des ätherischen Ölgehaltes für glatte und krause Petersilie

Ein gutes Bestimmtheitsmaß von 0,938 bis 0,960 konnte bei der Kalibration des ätherischen Ölgehaltes für glatte und krause Petersilie erzielt werden (Abb. 4-5 & 4-6). Es wurde festgestellt, dass die mittlere Abweichung zwischen 10-30% variiert, der Grund lag an der Wasserdampfdestillation als Referenzmethode. Nachdem jeweils die Sensoren am Trocknereingang und –ausgang mit derselben Wellenlänge messen und mit den gleichen Proben kalibriert wurden, waren die Ergebnisse sehr ähnlich.

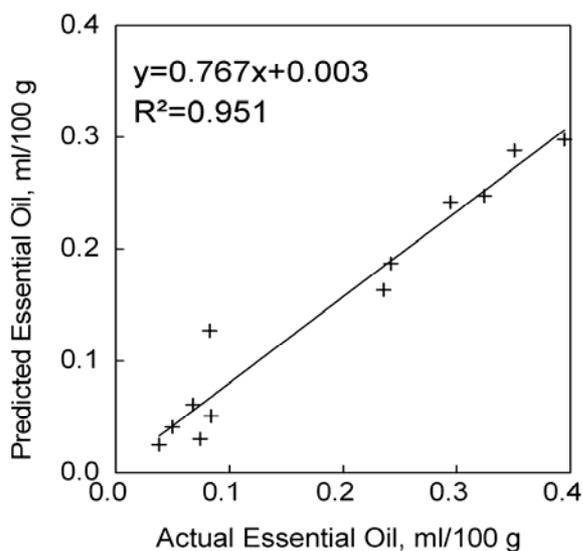


a)

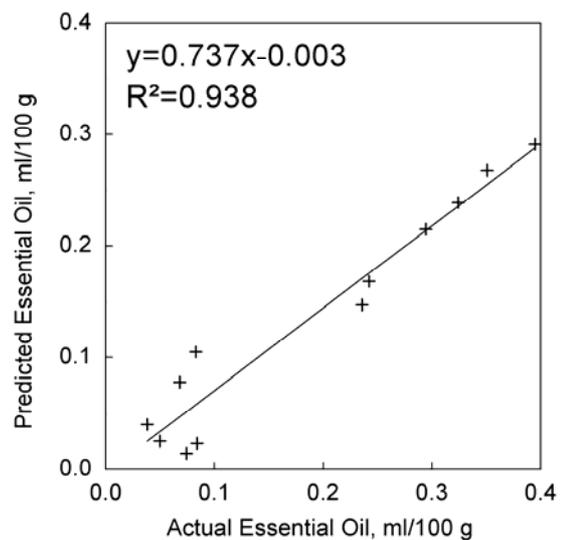


b)

Abb 4-5: Kalibration des ätherischen Ölgehaltes von glatter Petersilie für den Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b)



a)



b)

Abb. 4-6: Kalibration des ätherischen Ölgehaltes von krauser Petersilie für den Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b)

