

# Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Bornimer Agrartechnische Berichte**

Heft 94

Potsdam 2017

## **Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen**

---

Bornimer Agrartechnische Berichte  
Heft 94

Potsdam-Bornim 2017

## Herausgeber

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB)  
*Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB)*  
Max-Eyth-Allee 100  
D-14469 Potsdam

Telefon: 0331 5699 0  
Fax: 0331 5699 849  
e-Mail: [atb@atb-potsdam.de](mailto:atb@atb-potsdam.de)  
Internet: [www.atb-potsdam.de](http://www.atb-potsdam.de)

Juli 2017

## Kontakt

Dr.-Ing. Thomas Ziegler  
[tziegler@atb-potsdam.de](mailto:tziegler@atb-potsdam.de)  
[www.atb-potsdam.de/drying](http://www.atb-potsdam.de/drying)

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) mit Förderung durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg (MWFK).

Für den Inhalt zeichnet der Autor verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) möglich.

## Quellenangabe:

Ziegler, T. (2017). Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen. Schlussbericht zum BMEL/FNR-Demonstrationsprojekt Arzneipflanzen (KAMEL), Förderkennzeichen: 22015612. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 94, ISSN 0947-7314. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB).

ISSN 0947-7314

## Erstellung eines Leitfadens für die Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen

Schlussbericht  
zum Demonstrationsprojekt Arzneipflanzen (KAMEL)

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Agrartechnik  
und Bioökonomie e.V. (ATB), Potsdam  
Kooperationspartner: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (APL), Ranis

Förderkennzeichen: 22015612 bzw. 12NR156  
Projektlaufzeit: 01.03.2016 – 30.04.2017

Autor: Thomas Ziegler

Mitarbeit: Gunnar Jungmichel  
Louise Hauke  
Birgit Dick  
Hasan Jubaer  
Angelique Leifer  
Marcus Raupach

Potsdam-Bornim, 29. Juni 2017



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Vorwort

Arznei- und Gewürzpflanzen besitzen ein hohes Wertschöpfungspotenzial. Allein von den 15 wichtigsten in Deutschland nachgefragten Pflanzenarten wurden 2011 jedoch rund 87 % importiert. Einer Anbaufläche von ca. 12.000 ha steht ein theoretischer Flächenbedarf von mindestens 20.000 ha gegenüber (Schmitz & Pforte, 2014). Neue landwirtschaftliche Unternehmen müssen für den Anbau gewonnen werden, um den Bedarf an Qualitätsware aus kontrollierter Produktion zu decken (FNR, 2014a).

Die Produktion von qualitativ hochwertigen Arzneipflanzen für die Bereiche Humanmedizin, Kosmetik, Health Food und Veterinärmedizin erfordert in allen Schritten der Verfahrenskette umfangreiches Fachwissen und Spezialkenntnisse. Dies gilt auch für die Trocknung. In der Praxis ist ein grundlegendes Verständnis trocknungstechnischer und energetischer Zusammenhänge unverzichtbar, um eine wirtschaftliche Reduzierung der hohen Energiekosten zu realisieren. Durch einen entsprechenden Wissenstransfer soll der Leitfaden dazu beitragen, dass mehr Landwirte sich für den Anbau von Arzneipflanzen entscheiden.

Trocknungsanlagen erfordern in jedem Einzelfall betriebsspezifische Lösungen, die den besonderen Produktionsbedingungen der Landwirtschaftsunternehmen individuell gerecht werden. Die fundamentalen Gesetze der Thermodynamik gelten allgemein und lassen sich unabhängig von der jeweiligen Trocknerbauart anwenden. Trocknungstechnische Berechnungsbeispiele und detaillierte produktspezifische Werte sollen die Planung von neuen und auch die Optimierung von bereits bestehenden Trocknungsanlagen erleichtern. Hierfür werden verschiedene regelungs- und anlagentechnische Möglichkeiten zur Steigerung der energetischen und wirtschaftlichen Effizienz beispielhaft aufgezeigt und erläutert.

Unser Dank gilt dem BMEL für die Finanzierung des Vorhabens und der FNR für die freundliche administrative Unterstützung. Gunnar Jungmichel, Louise Hauke und Birgit Dick von der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. danken wir für die kompetente und unkomplizierte Kooperation. Mein persönlicher Dank gilt insbesondere Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Maltry † für seine wegweisende Begleitung zu Beginn meiner wissenschaftlicher Arbeit und Hasan Jubaer für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren.

Potsdam-Bornim, im Juni 2017

Thomas Ziegler

Für die finanzielle Unterstützung des Leitfadens bedanken wir uns bei den folgenden Verbänden:

**ÖKOPLANT e.V.**



Ökoplant e.V.  
Förderverein ökologischer Heil- und  
Gewürzpflanzenanbau  
[www.oekoplant-ev.de](http://www.oekoplant-ev.de)

Thüringer Interessenverband für  
Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen e.V.  
[www.curativeplants.com](http://www.curativeplants.com)

Verein zur Förderung des Heil- und  
Gewürzpflanzenanbaus in Bayern e.V.  
[www.kraeuteranbau.de](http://www.kraeuteranbau.de)

## Kurzfassung

Ziel des Leitfadens ist die Vermittlung von grundlegenden Informationen über die Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen. Maximale Energieeffizienz ist entscheidend für die wirtschaftliche Effizienz von Trocknungsanlagen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Anlagenkonfigurationen ist eine individuelle Planung unerlässlich. Diese Leistungen kann ein Leitfaden keinesfalls ersetzen. Er soll es dem Leser jedoch erleichtern, die Planung und den Betrieb von Trocknungsanlagen mit kritischem Sachverstand mitzugestalten.

Die Erntezeiträume der einzelnen Pflanzenarten und die Ernteerträge pro Hektar variieren erheblich. Unterschiedliche Feuchtegehalte und Schüttdichten von Ganzpflanzen, Blüten- und Wurzeldrogen haben maßgeblichen Einfluss auf die erforderliche Entfeuchtungsleistung von Trocknern. Da die Trocknung das Nadelöhr der Produktion darstellt, besitzt eine maximale Auslastung von Trocknungsanlagen im Verlauf der Ernteperiode absolute Priorität.

Die Qualitätssicherung muss die gesamte Produktion umfassen. Die empfindlichen Pflanzen sind in allen Verfahrensschritten möglichst gutschonend zu behandeln. Ein unverzüglicher Beginn der Trocknung und das Einhalten der maximal zulässigen Trocknungstemperatur sind entscheidend für den Erhalt der wirksamen Inhaltsstoffe.

Die Betriebsweise von Trocknern und wechselnde Wetterbedingungen haben einen wesentlich größeren Einfluss auf den spezifischen thermischen Energiebedarf als das Trocknungsverhalten einzelner Pflanzenarten. Zuerst sollten deshalb die jeweiligen Trocknungsprozesse luftseitig und regelungstechnisch optimiert werden. Die Realisierung einer effizienten Energieversorgung ist dann der zweite Schritt.

Zu den Möglichkeiten der lufttechnischen Effizienzsteigerung zählt insbesondere die Trocknung mit Teilumluft. Wird der Umluftanteil optimal geregelt, so verlängert sich die gesamte Trocknungsdauer nur geringfügig. Andere effektive Maßnahmen bei der Chargentrocknung sind die Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern oder die Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche. Alle diese Maßnahmen ermöglichen Energieeinsparungen von mehr als 25 %.

Basierend auf Simulationsergebnissen zur Flächentrocknung von Kamilleblüten wurden verschiedene Varianten der Energieversorgung vergleichend analysiert. Der Einsatz solarer Prozesswärme erfordert die Mischung von zu heißer Luft aus Luftkollektoren mit Frischluft, da die maximale Trocknungstemperatur nicht überschritten werden darf. Bei ununterbrochener Trocknung über mehrere Tage und Nächte sind die durch Solarwärme erreichbaren Energieeinsparungen relativ klein. Die Kombination einer Wärmepumpe mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) und Teilumluft ergab hingegen Primärenergieeinsparungen von 73 %.

Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen, dass sich der geregelte Teilumluft-Betrieb in weniger als zwei Jahren amortisiert. Unter Berücksichtigung von Fördermitteln wurden für die untersuchten Varianten Nutzung von BHKW-Abwärme, Kombination Wärmepumpe und BHKW sowie Nutzung von Solarwärme Amortisationsdauern zwischen ca. sechs und zehn Jahren ermittelt. Aufgrund der Kostendegression des spezifischen Investitionsbedarfs sollten für größere Trocknungsanlagen auch kürzere Amortisationsdauern erreichbar sein.



## Executive Summary

The objective of the guide is to provide essential information about efficient drying of medicinal and spice plants. Achieving maximum energy efficiency is crucial for ensuring an acceptable economic efficiency. Due to the large number of possible plant configurations, individual planning is indispensable in each case. While a guide is unable to replace the required service for planning, it may enable the reader to follow and shape the planning and the operation of drying plants with adequate expertise.

The periods of harvest and the specific yield per hectare of each fresh produce vary considerably. Moreover, significant differences in moisture content and bulk density among whole plants, flower and root drugs affect the required dehumidification capacity of dryers considerably. As drying constitutes the bottleneck of production, maximum exploitation of the dryer capacity during the harvesting season is a top priority.

In order to deliver high quality products, appropriate quality management must encompass the entire production. The sensitive plants are to be treated with extreme care during all process steps. An undelayed start of drying and compliance with the highest permissible drying temperature are essential for preserving the active ingredients.

With regard to efficient energy use, different modes of dryer operation and changing weather conditions have much greater impacts on the specific thermal energy consumption than the drying behavior of individual plant species. Therefore, the respective part of the drying processes pertaining to the air side should first be optimized by implementing an effective strategy of control. Employing an efficient energy supply is then the second step.

One of the primary measures to improve energy use efficiency is partial recirculation of dryer outlet air. If optimized control of the recycled air ratio is realized, the elongation of the total drying duration can be limited to a negligible minimum. Other effective measures in batch-type drying include utilizing outlet air in subsequent dryers or rearranging partially dried produce on a smaller grate area for further drying. Any of these measures can lead to energy savings of more than 25 %.

Based on simulation results obtained from fixed-bed drying of chamomile flowers, a comparative analysis of different energy supply alternatives revealed following insights. The use of solar process heat requires mixing of hot air from air collectors with fresh air, so that the maximum drying temperature is not exceeded. In case of continuous drying over several days, relatively small amount of energy can be saved by utilizing solar heat. In contrast, energy supply through the combination of a heat pump with a combined heat and power plant (CHPP) in addition to partial air recirculation led to primary energy savings of 73 %.

The performed economic assessment found that the investment required for a controlled recirculation of dryer outlet air would be paid back in less than two years. Considering subsidies, the other investigated variants i.e. utilization of CHPP waste heat, combination of heat pump and CHPP, and utilization of solar heat exhibited amortization periods approximately between six and ten years. Due to the decrease in specific investment requirements with respect to plant dimension, shorter amortization periods should be achievable for larger drying plants.

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	IV
Kurzfassung.....	V
Executive Summary .....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	IX
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Verzeichnis der Abkürzungen .....	XIII
1 Einleitung .....	1
2 Produktspezifische Aspekte der Trocknung von Arzneipflanzen .....	5
2.1 Qualitätsanforderungen .....	5
2.2 Vorbehandlung und Erstverarbeitung .....	7
2.3 Feuchtegehalte, Trocknungstemperaturen und Ernteerträge .....	11
2.4 Kombination unterschiedlicher Kulturen.....	17
3 Trocknungstechnische und energetische Grundlagen .....	26
3.1 Mollier $h, Y$ -Diagramm für feuchte Luft .....	26
3.2 Lufttransport und Ventilatoren .....	31
3.3 Energetische Grundlagen .....	39
3.4 Trocknungstechnische Kennzahlen .....	44
3.5 Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten .....	47
4 Lufttechnische Effizienzsteigerung der Chargentrocknung .....	55
4.1 Klimatische Bedingungen im Verlauf der Ernteperiode .....	55
4.2 Trocknung mit Teilumluft .....	58
4.3 Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern .....	63
4.4 Reduzierung der Luftmenge .....	64
4.5 Umlagerung und Zusammenlegung.....	65
4.6 Vergleich der lufttechnischen Varianten.....	67
5 Planung und Betrieb von Trocknungsanlagen .....	69
5.1 Allgemeine Grundlagen der Planung .....	69
5.2 Energiebedarf und Energieversorgung .....	70
5.2.1 Konventionelle Energieträger.....	71
5.2.2 Energie aus nachwachsenden Rohstoffen.....	71
5.2.3 Blockheizkraftwerke und Abwärmenutzung .....	76
5.2.4 Wärmerückgewinnung .....	77
5.2.5 Trocknung mit Wärmepumpen.....	79
5.2.6 Nutzung von Solarwärme.....	84
5.3 Betriebsoptimierung.....	91
5.4 Vergleich unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung.....	95



6	Betriebswirtschaftliche Aspekte der Produktion von Arzneipflanzen .....	103
6.1	Einordnung in die Organisationsstruktur des Betriebs.....	103
6.2	Anforderungen des kontrollierten Vertragsanbaus .....	105
6.3	Personelle und arbeitsorganisatorische Aspekte .....	106
6.4	Maschinen- und anlagentechnische Anforderungen .....	107
7	Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.....	109
7.1	Abschätzung der Betriebskosten .....	109
7.2	Abschätzung der Investitionskosten.....	114
7.3	Wirtschaftliche Bewertung .....	117
8	Fördermöglichkeiten .....	122
8.1	Förderprogramme.....	122
8.2	Technische Effizienzkriterien für förderfähige Maßnahmen .....	126
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	129
	Literaturverzeichnis.....	135
	Anhang .....	142
	Tabellenverzeichnis Anhang.....	143
	Abbildungsverzeichnis Anhang .....	145
	Verzeichnis der Symbole und Indizes .....	147
A	Allgemeine Tabellen .....	150
B	Produktspezifische Tabellen und Abbildungen.....	161
C	Trocknerspezifische Tabellen und Abbildungen.....	167
D	Energetische und anlagentechnische Tabellen und Abbildungen .....	171
E	Wirtschaftliche Tabellen und Abbildungen .....	180
F	Inhaltliche Ergänzungen .....	185
F.2	Ergänzungen zu Kapitel 2: Produktspezifische Aspekte .....	185
F.3	Ergänzungen zu Kapitel 3: Trocknungstechnische Grundlagen.....	191
F.4	Ergänzungen zu Kapitel 4: Lufttechnische Effizienzsteigerung .....	199
G	Kontaktadressen und Ansprechpartner.....	201
	Liste bisher erschienener Bornimer Agrartechnische Berichte .....	203

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Physiologische Prozesse im frischen Erntegut von Arznei- und Gewürzpflanzen während der Nacherntezeit (Böttcher, 2010).....	8
<b>Tabelle 2.2:</b>	Feuchtegehalte von Frischgut ( $F_{FG}$ ) und Trockengut ( $F_{TG}$ ), Eintrocknungsverhältnis (E) sowie spez. Wasserentzug pro kg Trockengut ( $W_{TG}$ ) für ausgewählte Pflanzenarten. ....	13
<b>Tabelle 2.3:</b>	Trocknungstemperaturen und Trocknungsdauern bei der Flächentrocknung.....	14
<b>Tabelle 2.4:</b>	Schichthöhe, Schüttdichte und spezifische Frischgut-Belegung pro $m^2$ Rostfläche für ausgewählte Pflanzenarten. ....	15
<b>Tabelle 2.5:</b>	Erntezeiträume der einzelnen Schnitte für unterschiedliche Pflanzenarten.....	16
<b>Tabelle 2.6:</b>	Durchschnittliche Trockengut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau. ....	17
<b>Tabelle 2.7:</b>	Berechnung von Rostflächen für die Flächentrocknung (exemplarisch). ....	21
<b>Tabelle 2.8:</b>	Ermittlung täglicher Ernteflächen für die Flächentrocknung (Rostfläche: $50 m^2$ , exemplarisch).....	21
<b>Tabelle 2.9:</b>	Insgesamt zu entziehende Wassermengen und durchschnittliche Entfeuchtungsleistungen bei der Flächentrocknung unterschiedlicher Pflanzenarten (Rostfläche: $50 m^2$ , exemplarisch). ....	24
<b>Tabelle 3.1:</b>	Spezifischer Wärmebedarf der Trocknung bei unterschiedlichen Umluftanteilen (exemplarisch).....	31
<b>Tabelle 3.2:</b>	Leistungsdaten eines Radialventilators bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (exemplarisch). ....	37
<b>Tabelle 3.3:</b>	Luftseitige Massen- und Energiebilanzen für einen Chargentrockner im reinen Frischluft-Betrieb (exemplarisch). ....	40
<b>Tabelle 3.4:</b>	Heiz- und Brennwerte von Heizöl und Erdgas bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	42
<b>Tabelle 3.5:</b>	Verfahrensvergleich zwischen Flächen- und Bandrocknern nach Mellmann & Füll (2008). ....	48
<b>Tabelle 3.6:</b>	Spezifischer thermischer Energiebedarf unterschiedlicher Trocknerbauarten nach Literaturangaben. ....	53
<b>Tabelle 4.1:</b>	Durchschnittliche Temperaturen und Wassergehalte der Außenluft sowie Tagessummen der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene am Standort Ranis (DWD, 2016).....	57
<b>Tabelle 4.2:</b>	Bedarf an Wärme und elektrischer Energie für unterschiedliche lufttechnische Varianten am Beispiel der Flächentrocknung von Kamilleblüten. ....	67
<b>Tabelle 4.3:</b>	Primärenergieeinsparung für unterschiedliche lufttechnische Varianten der Flächentrocknung bei konventioneller Luffterwärmung (exemplarisch). ....	68
<b>Tabelle 5.1:</b>	Spezifischer Investitionsbedarf und EEG-Vergütungssätze für Biogas sowie kalkulatorischer Gewinnbeitrag und Gesamtrentabilität unterschiedlicher Modellanlagen im Jahr 2013 (FNR, 2016). ....	75

<b>Tabelle 5.2:</b>	Nutzbare Solarwärme pro Tag und durchschnittliche Nutzwärmeleistung einer Luftkollektoranlage mit 100 m <sup>2</sup> Brutto-Kollektorfläche (Mai – Oktober).....	90
<b>Tabelle 5.3:</b>	Leistungsdaten unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung. ....	96
<b>Tabelle 5.4:</b>	Energiebedarf pro Charge Kamilleblüten bei der Trocknung mit Teilumluft und unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung. ....	100
<b>Tabelle 5.5:</b>	Spezifischer Primärenergiebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung. ....	102
<b>Tabelle 7.1:</b>	Durchschnittliche Preise und Preisverhältnisse für elektrischen Strom und Erdgas nach Daten des Statistischen Bundesamtes für 2016 (DESTATIS, 2017). ....	110
<b>Tabelle 7.2:</b>	Energiepreise, Vergütungen und Steuerentlastungen zur Berechnung der Energiekosten. ....	111
<b>Tabelle 7.3:</b>	Energiekosten pro Charge Kamilleblüten bei der Trocknung mit Teilumluft und unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung. ....	112
<b>Tabelle 7.4:</b>	Eingesparte Energiekosten im Vergleich mit der eingesparten Primärenergie bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung. ....	113
<b>Tabelle 7.5:</b>	Einsparung von Energiekosten, Rentabilität und Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung bei 3.000 Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung). ....	119

Weitere Tabellen befinden sich im Anhang.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1:</b>	Eintrocknungsverhältnis und spezifischer Wasserentzug pro kg Trockengut (TG) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Frischgutes.....	12
<b>Abb. 2.2:</b>	Erntezeiträume und berechnete Erntemengen (Frischgut) im Verlauf der Trocknungsperiode 2015 bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G.....	19
<b>Abb. 2.3:</b>	Berechnete Anzahl Roste für die Kombinationen Melisse und Baldrian (oben), Kamille, Mutterkraut, Goldrute, Kapuzinerkresse und Rosenwurz (Mitte) sowie Pfefferminze, Johanniskraut und Spitzwegerich (unten).....	22
<b>Abb. 3.1:</b>	Zustandsänderungen der Luft beim Mischen, Erwärmen und Trocknen im Mollier h,Y-Diagramm (exemplarisch).....	27
<b>Abb. 3.2:</b>	Zustandsänderungen der Luft bei Trocknung ohne und mit Teilumlufte im Mollier h,Y-Diagramm (exemplarisch). ....	30
<b>Abb. 3.3:</b>	Änderungen der Druckverluste pro m Schichthöhe bei der Satz-trocknung von Kamilleblüten, Melisse-Ganzpflanzen und Baldrianwurzeln (exemplarisch). ....	33
<b>Abb. 3.4:</b>	Schema eines Radialventilators für saug- und druckseitigen Kanalanschluss (Kullen & Albrich, 1988).....	34
<b>Abb. 3.5:</b>	Drehzahlkennlinien eines Radialventilators mit Anlagenkennlinien eines Flächentrockners für unterschiedliche Druckverluste (exemplarisch). ....	35
<b>Abb. 3.6:</b>	Ansicht der Trocknungsanlage Nöbdenitz vor der Modernisierung.....	49
<b>Abb. 3.7:</b>	Schnitt durch Halle 1 der Trocknungsanlage Nöbdenitz nach der Modernisierung (PGF, 2010).....	49
<b>Abb. 3.8:</b>	Seitenansicht eines Fünfband-trockners (Heindl & Müller, 2010).....	50
<b>Abb. 4.1:</b>	Jahresverläufe der mittleren Temperatur und des Wassergehalts der Außenluft am Standort Ranis (DWD, 2016).....	56
<b>Abb. 4.2:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der maximalen, mittleren und minimalen Außenlufttemperatur gemittelt über die Monate Juni bis September am Standort Ranis (DWD, 2016).....	58
<b>Abb. 4.3:</b>	Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb.....	59
<b>Abb. 4.4:</b>	Entfeuchtungsleistung und gesamte Wassermenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb. ....	61
<b>Abb. 4.5:</b>	Regelung des Umluftanteils bei Trocknung mit Teilumlufte in Abhängigkeit von der normierten Luftfeuchte $\Psi$ .....	62
<b>Abb. 4.6:</b>	Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb und im geregelten Teilumlufte-Betrieb. ....	62
<b>Abb. 4.7:</b>	Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche bei der Nutzung von 60 % Ablufte in nachgeschalteten Trocknern ab einer normierten Luftfeuchte von $\Psi = 0,5$ .....	63
<b>Abb. 4.8:</b>	Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche nach Reduzierung der Luftmenge auf 60 %.....	64
<b>Abb. 4.9:</b>	Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge nach Umlagerung und Zusammenlegung auf einer kleineren Rostfläche.....	65