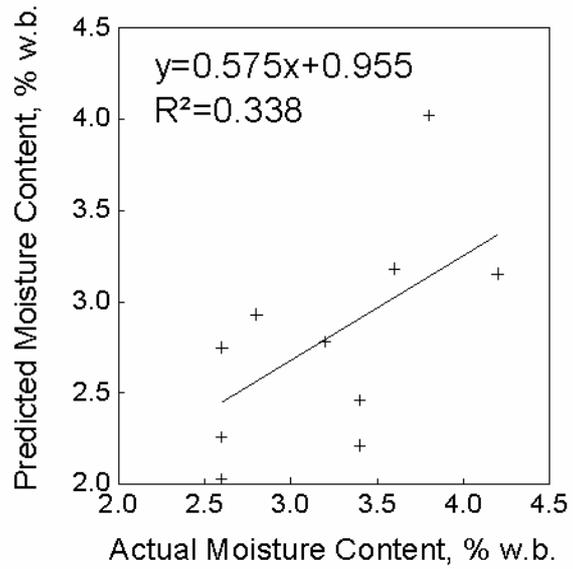
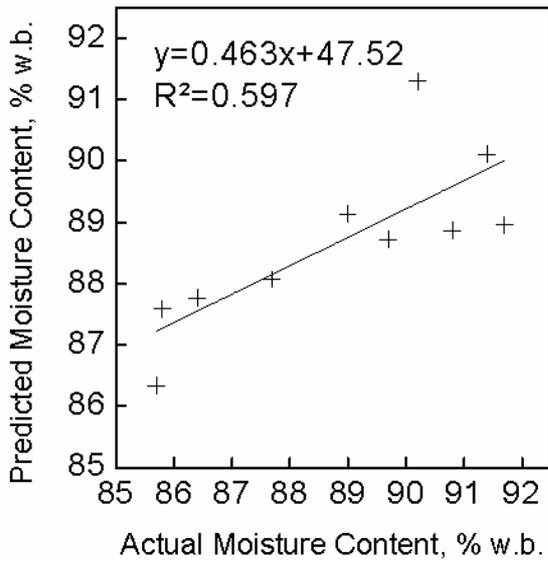
Das Problem bei der Messung von ätherischen Ölen ist, dass diese eine Mischung aus sehr vielen Einzelkomponenten sind. Die Konzentration der Komponenten schwankt je nach Entwicklungsstadium der Pflanze und den Trocknungsbedingungen. Nachdem jede Komponente bei unterschiedlichen Wellenlängen absorbiert wird, ist es unwahrscheinlich bei der Messwellenlänge von 2300 nm alle ätherischen Öle zu erfassen.

#### 1.4.4.2 Siebenbandtrockner

##### 1.4.4.2.1 Kalibration des Feuchtegehaltes für glatte Petersilie

Der Kalibration für die Feuchte wurde in einem sehr engen Bereich von 85-92% w.b. bzw. 2,5-4,5% w.b. durchgeführt. Dies lag an der Methode, bei der nur dort Proben entnommen wurden, wo der Sensor montiert war, allerdings zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Kalibrationskurve ist in Abb. 4-7 dargestellt. Das Resultat war ein jeweils sehr niedriges Bestimmtheitsmaß, wobei die Geradengleichung für die Frischware ein schlechteres Ergebnis erzielte.

Die Steigung war für beide Kalibrationen unter eins, somit war der NIR-Wert im Durchschnitt niedriger als der Referenzwert. Weiterhin wurden nur zehn Proben gemessen, dadurch wurde insgesamt ein niedrigeres Bestimmtheitsmaß als beim Fünfbandtrockner mit 15 Messungen erreicht.



a)

b)

Abb. 4-7: Kalibration des Feuchtegehaltes von glatter Petersilie für den NIR-Sensor am Trocknereingang (a) und Trocknerausgang (b)

Die Kalibration ergab einen sehr engen Bereich für die Frischware 6% w.b. (85-92% w.b.) und für die Trockenware 2% w.b. (2,5-4,5% w.b.). Für diesen speziellen Fall kann sich bei einer Abweichung der Referenzmessung sehr schnell ein Fehler verstärken. Der Vergleich der Feuchtemessung mit den beiden Referenzmethoden ist in Tab. 4-1 dargestellt, die mittlere Abweichung lag bei 1,17% w.b., wobei die höchste Abweichung bei 3.80% w.b. lag. Dies ist für einen so engen Kalibrationsbereich zu hoch. Allgemein kann gesagt werden, dass eine Kalibration nur so genau sein kann wie die Referenzmethode. Eine Dreifachbestimmung mit einer größeren Probemenge ist bei inhomogenen Probe vorteilhaft, da über die Standardabweichung auch viel zur Methode ausgesagt werden kann. Der Trockenschrank ist daher gegenüber dem Halogentrockner als Referenzmethode zu bevorzugen.