<b>Abb. 4.10:</b>	Elektrische Leistung und Energie für Ventilatoren im reinen Frischluft-Betrieb sowie nach Umlagerung und Zusammenlegung auf einer kleineren Rostfläche.....	66
<b>Abb. 5.1:</b>	Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten für Brennstoffe aus Biomasse (Kaltschmitt et al., 2009).....	72
<b>Abb. 5.2:</b>	Spezifische Investitionskosten für Biogasanlagen im Jahr 2013 (FNR, 2016).....	74
<b>Abb. 5.3:</b>	Simulation eines Systems zur rekuperativen Wärmerückgewinnung bei unterschiedlichen Temperaturen der Außenluft im Jahresverlauf (Halemba, 2015). ....	78
<b>Abb. 5.4:</b>	Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe und Kältemittelkreislauf im log p-h-Diagramm (Kirn, 1983). ....	79
<b>Abb. 5.5:</b>	Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe im Vergleich zu einer konventionellen Heizung. ....	81
<b>Abb. 5.6:</b>	Relativer Primärenergiebedarf von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen in Abhängigkeit von der Leistungszahl COP.....	81
<b>Abb. 5.7:</b>	Auswahl möglicher Schaltungsvarianten bei der Trocknung mit Wärmepumpen (K = Kondensator, T = Trockner, V = Verdampfer, WRG = interne Wärmerückgewinnung).....	82
<b>Abb. 5.8:</b>	Wärmepumpentrocknung mit interner Wärmerückgewinnung im Mollier h,Y-Diagramm (schematisch). ....	83
<b>Abb. 5.9:</b>	Tagesverläufe der Ein- und Austrittstemperaturen eines Luftkollektors im Juni. ....	86
<b>Abb. 5.10:</b>	Austrittstemperaturen aus einem Luftkollektor und Anteile solar erwärmter Luft für eine Trocknungstemperatur von 40 °C. ....	87
<b>Abb. 5.11:</b>	Tagesverläufe der Nutzwärmeleistung einer Luftkollektoranlage mit 100 m <sup>2</sup> Brutto-Kollektorfläche im Juni. ....	89
<b>Abb. 5.12:</b>	Prozentuale Wärmeleistung bezogen auf den reinen Frischluft-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.....	98
<b>Abb. 6.1:</b>	Produktions- und Organisationsstruktur der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. ....	104
<b>Abb. 7.1:</b>	Durchschnittliche Energiepreise und Preisverhältnisse für industrielle Abnehmer in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017). ....	109
<b>Abb. 7.2:</b>	Einsparung von Energiekosten im Teilumluft-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung und Brennstoffpreisen. ....	114
<b>Abb. 7.3:</b>	Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung bei unterschiedlichen Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung). ....	120

Weitere Abbildungen befinden sich im Anhang.

## Verzeichnis der Abkürzungen

AL	Abluft
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BT	Bandtrockner
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COP	Verhältnis nutzbare Wärme / elektrische Energie bei Wärmepumpen <i>coefficient of performance</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
EEX	European Energy Exchange AG, Strombörse in Leipzig
EN	Europäische Norm
EnergieStG	Energiesteuergesetz.
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
FA	Frühjahrsaussaat
FG	Frischgut (feuchtes Gut, Frischware)
FL	Frischluf (Außenluft)
FU	Frequenzumrichter
H <sub>2</sub> O	Wasser
HA	Herbstaussaat
i.N.	in Normbedingung (101.325 Pa, 0 °C)
ISO	International Organization for Standardization
KFW	KFW-Bankengruppe (KFW steht für Kreditanstalt für Wiederaufbau)
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KW	Kalenderwoche
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MAP	Marktanreizprogramm "Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt"
ML	Mischluft
MwSt	Mehrwertsteuer
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe



NHN	Normalhöhennull
PE	Primärenergie
TG	Trockengut (getrocknetes Gut, Trockenware)
TRY	Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes
TS	Trockensubstanz (Grundsubstanz mit 0 % Feuchtegehalt)
S	Schnitt (Ernteschnitt)
SEB	spez. elektrischer Energiebedarf
SPB	spez. Primärenergiebedarf (spez. PE-Bedarf)
STB	spez. thermischer Energiebedarf
StromStG	Stromsteuergesetz
UBA	Umweltbundesamt
UL	Umluft
ULA	Umluftanteil
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
ZL	Zuluft

Das Verzeichnis der Symbole und Indizes befindet sich im Anhang.

## 1 Einleitung

Ziel des Leitfadens ist es, interessierten Betrieben, Personen und Einrichtungen in möglichst kompakter Form Informationen zu vermitteln, die für die Errichtung und für den Betrieb von Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen von Bedeutung sind. Im Zentrum des Leitfadens stehen Informationen über Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, die nach primärenergetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden. Der Leitfaden richtet sich nicht nur an Neueinsteiger, sondern auch an Betreiber bereits bestehender Trocknungsanlagen. In beiden Fällen nimmt die Trocknung eine Schlüsselstellung ein, da sie mit hohen Investitionskosten verbunden ist und im Produktionsprozess hohe Energiekosten verursacht.

Die Projektierung einer Trocknungsanlage beginnt mit der Auswahl des Trocknungsverfahrens. Ziel ist nicht minimaler Energieverbrauch, sondern maximale Energieeffizienz, um den Trocknungsprozess wirtschaftlich optimal zu gestalten. Aufgrund der Vielzahl möglicher Anlagenkonfigurationen ist eine individuelle Beratung und Planung unerlässlich. Diese Leistungen kann ein Leitfaden keinesfalls ersetzen. Die Projektierung von konkreten Trocknungsanlagen ist ausdrücklich kein Gegenstand des Leitfadens. Dem Leser soll es jedoch ermöglicht werden, den Planungsablauf mit kritischem Sachverstand mitzugestalten. Wesentliche Inhalte des Leitfadens werden deshalb anhand von beispielhaften Anlagenkonfigurationen beschrieben.

Hierfür werden produktspezifische Aspekte, trocknungstechnische und energetische Zusammenhänge sowie Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energiequellen und der Betriebsoptimierung erläutert. Größenordnungen von Energieeinsparungen durch unterschiedliche anlagen- und regelungstechnische Maßnahmen werden exemplarisch dargestellt. Die erforderlichen Investitionskosten werden abgeschätzt. Auch betriebswirtschaftliche und arbeitsorganisatorische Aspekte werden berücksichtigt. Der Leitfaden will den Stand der Technik aufzeigen, Vor- und Nachteile unterschiedlicher Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bewerten und Entscheidungshilfen durch Abschätzung von Investitions- und Betriebskosten bieten.

### Inhalte des Leitfadens

In **Kapitel 2** werden produktspezifische Aspekte beschrieben, die bei der Trocknung von Arzneipflanzen zu beachten sind. Dies beinhaltet die Klassifikation nach Drogengruppen, Qualitätsanforderungen der unterschiedlichen Kulturen sowie Verfahrensschritte der Vorbehandlung vor der Trocknung und der Erstverarbeitung nach der Trocknung. Grundlegende Definitionen und Berechnungsformeln zum Feuchtegehalt, Wassergehalt, Eintrocknungsverhältnis und spezifischen Wasserentzug werden erläutert. Typische Feuchtegehalte, Trocknungstemperaturen, Trocknungsdauern und Ernteerträge werden für ausgewählte Pflanzenarten tabellarisch dargestellt.

Für die Praxis der chargenweisen Flächentrocknung sind produktspezifische Werte der Schichthöhe, der Schüttdichte und der Frischgut-Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche von besonderer Relevanz. Die Zeiten der Aussaat bzw. Anpflanzung (Herbst oder Frühjahr), die Nutzungsdauern der unterschiedlichen Pflanzenarten (ein- oder mehrjährig) und die

Witterungsbedingungen haben wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf der Ernte. Zur Kombination unterschiedlicher Kulturen im Verlauf der Ernteperiode sind Erntezeiträume und die Anzahl der Ernteschnitte in weiteren Tabellen zusammengestellt. Trocknungspläne, die Berechnung täglicher Erntemengen, Ernteflächen und Rostflächen im großflächigen Anbau und die Abschätzung der durchschnittlich erforderlichen Trocknungs- bzw. Entfeuchtungsleistung werden beispielhaft erläutert.

Eine sinnvolle Nutzung des Leitfadens setzt das Verständnis einiger trocknungstechnische und energetischer Grundlagen voraus (**Kapitel 3**). Hierfür werden zunächst Aufbau und Anwendung des Mollier  $h, Y$ -Diagramms für feuchte Luft in möglichst kompakter Form beschrieben. Dabei wird insbesondere auch auf Zusammenhänge bei der Trocknung im Teilumluft-Betrieb eingegangen. Es folgen Erläuterungen zum Lufttransport und zu Ventilatoren, deren Betriebsverhalten maßgeblich von veränderlichen Strömungswiderständen bzw. Druckverlusten bestimmt wird. Anschließend werden grundlegende energetische Zusammenhänge und trocknungstechnische Kennzahlen erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet eine kurze Beschreibung der Bauarten von Konvektionstrocknern, die für Arznei- und Gewürzpflanzen geeignet sind. Dabei werden Chargentrockner (z.B. Flächentrockner) und kontinuierliche Trockner (z.B. Bandtrockner) unterschieden.

Ein Schwerpunkt des Leitfadens ist die modulare Kombination von mehreren Chargentrocknern, mit denen flexibel auf unterschiedliche Erntemengen reagiert werden kann. Um den Durchsatz an Trockengut und die energetische Effizienz der Trocknung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen vergleichend bewerten zu können, wurde eine modellbasierte Fallstudie erarbeitet. Die Ergebnisse der Fallstudie, die auf einem einfachen Modell der Flächentrocknung basieren, werden in **Kapitel 4** beschrieben.

Die untersuchten lufttechnischen Varianten zur Effizienzsteigerung umfassen die Trocknung mit Teilumluft, die Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern, die Reduzierung der Luftmenge sowie die Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche. Den Berechnungen wurden unterschiedliche Tagesverläufe der Außenlufttemperatur zugrunde gelegt. Die Ergebnisse verdeutlichen die großen Potenziale lufttechnischer Maßnahmen, die bei jeder Trocknungsanlage der jeweiligen Gutart und den wechselnden klimatischen Bedingungen angepasst werden sollten.

Basierend auf der allgemeinen Vorgehensweise bei der Planung von Trocknungslagen werden in **Kapitel 5** weitere Maßnahmen erläutert, mit denen der Energiebedarf der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen reduziert werden kann. Bei der Einordnung der Trockner in den Produktionsablauf sind insbesondere vorhandene Ressourcen (Energieversorgung, verfügbare Energiequellen, vorhandene Gebäude, bereits bestehende Trocknungsanlagen) zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Bereitstellung und Nutzung thermischer und elektrischer Energie werden erläutert. Dies beinhaltet konventionelle Energieträger, nachwachsende Rohstoffe, Blockheizkraftwerke, Abwärmenutzung, Wärmerückgewinnung, Trocknung mit Wärmepumpen und die Nutzung von Solarwärme. Die untersuchten Maßnahmen zur Auslastung von Trocknungsanlagen und zur Betriebsoptimierung werden primärenergetisch bewertet. Für die Umsetzung sind geeignete Systeme der Mess-, Steuer und Regelungstechnik von besonderer Bedeutung.

In **Kapitel 6** werden betriebswirtschaftliche Aspekte behandelt. Diese umfassen die Einordnung der Produktion von Arzneipflanzen in die Organisationsstruktur des Betriebs, Anforderungen des kontrollierten Vertragsanbaus, personelle und arbeitsorganisatorische Aspekte sowie maschinen- und anlagentechnische Anforderungen.

Trocknungskosten hängen im Einzelfall von der Art, der Menge und der Beschaffenheit der Ausgangsstoffe und der Endprodukte, vom Preis- und Lohnniveau und von anderen Gegebenheiten ab. Da diese Faktoren örtlich verschieden und zeitlich veränderlich sind, können im Rahmen des Leitfadens keine festen Kostenangaben gemacht werden. Die in **Kapitel 7** zusammengestellten Informationen und Amortisationsrechnungen sollen jedoch helfen, die Betriebskosten zu überschlagen und die Realisierbarkeit von Investitionsvorhaben abzuschätzen.

Insbesondere durch das 2016 aktualisierte Bundesprogramm Energieeffizienz der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) hat sich die Fördersituation für Unternehmen, die in der landwirtschaftlichen Primärproduktion tätig sind, stark verbessert. Eine Auswahl auch anderer Förderprogramme, die für Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen in Frage kommen, wird in **Kapitel 8** beschrieben.

### **Abgrenzung**

Folgende Aspekte der Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen werden nicht behandelt:

- Standortanforderungen der unterschiedlichen Produkte (Boden- und Klimaansprüche)
- Fruchtfolgegestaltung
- Bodenbearbeitung und Düngung
- Saat- und Pflanzgut
- Aussaat und Pflanzung
- Beregnung
- Unkrautbekämpfung
- Pflanzenschutz und hygienische Anforderungen an die Anbauflächen
- Erntetechnologien

Die genannten Themenbereiche werden umfassend in anderen Publikationen dargestellt, insbesondere in dem von Bernd Hoppe (2010b) herausgegebenen Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Band 2. Auch Krankheiten und Schädlinge (Meyer et al., 2010) und die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Pflanzenarten (Arzneimittelbereich, Gewürzmittelbereich, Kosmetik, Aromatherapie, Lebensmittelbereich, Veterinärmedizin und Tierernährung, Industrierohstoffe) werden nicht behandelt.<sup>1</sup> Dies gilt auch für die Preise der jeweiligen Endprodukte sowie für die Anwendungsgebiete pflanzlicher Arzneimittel (FNR, 2013).

### **Hinweise zur Benutzung**

Bei der Erarbeitung des Leitfadens wurde auf eine möglichst kompakte Darstellung Wert gelegt. Zahlreiche Detailinformationen zur Ergänzung der beispielhaften Darstellungen im

---

<sup>1</sup> vgl. hierzu Hoppe (2009): Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Band 1.

Haupttext sind deshalb zum Nachschlagen im Anhang zusammengestellt. Dies gilt auch für die unverzichtbaren Formeln zur Berechnung trocknungstechnischer bzw. thermodynamischer Zusammenhänge, auf die in einzelnen Abschnitten Bezug genommen wird. Das Verzeichnis der Symbole und Indizes befindet sich aus diesem Grund ebenfalls im Anhang.

Der Anhang enthält allgemeine, produktspezifische, trocknerspezifische, energetische, anlagentechnische sowie wirtschaftliche Tabellen und Abbildungen (**Anhang A – E**). Inhaltliche Ergänzungen zu einzelnen Abschnitten des Leitfadens sind in **Anhang F** untergebracht. Kontaktadressen und Ansprechpartner sind in **Anhang G** aufgelistet.

## 2 Produktspezifische Aspekte der Trocknung von Arzneipflanzen

Das oberste Gebot bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen ist das Erhalten der wirksamen Inhaltsstoffe. Dies hängt in besonderem Maße von dem Einhalten der maximal zulässigen Trocknungstemperatur ab (Maltry et al., 1975). Auch die Farbe und der mikrobielle Besatz (Keimzahl) stellen wichtige Qualitätskriterien dar (Heindl & Müller, 2010). So vielfältig die Erscheinungsformen von Arznei- und Gewürzpflanzen sind, so unterschiedlich sind auch die notwendigen Aufbereitungsschritte (Heindl & Hoppe, 2010).<sup>2</sup> Durch unterschiedliche Verfahren der Vorbehandlung des geernteten Frischgutes vor der Trocknung, wie z.B. Blütentrennung, Zerkleinern von frischen Krautdrogen, Teilung der Wurzelstöcke und Waschen von Wurzeldrogen, kann die Qualität des Trocknungsgutes beeinträchtigt werden. Physiologischen Stoffwechselabläufen und -reaktionen kommt dabei eine erhebliche Bedeutung zu (Böttcher, 2010). Mechanische Verfahren der Erstbehandlung nach der Trocknung (z.B. Schneiden, Rebeln, Sieben, Sichten) erfordern je nach Produktart unterschiedliche Verarbeitungsanlagen (Sagemüller & Heindl, 2010).

In diesem Kapitel werden zunächst die Qualitätsanforderungen der unterschiedlichen Pflanzenarten beschrieben (Abschnitt 2.1) sowie Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung erläutert (Abschnitt 2.2). Anschließend werden Feuchtegehalte, Trocknungstemperaturen und Ernteerträge ausgewählter Pflanzenarten im großflächigen Anbau dargestellt (Abschnitt 2.3). Dies beinhaltet auch eine kurze Erläuterung grundlegender Berechnungsformeln zum Wassergehalt, Eintrocknungsverhältnis und spezifischen Wasserentzug. Produktspezifische Werte der Schichthöhe, der Schüttdichte und der Frischgut-Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche sind von besonderer Bedeutung für die Praxis der chargenweisen Flächentrocknung. Dies gilt auch für die Erntezeiträume, für den zeitlichen Ablauf der einzelnen Ernteschnitte und für die zu erwartenden Ernteerträge. Zur Kombination unterschiedlicher Kulturen im Verlauf der Ernteperiode werden im Abschnitt 2.4 Trocknungspläne und die Berechnung täglicher Erntemengen, Ernteflächen und Rostflächen erläutert. Beispielhafte Berechnungen zur Abschätzung der für einzelne Gutarten durchschnittlich erforderlichen Entfeuchtungsleistung bilden den Abschluss dieses Kapitels.

### 2.1 Qualitätsanforderungen

Arznei- und Gewürzpflanzen sind eine sensible und anspruchsvolle Pflanzengruppe und unterliegen der Arzneimittel- und Lebensmittelgesetzordnung mit hohen Qualitätsansprüchen. Die Qualität wird in entscheidender Weise durch die Produktionsbedingungen beim Erzeuger geprägt (Hoppe, 2005). Im gesamten Herstellungsprozess werden hohe Anforderungen an die Hygiene gestellt. Qualitätsanforderungen betreffen insbesondere die wertbestimmenden Inhaltsstoffe, die Farbe und den mikrobiellen Besatz der Pflanzen (Heindl & Müller, 2010). Hierbei wird auf Verunreinigungen, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, mikrobiologische Reinheit, Aflatoxine und Schwermetalle geachtet (Dachler & Pelzmann, 1999).

---

<sup>2</sup> In der Praxis werden Verfahrensschritte zur Aufbereitung zwischen Ernte und Trocknung auch als "Nachernteprozesse" oder "Nacherntebehandlung" bezeichnet. Im Folgenden wird zwischen "Vorbehandlung" des geernteten Frischgutes vor der Trocknung und "Erstverarbeitung" der Trockenware nach der Trocknung unterschieden.



Die Qualitätsanforderungen für die unterschiedlichen Einzeldrogen sind in den jeweiligen Monografien der europäischen (EAB, 2016), deutschen (DAB, 2015) und homöopathischen (HAB, 2016) Arzneimittelbücher geregelt. Qualitätsansprüche an Gewürzpflanzen werden im deutschen Lebensmittelbuch aufgeführt (DLMB, 2016). Darüber hinaus müssen die Produkte den Verbrauchererwartungen hinsichtlich Aussehen und Geschmack und den Anforderungen der Abnahmeverträge der Industrie entsprechen. Die Qualitätsmerkmale werden insbesondere durch Reinheit, Mindestgehalte an ätherischen Ölen und Grenzwerte für Schwermetalle und für Pflanzenschutzmittelrückstände bestimmt. Die geforderten Feuchtegehalte der getrockneten Rohware liegen zwischen 8 % und 12 % (EAB, 2016).

### **Klassifikation nach Drogengruppen**

In Deutschland werden mehr als 100 unterschiedliche Arten von Arznei- und Gewürzpflanzen angebaut. 46 Arten haben eine Bedeutung für den deutschen Absatzmarkt (Schmitz & Pforte, 2014). Die Inhaltsstoffe sind in unterschiedlichen Pflanzenteilen konzentriert, sodass ein breites Spektrum zu beerntender Pflanzenorgane vorliegt (Zimmer & Müller, 2004). Je nachdem, welche Pflanzenteile Verwendung finden, werden die einzelnen Arten in entsprechende Drogengruppen eingeordnet (z.B. Blüten-, Kraut- oder Wurzeldrogen). Von vielen Pflanzenarten gibt es mehrere Sorten, von manchen Pflanzenarten werden mehrere Pflanzenteile (z.B. Blüten und Kraut) genutzt.

Bei den Pflanzenteilen wird zwischen Blüte, Blatt, Kraut, Frucht, Wurzel, Wurzelstock, Samen, Knolle und Zwiebel unterschieden (Dachler & Pelzmann, 1999). Die unterschiedlichen Pflanzenteile weisen ein jeweils unterschiedliches Trocknungsverhalten auf. Allgemein beinhalten Blätter einen größeren Wirkstoffgehalt als Stängel und trocknen schneller. Aus trocknungstechnischer Sicht ist bei Kraut- und Blattdrogen somit ein Abtrennen der Stängel und Stiele vor dem Trocknen sinnvoll.<sup>3</sup>

Im Anhang sind die verwendeten Pflanzenteile und wertbestimmenden Inhaltsstoffe unterschiedlicher Arzneipflanzen aufgelistet (**Tabelle B.1**). Zu den Inhaltsstoffen der Pflanzen zählen ätherische Öle, Schleim-, Scharf-, Gerb- und Bitterstoffe, Alkaloide, Glykoside, Flavonoide, Saponine, Cumarine und fette Öle (Dachler & Pelzmann, 1999).

### **Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit**

Um die Mindestanforderungen an die Produktqualität gezielt und mit Sicherheit zu erreichen, wenden die Anbauer Qualitätssicherungssysteme an und unterziehen sich den entsprechenden Zertifizierungen. Hier geht es vor allem um die Prozessqualität in allen Produktionsstufen und Verfahrensabschnitten. Die exakte Dokumentation aller Prozessabschnitte garantiert eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Produkte. Gleichzeitig wird eine frühzeitige Risikoerkennung und bessere Gefahrenabwehr ermöglicht. Die dokumentierte Prozessqualität führt zu einer hohen Transparenz der Produktqualität.

In der landwirtschaftlichen Praxis hat sich das Qualitätssicherungssystem zur kontrollierten, integrierten Produktion durchgesetzt, ebenso die Anwendung der GAP-Richtlinien "Good

---

<sup>3</sup> Unter "Stängel" ist der Hauptspross zu verstehen. "Stiele" stellen die Verbindung zwischen Hauptspross und Blättern dar.

*Agricultural Practices*" (BBodSchG, 2015). Das HACCP-System "*Hazard Analysis Critical Control Points*" als ein wesentliches Qualitätssicherungssystem für eine hohe und sichere Prozessqualität findet EU-weite Anwendung und ist mit allen anderen Qualitätssicherungssystemen eng vernetzt (EU-852/2004, 2004). Zusätzlich existieren bilaterale, vertiefende Vereinbarungen zur Produktqualität zwischen einzelnen Vertragspartnern. Risiko- und Gefährdungspotenziale bei der Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen werden nachfolgend anhand von Beispielen erläutert. Die Beispiele veranschaulichen, dass für die Erzielung von hohen Produktqualitäten Qualitätssicherungssysteme unerlässlich sind.

Standort, Witterung, Anbaumaßnahmen und Erntetechnologien haben großen Einfluss auf die Qualität der getrockneten Pflanzen. Qualitätseinbußen entstehen zum Beispiel durch Beschädigung oder Verunreinigung des Erntegutes sowie durch die Ernte unerwünschter Pflanzenteile (Zimmer & Müller, 2004). Neben der Löslichkeit des jeweiligen Öls in der Wasserphase und der Lage der Öldrüsen hat die Trocknungstemperatur wesentlichen Einfluss auf den Verlust von Inhaltsstoffen. Folglich ist die maximal zulässige Trocknungstemperatur abhängig von der Beschaffenheit der wertbestimmenden Inhaltsstoffe (Heindl & Müller, 2010). Der Verlust an Inhaltsstoffen nimmt mit steigender Temperatur zu. Pflanzenarten, bei denen ein Mindestgehalt an ätherischen Ölen vorgeschrieben ist, werden nur bei relativ niedrigen Temperaturen getrocknet (Bomme et al., 2002).

Da viele getrocknete Arzneipflanzen als Tee eingesetzt werden, stellt auch die Farbe ein wichtiges Qualitätskriterium dar, welches der Verbraucher unmittelbar wahrnimmt. Bräunungsreaktionen, beispielsweise aufgrund von Fermentationsprozessen durch mechanische Beschädigung empfindlicher Blätter, sind zu vermeiden. Bei der Trocknung von tau- oder regenfeuchtem Erntegut kann es vermehrt zu Bräunungsreaktionen (Heindl & Müller, 2010).

Qualitätsverluste treten teilweise während und auch erst nach der Lagerung auf. Hohe Trocknungstemperaturen führen dazu, dass Öldrüsen beschädigt werden. Das Öl lagert sich an dem Pflanzenmaterial ab und verflüchtigt sich während der Lagerung (Heindl & Müller, 2010). In **Tabelle B.2** im Anhang sind Qualitätsanforderungen an unterschiedliche Arzneipflanzen beispielhaft aufgeführt (EAB, 2016).

## 2.2 Vorbehandlung und Erstverarbeitung

Bei der Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen ist der Abschnitt zwischen Ernte und Trocknungsbeginn von großer Bedeutung für die Sicherung der Produktqualität. Die Beherrschung und optimale Gestaltung der unterschiedlichen Verfahren zur Aufbereitung vor der Trocknung erfordert Kenntnisse über die Nacherntephysiologie der jeweils geernteten Frischpflanzen. Auch die Art der technischen Trocknung ist zu berücksichtigen. Unterschiedliche Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten stellen unterschiedliche Anforderungen an die Vorbehandlung der einzelnen Trocknungsgüter.

Hinsichtlich des günstigsten Erntezeitpunkts sind pflanzen- und witterungsbedingt oft Kompromisse erforderlich. Hier muss der Anbauer vorausschauend handeln und über den weiteren Erntefortgang nach betriebswirtschaftlichen und arbeitsorganisatorischen Aspekten entscheiden. Dabei sind u.a. die Befahrbarkeit der Erntefelder und die zur Verfügung stehende Trocknungskapazität zu beachten.

### Physiologische Prozesse im frischen Erntegut

Bei unsachgemäßer Vorbehandlung können hohe Qualitätsverluste entstehen, die bis zum totalen Verderb der geernteten Frischware führen können. Ziel ist es, durch schonenden Umgang mit dem zu trocknenden Erntegut die wertbestimmenden Inhaltsstoffe in den Pflanzenteilen zu erhalten und die technologisch bedingten Masseverluste einzuschränken. Arznei- und Gewürzpflanzen haben als lebende Pflanzenorgane nach dem Ernteschnitt (bei Wurzeldrogen ab der Rodung) einen intensiven Stoffwechsel, der sich in den in **Tabelle 2.1** dargestellten Prozessen widerspiegelt (Böttcher, 2010).

**Tabelle 2.1:** *Physiologische Prozesse im frischen Erntegut von Arznei- und Gewürzpflanzen während der Nacherntezeit (Böttcher, 2010).*

Physiologischer Prozess	Auswirkungen
Atmung	Erwärmung, Selbsterhitzung, Fermentation
Alterung	Chlorophyllabbau, Blattablösung, qualitative und quantitative Veränderung der Inhaltsstoffe
Transpiration	Welke, Schrumpfung, qualitative und quantitative Veränderung der Inhaltsstoffe
Mikrobiologische Belastung	vor allem an Beschädigungsstellen, Druckstellen, Erhitzungsstellen, Faulstellen sowie Verderb
Beschädigungen	mechanischer Abrieb, Blütenzerfall, Qualitätsminderung

Um Qualitätsverluste zu minimieren, ist die Atmung der geernteten Frischware bis zum Beginn der Trocknung zu erhalten. Die beträchtliche und stabile Atmungsaktivität von Arznei- und Gewürzpflanzen kann die Zusammensetzung und den Gehalt der Inhaltsstoffe negativ beeinflussen. Im gesamten Verlauf der Vorbehandlung sind deshalb alle Maßnahmen zu treffen, um die Pflanzen schonend zu transportieren, Beschädigungen wie Druckstellen und Quetschungen zu vermeiden und einer möglichen Eigenerwärmung entgegenzuwirken. Die Transportanhänger sollten deshalb über seitliche Lüftungsschlitze oder Lüftungsgitter verfügen. Es gilt der Grundsatz, den Transport und alle notwendigen Bearbeitungsschritte in möglichst kurzer Zeit durchzuführen, um die Frischware schnellstmöglich der technischen Trocknung zuführen zu können.

Die Frischware sollte bereits vor der eigentlichen Trocknung mit nicht erwärmter Außenluft belüftet werden (sogenannte Kaltbelüftung). Neben der Verhinderung der Eigenerwärmung hat diese Maßnahme das Ziel, das zu trocknende Gut auf eine einheitliche Ausgangstemperatur zu bringen und damit von Anfang an einen gleichmäßigen, schonenden Trocknungsprozess zu erreichen.

Die wesentlichen Kriterien zur Beurteilung der physiologischen Prozesse zwischen Ernte und Trocknung sind in der Praxis das Aussehen, der Frischegrad und die Temperatur- bzw. Wärmeentwicklung der Pflanzen. Entsprechende Kontrollen führt der Praktiker auf Grundlage seines fundierten Fachwissens und seiner Erfahrungen kontinuierlich durch. Stichprobenweise werden auch Messungen zu einzelnen Qualitätsparametern durchgeführt und dokumentiert. Messungen, als wichtiger Bestandteil des Qualitätssicherungssystems, dienen der regelmäßigen Kontrolle der Prozessabläufe.

### Verfahrensschritte der Vorbehandlung

Je nach Pflanzenart und Trocknungsverfahren kommen unterschiedliche Verfahren zur Vorbehandlung der Frischware zum Einsatz (Heindl & Hoppe, 2010):

- Sieben
- Sichten (Windsichten)
- Schneiden und Zerkleinern
- Waschen
- Teilen und Zerkleinern von Wurzelstöcken

Bei der kontinuierlichen Bandtrocknung wird eine rieselfähige Gutstruktur benötigt. Die Vorbehandlung vor der Trocknung ist deshalb meistens aufwändiger als bei der Flächentrocknung. Umgekehrt erfordert die Erstverarbeitung nach der Flächentrocknung im Allgemeinen einen größeren verfahrenstechnischen Aufwand. Im Anhang sind Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung für ausgewählte Pflanzenarten dargestellt (**Tabelle B.3**).

Bei **Blütendrogen** sind die Vorbehandlungsschritte für chargenweise und kontinuierliche Trocknerbauarten sehr ähnlich. Die Blütenköpfe werden durch Siebanlagen von Stängeln, Krautbesatz und anderen Fremdbestandteilen getrennt. Meistens werden Siebtrommelanlagen mit zwei gegenläufig rotierenden Siebtrommeln eingesetzt. Um einen kontinuierlichen Prozess zu ermöglichen, sind die Siebtrommeln gegenüber der Horizontalen geneigt. Frisch geerntete Blütendrogen sind besonders druckempfindlich. Da sie sich leicht durch fermentative Prozesse erwärmen und verfärben können, müssen sie nach der Ernte zeitnah getrocknet werden (Maltry et al., 1975).

Bei **Kraut- und Blattdrogen** unterscheiden sich die zeitlichen Abläufe der Aufbereitung je nach Art des Trocknungsverfahrens. Die einzelnen Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung bei chargenweiser und kontinuierlicher Trocknung sind im Anhang schematisch dargestellt (**Abb. B.1**). Bei der Chargentrocknung von Ganzpflanzen erfolgt die Aufbereitung (Schneiden, Windsichten, Verpacken) erst nach der Trocknung.

Im Fall der kontinuierlichen Bandtrocknung werden die frischen Kraut- oder Blattpflanzen zunächst in kleinere Teile geschnitten bzw. gehäckselt. Danach werden vorrangig die Stängel durch Windsichtung aussortiert. Die so entstandene Blattware wird anschließend manchmal auch gewaschen. Das Waschen vor der Trocknung hat Vor- und Nachteile und wird nur bei hohem Sandgehalt empfohlen (Heindl & Hoppe, 2010). Ein Vorteil ist, dass durch das Waschen Staub, Sand und Steine abgesondert werden können. Dem stehen jedoch die Wasseraufnahme des Produkts, die Auswaschung von ätherischen Ölen und Inhaltsstoffen sowie die Anreicherung von Bakterien und Keimen gegenüber. Zum Entfernen von Steinen und Erdteilchen können auch Siebtrommeln genutzt werden (Heindl & Hoppe, 2010).

Das Schneiden der Frischware erfolgt mit Schneidemaschinen meist im Quadratschnitt. Hierbei muss auf eine schonende Dosierung und geringe Verdichtung auf den Zuführbändern bzw. Zuführwalzen geachtet werden (Heindl & Hoppe, 2010). Nach dem Schneiden bzw. Zerkleinern der Frischware erfolgt zumeist die Trennung von Stielen und Blättern durch Windsichtung. Je nach gewünschter Qualität können Blätter mit Stielen erneut der Schneidemaschine zugeführt werden. Durch das Schneiden und Austragen der Stiele werden im Vergleich zur Ganzpflanzentrocknung größere Schüttdichten erreicht: ca. 130 – 300 kg/m<sup>3</sup> bei geschnittenen Kräutern, ca. 50 – 100 kg/m<sup>3</sup> bei ungeschnittenen Kräutern (Heindl & Hoppe, 2010).

Bei **Wurzeldrogen** (z.B. Baldrian) sind die Vorbehandlungsschritte für chargenweise und kontinuierliche Trocknungsverfahren wiederum ähnlich. Die Wurzeln werden zunächst zur Grobreinigung über eine Rüttel- und Siebeinrichtung geführt, anschließend gewaschen und grob zerkleinert. Die vor der Trocknung erforderliche Endreinigung nach der Zerteilung muss aus bakteriologischen Gründen immer mit frischem Trinkwasser erfolgen (Heindl & Hoppe, 2010).

### Verfahrensschritte der Erstverarbeitung

Bei der Erstverarbeitung der Trockenware kommen je nach Pflanzenart folgende mechanische Verfahren zum Einsatz (Sagemüller & Heindl, 2010):

- Schneiden und Zerkleinern bzw. Häckseln
- Reibeln
- Sieben
- Sichten (Windsichten)
- Verpacken

Wie bereits erwähnt, erfordert die Erstverarbeitung der Trockenware nach der Flächentrocknung im Allgemeinen einen größeren verfahrenstechnischen Aufwand als nach der Bandtrocknung. Dies gilt insbesondere für als Ganzpflanzen getrocknete Kraut- und Blatt-drogen (**Tabelle B.3**). Bei der Bandtrocknung haben Schneiden und Zerkleinern bzw. Häckseln bereits im Rahmen der Vorbehandlung stattgefunden. Um die Produktreinheit zu erhöhen, ist ein erneutes Sieben und Sichten zur Abtrennung von unerwünschten Pflanzenteilen und verbliebenen Fremdbestandteilen möglich.

Bei getrockneten **Blütendrogen** hat die Erstverarbeitung zum Ziel, eine hochwertige Blütenware zu erzeugen, die als Apothekerware den Verbraucher erreicht. Dabei werden höchste Anforderungen an die Reinheit der Ware gestellt, die durch mechanische und manuelle Bearbeitung sichergestellt wird. Über Aufgabe- und Dosierbänder werden die Blütenköpfe zunächst gegenläufig rotierenden Scherwalzen (Siebtrommeln) zugeführt, wobei ein Abscheren der an den Blütenköpfen verbliebenen Stiele erfolgt. In der anschließenden Handverlesung werden die letzten Fremdbestandteile, wie z.B. mögliche einzelne Stängel, aussortiert. Die dabei durchgeführte Sichtkontrolle ist gleichzeitig Endkontrolle der Produktreinheit. Zum Schluss erfolgen Verpackung und Wägung der Apothekerware.

Bei der Erstverarbeitung von getrockneten **Kraut- und Blattdrogen** (z.B. Melisse, Pfefferminze) kommen hauptsächlich mechanische und pneumatische Verfahren zum Einsatz. Bei Ganzpflanzen erfolgt zunächst ein Zerkleinern der Pflanzen durch Schneideanlagen mit darauffolgendem Sieben und Sichten (**Abb. B.1** im Anhang). Ein sauberer, quetschfreier Schnitt in der Schneidemaschine ist äußerst wichtig für die Qualität der getrockneten Ware (Heindl & Hoppe, 2010). Mit zunehmender Schnittlänge nehmen das Maß der Gewebezzerstörung und der mikrobielle Besatz bzw. die Keimzahlen ab, aber die Trocknungsdauer steigt (Plescher, 2004). Durch Windsichtung werden die Stängel von den Blättern getrennt. Auch Rebelanlagen kommen in der Praxis zum Einsatz. Zum Abspalten von Samenkapseln, z.B. bei Johanniskraut, ist ein Dreschen der Pflanzen möglich.

Bei getrockneten **Wurzeldrogen** beschränkt sich die Erstverarbeitung im Wesentlichen auf die Verpackung, da die Ware bereits während der Vorbehandlung gereinigt, zerkleinert und von Fremdbesatz befreit wurde. In Ausnahmefällen (z.B. bei extremen Erntebedingungen) ist nach der Trocknung eine mechanische Aufbereitung zur Absiebung von geringfügigem Erdbesatz in Form kleiner Klümpchen erforderlich.

## 2.3 Feuchtegehalte, Trocknungstemperaturen und Ernteerträge

### Definitionen

Frischgut (FG) ist das feuchte Gut vor der Trocknung, Trockengut (TG) das getrocknete Gut nach der Trocknung. Das Trockengut unterscheidet sich von der reinen Trockensubstanz (TS) durch das im Trockengut enthaltene Wasser. Die im Folgenden erläuterten Berechnungsformeln sind im Anhang tabellarisch zusammengestellt (**Tabelle A.1**).

Der Feuchtegehalt  $F$  ist definiert als Verhältnis aus der Wassermasse  $m_W$  und der Gesamtmasse, welche aus Wasser  $m_W$  und Trockensubstanz  $m_{TS}$  besteht, und wird üblicherweise in Prozent angegeben (Gl. A.1). Der Feuchtegehalt  $F$  lässt sich auf einfache Weise in den Wassergehalt  $X$  umrechnen (Gl. A.2). Der Wassergehalt  $X$  ist der Quotient aus der Wassermasse  $m_W$  und der Masse der Trockensubstanz  $m_{TS}$  (Gl. A.3). Der Wassergehalt  $X$  lässt sich auch direkt aus dem Feuchtegehalt  $F$  berechnen (Gl. A.4).

Das Eintrocknungsverhältnis  $E$  ist definiert als Verhältnis aus der Masse des Frischgutes  $m_{FG}$  und der Masse des Trockengutes  $m_{TG}$  (Gl. A.5). Das Eintrocknungsverhältnis lässt sich sowohl aus den Feuchtegehalten  $F_{FG}$  und  $F_{TG}$  (Gl. A.6) als auch aus den Wassergehalten  $X_{FG}$  und  $X_{TG}$  (Gl. A.7) berechnen.

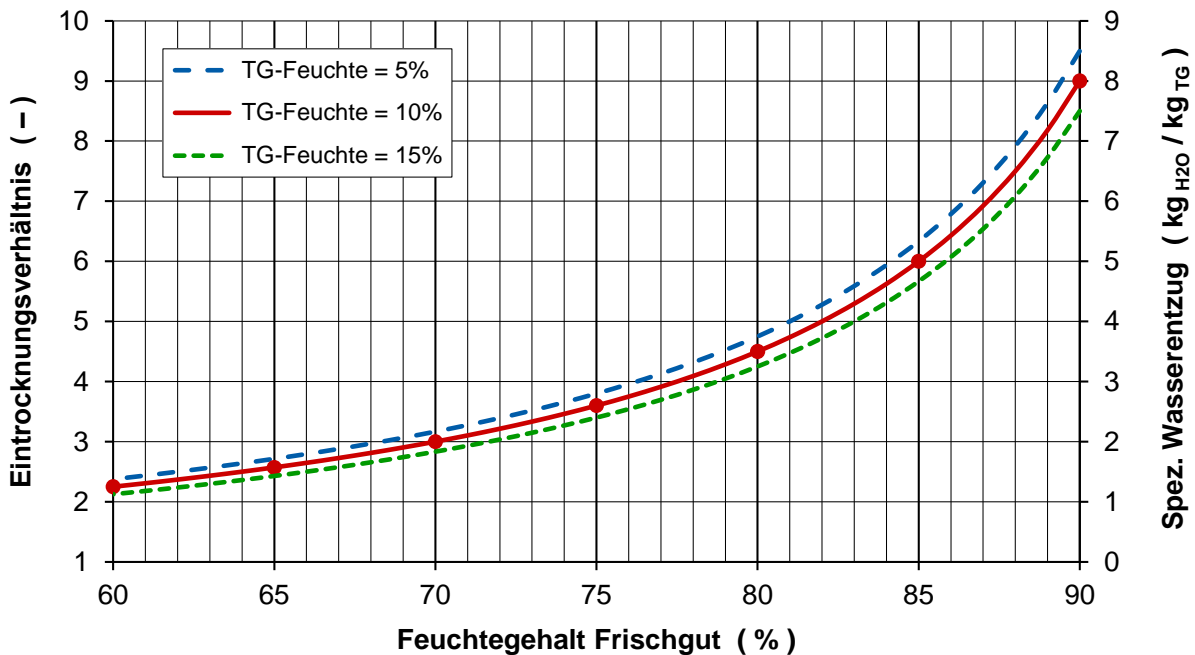
Die bei der Trocknung entzogene Wassermenge  $\Delta m_W$  ergibt sich aus der Differenz der Frischgutmasse  $m_{FG}$  und der Trockengutmasse  $m_{TG}$  (Gl. A.8). Die entzogene Wassermenge  $\Delta m_W$  kann ebenfalls sowohl aus den Feuchtegehalten (Gl. A.9) als auch aus den Wassergehalten (Gl. A.10) berechnet werden.