Tab. 4-1: Vergleich zwischen Trockenschrank und Halogentrockner zur Feuchtebestimmung für frische, glatte Petersilie

Feuchtegehalt (Trockenschrank) ± Standardabweichung, % w.b.	Feuchtegehalt (Halogentrockner), % w.b.	Absolute Abweichung, % w.b.
85,65 ± 0,27	85,08	0,48
85,85 ± 0,49	83,63	2,22
86,41 ± 0,50	86,24	0,17
88,56 ± 0,97	87,94	0,62
88,62 ± 0,41	88,75	0,13
89,11 ± 0,21	88,41	0,70
88,97 ± 0,08	87,98	0,99
89,26 ± 0,32	88,10	1,16
88,97 ± 0,21	85,17	3,80
88,83 ± 0,51	87,90	0,93
89,19 ± 0,18	87,56	1,63
	Mittlere Abweichung, % w.b.	1,17

#### 1.4.4.3 Anwendung der NIR-Sensoren zur Kontrolle des Trocknungsprozesses

In Abb. 4-8 ist die Wasserverdampfung in Abhängigkeit von verschiedenen Aufgabemengen und Anfangsfeuchten dargestellt. Die Zielfeuchte ist dabei immer 6,7% w.b.. Wenn der Trockner in einem stationären Zustand ist, hat er eine bestimmte Wasserverdampfung. Falls die Eingangsfeuchte sich während der Trocknung ändert und der Trockner dieselben Einstellungen für Trocknungstemperatur, Bandgeschwindigkeit und Luftvolumenstrom behält, kann dies durch die Anpassung des Eingangsmassenstromes kompensiert werden. Eine Voraussetzung dafür ist eine Bandwaage am Trocknereingang, um den Massenstrom zu erfassen (siehe Abb. 4-2). Weiterhin müssen die Temperaturen und Bandgeschwindigkeiten erfasst werden. Dieses System könnte auf Schwankungen der Eingangsfeuchte reagieren, wenn sich z.B. die Erntebedingungen je nach Tageszeit ändern. Weiterhin kann der Betreiber damit erfassen, ob die Endfeuchte innerhalb der Vorgaben liegt.