Neben dem Eintrocknungsverhältnis sind drei Definitionen des spezifischen Wasserentzugs als Vergleichsgrößen von Interesse. Je nach Bezugsgröße werden dabei der spez. Wasserentzug pro kg Trockengut  $W_{TG}$  (Gl. A.11), pro kg Frischgut  $W_{FG}$  (Gl. A.12) und pro kg Trockensubstanz  $W_{TS}$  (Gl. A.13) unterschieden.



### Eintrocknungsverhältnis und spezifischer Wasserentzug

Der nicht-lineare Zusammenhang von Eintrocknungsverhältnis  $E$  und spezifischem Wasserentzug pro kg Trockengut  $W_{TG}$  in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Frischgutes ist in **Abb. 2.1** exemplarisch für drei Feuchtegehalte des Trockengutes dargestellt. Das Eintrocknungsverhältnis (und auch der spez. Wasserentzug pro kg Trockengut) werden viel stärker durch den Anfangsfeuchtegehalt (des Frischgutes) als durch den Endfeuchtegehalt (des Trockengutes) bestimmt.



**Abb. 2.1:** Eintrocknungsverhältnis und spezifischer Wasserentzug pro kg Trockengut (TG) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Frischgutes.

Die Unterschiede sollen anhand eines Beispiels quantifiziert werden. Bei der Trocknung von 80 % (FG) auf 10 % (TG) müssen 3,5 kg Wasser pro kg Trockengut entzogen werden:

$$\text{Eintrocknungsverhältnis: } E = \frac{100\% - F_{TG}}{100\% - F_{FG}} = \frac{100\% - 10\%}{100\% - 80\%} = 4,5 \quad (2.1)$$

$$\text{Spez. Wasserentzug pro kg Trockengut: } W_{TG} = E - 1 = 3,5 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG} \quad (2.2)$$

Bei Trocknung von 80 % (FG) auf 5 % (TG) ergeben sich  $3,75 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG}$ . Ein um 5 % kleinerer Feuchtegehalt des Trockengutes erfordert folglich einen um ca. 7 % größeren Wasserentzug. Liegt der FG-Feuchtegehalt hingegen bei 85 %, so müssen bei Trocknung auf 10 % TG-Feuchtegehalt  $5,0 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG}$  entzogen werden:

$$\text{Eintrocknungsverhältnis: } E = \frac{100\% - F_{TG}}{100\% - F_{FG}} = \frac{100\% - 10\%}{100\% - 85\%} = 6,0 \quad (2.3)$$

$$\text{Spez. Wasserentzug pro kg Trockengut: } W_{TG} = E - 1 = 5,0 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG} \quad (2.4)$$

Ein um 5 % größerer Feuchtegehalt des Frischgutes erfordert in diesem Beispiel folglich einen um ca. 43 % größeren Wasserentzug.

Die **Abb. 2.1** zugrunde liegenden Zahlenwerte sind im Anhang für einen Feuchtegehalt des Trockengutes von 10 % dargestellt (**Tabelle A.2**). Neben dem Eintrocknungsverhältnis und dem spez. Wasserentzug pro kg Trockengut  $W_{TG}$  enthält die Tabelle auch den spez. Wasserentzug pro kg Frischgut  $W_{FG}$ . Auf eine Auflistung von Zahlenwerten für andere Feuchtegehalte des Trockengutes wurde verzichtet. Bei Bedarf können entsprechende Werte mit den erläuterten Formeln berechnet werden.

### Feuchtegehalte von Arznei- und Gewürzpflanzen

Nach dem Europäischen Arzneibuch darf der Feuchtegehalt getrockneter Arzneipflanzen max. 8 – 12 % betragen (EAB, 2016). Frischgut- und Trockengut-Feuchtegehalte ausgewählter Pflanzenarten ( $F_{FG}$  bzw.  $F_{TG}$ ) zeigt **Tabelle 2.2**. Das Eintrocknungsverhältnis  $E$  und der spezifische Wasserentzug pro kg Trockengut  $W_{TG}$  wurden jeweils berechnet.

**Tabelle 2.2:** Feuchtegehalte von Frischgut ( $F_{FG}$ ) und Trockengut ( $F_{TG}$ ), Eintrocknungsverhältnis ( $E$ ) sowie spez. Wasserentzug pro kg Trockengut ( $W_{TG}$ ) für ausgewählte Pflanzenarten.

Pflanzenart	$F_{FG}$ %	$F_{TG}$ %	$E$ –	$W_{TG}$ $\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}}$	Anmerkungen
Baldrian	75	9,9	3,60	2,60	Wurzelstöcke
Goldrute	67	8,5	2,77	1,77	Ganzpflanze
Johanniskraut	69	8,2	2,96	1,96	Blühhorizont
Kamille	78	8,9	4,14	3,14	Blüten ohne Kraut
Kapuzinerkresse	84	8,7	5,70	4,70	blühendes Kraut
Melisse	78	10,4	4,08	3,08	Ganzpflanze
Mutterkraut	74	8,2	3,53	2,53	Blühhorizont
Pfefferminze	80	11,7	4,42	3,42	Ganzpflanze
Rosenwurz	75	8,3	3,67	2,67	Wurzelstöcke
Spitzwegerich	85	9,2	6,05	5,05	Blätter

Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015)

Die in der Praxis ermittelten Werte des Frischgut-Feuchtegehalts liegen zwischen 67 % (Goldrute) und 85 % (Spitzwegerich), die Trockengut-Feuchtegehalte bei 8,2 – 11,7 %. Goldrute hat das kleinste Eintrocknungsverhältnis (2,77) und benötigt damit den kleinsten spez. Wasserentzug ( $1,77 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG}$ ), Kapuzinerkresse ( $5,70$  bzw.  $4,70 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG}$ ) und Spitzwegerich ( $6,05$  bzw.  $5,05 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TG}$ ) weisen die größten Werte auf.

Bei Kamille wurde der FG-Feuchtegehalt nach der Blütentrennung ermittelt. Die FG-Feuchtegehalte können je nach Ernteschnitt und Erntezeit (morgens, mittags, abends) variieren. Abweichungen im Frischgut-Feuchtegehalt von  $\pm 2$  % pro Gutart sind möglich. Der TG-Feuchtegehalt von Pfefferminze ist für Blätter angegeben, die als Tee verwendet werden.

## Trocknungstemperaturen und Trocknungsdauern

In **Tabelle 2.3** sind Trocknungstemperaturen und Trocknungsdauern für unterschiedliche Pflanzenarten dargestellt. Die Trocknungstemperaturen liegen zwischen 30 °C und 45 °C. Für die Flächentrocknung wurden in der Praxis durchschnittliche Trocknungsdauern von 73 h (ca. drei Tage, z.B. Mutterkraut) bis 240 h (ca. zehn Tage, Kapuzinerkresse) ermittelt.

**Tabelle 2.3:** *Trocknungstemperaturen und Trocknungsdauern bei der Flächentrocknung.*

Pflanzenart	Trocknungstemperatur (°C)		Trocknungsdauer (h)		
	min	max	min	max	Ø
Baldrian	30	40	92	100	96
Goldrute	40	45	75	85	80
Johanniskraut	40	45	115	125	120
Kamille	35	42	72	84	78
Kapuzinerkresse	35	45	230	280	240
Melisse	40	45	78	82	80
Mutterkraut	40	45	70	76	73
Pfefferminze	40	45	90	102	96
Rosenwurz	30	45	110	130	120
Spitzwegerich	40	45	72	80	76

Quelle: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

Die Trocknungsdauer kann erheblich variieren. Ursache hierfür sind wechselnde klimatische Bedingungen und die Betriebsweise des jeweiligen Trockners. Insbesondere bei kalten Außenluftbedingungen und voller Auslastung der gesamten Trocknungsanlage kann es vorkommen, dass die zur Verfügung stehende Heizleistung nicht ausreicht. Dies hat zwangsläufig eine längere Trocknungsdauer zur Folge, worauf mit einer Reduzierung der Schichthöhe reagiert werden muss. Eine zur Energieeinsparung zeitweise unterbrochene Trocknung ("*intermittent drying*") hat sich bei Arznei- und Gewürzpflanzen nicht bewährt und würde zur Verlängerung der Rostliegezeit und der Trocknungsdauer führen.

## Spezifische Frischgut-Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche

Bei der Flächentrocknung wird das frische Erntegut auf Trocknungsrosten aufgebracht und mit Hilfe von Ventilatoren belüftet bzw. getrocknet. Die Schichthöhen variieren je nach Pflanzenart, Trocknungstemperatur und spezifischer Luftmenge pro m<sup>2</sup> Rostfläche.<sup>4</sup> Die Schichthöhen und auch die Schüttdichten verändern sich im Verlauf der Trocknung. Dies hat Auswirkungen auf das Betriebsverhalten und den Energiebedarf der Ventilatoren.

Auf der Basis von Praxisangaben ermittelte Werte für die Schichthöhe, die Schüttdichte und die spezifische Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche (jeweils Frischgut) sind in **Tabelle 2.4** dargestellt. Die Schichthöhen des aufgebrauchten Frischgutes liegen zwischen 0,40 m (Kapuzinerkresse)

<sup>4</sup> Gemeint ist der spezifische Luftvolumenstrom pro m<sup>2</sup> Rostfläche. Die Bezeichnungen Luftmenge und Luftvolumenstrom werden in der Praxis synonym verwendet.

und bis zu 1,30 m (Johanniskraut). Die größten Schüttdichten haben Wurzelrogen wie z.B. Baldrian (bis zu 235  $kg/m^3$ ) und Kamilleblüten (bis zu 259  $kg/m^3$ ).

**Tabelle 2.4:** Schichthöhe, Schüttdichte und spezifische Frischgut-Belegung pro  $m^2$  Rostfläche für ausgewählte Pflanzenarten.

Pflanzenart	Schichthöhe FG		Schüttdichte FG		Spez. Belegung FG	
	m		$kg_{FG}/m^3$		$kg_{FG}/m^2$	
	min	max	min	max	min	max
Baldrian	0,50	0,70	193	235	97	164
Goldrute	0,50	0,70	123	141	62	99
Johanniskraut	1,00	1,30	66	72	66	94
Kamille	0,50	0,75	239	259	120	195
Kapuzinerkresse	0,40	0,50	127	152	51	76
Melisse	1,00	1,20	80	93	80	112
Mutterkraut	0,50	0,70	165	195	82	137
Pfefferminze	0,80	1,20	99	108	80	130
Rosenwurz	0,40	0,75	193	223	77	167
Spitzwegerich	0,50	0,75	159	178	79	134

Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

Die Werte der spezifischen Frischgut-Belegung pro  $m^2$  Rostfläche variieren von 51  $kg/m^2$  (Kapuzinerkresse) bis zu 195  $kg/m^2$  (Kamilleblüten). Entsprechende Werte nach der Trocknung (Schichthöhe, Schüttdichte und spezifische Trockengut-Masse pro  $m^2$  Rostfläche) sind in **Tabelle C.1** im Anhang dargestellt. Vergleichsweise schnell trocknende Pflanzenarten (z.B. Kamilleblüten) erlauben eine größere spezifische Frischgut-Belegung als schwieriger zu trocknende Pflanzenarten (z.B. Ganzpflanzen mit Stängeln, Wurzelrogen), die im Allgemeinen auch eine längere Trocknungsdauer benötigen (**Tabelle 2.3**).

### Nutzungsdauern, Erntezeiträume und Ernteschnitte

Arznei- und Gewürzpflanzen werden auf Flächen unterschiedlicher Größe angebaut und zu unterschiedlichen Zeiten geerntet, oft in zwei oder drei Ernteschnitten pro Jahr. Der jeweilige Erntezeitraum und die Anzahl der Ernteschnitte werden durch verschiedene äußere Bedingungen beeinflusst. Dabei spielen insbesondere auch veränderliche klimatische Bedingungen und witterungsbedingte Einflüsse eine Rolle. Die Nutzungsdauern (ein- oder mehrjährig) und die Anzahl der Ernteschnitte sind in **Tabelle B.4** im Anhang aufgeführt.

Die durchschnittlichen Erntezeiträume der einzelnen Schnitte sind in **Tabelle 2.5** dargestellt. Je nach Standort, Sorte und klimatischen Gegebenheiten können die Erntezeiträume und auch die Anzahl der Ernteschnitte von Jahr zu Jahr etwas variieren. Bei Baldrian sind Herbst- und Frühjahrsanpflanzungen möglich, die Ernte erfolgt im Herbst. Bei Johanniskraut sind je nach Sorte ein bis zwei Ernteschnitte möglich.

**Tabelle 2.5:** Erntezeiträume der einzelnen Schnitte für unterschiedliche Pflanzenarten.

Pflanzenart	Schnitt 1		Schnitt 2		Schnitt 3	
	von	bis	von	bis	von	bis
Baldrian	15.10.	30.11.	-	-	-	-
Goldrute	15.08.	25.08.	-	-	-	-
Johanniskraut (frühe Sorte)	24.06.	05.07.	01.09.	10.09.	-	-
Johanniskraut (späte Sorte)	10.07.	20.07.	-	-	-	-
Kamille (HA)	25.05.	15.06.	15.06.	30.06.	-	-
Kamille (FA)	25.06.	15.07.	25.07.	15.08.	-	-
Kapuzinerkresse	10.08.	25.08.	10.09.	20.09.	05.10.	15.10.
Melisse	25.05.	20.07.	25.07.	10.09.	-	-
Mutterkraut	19.06.	02.07.	-	-	-	-
Pfefferminze (2. Standjahr)	30.05.	20.07.	10.08.	20.09.	10.10.	01.11.
Pfefferminze (1. Standjahr)	20.07.	10.08.	20.09.	20.10.	-	-
Rosenwurz	15.10.	30.10.	-	-	-	-
Spitzwegerich (HA)	07.05.	20.05.	25.07.	05.08.	25.10.	02.11.
Spitzwegerich (FA)	15.06.	25.06.	20.08.	30.08.	-	-

FA = Frühljahrsaussaat; HA = Herbstsaussaat; Quelle: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

Herbstsaussaaten (HA) und Frühljahrsaussaaten (FA) von Kamille erfordern unterschiedliche Erntezeiträume. Kapuzinerkresse ist eine einjährige Kultur, nicht winterhart und kann daher nur im Frühjahr ausgesät werden. Bei Mutterkraut hängt die Anzahl der Ernteschnitte vom Ernteverfahren und von der Schnitthöhe ab. Bei Pfefferminze sind im zweiten Standjahr drei Ernteschnitte möglich. Die Ernte von Rosenwurz erfolgt im dritten Standjahr.

### Ernteerträge

Die Ernteerträge von Arznei- und Gewürzpflanzen unterscheiden sich erheblich, und zwar nicht nur je nach Pflanzenart, sondern auch von Schnitt zu Schnitt. Durchschnittlich zu erwartende Trockengut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt sind in **Tabelle 2.6** aufgeführt. Die entsprechenden Frischgut-Erträge, die sich über das jeweilige Eintrocknungsverhältnis aus **Tabelle 2.2** errechnen lassen, sind in **Tabelle B.5** im Anhang dargestellt.

Die Angaben für Mutterkraut beruhen auf einer Pflückernte; durch Häckselernte der Ganzpflanze (Blühhorizont) kann ein ca. fünfmal größerer Ertrag eingebracht werden. Bei Pfefferminze ist das zweite Standjahr das Hauptnutzungsjahr. Im dritten Standjahr bildet sich mehr Unkraut aus, und der Ertrag ist deutlich kleiner. Bedingt durch veränderliche Witterungsverhältnisse schwanken die Ernteerträge der einzelnen Pflanzenarten von Jahr zu Jahr. Auch unterschiedliche Bodenqualitäten und insbesondere das jeweils verwendete Saatgut haben einen großen Einfluss auf die Ernteerträge. Die Regeneration eines Feldes von Schnitt zu Schnitt ist außerdem abhängig von der Pflück- bzw. Schnitttiefe. In der Praxis ermittelte Schwankungsbreiten der Frischgut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt sind **Tabelle B.6** im Anhang zu entnehmen.

**Tabelle 2.6:** Durchschnittliche Trockengut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau.

Pflanzenart	Trockengut-Ertrag pro Ernteschnitt (t/ha)									TG-Ertrag pro Jahr t(ha-a)
	1. Standjahr			2. Standjahr			3. Standjahr			
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
Baldrian	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0
Goldrute	5,0	-	-	5,0	-	-	4,0	-	-	4,67
Johanniskraut	1,5	0,5	-	2,0	0,5	-	-	-	-	2,25
Kamille	0,28	0,17	-	-	-	-	-	-	-	0,45
Kapuzinerkresse	1,4	0,6	0,2	-	-	-	-	-	-	2,2
Melisse	3,0	1,5	-	3,0	2,0	-	2,5	1,5	-	4,5
Mutterkraut	0,4	-	-	0,4	-	-	-	-	-	0,4
Pfefferminze	2,2	1,4	-	2,8	2,2	0,6	2,0	0,8	-	4,0
Rosenwurz	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-	1,7
Spitzwegerich	2,5	2,0	0,5	3,0	2,0	0,5	1,5	1,0	0,5	4,5

TG = Trockengut; S = Ernteschnitt-Nr.; Goldrute: Blüte und Kraut; Johanniskraut: 2. Schnitt nur bei frühen Sorten; Mutterkraut: Pflückernte (durch Häckselerte der Ganzpflanze sind ca. fünfmal größere Erträge möglich); Rosenwurz: TG-Ertrag nicht repräsentativ. Spitzwegerich: 3. Schnitt nur bei Frühjahrssaat; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

## 2.4 Kombination unterschiedlicher Kulturen

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sollten Trocknungsanlagen im Verlauf der Ernteperiode maximal ausgelastet werden. Dies erfordert möglichst optimale Kombinationen von zu trocknenden Produkten. Wenn mehrere Chargentrockner zur Verfügung stehen, kann flexibel auf unterschiedliche Erntemengen reagiert werden. Die erforderliche Trocknungsleistung (bzw. der angestrebte Durchsatz an Trocknungsgut in einem bestimmten Zeitraum) ergibt sich aus der Anbaufläche und aus zeitlichen Verteilung des Erntegutanfalls der einzelnen Arten. Dabei hat sowohl die gesamte Größe als auch der Teil der Anbaufläche, der pro Tag abgeerntet werden kann, erheblichen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf der einzelnen Ernteschnitte. Durch Abstimmung des Anbauplans mit dem Trocknungsplan kann bei Arzneipflanzen eine recht gute Auslastung der Trocknungsanlage während der Trocknungsperiode erreicht werden.

In diesem Abschnitt wird die Berechnung täglicher Erntemengen und der für die Trocknung benötigten Rostflächen beispielhaft erläutert. Hierfür wird zunächst von der Erntefläche ausgegangen, die mit den zur Verfügung stehenden Erntemaschinen und Anlagen zur Vorbehandlung bewältigt werden kann. Ist die insgesamt benötigte Rostfläche bekannt, so kann die Anzahl der pro Tag erforderlichen Trocknungsroste verringert werden, indem die einzelnen Roste mit möglichst großen Frischgutmengen belegt werden. Dabei sind die bereits erläuterten gutartabhängigen Unterschiede der spezifischen Frischgut-Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche zu beachten. Für Praktiker ist die Kenntnis entsprechender Werte deshalb von besonderer Relevanz (**Tabelle 2.4**).

## Ernte- und Trocknungspläne

Eine vereinfachte Darstellung der Erntezeiträume im Verlauf der Trocknungsperiode zeigt **Abb. 2.2**. Entsprechende Balkenpläne werden in der Praxis benötigt, um Trocknungspläne für den Verlauf der Ernteperiode erstellen zu können. Um die Darstellung unabhängig von einzelnen Jahren gestalten zu können, wurden die einzelnen Wochen vom 1. Januar an gezählt.<sup>5</sup> Jedes farbige markierte Kästchen entspricht einer Woche, in der die jeweilige Pflanzenart geerntet wird (**Tabelle 2.5**). In den einzelnen Kästchen sind berechnete Frischgutmengen eingetragen, die im Verlauf der Trocknungsperiode 2015 bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. pro Woche geerntet wurden. Für die Trocknung sind gegebenenfalls einige weitere Tage erforderlich (Markierung +T).

Die Ernteflächen, Erntemengen und Ernteerträge bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. im Jahr 2015 sind in **Tabelle C.2** im Anhang dargestellt. Bei Goldrute (123 %), Melisse (137 %) und Mutterkraut (118 %) wurden 2015 überdurchschnittliche Erträge erzielt. Bei anderen Gutarten lagen die Erträge hingegen zum Teil deutlich unter den Erwartungen. Dies gilt für Kamille (92 %), Kapuzinerkresse (66 %), Pfefferminze (86 %) und Spitzwegerich (58 %), aber insbesondere für Baldrian (26 %) und Johanniskraut (37 %). Die Werte belegen die großen Schwankungen der Ernteerträge, mit denen in der Praxis gerechnet werden muss.