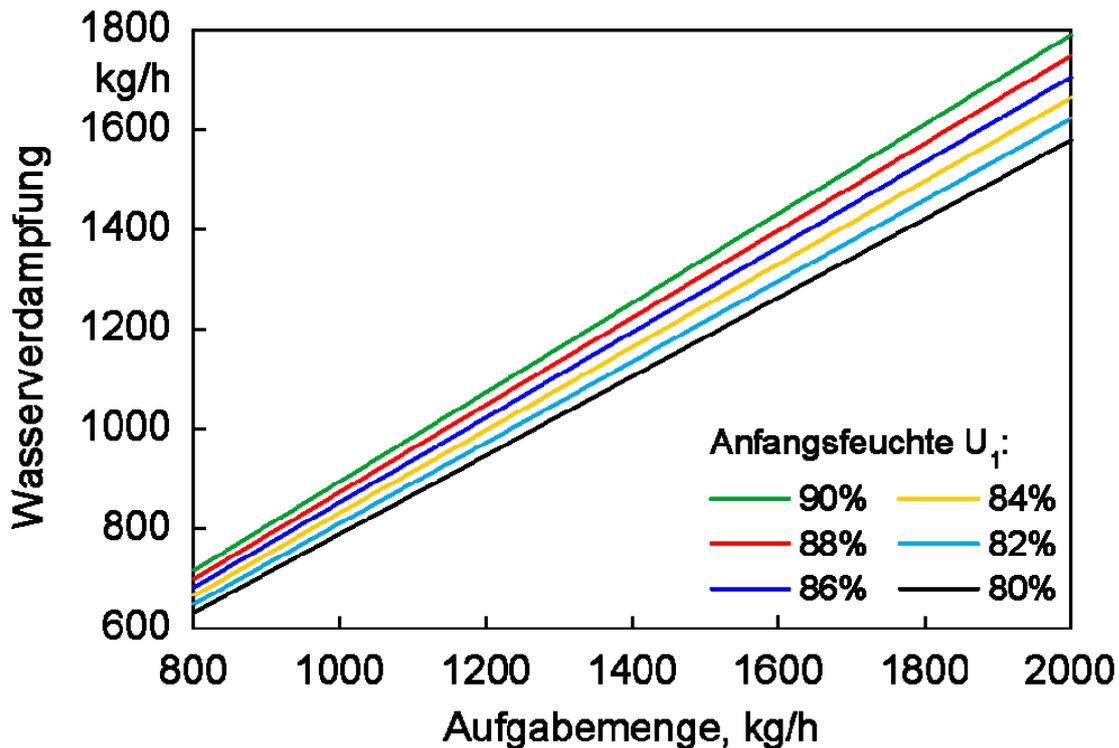


Abb. 4-8: Wasserverdampfung in Abhängigkeit von Aufgabemenge und Anfangsfeuchte

#### 1.4.5 Zusammenfassung

Die Kalibration des Feuchtegehaltes für krause Petersilie mit dem Trockenschrank als Referenzmethode erzielte gute Ergebnisse. Die Kalibration für glatte Petersilie war problematisch, da die Produktbeschaffenheit, mit Sandpartikeln und Oberflächenfeuchte die Genauigkeit beeinflusste. Im Allgemeinen erzielte der Sensor am Trocknereingang schlechtere Ergebnisse als der am Trocknerausgang. Die Kalibration für die ätherischen Öle lieferte gute Ergebnisse. Der Vergleich der Referenzmethoden zeigte, der Trockenschrank gegenüber dem Halogentrockner zu bevorzugen ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch eine repräsentative Auswahl von Proben unter Berücksichtigung der Variationen wie Oberflächenfeuchte, Stengelanteil und Kontaminationen eine genaue Kalibration für die Produktfeuchte und den ätherischen Ölgehalt möglich ist.

Als weiteren Forschungsbedarf wäre die Entwicklung und Validierung eines Steuerungssystemes mit dem Ziel der Energieeinsparung, der Qualitätsverbesserung sowie des Prozessmonitorings zu nennen.

#### 1.4.6 Literatur

- Büning-Pfaue H** (2003) Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 82 (1), 107-115
- Cozzolino D** (2009) Near Infrared Spectroscopy in Natural Products Analysis. *Planta Medica*, 75 (7), 746-756
- Davies A M C & Grant A** (1987) Review: Near infra-red analysis of food. *International Journal of Food Science and Technology*, 22, 191-207
- Heindl A & Heindl T** (1998) Application of Continuous Moisture Measurement in Multi-pass Band dryers. *Journal of Medicinal and Spice Plants*, 3, 146-154
- Isaksson T, Nilsen B N, Togersen G, Hammond R P, Hildrum K I** (1996) On-line, proximate analysis of ground beef directly at a meat grinder outlet. *Meat Science*, 43 (3-4), 245-253.
- Isengard H D** (2001) Water content, one of the most important properties of food. *Food Control*, 12 (7), 395-400.
- Isengard H D, Merkh G, Schreib K, Labitzke I, Dubois C** (2010) The influence of the reference method on the results of the secondary method via calibration. *Food Chemistry*, 122 (2), 429-435.
- International Organization for Standardization** (1984) ISO 6571 Spices, condiments and herbs – Determination of volatile oil content. 1. ed., Geneva, Switzerland
- Jensen P D, Hartmann H, Böhm T, Temmerman M, Rabier F, Morsing M** (2006) Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass and Bioenergy*, 30 (11), 935-943.
- Kemney G J** (2001) Process Analysis. In: Burns D A; Ciurczak E W (ed) *Handbook of Near-Infrared Analysis*, pp 729-782. Marcel Dekker, New York, USA
- Lück W** (1964) *Die Feuchtigkeit – Grundlagen, Messen, Regeln*, pp 141-187. Oldenbourg, München, Germany
- McFarlane I** (1995) *Automatic control of food manufacturing processes*, pp 1-21. Blackie Academic and Professional, Glasgow, UK
- Mettler Toledo** (2009) *Operating Instructions Moisture Analyzer HB43-S*. Mettler Toledo AG, Greifensee, Switzerland
- Temple S J & Van Boxtel A J B** (2000) Control of fluid bed tea dryers: Controller design and tuning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26 (2), 159-170.

- Teuscher E** (2003) *Gewürzdrogen: Ein Handbuch der Gewürze, Gewürzkräuter, Gewürzmischungen und ihrer ätherischen Öle*, pp 275-280. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Germany
- Thermo Electron** (2004) *Spectra-Quad 5400 User's Guide*, Waltham, USA
- Togersen G, Arnesen J F, Nilsen B N, Hildrum K I** (2003) On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy. *Meat Science*, 63 (4), 515-523.
- Raghavan S** (2007) *Handbook of Spices, Seasonings and Flavorings*. pp 150-151. CRC press, Boca Raton, USA
- Schulz H, Quilitzsch R, Krüger H** (2003) Rapid evaluation and quantitative analysis of thyme, oregano and chamomile essential oils by ATR-IR and NIR spectroscopy. *Journal of Molecular Structure* 661-662 (1-3), 299-306.
- Schweiggert U, Carle R, Schieber A** (2007) Conventional and alternative processes for spice production - a review. *Trends in Food Science & Technology* 18 (5), 260-268.
- Scotter C** (1990) Use of near infrared spectroscopy in the food industry with particular reference to its applications to on/in-line food processes. *Food Control*, 1 (3), 142-149.
- Shenk J S, Workman J J, Westerhaus M O** (2001) Application of NIR Spectroscopy to Agricultural Products. In: Burns D A; Ciurczak E W (ed) *Handbook of Near-Infrared Analysis*, pp 419-474. Marcel Dekker, New York, USA
- Shiroma C, Rodriguez-Saona L** (2009) Application of NIR, MIR spectroscopy in quality control of potato chips, *Journal of Food Composition and Analysis*, 2(6), 596-605.
- Soysal Y, Oztekin S, Eren O** (2006) Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering* 93(4): 403–413.

## 2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse ist durch die Kooperation und Anwendung in landwirtschaftlichen Betrieben, weiterverarbeitenden Industriebetrieben und Anlagenbauern abhängig. Die Ergebnisse zur Nutzung von BHKW-Abwärme hat voraussichtlich einen hohen Nutzen in der Praxis, da immer mehr dezentrale Kraftwerke entstehen, mit deren Abwärmenutzung ein hoher Gesamtwirkungsgrad, gerade auch in Sommermonaten erzielt werden kann. Dies ist nicht beschränkt auf Biogasanlagen sondern ebenso für Hackschnitzelfeuerungen, Gas-BHKWs oder andere dezentrale Kraft-Wärmekopplungen denkbar. Die Integration der zusätzlichen Wärmequelle konnte exemplarisch an einem Vortrockner, zur Durchsatzsteigerung und effizienten Energieeinbringung mit homogener Luftverteilung gezeigt werden.

Die Ergebnisse der CFD-Strömungssimulation können in Form der entwickelten Dächergeometrie für jeden Bandtrockner mit dieser Luftführung angepasst werden. Weiterhin konnte die CFD-Simulation als Methode validiert werden, die sich als Tool für Optimierungen sehr gut eignet. Eine Etablierung in der industriellen und wissenschaftlichen Praxis ist daher gut vorstellbar. Generell ist das Energiemonitoring in landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen noch ausbaufähig. Die hier verwendete Messtechnik sollte von Betreiber verwendet werden um Einblick in den Prozess zu bekommen und eigenständig Optimierungsmaßnahmen durchzuführen. Die Online-Feuchtemessung und damit verbundene Regelungstechnik bietet viel Potential, setzt aber einen großen zeitlichen Aufwand für die Kalibration und ein hohes Investment in die Sensoren voraus, so dass dies nur für große Anlagen mit hoher Auslastung zu empfehlen ist.

## 3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der Bandtrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen sind von anderen Stellen keine Ergebnisse bekannt.