Der in **Abb. 2.2** dargestellte Balkenplan veranschaulicht folgende Zusammenhänge:

- Manche Gutarten werden nur in relativ kleinen Zeitfenstern von jeweils ca. zwei bis drei Wochen getrocknet, z.B. Goldrute, Kapuzinerkresse, Mutterkraut, Spitzwegerich.
- Bei manchen Gutarten schließen sich die Ernte- bzw. Trocknungszeiträume der jeweiligen Sorten oder Aussaaten unmittelbar oder mit einer kurzen Pause aneinander an. Dies ist z.B. bei Johanniskraut (frühe und späte Sorte) und bei Kamille (Herbst- und Frühjahrsaussaat) der Fall.
- Bei Melisse folgt die Trocknung des zweiten Ernteschnitts unmittelbar nach der Trocknung des ersten. Auch bei Pfefferminze schließen sich die Trocknungszeiträume der einzelnen Ernteschnitte unmittelbar aneinander an. Dabei sind zeitliche Überschneidungen möglich.
- Die Trocknungszeiträume der einzelnen Pflanzenarten überschneiden sich im Verlauf der Ernteperiode. Sollen mehrere Pflanzenarten parallel getrocknet werden, so sind mehrere Trockner erforderlich.

## Tägliche Erntemengen, Ernteflächen und Rostflächen im großflächigen Anbau

Die Agrarprodukte Ludwigshof e.G. betreibt am Standort Rockendorf vier Trocknungshallen mit einer Rostfläche von insgesamt ca. 1.218 m<sup>2</sup>. Die Rostfläche der einzelnen Hallen liegt zwischen ca. 300 m<sup>2</sup> und 317 m<sup>2</sup>. In den Hallen befinden sich insgesamt 27 Flächentrockner (sechs bis acht Trocknungsroste pro Halle). Die Größe der einzelnen Roste variiert zwischen 37,5 m<sup>2</sup> und 52,8 m<sup>2</sup>, die durchschnittliche Rostgröße beträgt ca. 45 m<sup>2</sup>.

<sup>5</sup> Der Beginn der einzelnen Kalenderwochen ändert sich von Jahr zu Jahr. Die dargestellten Wochen stimmen nicht mit Kalenderwochen überein.



Monat	Mai			Juni			Juli			August			September			Oktober			November											
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1. Tag (Montag)	07.05.			04.06.			02.07.			30.07.			03.09.			01.10.			29.10.											
<b>Woche</b>																														
<b>Pflanzenart</b>																														
Baldrian																														
Goldrute																														
Johanniskraut (früh)																														
Johanniskraut (spät)																														
Kamille (HA)																														
Kamille (FA)																														
Kapuzinerkresse																														
Melisse																														
Mutterkraut																														
Pfefferminze (2. Jahr)																														
Pfefferminze (1. Jahr)																														
Rosenwurz																														
Spitzwegerich (HA)																														
Spitzwegerich (FA)																														
Summe Frischgut (t)	41	41	76	216	232	269	271	280	193	197	155	199	224	185	146	174	131	118	60	63	50	51	71	88	61	44	6	6	6	4

Zahlenwerte: pro Woche geerntete Frischgutmengen in t (berechnet);  
 früh = frühe Sorte; spät = späte Sorte; FA = Frühjahrssaat; HA = Herbstsaat; +T = weitere Trocknungstage;  
 durchschnittlich zu erwartende Erntezeiträume der einzelnen Gutarten vgl. Tabelle 2.5;  
 Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Abb. 2.2:** Erntezeiträume und berechnete Erntemengen (Frischgut) im Verlauf der Trocknungsperiode 2015 bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G.

Die Wärmeversorgung der einzelnen Roste erfolgt mit dezentralen Warmluftzeugern (Erdgas, max. Nennwärmeleistung 107 kW). Zur Nutzung der Abwärme eines in der Nähe befindlichen Blockheizkraftwerks (Biogas-BHKW, elektrische Nennleistung 366 kW, nutzbare Wärmeleistung 425 kW) sind zusätzlich mehrere Luft-Wasser-Wärmeübertrager installiert (Wärmeleistung jeweils ca. 50 kW). Halle 4 verfügt außerdem über zwei Wärmepumpen (Wärmeleistung jeweils max. ca. 240 kW).

Die Größe der Anbaufläche, die pro Tag abgeerntet werden kann, wird maßgeblich bestimmt von der zur Verfügung stehenden Erntetechnik (z.B. Kamillepflückmaschinen, Langgutlader, Transportfahrzeuge). Darüber hinaus müssen Maschinen und Anlagen zur Vorbehandlung der frisch geernteten Pflanzen in ausreichender Kapazität vorhanden sein. Bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. können pro Tag bis zu 30 Hektar Kamille abgeerntet werden. Bei Baldrian ist die Leistung der Wurzeldrogenwäsche der begrenzende Faktor in der Feldernte. Durchschnittlich kann etwa ein Hektar Baldrian pro Tag geerntet werden. Je nach Witterungsbedingungen muss der Anbauer über eine Vorratsrodung entscheiden, um die Wurzelwäsche maximal auszulasten. Die Ernte von Ganzpflanzen (z.B. Goldrute, Kapuzinerkresse, Melisse, Pfefferminze, Spitzwegerich) erfolgt im Parallelverfahren mit Langgutlader und Transportfahrzeug.

Ist die Größe der täglich möglichen Erntefläche bekannt, so lässt sich die benötigte Rostfläche basierend auf den Frischgut-Erträgen pro Ernteschnitt und der spezifischen Rostbelegung berechnen. Entsprechende Beispielrechnungen für Kamille, Baldrian und Kapuzinerkresse sind in **Tabelle 2.7** dargestellt. Dabei wurde eine Rostgröße von jeweils 50 m<sup>2</sup> angenommen. Die erforderliche Anzahl der Trocknungsroste kann zunächst durch einfache Division ermittelt werden. Dabei ergeben sich im Allgemeinen keine ganzzahligen Werte. Es sollte daher besser von der zur Verfügung stehenden Anzahl der Trocknungsroste ausgegangen werden (**Tabelle 2.8**). Die Berechnung erfolgt analog zu **Tabelle 2.7**, nur in umgekehrter Reihenfolge.

Aus Gründen der Auslastung ist grundsätzlich eine maximale Belegung der einzelnen Roste anzustreben. Insbesondere bei relativ kleinen Frischgut-Erträgen kann dadurch die Anzahl der Roste reduziert werden. Dies ist in der Beispielrechnung für Kamille möglich. Die Planung der pro Tag zu belegenden Rostflächen muss so erfolgen, dass die entsprechenden Frischgutmengen auch mit der zur Verfügung stehenden Technik bewältigt werden können.

In **Tabelle 2.8** ergibt sich für Kamilleblüten eine täglich erforderlich Erntefläche von ca. 28 – 32 ha. Bei Baldrian übersteigt die berechnete Erntefläche die durchschnittliche Kapazität der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (etwa ein Hektar pro Tag). Sollen die Trocknungsroste trotzdem maximal belegt werden, so müssen Baldrianwurzeln, wie bereits erwähnt, auf Vorrat gerodet werden. Täglich könnten bis zu 10 ha Kapuzinerkresse geerntet werden. Die Erntemengen werden jedoch durch die Anzahl der freien Trocknungsroste bestimmt. Außerdem wird für die Trocknung von Kapuzinerkresse vorzugsweise BHKW-Abwärme genutzt. Weitere Beispiele zur Ermittlung täglicher Erntemengen und Ernteflächen im großflächigen Anbau sind in **Tabelle C.3** im Anhang dargestellt. Für die einzelnen Gutarten wurde dabei eine Rostfläche von jeweils insgesamt 200 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt.

**Tabelle 2.7:** Berechnung von Rostflächen für die Flächentrocknung (exemplarisch).

Pflanzenart		Kamilleblüten		Baldrianwurzeln		Kapuzinerkresse	
Größe	Einheit	min	max	min	max	min	max
(1) Erntefläche pro Tag	ha	30		1,0		1,0	
(2) FG-Ertrag pro Ernteschnitt	t/ha	0,6	1,4	1,8	10,8	2,3	10,2
Ernteschnitt-Nr.	–	S2	S1	S1	S1	S2	S1
(3) FG-Masse pro Tag	t	18,0	42,0	1,8	10,8	2,3	10,2
(4) spez. Rostbelegung FG	kg/m <sup>2</sup>	120	195	97	164	51	76
(5) benötigte Rostfläche	m <sup>2</sup>	150	215	19	66	45	134
(6) Anzahl Roste mit 50 m <sup>2</sup> aufgerundet	–	3,0	4,3	0,4	1,3	0,9	2,7
	–	3	5	1	2	1	3

FG = Frischgut; (1) Annahme; (2) aus **Tabelle C.3**; (3) berechnet; (4) aus **Tabelle 2.4**; (5, 6) berechnet; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Tabelle 2.8:** Ermittlung täglicher Ernteflächen für die Flächentrocknung (Rostfläche: 50 m<sup>2</sup>, exemplarisch).

Pflanzenart		Kamilleblüten		Baldrianwurzeln		Kapuzinerkresse	
Größe	Einheit	min	max	min	max	min	max
(1) Anzahl Roste mit 50 m <sup>2</sup>	–	2	4	1	2	1	3
(2) gesamte Rostfläche	m <sup>2</sup>	100	200	50	100	50	150
(3) maximale spez. Rostbelegung FG	kg/m <sup>2</sup>	195		164		76	
(4) FG-Masse pro Tag	t	19,5	39,0	8,2	16,4	3,8	11,4
(5) FG-Ertrag pro Ernteschnitt	t/ha	0,6	1,4	1,8	10,8	2,3	10,2
Ernteschnitt-Nr.	–	S2	S1	S1	S1	S2	S1
(6) erforderliche Erntefläche	ha	32,5	27,9	4,6	1,5	1,7	1,1

FG = Frischgut; (1) Annahme; (2) berechnet; (3) aus **Tabelle 2.4**; (4) berechnet; (5) aus **Tabelle C.3**; (6) berechnet; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

### Auslastung von Flächentrocknern

Hinsichtlich der Kombination unterschiedlicher Kulturen sind zahlreiche Varianten möglich. Generell sollten bei chargenweisen Trocknungsverfahren mehrere Trockner zur Verfügung stehen, um flexibel auf unterschiedliche Erntemengen reagieren zu können. Um im gesamten Verlauf der Ernteperiode eine möglichst lückenlose Auslastung zu erreichen, sollten mehrere Gutarten angebaut werden. Dabei ist es wichtig, die Anbau- und Trocknungspläne aufeinander abzustimmen. Die Zeiten der Aussaat bzw. Anpflanzung (Herbst oder Frühjahr) die Nutzungsdauern (ein- oder mehrjährig), die Erntezeiträume, die Ernteerträge und die Anzahl der Ernteschnitte sind zu berücksichtigen.

Monat	Mai		Juni			Juli			August			September			Oktober			November														
1. Tag (Montag)	07.05.		04.06.			02.07.			30.07.			03.09.			01.10.			29.10.														
Pflanzenart / Woche	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
Baldrian																										1	1	1	1	1	1	
Melisse				6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Anzahl Roste (45 m <sup>2</sup> )				6	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Goldrute																																
Kamille (HA)				5	12	12	11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Kamille (FA)																																
Kapuzinerkresse																																
Mutterkraut																																
Rosenwurz																																
Anzahl Roste (45 m <sup>2</sup> )				5	12	12	11	7	10	3	3	2	2	2	3	6	4															
Johanniskraut (früh)																																
Johanniskraut (spät)																																
Pfefferminze (2. Jahr)																																
Pfefferminze (1. Jahr)																																
Spitzwegerich (HA)																																
Spitzwegerich (FA)																																
Anzahl Roste (45 m <sup>2</sup> )				4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Summe Anzahl Roste	4	4	4	11	26	26	30	26	28	21	21	26	22	22	24	18	20	18	15	8	12	5	6	9	10	8	1	1	1	1	1	

**Abb. 2.3:** Berechnete Anzahl Roste für die Kombinationen Melisse und Baldrian (oben), Kamille, Mutterkraut, Goldrute, Kapuzinerkresse und Rosenwurz (Mitte) sowie Pfefferminze, Johanniskraut und Spitzwegerich (unten).

Zahlenwerte: pro Woche benötigte Anzahl Roste für Frischgut (berechnet);  
 früh = frühe Sorte; spät = späte Sorte; FA = Frühjahrssaat; HA = Herbstsaat; +T = weitere Trocknungstage;  
 durchschnittlich zu erwartende Erntezeiträume der einzelnen Gutarten vgl. Tabelle 2.5;  
 Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

Die Trocknungspläne müssen so erstellt werden, dass ausreichend Zeit zur Belegung, Beräumung und Reinigung der einzelnen Roste zur Verfügung steht. Je nach Rostgröße und Pflanzenart können die Belegung und auch die Beräumung mindestens jeweils 30 – 60 min in Anspruch nehmen. Bei der Belegung muss die Schichthöhe manuell ausgeglichen werden. Bei Wechseln der Pflanzenart, aber auch bei unterschiedlichen Chargen oder Sorten innerhalb einer Pflanzenart, sollten die Roste gereinigt werden (besenrein).

Die im Verlauf der Trocknungsperiode 2015 bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. geernteten Frischgutmengen wurden bereits in **Abb. 2.2** dargestellt. Im Unterschied dazu bezeichnen die Zahlwerte in **Abb. 2.3** die Anzahl der Roste, die pro Woche für die Frischgut-Belegung erforderlich sind (durchschnittliche Rostgröße:  $45 \text{ m}^2$ ). Die Berechnung erfolgte ähnlich zu der anhand von **Tabelle 2.7** erläuterten Vorgehensweise.<sup>6</sup>

- Würden nur Melisse und Baldrian angebaut, so wären maximal 8 Trocknungsroste erforderlich (ca.  $360 \text{ m}^2$ ). Von Mitte September bis Mitte Oktober ergäbe sich eine trocknungsfreie Zeit von ca. vier Wochen. Für Baldrian würde pro Woche durchschnittlich nur ein Rost für die Frischgut-Belegung benötigt.
- Für Kamilleblüten sind bei den zugrunde gelegten Ernteflächen hingegen bereits insgesamt 12 Trocknungsroste erforderlich. Die deutlich größere Rostfläche (ca.  $540 \text{ m}^2$ ) resultiert insbesondere aus den großen Erntemengen der Herbstaussaat (1. Schnitt ca. 25. Mai – 15. Juni); der 2. Schnitt (ca. 15. – 30. Juni) schließt sich unmittelbar an. Für die Frühjahrsaussaat von Kamille sowie für Mutterkraut, Goldrute, Kapuzinerkresse und Rosenwurz werden deutlich kleinere Rostflächen benötigt.
- Betrachtet man die Kombination Pfefferminze, Johanniskraut und Spitzwegerich, so sind maximal sogar 18 Trocknungsroste erforderlich (ca.  $810 \text{ m}^2$ ). Bei Pfefferminze stehen für die Ernte des 1. Standjahres (1. Schnitt) nur etwa drei Wochen zur Verfügung (ca. 20. Juli – 10. August). Die in diesem Zeitraum benötigte Rostfläche ist entsprechend groß. Durch den Anbau von Johanniskraut und Spitzwegerich können im Verlauf der Trocknungsperiode weitere Roste genutzt werden.

Insgesamt zeigt die Auswertung von Ende Mai (KW 22) bis Ende August (KW 35) eine gute bis sehr gute Auslastung der Trocknungsanlage.<sup>7</sup> Dabei wurden jedoch nur die Rostflächen abgeschätzt, die für die Frischgut-Belegung benötigt werden. Eine Umlagerung bzw. Zusammenlegung auf einer insgesamt kleineren Rostfläche, die bei zahlreichen Pflanzenarten nach zwei oder drei Trocknungstagen sinnvoll ist, wurde nicht berücksichtigt.

---

<sup>6</sup> Der Berechnung wurden folgende Daten zugrunde gelegt: die für die einzelnen Pflanzenarten im Jahr 2015 erzielten Ernteerträge nach **Tabelle C.2**, das jeweilige Eintrocknungsverhältnis nach **Tabelle 2.2**, durchschnittliche Trocknungsdauern in Tagen nach **Tabelle 2.3** (aufgerundet), eine jeweils maximale spezifische Frischgut-Belegung pro  $\text{m}^2$  Rostfläche nach **Tabelle 2.4** sowie die Erntezeiträume der einzelnen Schnitte nach **Tabelle 2.5**.

<sup>7</sup> In KW 24 und in KW 28 übersteigt die berechnete Summe der Roste die der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. zur Verfügung stehende Anzahl (27 Flächentrockner). Diese Diskrepanz kann durch die vorzugsweise Nutzung größerer Roste (max.  $52,8 \text{ m}^2$ ) ausgeglichen werden.

### Unterschiedliche Wassermengen und durchschnittliche Entfeuchtungsleistung

Wie bereits erläutert, weisen die Frischgut-Erträge pro Ernteschnitt und die Feuchtegehalte große produktspezifische Unterschiede auf. Daraus resultieren große Unterschiede der den Pflanzen insgesamt zu entziehenden Wassermengen, die sich über das jeweilige Eintrocknungsverhältnis berechnen lassen. Hierfür wird wiederum von der spezifischen Frischgut-Belegung pro  $m^2$  Rostfläche ausgegangen. Ist zusätzlich die zu erwartende Trocknungsdauer bekannt, so kann zunächst die durchschnittliche Entfeuchtungsleistung des Trockners abgeschätzt werden. Entsprechende Beispielrechnungen für Kamilleblüten, Baldrianwurzeln und Kapuzinerkresse (Ganzpflanzen) sind in **Tabelle 2.9** dargestellt. Dabei wurde eine Rostfläche von jeweils  $50 m^2$  zugrunde gelegt.

**Tabelle 2.9:** Insgesamt zu entziehende Wassermengen und durchschnittliche Entfeuchtungsleistungen bei der Flächentrocknung unterschiedlicher Pflanzenarten (Rostfläche:  $50 m^2$ , exemplarisch).

Pflanzenart		Kamilleblüten		Baldrianwurzeln		Kapuzinerkresse	
Größe	Einheit	min	max	min	max	min	max
(1) spez. Rostbelegung Frischgut (FG)	$kg/m^2$	120	195	97	164	51	76
(2) FG-Masse für $50 m^2$ Rostfläche	$kg$	6.000	9.750	4.850	8.200	2.550	3.800
(3) Eintrocknungsverhältnis (E)	–	4,14		3,60		5,70	
(4) Trockengut-Masse	$kg$	1.449	2.355	1.347	2.278	447	667
(5) zu entziehende Wassermenge	$kg$	4.551	7.395	3.503	5.922	2.103	3.133
(6) Trocknungsdauer	$h$	72	84	92	100	230	280
(7) durchschn. Entfeuchtungsleistung	$kg/h$	63	88	38	59	9	11

(1) aus **Tabelle 2.4**; (2) berechnet:  $m_{FG} = \rho_{FG} \cdot A_{Rost}$ ; (3) aus **Tabelle 2.2**;

(4) berechnet:  $m_{TG} = m_{FG} / E$ ; (5) berechnet:  $m_W = m_{FG} - m_{TG}$ ; (6) aus **Tabelle 2.3**;

(7) berechnet:  $\dot{m}_W = m_W / t$ ; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

Kamilleblüten sind vergleichsweise leicht zu trocknen. Daher können Roste von Flächentrocknern mit relativ großen Frischgutmengen belegt werden (bei entsprechend großen Luftmengen). Bei einer gleichzeitig kurzen Trocknungsdauer ergibt sich die größte durchschnittliche Entfeuchtungsleistung der drei dargestellten Pflanzenarten. Baldrian muss deutlich weniger Wasser entzogen werden, benötigt jedoch eine längere Trocknungsdauer. Unter den in **Tabelle 2.9** getroffenen Annahmen beträgt die durchschnittliche Entfeuchtungsleistung im Vergleich zu Kamille nur ca. 60 – 67 %.

Ein extremes Beispiel ist Kapuzinerkresse. Da das Eintrocknungsverhältnis sehr groß ist, und die Stängel der Ganzpflanzen ihr Wasser nur sehr langsam abgeben, können die Roste nur mit relativ kleinen Frischgutmengen belegt werden. In Verbindung mit der langen Trocknungsdauer ergibt sich eine sehr kleine durchschnittliche Entfeuchtungsleistung. Kapuzinerkresse sollte deshalb nach zwei oder drei Trocknungstagen umgelagert bzw. auf einer kleineren Rostfläche zusammengelegt werden.

### **Bewirtschaftung mehrerer Trocknungsroste**

Eine Zusammenlegung der angetrockneten Ware von zwei Rosten auf einem ist auch bei anderen Pflanzenarten möglich (z.B. bei Goldrute, Johanniskraut, Melisse, Pfefferminze oder Spitzwegerich). Da dann nur noch wesentlich weniger Trocknungsluft zu erwärmen ist, können erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden. Das Zusammenlegen muss jedoch möglichst gleichmäßig erfolgen. Insbesondere ist darauf zu achten, dass bei der Umlagerung evtl. vorhandene Feuchtenester nicht weitergetragen werden. Auch neue Feuchtenester, die durch eine unerwünschte Verdichtung der angetrockneten Ware entstehen können, sind zu vermeiden.

Bei der Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen gibt es mehrere Möglichkeiten zur Bewirtschaftung der Trocknungsroste. Im Anhang werden drei Beispiele dargestellt und erläutert (**Abb. C.1**, **Abb. C.2** und **Abb. C.3**).

Die beispielhaft für Kamille, Baldrian und Kapuzinerkresse erläuterten Zusammenhänge verdeutlichen die großen produktspezifischen Unterschiede, die bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen zu beachten sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn unterschiedliche Produkte in einer Anlage getrocknet werden. Es gibt eine zahlreiche Möglichkeiten, mit denen der Energiebedarf der Trocknungsanlagen reduziert werden kann. Neben der Umlagerung und Zusammenlegung beinhalten insbesondere lufttechnische Maßnahmen erhebliche Potenziale zur Effizienzsteigerung. Die Trocknung mit Teilumlufte, die Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern und die Reduzierung der Luftmenge werden in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Hierfür müssen zunächst jedoch einige trocknungstechnische und energetische Grundlagen erläutert werden.



### 3 Trocknungstechnische und energetische Grundlagen

Das Mollier  $h, Y$ -Diagramm für feuchte Luft besitzt zentrale Bedeutung für alle lufttechnischen Prozesse, so auch für die Trocknung.<sup>8</sup> Aufbau und Anwendung des Diagramms werden beschrieben, soweit es für das Verständnis des Leitfadens erforderlich ist (Abschnitt 3.1). Elementare Zustandsänderungen feuchter Luft werden am Beispiel der Trocknung im Teilumluft-Betrieb dargestellt und erläutert.

Konvektionstrockner sind Trockner, in denen erwärmte Luft als Trocknungsmedium eingesetzt wird. Der Lufttransport hat in Konvektionstrocknern mehrere Aufgaben zu erfüllen (Wärmetransport, Abtransport der Feuchtigkeit, Überwindung von Strömungswiderständen). Der Strömungswiderstand von Schüttungen bzw. dicken Schichten von Arzneipflanzen nimmt im Verlauf der Trocknung erheblich ab. Dies hat grundlegende Auswirkungen auf das Betriebsverhalten von Ventilatoren (Abschnitt 3.2).

Im Abschnitt 3.3 "Energetische Grundlagen" werden die für die Auslegung und Berechnung von Trocknungsanlagen erforderlichen Massen- und Energiebilanzen beschrieben. Die Erläuterung erfolgt am Beispiel eines Chargentrockners im reinen Frischluft-Betrieb. Bei der Ermittlung des Brennstoffbedarfs bzw. der zur Lufterwärmung erforderlichen Brennstoffleistung müssen die Heizwerte der unterschiedlichen Brennstoffe berücksichtigt werden. Wichtige Begriffe, Maßeinheiten, Berechnungsgleichungen und trockenungstechnische Kennzahlen werden erläutert. Da Trocknungsanlagen nicht nur thermische, sondern auch elektrische Energie benötigen, erfordert die Nutzung unterschiedlicher Energieträger und erneuerbarer Energiequellen eine primärenergetische Bewertung. Dies ist insbesondere bei der Nutzung von Blockheizkraftwerken und bei der Trocknung mit Wärmepumpen von Bedeutung.

Im Abschnitt 3.4 die wichtigsten Formeln und Bilanzgleichungen zur Berechnung trockenungstechnischer Kennzahlen aufgeführt. Abschnitt 3.5 enthält eine kurze Beschreibung von Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten. Auf eine Darstellung allgemeiner trockenungstechnischer Grundlagen wird verzichtet. Sorptionsisothermen, die sowohl für die Trocknung als auch für die Lagerung von Arznei- und Gewürzpflanzen eine große Bedeutung haben, werden in Anhang F erläutert.

#### 3.1 Mollier $h, Y$ -Diagramm für feuchte Luft

Nach einem Vorschlag von Richard Mollier (1923, 1929)<sup>9</sup> lassen sich Zustand und Zustandsänderungen feuchter Luft übersichtlich darstellen, wenn man die (auf 1 kg trockene Luft bezogene) Enthalpie der feuchten Luft über dem absoluten (ebenfalls auf 1 kg trockene Luft bezogenen) Wassergehalt aufträgt. Auf diese Weise repräsentiert die x-Achse (Wassergehalt) das Gesetz von der Erhaltung der Masse und die y-Achse (Enthalpie) das

---

<sup>8</sup> In der internationalen Literatur wird für den Wassergehalt der Luft seit einigen Jahren das Symbol  $Y$  verwendet. Das Symbol  $X$  steht üblicherweise für den (auf die reine Trockensubstanz bezogenen) Wassergehalt von Trocknungsgütern.

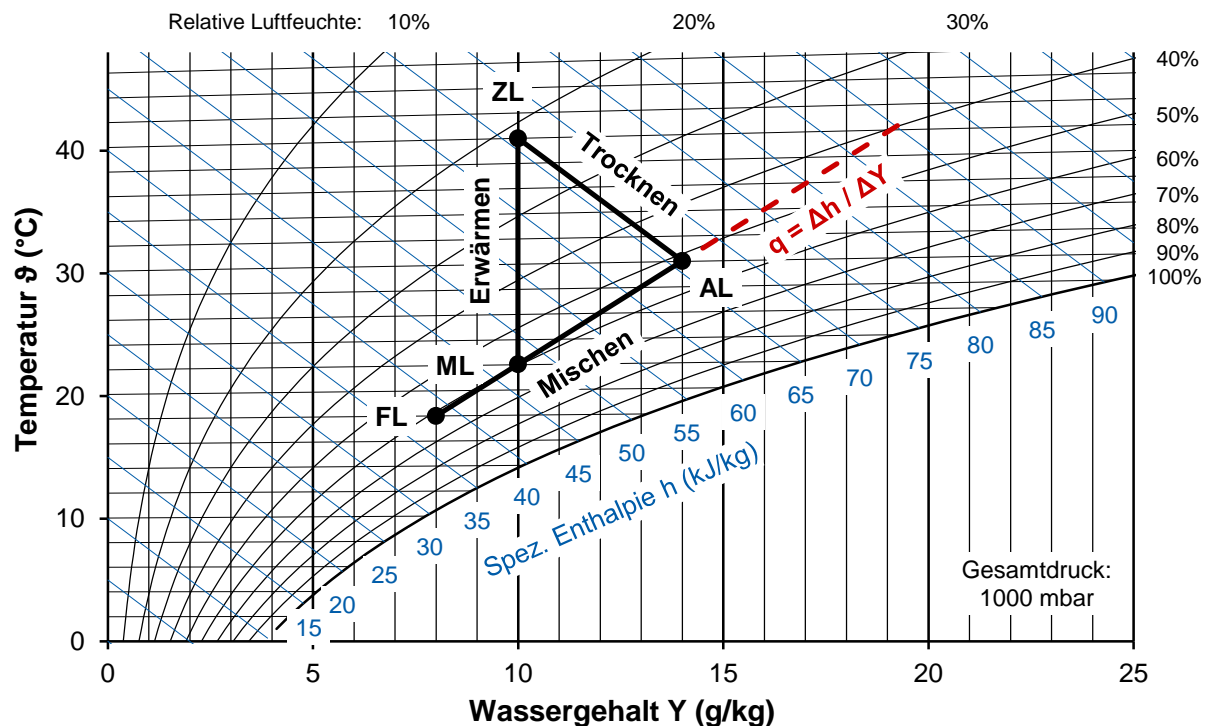
<sup>9</sup> zitiert in Elsner & Dittmann (1993): Nach einer internationalen Vereinbarung aus dem Jahre 1923 werden alle Zustandsdiagramme, in denen die Enthalpie eine der beiden Koordinaten darstellt, als Mollier-Diagramme bezeichnet.

Gesetz von der Erhaltung der Energie.<sup>10</sup> Diese Darstellungsform hat sich in allen lufttechnischen Bereichen bewährt, da elementare Vorgänge wie reine Erwärmung oder Abkühlung, Mischung zweier Luftmengen, Mischung feuchter Luft mit Wasser oder Wasserdampf oder auch Nebelbildung sehr gut anschaulich gemacht werden können. Aufbau und Anwendung des Mollier  $h, Y$ -Diagramms werden in zahlreichen thermodynamischen Lehrbüchern, z.B. von Bošnjaković (1971), Maltry (1975) oder Elsner & Dittmann (1993), detailliert erläutert.

Die nachfolgenden Erläuterungen zum Mollier  $h, Y$ -Diagramm beschränken sich auf ungesättigte feuchte Luft (**Abb. 3.1**). Formeln und Konstanten zur Berechnung der Zustandsgrößen sind im Anhang zusammengestellt (**Tabelle A.3** und **Tabelle A.4**). Grundlegende Berechnungsformeln zur Trocknung sowie zur Trocknung im Teilumluf-Betrieb sind ebenfalls im Anhang aufgeführt (**Tabelle A.5** und **Tabelle A.6**).

### Beschreibung des Mollier $h, Y$ -Diagramms

Um die Diagrammfläche gut auszunutzen zu können, verwendete Mollier von Anfang an anstatt eines rechtwinkligen Koordinatensystems schiefwinklige Koordinaten. Dabei legte er den Verlauf der x-Achse so fest, dass die Linie gleicher Temperatur bei 0 °C (Null-Grad-Isotherme) senkrecht zur y-Achse verläuft. Dadurch werden die *Isenthalpen* (Linien gleicher spezifischer Enthalpie,  $h = const$ ) nicht mehr durch waagerechte, sondern durch parallele, schräg nach rechts unten verlaufende Geraden abgebildet.



**Abb. 3.1:** Zustandsänderungen der Luft beim Mischen, Erwärmen und Trocknen im Mollier  $h, Y$ -Diagramm (exemplarisch).

<sup>10</sup> Die **Enthalpie** ist eine kalorische bzw. energetische Zustandsgröße, die von Mollier ursprünglich als "Wärmeinhalt bei konstantem Druck" bezeichnet wurde. Die Enthalpie der feuchten Luft setzt sich additiv zusammen aus der Enthalpie der trockenen Luft und der Enthalpie des in der Luft enthaltenen Wassers. Da immer nur mit Enthalpiendifferenzen gerechnet werden kann, wurde trockener Luft bei 0 °C eine spezifische Enthalpie von 0 kJ/kg als Bezugsgröße zugeordnet.

Üblicherweise benutzt man die Null-Grad-Isotherme als Hilfsachse zur Aufnahme der Zahlenwerte für den Wassergehalt.

Die *Isothermen* (Linien gleicher Temperatur,  $\vartheta = const$ ) sind Geraden, die sich mit zunehmender Temperatur allmählich aufrichten. Dieses Verhalten macht sich jedoch im Bereich niedriger Temperaturen kaum bemerkbar. Die *Sättigungskurve* (relative Luftfeuchte  $\varphi = 100\%$ ) trennt das Zustandsgebiet der ungesättigten feuchten Luft (oberhalb der Sättigungskurve) vom Nebelgebiet (unterhalb der Sättigungskurve).<sup>11</sup> Mollier  $h, Y$ -Diagramme enthalten üblicherweise mehrere Linien gleicher relativer Luftfeuchte. Die Linie  $\varphi = 0$  fällt mit der  $y$ -Achse zusammen (Annahme Wassergehalt  $Y = 0$ ).

Da die Gasphase der feuchten Luft thermodynamisch ein Gemisch idealer Einzelgase darstellt, ist dessen Enthalpie und damit auch der Verlauf der Isothermen für das ungesättigte Gemisch unabhängig vom Gesamtdruck. Anders verhält es sich dagegen mit den Parameterlinien gleicher relativer Luftfeuchte ( $\varphi = const$ ), die bei kleinerem Gesamtdruck etwas flacher verlaufen als in **Abb. 3.1** (Gesamtdruck 1.000 mbar bzw. 100.000 Pa). Diese Druckabhängigkeit muss jedoch nur bei sehr genauen Berechnungen, insbesondere in Höhenlagen weit oberhalb des Meeresspiegels, berücksichtigt werden.

### Zustandsänderungen der Luft

Die Zustandsänderungen der Luft beim Erwärmen, Trocknen und Mischen werden nachfolgend am Beispiel der Trocknung im Teilumluft-Betrieb erläutert. Dabei wird ein Teil der Trocknerabluft (AL) in die Umgebung entlassen. Die restliche Abluft wird als Umluft (UL) zurückgeführt und vor dem Ventilator mit Frischluft (FL) gemischt. Die resultierende Mischluft (ML) wird anschließend auf die erforderliche Temperatur der Zuluft (ZL) erwärmt.

- Beim **Erwärmen** bleibt der Wassergehalt der Luft unverändert:  $Y = const$ . Die entsprechende Zustandsänderung erscheint im Mollier  $h, Y$ -Diagramm als senkrechte Strecke. Die der Luft zugeführte Wärmemenge entspricht der Differenz der Enthalpiewerte vor und nach der Erwärmung. In **Abb. 3.1** beträgt die spezifische Enthalpiedifferenz  $\Delta h_1 = h_{ZL} - h_{ML} = 66,0 - 47,6 = 18,4 \text{ kJ/kg}$ .
- Beim **Trocknen** sinkt der Wassergehalt des Gutes, und der Wassergehalt der Luft steigt. Da für die Verdunstung des Wassers Energie benötigt wird, kühlen Gut und Luft sich gemeinsam ab. Der "Wärmeinhalt" (Mollier) bzw. die Energie der Luft bleiben dabei erhalten. Mit anderen Worten: Die Trocknung verläuft bei näherungsweise konstanter spezifischer Enthalpie. Die Zustandsänderung der Luft liegt im Mollier  $h, Y$ -Diagramm deshalb auf einer Geraden, die sich von einer Linie  $h = const$  nur wenig unterscheidet.<sup>12</sup> Die beim Trocknen von der Luft aufgenommene Wassermenge

<sup>11</sup> Die Beschreibung des Mollier  $h, Y$ -Diagramms beschränkt sich auf das Zustandsgebiet der ungesättigten feuchten Luft. Parameterlinien im Nebelgebiet sind nicht dargestellt.

<sup>12</sup> Diese übliche Berechnung des idealen Trocknungsprozesses (ohne Wärmeverluste) resultiert aus seiner Energie- und Massenbilanz. Die spez. Enthalpie der Abluft kann sich geringfügig von der spez. Enthalpie der Zuluft unterscheiden. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn die Guterwärmung (oder Abkühlung), z.B. zu Beginn der Trocknung, berücksichtigt wird. Oft ist diese (sensible) Wärme im Vergleich zur (latenten) Verdampfungswärme des Wassers aber so klein, dass sie vernachlässigt werden kann.

entspricht der Wassergehaltsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft. In **Abb. 3.1** beträgt die Wassergehaltsdifferenz  $\Delta Y_1 = Y_{AL} - Y_{ZL} = 14,0 - 10,0 = 4,0 \text{ g/kg}$ .

- Beim **Mischen** zweier Luftströme unterschiedlichen Zustands liegt der Mischpunkt im Mollier  $h, Y$ -Diagramm auf einer Geraden zwischen den beiden Zustandspunkten. Die genaue Lage des Mischpunkts auf der Mischgeraden resultiert aus dem Massenverhältnis der beiden Luftströme. Setzt sich die Mischluft (ML) beispielsweise aus zwei Teilen Frischluft (FL) und einem Teil Abluft (AL) zusammen, so wie in **Abb. 3.1**, so teilt sich die Mischgerade analog zum Hebelgesetz im Verhältnis 1:2.
- Der **Umluftanteil**, d.h. der Teil der Abluft, der als Umluft zurückgeführt wird, beträgt in diesem Beispiel genau ein Drittel:  $ULA = (Y_{ML} - Y_{FL}) / (Y_{AL} - Y_{FL}) = 2,0 / 6,0 = 33,3 \%$ . Der gleiche Wert ergibt sich, wenn die spez. Enthalpiedifferenzen für die Berechnung verwendet werden:  $ULA = (h_{ML} - h_{FL}) / (h_{AL} - h_{FL}) = 9,2 / 27,6 = 33,3 \%$ .

### Spezifischer Wärmebedarf

Bei bekanntem Anfangszustand und Endzustand der Luft lässt sich im Mollier  $h, Y$ -Diagramm sofort der spezifische Wärmebedarf pro kg verdunstetes Wasser ermitteln. Dies gilt allgemein für alle Trocknungsprozesse, so auch für die Trocknung im Teilumluf-Betrieb. Der spez. Wärmebedarf entspricht dem Quotienten  $q = \Delta h / \Delta Y$ . Je kleiner dieser Quotient ist, bzw. je flacher die entsprechende Gerade im Mollier  $h, Y$ -Diagramm liegt, umso kleiner ist der (aktuelle) spez. Wärmebedarf der Trocknung.

In **Abb. 3.1** beträgt die spez. Enthalpiedifferenz zwischen Abluft (AL) und Frischluft (FL)  $\Delta h_2 = h_{AL} - h_{FL} = 66,0 - 38,4 = 27,6 \text{ kJ/kg}$ , die entsprechende Wassergehaltsdifferenz  $\Delta Y_2 = Y_{AL} - Y_{FL} = 14,0 - 8,0 = 6,0 \text{ g/kg}$ . Daraus errechnet sich ein spez. Wärmebedarf von  $q_2 = \Delta h_2 / \Delta Y_2 = 4,60 \text{ MJ/kg}$ . Dieser Quotient, d.h. die Steigung der Mischgeraden, ist genau so groß wie der Quotient  $q_1 = \Delta h_1 / \Delta Y_1$ , der sich aus den beim Erwärmen und Trocknen angegebenen Werten errechnen lässt (siehe oben); es gilt:  $q_1 = q_2 = q$ .

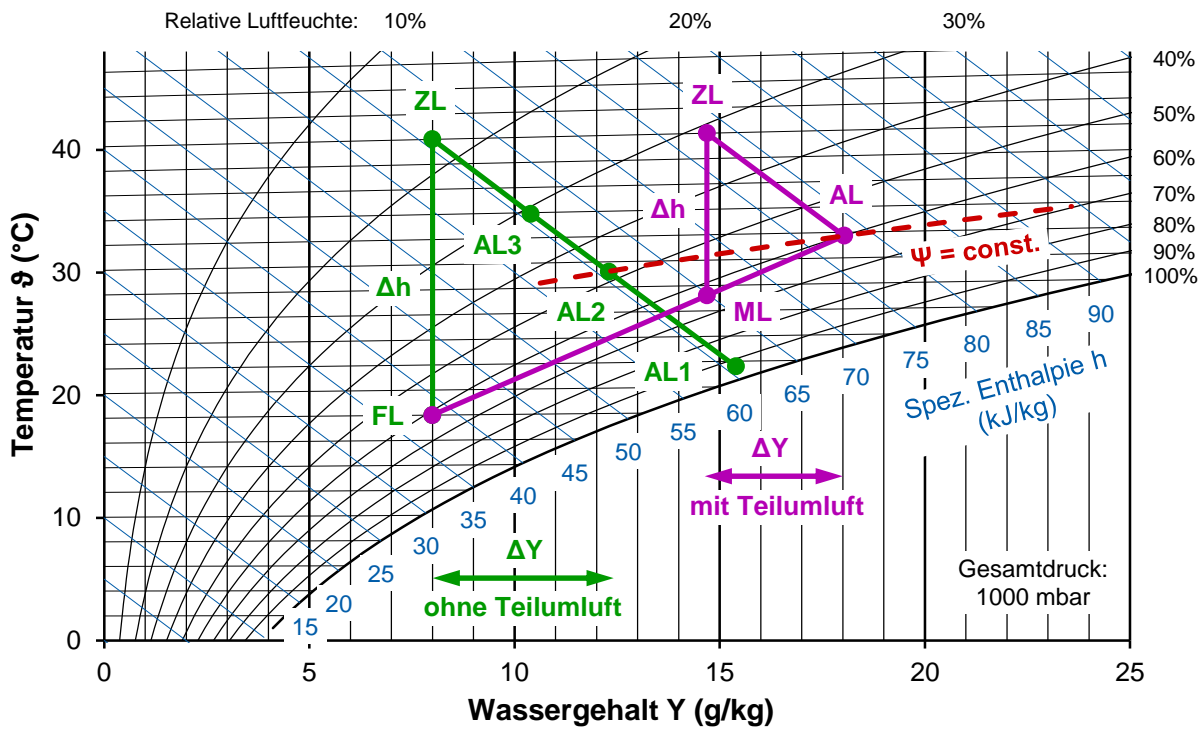
### Lufttechnische Zusammenhänge bei der Trocknung mit Teilumluf

Es ist bekannt, dass der Teilumluf-Betrieb sich aus energetischer Sicht vorteilhaft auf die Trocknung auswirken kann (Maltry et al., 1975; Müller, 1992; Militzer, 1996b; Ziegler et al., 2011; Ziegler et al., 2016b). Der Einfluss des Umluftanteils auf den spez. Wärmebedarf der Trocknung wird nachfolgend exemplarisch erläutert (**Abb. 3.2**). Die Temperatur der Zuluft ( $40^\circ\text{C}$ ) und der Zustand der Frischluft ( $18^\circ\text{C}$ ,  $8 \text{ g/kg}$ ) sind die gleichen wie in **Abb. 3.1**.