#### 4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

##### Referierte Veröffentlichungen:

Böhner, M., I. Barfuss, A. Heindl, J. Müller, Gleichmäßigkeit und Energieverbrauch der Bandtrocknung von Petersilie (*Petroselinum crispum*) [Uniformity and energy consumption of a band drying process of parsley (*Petroselinum crispum*)]. Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen, 9/2009. 14(3): p. 126-131

##### Geplant Veröffentlichungen 2011:

Böhner, M., I. Barfuss, A. Heindl, J. Müller: Optimisation of the airflow in a multi-belt conveyor dryer for spice plants by CFD; International Journal of Food Science & Technology

Böhner M., G. Romano, P. Rose, A. Heindl, J. Müller, On-line prediction of moisture content and essential oil of parsley bulk with near infrared spectroscopy during belt drying, Food and Bioprocess Technology

Böhner, M., A. Heindl, J. Müller: Reduktion des fossilen Energieverbrauchs der Bandtrocknung durch die Abwärmenutzung eines Biogasblockheizkraftwerkes, Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen

##### Patente/ Gebrauchsmuster:

Böhner M; Barfuss I; Heindl A; Müller J; Graf H; Wieninger M: Luftleitvorrichtung zur Verbesserung der Luftverteilung über der Bandbreite im Inneren von Bandtrocknern; Nr. DE 20 2009 010 412.52010; Deutsches Patent und Markenamt, 2010, München

##### Übrige Publikationen:

Böhner, M., I. Barfuss, A. Heindl, J. Müller, Optimierung der Luftführung eines Bandtrockners mittels Strömungssimulation (Optimisation of the air supply of a multibelt conveyor dryer by fluid flow simulation), in Landtechnik. 7/2009. p. 175-177

## Vorträge/ Tagungsberichte:

Müller, J., M. Böhner, A. Heindl. Perspektiven der Trocknung unter dem Druck steigender Energiepreise. in Tagungsband des Workshop: Arznei-, Kosmetik- und Gewürzpflanzen - Lohnt sich der Anbau in Baden-Württemberg? 10/2008. Stuttgart: Landwirtschaftliches Technologiezentrum, Karlsruhe

Böhner, M., I. Barfuss, A. Heindl, J. Müller, Optimierung von Bandtrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen in Bezug auf Energieeinsatz und Produktqualität. in Tagungsband 19. Bernburger Winterseminar zu Fragen der Arznei- und Gewürzpflanzenproduktion. 2/2009. Bernburg: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau Sachsen-Anhalt.

Barfuss, I., M. Böhner, A. Heindl, J. Müller, Modellierung und Optimierung der Luftführung eines Fünfbandtrockners mittels CFD-Strömungssimulation. in Tagungsband 19. Bernburger Winterseminar zu Fragen der Arznei- und Gewürzpflanzenproduktion. 2/2009. Bernburg: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau Sachsen-Anhalt.

Romano, G., M. Böhner, P. Rose, A. Heindl, J. Müller, Monitoring of the moisture content during dehydration of parsley with near infrared spectroscopy. in Proceedings of the 5th CIGR Section VI International Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management. 9/2009. Potsdam

Böhner, M., P. Senckenberg, A. Heindl, J. Müller: Reducing fossile energy consumption of a belt dryer by using biogas waste heat, XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), 6/2010, Quebec, Canada

Böhner, M., J. Müller: Trocknung von Gewürzkräutern - State of the Art. In Tagungsband: Gesellschaft deutscher Lebensmitteltechnologien - Technologie der Kräuter und Gewürze III, 6/2010, Potsdam-Nuthetal

Böhner, M., J. Müller: Optimierung von Trocknungsverfahren - Aktueller Stand und Perspektiven; BMELV-Tagung „Arzneipflanzen 2010“, 10/2010, Neustadt a.d. Weinstraße

Geplant (Vortrag angenommen):

Böhner, M., I. Barfuss, A. Heindl, J. Müller: Optimierung der Bandtrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen hinsichtlich Energieeinsatz, Wirtschaftlichkeit und Produktqualität; 6. Fachtagung Arznei- und Gewürzpflanzen, Deutscher Fachausschuß für Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen, 9/2011, Berlin