- Zu Beginn der **Trocknung ohne Teilumluf** ist die Abluft nahezu gesättigt (Punkt AL1:  $21,6^\circ\text{C}$ ;  $15,4 \text{ g/kg}$ ;  $60,9 \text{ kJ/kg}$ ;  $93,6 \%$  r. F.). Wenn sich der Zustand der Zuluft nicht verändert, so bewegt sich der Zustand der Abluft im weiteren Verlauf der Trocknung bei konstanter spez. Enthalpie in Richtung Zuluft. Dabei steigt die Temperatur der Abluft, und ihre relative Feuchte sinkt (Punkt AL3:  $3,9^\circ\text{C}$ ;  $10,4 \text{ g/kg}$ ;  $60,9 \text{ kJ/kg}$ ;  $31,2 \%$  r. F.).
- Wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt (AL2) auf **Trocknung mit Teilumluf** umgeschaltet wird, so führt dies zu größeren Wassergehalten sowohl der Zuluft als auch der

Abluft.<sup>13</sup> In **Abb. 3.2** werden voraussetzungsgemäß genau zwei Drittel Abluft mit einem Drittel Frischluft gemischt (Umluftanteil  $ULA = 66,7\%$ ). Die resultierende Mischluft wird wiederum auf  $40\text{ °C}$  erwärmt.

- Beim Übergang vom Frischluft- zum Teilumluf-Betrieb bewegt sich der Abluftzustand näherungsweise auf einer Linie konstanter normierter Luftfeuchte. Die **normierte Luftfeuchte  $\Psi$**  kann zu jedem Zeitpunkt der Trocknung aus gemessenen Luftzuständen berechnet werden und wird in Anhang F erläutert (**Abb. F.5**).



**Abb. 3.2:** Zustandsänderungen der Luft bei Trocknung ohne und mit Teilumluf im Mollier  $h, Y$ -Diagramm (exemplarisch).

Die Auswirkungen unterschiedlicher Umluftanteile auf die Dauer und den gesamten Energiebedarf der Trocknung werden in späteren Abschnitten des Leitfadens noch detailliert beschrieben. Zunächst ist festzuhalten, dass mit einer Regelung des Umluftanteils erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden können.

Zur Erläuterung sind in **Tabelle 3.1** exemplarische Werte des spezifischen Wärmebedarfs bei unterschiedlichen Umluftanteilen zusammengestellt. Die Werte resultieren aus den Luftzuständen in **Abb. 3.1** (Umluftanteil =  $33,3\%$ ) und **Abb. 3.2** (Umluftanteil =  $0$  bzw.  $66,7\%$ ). Mit steigendem Umluftanteil reduzieren sich sowohl die spez. Enthalpiedifferenz  $\Delta h$  zur Erwärmung der Zuluft als auch die Wassergehaltsdifferenz  $\Delta Y$ , die von der Abluft aufgenommen werden kann. Unter den getroffenen Annahmen fällt  $\Delta h$  stärker als  $\Delta Y$ . Bei Trocknung mit zwei Dritteln Umluft reduziert sich der spezifische Wärmebedarf im Vergleich zum reinen Frischluft-Betrieb auf ca.  $76\%$ .

<sup>13</sup> Dies kann einige Zeit in Anspruch nehmen. Die sich schließlich einstellenden Luftzustände resultieren aus den Klappenstellungen bzw. aus den lufttechnischen Verhältnissen in der Trocknungsanlage.



**Tabelle 3.1:** Spezifischer Wärmebedarf der Trocknung bei unterschiedlichen Umluftanteilen (exemplarisch).

Größe	Symbol	Wert			Einheit
Umluftanteil	$ULA$	0	33,3	66,7	%
spez. Enthalpiedifferenz	$\Delta h$	22,5	18,4	13,2	$kJ/kg_L$
		100	81,9	58,9	%
Wassergehaltsdifferenz	$\Delta Y$	4,3	4,0	3,3	$g_{H_2O}/kg_L$
		100	92,9	77,7	%
spez. Wärmebedarf	$q = \Delta h/\Delta Y$	5,22	4,60	3,96	$MJ/kg_{H_2O}$
		100	88,2	75,8	%

Zustand der Frischluft: 18,0 °C; 8,0 g/kg; 38,4 kJ/kg; 61,4 % r.F.;  
 Temperatur der Zuluft: 40,0 °C; normierte Luftfeuchte: 55,8 %.

### 3.2 Lufttransport und Ventilatoren

Der Lufttransport hat in Konvektionstrocknern folgende Aufgaben zu erfüllen (Maltry et al., 1975): Aufnahme der Wärme im Wärmeerzeuger bzw. Wärmeübertrager, Transport der zur Verdunstung der Feuchtigkeit erforderlichen Wärme bis an die Oberfläche der Einzelkörper, Aufnahme der aus dem Trocknungsgut dampfförmig entweichenden Feuchtigkeit, Abtransport der Feuchtigkeit, Überwindung der durch die Luftströmung in den Luftkanälen und im Trockner verursachten Strömungswiderstände.

Die pro Zeiteinheit und pro kg Trocknungsgut eingesetzte Luftmenge hat wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf und auf die Betriebskosten der Trocknung. Je größer die Luftmenge, desto mehr Wasserdampf kann mit der Trocknungsluft abtransportiert werden, desto größer ist jedoch auch der thermische Energieaufwand zur Lufterwärmung. Gleichzeitig steigen die bei der Durchströmung der Trocknungsanlage und des Trocknungsgutes entstehenden Druckverluste. Dies führt zu einem größeren elektrischen Energiebedarf der eingesetzten Ventilatoren.

Die Industrie bietet eine Vielzahl von Ventilatoren unterschiedlicher Bauart an. Zur Aufgabe des Anlagenplaners gehört es, für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Ventilatoren auszuwählen. Der erforderliche Überdruck eines Ventilators (Totaldruck) muss dabei den summierten Druckverlusten der einzelnen Teilsysteme entsprechen.

In diesem Abschnitt werden zunächst allgemeine Zusammenhänge zum Druckverlust in Luftkanalsystemen und in trocknenden Schüttungen beschrieben. Anschließend werden unterschiedliche Bauformen von Ventilatoren und das Betriebsverhalten von Radialventilatoren erläutert. Die Drehzahlregelung von Ventilatoren hat erhebliche Bedeutung für die Energieeffizienz der Trocknung. Berechnungsformeln zum Lufttransport und zum Druckverlust in Schüttungen sowie Proportionalitätsgesetze für Ventilatoren sind wiederum im Anhang tabellarisch zusammengestellt (**Tabelle A.7**, **Tabelle A.8** und **Tabelle A.9**).

## Druckverluste in Luftkanalsystemen

Auch für strömende Luft gelten die Gesetze von der Erhaltung der Masse und der Energie. Ist der Volumenstrom der Trocknungsluft gegeben, so lässt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit für einen bestimmten Querschnitt berechnen: Je größer die durchströmte Querschnittsfläche, umso kleiner die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und umgekehrt. Der Massenstrom der Luft bleibt dabei konstant (Kontinuitätsgleichung). Der Satz von Bernoulli besagt, dass bei stationärer reibungsfreier Strömung die Gesamtenergie bzw. der Gesamtdruck längs eines Stromfadens konstant ist (Epperlein, 1989). Der Gesamtdruck (oder Totaldruck) ist die Summe aus dem dynamischen Druck (Geschwindigkeitsdruck, Staudruck) und dem statischen Druck.<sup>14</sup> Diese Drücke haben sowohl rechnerisch, z.B. für Luftkanäle und Ventilatoren, als auch messtechnisch eine große Bedeutung.

Energieverluste in Luftkanalsystemen resultieren maßgeblich aus Verwirbelungen der strömenden Luft und äußern sich in Druckverlusten. Der Druckverlust einer Teilstrecke setzt sich aus der Rohrreibung und besonderen Strömungswiderständen zusammen, die man als Einzelwiderstände bezeichnet (z.B. Richtungs- und Querschnittsänderungen oder Abzweigungen). Der gesamte Druckverlust eines Kanalsystems ergibt sich aus der Addition aller Teilstreckenverluste. Die Berechnung von Luftkanälen muss grundsätzlich mit dem Gesamtdruck erfolgen. Die Rohrreibung wird in der Praxis nur in Ausnahmefällen rechnerisch ermittelt. Man bedient sich verschiedener Diagramme, aus denen bei bekannten Volumenströmen und Abmessungen der Rohrleitungen bzw. Luftkanäle das Druckgefälle entnommen werden kann (Katz et al., 1989).

Bei Querschnittsverengungen muss die damit verbundene Erhöhung der kinetischen Energie zusätzlich auf Kosten des statischen Drucks aufgebracht werden. Bei Erweiterungen geht ein mehr oder weniger großer Teil der kinetischen Energie durch Verwirbelungen verloren. Durch allmählich ihren Querschnitt erweiternde Übergangsstücke (Diffusoren) kann die kinetische Energie teilweise in statischen Druck umgewandelt werden. Umlenkungen verursachen eine höhere Geschwindigkeit an der Außenseite und eine verminderte Geschwindigkeit an der Innenseite der Krümmung, verbunden mit einem breiten Wirbel- und Ablösungsgebiet.

Es gibt eine ganze Reihe von Maßnahmen, mit denen die Druckverluste in Luftkanalsystemen – und damit der elektrische Energiebedarf von Ventilatoren – beträchtlich reduziert werden können. Hierzu zählen strömungstechnisch optimierte Querschnittsverengungen, Diffusoren, Krümmer mit kreisförmigem Querschnitt, Umlenkungen mit rechteckigem Querschnitt, Luftleitgitter bzw. -bleche sowie Verzweigungen. Diese Einzelwiderstände bewirken eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit oder der Strömungsrichtung. Die dabei vor allem durch Wirbelbildung entstehenden Druckverluste sind dem Quadrat der mittleren Strömungsgeschwindigkeit proportional und können mit Hilfe sogenannter Widerstandsbeiwerte (Zeta-Wert) berechnet werden (Epperlein, 1989).

Auch Wärmeübertrager verursachen Druckverluste in Trocknungsanlagen. Bei der thermischen Auslegung von Wärmeübertragern gibt es immer mehrere Möglichkeiten. Eine Optimierung der Abmessungen kann auch unter besonderer Beachtung des Druckverlusts

---

<sup>14</sup> Änderungen der Lageenergie bzw. der geodätischen Druckhöhe können bei konvektiven Trocknungsverfahren normalerweise vernachlässigt werden.



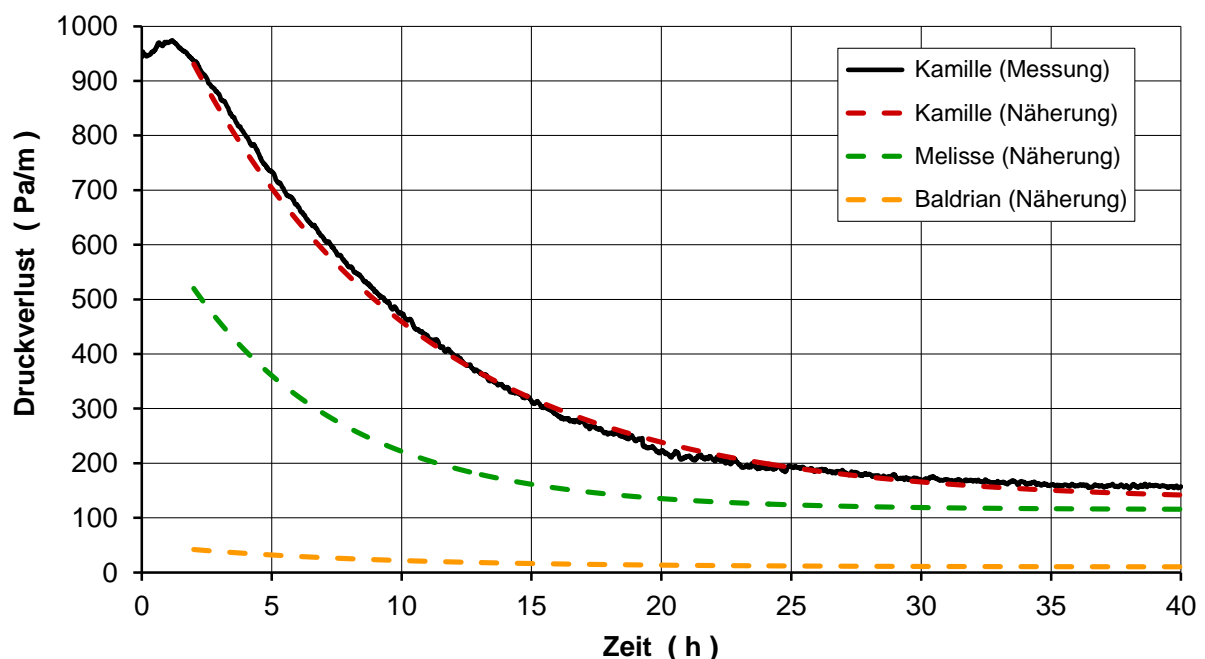
vorgenommen werden. Für weitere Zusammenhänge muss auf die Fachliteratur verwiesen werden, z.B. Schedwill (1989). Allgemeine Berechnungsformeln zum Lufttransport sind in **Tabelle A.7** im Anhang aufgelistet.

### Strömungswiderstand von Schüttungen

Der Strömungswiderstand der Trocknungsgüter ist eine ausschlaggebende Größe für die Wahl der Ventilatoren. Die Eigenschaften der unterschiedlichen Arznei- und Gewürzpflanzen (Größe, Form, Oberflächenbeschaffenheit, Wassergehalt, Schichthöhe, Schüttdichte) verändern sich im Verlauf der Trocknung erheblich. Landwirtschaftliche Produkte sind allgemein verhältnismäßig elastisch, sodass nur bei kleineren Schichthöhen eine lineare Relation zwischen der Schichthöhe und dem Druckverlust besteht.

Entsprechende Zusammenhänge wurden in einer grundlegenden Forschungsarbeit von Matthies (1956) für eine Vielzahl unterschiedlicher Körner- und Erdfrüchte umfassend beschrieben und untersucht. Die Untersuchungen wurden auch auf einige halm- und blattförmige Erntegüter ausgedehnt (Roggenstroh, blattarmes Luzerneheu, blattreiche Luzerne, gehäckselte und ungehäckselte Zuckerrübenblätter). Diese verändern ihre Form und damit ihre Schüttdichte im Verlauf der Trocknung jedoch wesentlich stärker als korn- und knollenförmige Güter. Matthies stellte u.a. fest, dass für eine genaue Bestimmung der Eigenschaften, die gerade halm- und blattförmige Güter im Hinblick auf den Strömungswiderstand haben, Großzahlversuche nötig wären.

Für Arznei- und Gewürzpflanzen liegen entsprechend systematische Untersuchungen bisher leider nicht vor. Für Kamilleblüten, Melisse-Ganzpflanzen und Baldrianwurzeln wurden jedoch exemplarische Messungen zum Druckverlust im Verlauf der chargenweisen Satzrock-



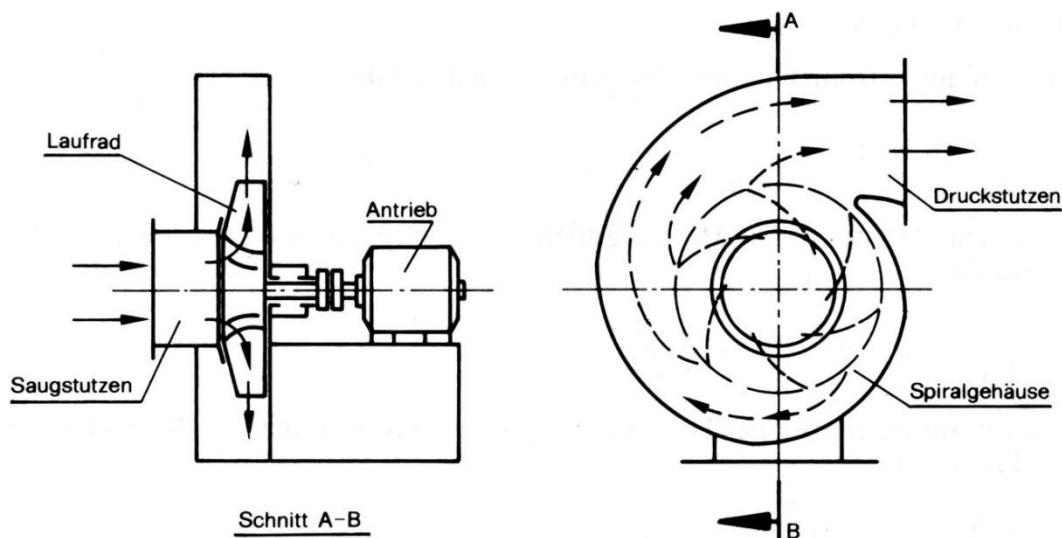
**Abb. 3.3:** Änderungen der Druckverluste pro m Schichthöhe bei der Satzrocknung von Kamilleblüten, Melisse-Ganzpflanzen und Baldrianwurzeln (exemplarisch).

nung durchgeführt (Ziegler et al., 2013b).<sup>15</sup> Die mit Kamilleblüten durchgeführten Messungen werden im Anhang erläutert (**Abb. F.6**). Eine näherungsweise Darstellung der zeitlichen Verläufe zeigt **Abb. 3.3**. Die Näherungsfunktion und die benötigten Konstanten sind in **Tabelle A.8** im Anhang aufgeführt.

Die Auswertung der Messungen belegt die großen produktspezifischen Unterschiede und zeigt, in welcher erheblicher Größenordnung sich die Druckverluste im Verlauf der Trocknung ändern. Zur trockenungstechnischen Optimierung der Luftmenge sollte die Drehzahl von Ventilatoren deshalb geregelt werden.

### Bauformen von Ventilatoren

Es gibt unterschiedliche Bauformen von Ventilatoren. Die Einteilung erfolgt entsprechend der Durchströmungsrichtung des Laufrades. Man unterscheidet Radial-, Axial-, Halbaxial- und Querstromventilatoren. Bei Radialventilatoren wird die Luft axial angesaugt und im Laufrad radial umgelenkt (**Abb. 3.4**). Sogenannte Hochleistungsventilatoren besitzen Laufräder mit rückwärts gekrümmten Schaufeln (konvexe Krümmung in Drehrichtung). Der Begriff Hochleistung bezieht sich nicht auf die Luftleistung, sondern auf den guten Wirkungsgrad, der je nach Baugröße, Laufradauslegung und Fertigungsgüte zwischen 75 % und 88 % liegt. Laufräder mit vorwärts gekrümmten Schaufeln werden wegen ihres trommelartigen Aussehens auch Trommelläufer genannt. Vorteile dieser Bauart sind die kompakte Bauweise, die geringe Schallabstrahlung und die niedrigen Herstellungskosten. Als Nachteil ist der geringe Wirkungsgrad von ca. 60 % bis 70 % anzusehen (Kullen & Albrich, 1988).



**Abb. 3.4:** Schema eines Radialventilators für saug- und druckseitigen Kanalanschluss (Kullen & Albrich, 1988).

Axialventilatoren haben im Vergleich zu Radialventilatoren bei gleichem Luftdurchsatz kleinere Abmessungen. Nachteilig ist die geringere Druckerhöhung, die aus der starken Rotation der Luft resultiert. Durch ein feststehendes Leitrad hinter dem Laufrad wird die verwirbelte Luft in

<sup>15</sup> Die spezifische Luftmenge betrug jeweils 640 m<sup>3</sup>/h und m<sup>2</sup> Rostfläche, die Zulufttemperatur wurde auf 40 °C geregelt. Die Schichthöhen zu Beginn der Trocknung lagen bei ca. 34 cm (Baldrian), 37 – 52 cm (Kamilleblüten) und 80 cm (Melisse-Ganzpflanzen).

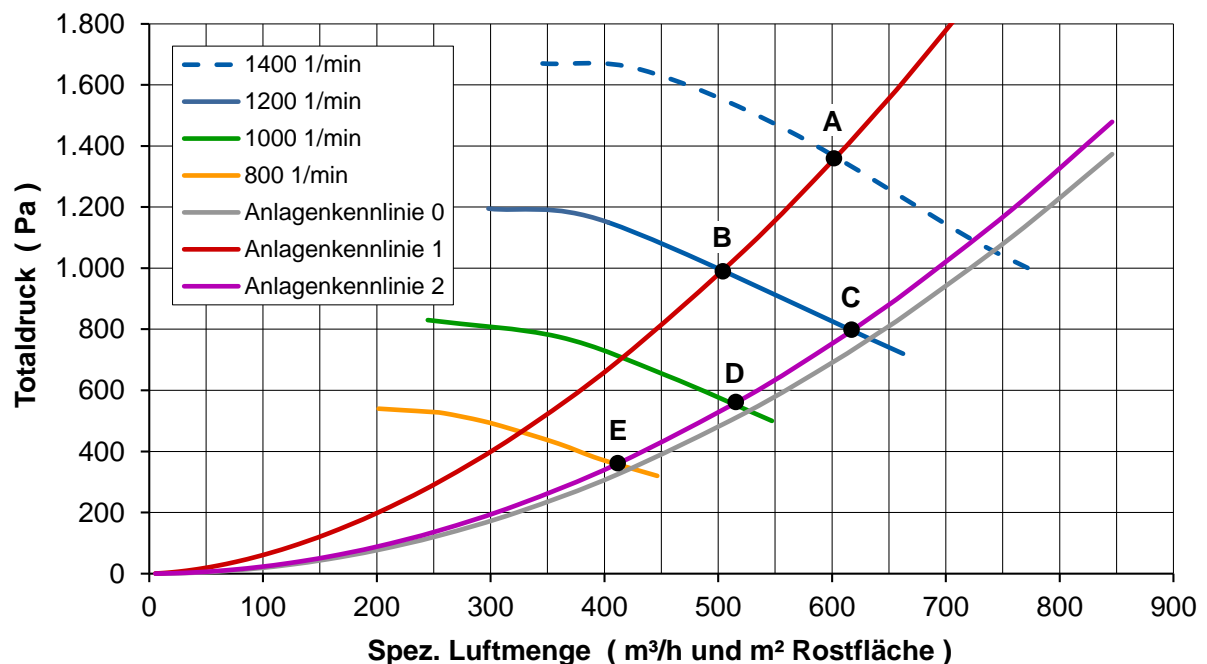
axialer Richtung umgelenkt. In dem anschließenden Diffusor wird die Strömung verzögert, wodurch sich ein Teil der Geschwindigkeitsenergie (dynamischer Druck) in statischen Druck umwandelt.

Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln werden immer dann eingesetzt, wenn im Vergleich zu Axialventilatoren bei gleichem Luftvolumenstrom eine größere Druckerhöhung erforderlich ist. Dies ist bei der Flächentrocknung der Fall.

### Betriebsverhalten von Ventilatoren

Kennzeichnend für die Eigenschaften eines bestimmten Ventilators ist sein Kennlinienfeld, d.h. die Darstellung des erzeugten Überdrucks in Abhängigkeit vom geförderten Volumenstrom bei verschiedenen Drehzahlen. Der Betriebspunkt eines Ventilators ist immer der Schnittpunkt zwischen der Drehzahlkennlinie und der Anlagenkennlinie. In **Abb. 3.5** sind vier Drehzahlkennlinien eines Radialventilators exemplarisch dargestellt.<sup>16</sup> Je höher die Drehzahl, desto höher ist die erreichbare Totaldruckerhöhung.

Außerdem sind in **Abb. 3.5** drei Anlagenkennlinien eingetragen. Je kleiner der Strömungswiderstand der Trocknungsanlage, desto größer ist der Luftvolumenstrom, der sich bei gleicher Drehzahl des Ventilators einstellt (Betriebspunkt). Es gibt nur einen Punkt des Kennlinienfeldes (Druck, Volumenstrom, Drehzahl), bei dem der Wirkungsgrad des Ventilators sein Maximum hat. Jede Abweichung von diesem Punkt bringt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades und damit eine Vergeudung von Energie mit sich.



**Abb. 3.5:** Drehzahlkennlinien eines Radialventilators mit Anlagenkennlinien eines Flächentrockners für unterschiedliche Druckverluste (exemplarisch).

Ventilator Kennlinien werden auf Prüfständen ermittelt, bei denen optimale Strömungsverhältnisse vorliegen. In der Praxis sind die Einbauverhältnisse jedoch meistens ungünstiger, sodass die Werte der Katalog-Kennlinien nicht erreicht werden. Wie groß die Abweichungen

<sup>16</sup> Die Drehzahlkennlinien wurden dem Datenblatt eines Ventilatorherstellers entnommen.

jeweils sind, lässt sich aufgrund der vielfältigen Einflüsse nur grob abschätzen oder experimentell ermitteln (Kullen & Albrich, 1988).

Da die Druckverluste in Luftkanalsystemen proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit sind, haben Anlagenkennlinien prinzipiell die Form einer quadratischen Parabel (Widerstandsparabel).<sup>17</sup> Dies ist bei durchströmten Schüttungen nur näherungsweise der Fall. Allgemein gültige Proportionalitätsgesetze für Ventilatoren (Zusammenhänge zwischen Drehzahl, Volumenstrom, Druck, Leistungsbedarf des Laufrades, Luftdichte) sind in **Tabelle A.9** im Anhang aufgeführt.

### Totaldruckerhöhung, Luftmenge und Ventilatorleistung

Die sich je nach Druckverlust und Ventilatorleistung einstellenden Luftvolumenströme werden nachfolgend anhand von **Abb. 3.5** exemplarisch erläutert. Die dargestellten Anlagenkennlinien 1 und 2 wurden basierend auf der bereits erwähnten Näherungsformel für die Druckverluste von halm- und blattförmigen Erntegütern nach Matthies (1956) berechnet (**Tabelle A.8** im Anhang). Der bei der Durchströmung der Trocknungsanlage entstehende Druckverlust wurde addiert.

- Die untere Anlagenkennlinie 0 (grau) beschreibt den Druckverlust der Trocknungsanlage ohne Trocknungsgut.<sup>18</sup>
- Die obere Anlagenkennlinie 1 (rot) beschreibt den gesamten Druckverlust der Trocknungsanlage zu Beginn der Trocknung von Kamilleblüten (Schichthöhe: 75 cm).
- Die beiden oberen Drehzahlkennlinien (blau) beschreiben die Totaldruckerhöhung des Ventilators bei Drehzahlen von 1.400 bzw. 1.200 Umdrehungen pro Minute (U/min).
- **Betriebspunkt A:** Für eine spez. Luftmenge von  $600 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$  wäre bei einem Gegendruck von 1.350 Pa eine Ventilatorleistung von 1.400 U/min erforderlich.<sup>19</sup>
- **Betriebspunkt B:** Reicht die verfügbare Ventilatorleistung nicht aus, so können nur kleinere Werte realisiert werden. Bei einer Drehzahl von z.B. 1.200 U/min und einem Gegendruck von 990 Pa stellt sich eine spez. Luftmenge von  $510 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$  ein.
- **Betriebspunkt C:** Wie erläutert, sinkt der Druckverlust von Arznei- und Gewürzpflanzen im Verlauf der Trocknung erheblich.<sup>20</sup> Entsprechende Verhältnisse zeigt Anlagenkennlinie 2 (violett). Wird die Drehzahl des Ventilators nicht verändert, so steigt die spez. Luftmenge auf  $620 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

<sup>17</sup> Diese Parabel beginnt meist im Punkt  $\dot{V} = 0$  und  $\Delta p_{total} = 0$ . Nur wenn der Ventilator in einen Überdruckraum bläst oder aus einem Unterdruckraum saugt, beginnt die Widerstandsparabel in einem Punkt  $\Delta p_{total} \neq 0$ .

<sup>18</sup> Die Strömungswiderstände der einzelnen Komponenten einer Trocknungsanlage (z.B. Luftkanäle, Luftklappen, Wärmeübertrager, Druckkammern hinter den Ventilatoren, Lufträume unter den Trocknungsrosten, Rostbleche) sind im Allgemeinen nicht bekannt und können mit vertretbarem Aufwand auch nicht ermittelt werden. Der Druckverlust der Trocknungsanlage (ohne Schüttung) wurde deshalb auf die Strömungsgeschwindigkeit über den Trocknungsrosten bezogen und mit Hilfe eines Widerstandsbeiwerts (Zeta-Wert) abgeschätzt.

<sup>19</sup> Bei einer Rostfläche von 25 m<sup>2</sup> entspricht eine spez. Luftmenge von  $600 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$  einem Luftvolumenstrom von 15.000 m<sup>3</sup>/h.

<sup>20</sup> Der Druckverlust von Kamilleblüten beträgt nach 40 Stunden nur noch ca. 15 % vom Maximalwert zu Beginn der Trocknung. Bei anderen Gutarten liegen die relativen Änderungen der Druckverluste in einer ähnlichen Größenordnung.

- **Betriebspunkt D:** Wird die Drehzahl des Ventilators auf z.B. 1.000  $U/min$  reduziert (grüne Kurve), so stellt sich eine spez. Luftmenge von  $520 \text{ m}^3/(h \cdot \text{m}^2)$  ein.
- **Betriebspunkt E:** Durch eine weitere Reduzierung der Drehzahl, z.B. auf  $800 \text{ U/min}$  (orange), können auch kleinere Luftmengen realisiert werden.

Die Werte der beschriebenen Betriebspunkte A – E (Drehzahl, Totaldruck, spez. Luftmenge) sind in **Tabelle 3.2** noch einmal zusammengefasst. Die Tabelle enthält außerdem Werte für den Luftvolumenstrom, den Wirkungsgrad und die erforderliche elektrische Leistung des Ventilators, jeweils für eine Rostfläche von  $25 \text{ m}^2$ . Bei den Wirkungsgraden ist zu beachten, dass in den Katalog-Kennlinien der Hersteller normalerweise die Wirkungsgrade des Laufrades dargestellt sind. Die tatsächlichen Wirkungsgrade sind deutlich kleiner, da zusätzlich Verluste des Antriebs zu berücksichtigen ist. Sind die Totaldruckerhöhung, der Luftvolumenstrom und der Wirkungsgrad bekannt, so lässt sich die elektrische Leistung des Ventilators berechnen (Gl. A.62 im Anhang).

**Tabelle 3.2:** Leistungsdaten eines Radialventilators bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (exemplarisch).

Größe	Symbol	Betriebspunkte					Einheit
		A	B	C	D	E	
(1) Drehzahl	$n$	1.400	1.200	1.200	1.000	800	$1/min$
(2) Totaldruckerhöhung	$\Delta p_{total}$	1.350	990	800	560	350	$Pa$
(3) spez. Luftmenge	$\dot{V}''_L$	600	510	620	520	410	$\text{m}^3/(h \cdot \text{m}^2)$
(4) Luftvolumenstrom	$\dot{V}_L$	15.000	12.750	15.500	13.000	10.250	$\text{m}^3/h$
(5) Wirkungsgrad	$\eta_{Vent}$	69	68	61	60	59	%
(6) elektrische Leistung bez. auf Punkt B	$P_{Vent}$	8,2	5,2	5,6	3,3	1,7	$kW$ %

(1, 2, 3) vgl. **Abb. 3.5**; (4) berechnet für eine Rostfläche von  $25 \text{ m}^2$ ; (5) Wirkungsgrad des Laufrades multipliziert mit dem Wirkungsgrad des Antriebs: ca. 84 %; (6) berechnet.

Bei der Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen werden oft Radialventilatoren mit einer elektrischen Leistung von ca.  $5 - 6 \text{ kW}$  eingesetzt. Unter den getroffenen Annahmen (maximaler Druckverlust der Schüttung, hoher Druckverlust der Trocknungsanlage) bedeutet dies, dass ein Luftvolumenstrom von  $15.000 \text{ m}^3/h$  zu Beginn der Trocknung von Kamilleblüten nicht erreicht werden kann. Hierfür wäre eine elektrische Ventilatorleistung von ca.  $8,2 \text{ kW}$  erforderlich (Betriebspunkt A). Umgekehrt zeigen die exemplarischen Leistungsdaten in **Tabelle 3.2**, dass die Ventilatorleistung im weiteren Verlauf der Trocknung deutlich reduziert werden kann (Betriebspunkte D und E). Dies kann insbesondere gegen Ende der Trocknung sinnvoll sein.

### Regelung von Ventilatoren

Durch Regelung werden der Volumenstrom und die erforderliche Druckerhöhung den jeweiligen Anforderungen angepasst. Die Auswahl des Regelungsverfahrens hängt von vielen Faktoren ab, z.B. Preis, Kennlinienverlauf, Regelweg. Für die Regelung von Ventilatoren gibt es verschiedene Möglichkeiten (Kullen & Albrich, 1988):

- Drallregler
- Drosselung
- Drehzahländerung
- Laufschaufelverstellung (bei Axialventilatoren)
- Bypass-Regelung
- Parallelbetrieb von Ventilatoren
- Hintereinanderschaltung von Ventilatoren
- Ein- / Ausschaltregelung

Drallregler werden nur bei Hochleistungsradialventilatoren sowie Axialventilatoren und nicht bei Trommelläufern eingesetzt. Nachteilig sind die Geräuscherhöhung und der sich mit zunehmender Volumenstromreduzierung verschlechternde Wirkungsgrad. Drallregler werden dann eingesetzt, wenn die Drosselregelung bzw. Bypass-Regelung zu verlustreich und die Drehzahlregelung zu teuer ist. Die Verwendung einer Drosselklappe oder eines Schiebers ist eine einfache Art, den Volumenstrom zu variieren. Daher ist sie eine häufig angewandte Regelungsart, obwohl sie vom Energieaufwand her die ungünstigste ist. Bei der Bypass-Regelung wird ein Teil des Volumenstroms über einen Bypass-Kanal zur Saugseite des Ventilators zurückgeführt oder als Fortluft ins Freie geblasen. Zur Regelung werden im Bypass-Kanal bzw. in der Fortluftöffnung Drosselklappen eingebaut. Die Bypass-Regelung ist wie die Drosselregelung eine sehr verlustbehaftete Methode.

Die Drehzahlregelung ist wie die Laufschaufelverstellung bei Axialventilatoren die verlustärmste Methode. Die Drehzahländerung erfolgt meist durch Variation der Motordrehzahl. Alle Drehstrom-Asynchron-Motoren können mit Frequenzumrichtern geregelt werden, während Schlupfregelung (Änderung der Versorgungsspannung bei gleichbleibender Frequenz) nur bei dafür ausgelegten Motoren verwendet werden darf. Da sowohl Frequenzumrichter als auch elektronische Spannungsregler Oberwellen erzeugen, die zu mehr oder weniger starken Netzurückwirkungen führen, sollte man folgende Vorsorgemaßnahmen treffen:

- Getrennter Stromkreis für Regler und Messinstrumente oder Rechenanlagen,
- Starkstromleitungen und Messleitungen nicht im selben Kanal führen.

Bei Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln (**Abb. 3.4**) ist die erforderliche Wellenleistung bei Drehzahlregelung immer am kleinsten. Den Betreiber interessiert jedoch die elektrische Leistungsaufnahme, die bei Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter im Bereich des Nennvolumenstroms die den größten Stromverbrauch hat. Dies liegt daran, dass Frequenzumrichter Gesamtwirkungsgrade von ca. 90 – 95 % besitzen. Dieser Nachteil lässt sich bei langen Betriebszeiten mit dem Nennvolumenstrom beheben, indem man den Frequenzumrichter durch eine Bypass-Schaltung überbrückt.

Beim Bestellen eines Ventilators muss man berücksichtigen, dass die Ventilator-Hersteller Kennlinien meist nur für die strömungsgünstigsten Verhältnisse angeben. Daher empfiehlt es sich bei Anfragen und Bestellungen, die Einbauverhältnisse mit anzugeben. Eine nachträgliche Korrekturmöglichkeit sollte eingeplant werden. Bei Radialventilatoren kann das Übersetzungsverhältnis z.B. durch Wechseln der Riemenscheibe erfolgen. Bei nachträglicher Vergrößerung des Volumenstroms ist zu kontrollieren, ob der Antriebsmotor des Ventilators



noch ausreichend dimensioniert ist. Wie erläutert, steigen bei einem größeren Luftvolumenstrom die Druckverluste der Trocknungsanlage und damit auch die erforderliche elektrische Leistung des Ventilators.

### 3.3 Energetische Grundlagen

Die Auslegung und Berechnung von Trocknungsanlagen beruht auf Massen- und Energiebilanzen. In der gutseitigen Wasserbilanz wird zunächst die Wassermenge berechnet, die dem Trocknungsgut in einem bestimmten Zeitraum entzogen werden soll. Anschließend wird in der luftseitigen Wasserbilanz der Luftmassenstrom bestimmt, der zur Aufnahme des verdunsteten Wassers erforderlich ist. Die insgesamt benötigte Wärmeleistung wird mit Hilfe der Wärmebilanz des Trockners ermittelt.

Massen- und Energiebilanzen für einen kontinuierlichen Trockner (**Tabelle A.10**) und für einen Chargentrockner (**Tabelle A.11**) sind im Anhang aufgeführt. Wesentliche Elemente der Berechnungsgleichungen sind die spezifische Enthalpiedifferenz  $\Delta h$  und die Wassergehaltsdifferenz  $\Delta Y$ , die zur Ermittlung des spezifischen Wärmebedarfs erforderlich sind:  $q = \Delta h / \Delta Y$ . Die für die Bilanzen benötigten Werte für spez. Enthalpie und Wassergehalt können einem Mollier  $h, Y$ -Diagramm entnommen werden, sofern die Zustände der ein- und austretenden Luft zuvor festgelegt wurden.

#### Luftseitige Massen- und Energiebilanzen

Konvektionstrockner für Arznei- und Gewürzpflanzen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art der Gutbewegung. In Chargentrocknern ruht das Trocknungsgut, in kontinuierlich arbeitenden Trocknern wird es durch die Trocknungsanlage transportiert. Die Vorgehensweise zur Aufstellung von Massen- und Energiebilanzen ist jedoch prinzipiell die gleiche. Der Unterschied besteht darin, dass sich der mittlere Zustand der Abluft bei kontinuierlichen Trocknern unter idealen Betriebsbedingungen nicht ändert (Beharrungszustand).

Im Gegensatz dazu ändert sich der Zustand der Abluft bei Chargentrocknern im zeitlichen Verlauf der Trocknung erheblich und nähert sich gegen Ende der Trocknung dem Zustand der Zuluft an (vgl. Erläuterungen zu **Abb. 3.2**). Dies bedeutet, dass detaillierte Massen- und Energiebilanzen bei Chargentrocknern zunächst nur für einen bestimmten *Zeitpunkt* der Trocknung aufgestellt werden können. Die für einen bestimmten *Zeitraum* interessierenden Größen (z.B. die insgesamt bis zum Ende der Trocknung benötigte Wärmemenge) müssen durch Integration über den jeweiligen Zeitraum ermittelt werden.

Die Berechnung der luftseitigen Massen- und Energiebilanzen wird nachfolgend am Beispiel eines Chargentrockners im reinen Frischluft-Betrieb erläutert (**Tabelle 3.3**).<sup>21</sup> Den Berechnungen wurden die gleichen spezifischen Luftmengen pro m<sup>2</sup> Rostfläche wie in **Tabelle 3.2** zugrunde gelegt.

Betriebspunkt B beschreibt den Beginn der Trocknung von Kamilleblüten ( $t = 2$  h), Betriebspunkt C die entsprechenden Werte nach einer Trocknungsdauer von ca. 40 Stunden. Die

---

<sup>21</sup> Einige der zeitbezogenen Größen, z.B. der Massenstrom der Zuluft, Wärmeleistungen, elektrische Leistung von Ventilatoren, die in **Tabelle A.10** für kontinuierliche Trocknung angegeben sind, gelten analog auch für chargenweise Trocknung (**Tabelle A.11**).



Luftmengen für einen Flächentrockner beliebiger Größe können durch Multiplikation des Volumenstroms (2) bzw. Massenstroms (3) mit der entsprechenden Rostfläche hochgerechnet werden. Dies gilt analog auch für die Wärmeleistungen (5 – 8).

**Tabelle 3.3:** Luftseitige Massen- und Energiebilanzen für einen Chargentrockner im reinen Frischluft-Betrieb (exemplarisch).

Größe	Symbol	t = 2 h	t = 40 h	Einheit
(1) Betriebspunkt		<b>B</b>	<b>C</b>	
(2) Volumenstrom der Zuluft	$\dot{V}''_{ZL}$	510	620	$m^3/(h \cdot m^2)$
(3) Massenstrom der Zuluft	$\dot{m}''_{ZL}$	567	690	$kg_L/(h \cdot m^2)$
(4) spez. Enthalpiedifferenz	$\Delta h$	22,5	22,5	$kJ/kg_L$
(5) ideale Wärmeleistung	$\dot{Q}''_{ideal}$	3,54	4,30	$kW/m^2$
(6) Wärmeleistung Ventilator	$\dot{Q}''_{vent}$	-0,21	-0,22	$kW/m^2$
(7) Wärmeverlustleistung	$\dot{Q}''_{verlust}$	0,18	0,22	$kW/m^2$
(8) gesamte Wärmeleistung	$\dot{Q}''_{ges}$	3,51	4,30	$kW/m^2$
(9) Wassergehaltsdifferenz	$\Delta Y$	7,4	2,4	$g_{H_2O}/kg_L$
(10) Entfeuchtungsleistung	$\dot{m}''_W$	4,2	1,7	$kg_{H_2O}/(h \cdot m^2)$
(11) spez. Wärmebedarf	$q_{akt}$	0,835	2,545	$kWh/kg_{H_2O}$
		3,01	9,16	$MJ/kg_{H_2O}$
		100	305	%

(1) aus **Tabelle 3.2**; (2, 3) pro  $m^2$  Rostfläche; (3) Zustand der Zuluft: 40,0 °C; 8,0 g/kg; 60,9 kJ/kg; 17,2 % r.F.; (4) Zustand der Frischluft: 18,0 °C; 8,0 g/kg; 38,4 kJ/kg; 61,4 % r.F.; (5) zur Erwärmung der Frischluft von 18 °C auf 40 °C; (6) Motor des Ventilators im Luftstrom; (7) Annahme: 5 % der Wärmeleistung bei idealer Trocknung; (8) Summe; (9) berechnet aus den angenommenen Luftzuständen; (10) Wassergehaltsdifferenz Abluft – Zuluft multipliziert mit dem Massenstrom der Zuluft; (11) gesamte Wärmeleistung dividiert durch die Entfeuchtungsleistung.

Der Massenstrom der Zuluft (3) resultiert aus der Multiplikation des Volumenstroms (2) mit der Luftdichte bei 40 °C ( $1,11 \text{ kg}/m^3$ ):

$$\dot{m}''_{ZL} = \rho_{ZL} \cdot \dot{V}''_{ZL} \quad (3.1)$$

Da sich die Zustände der Frischluft und der Zuluft voraussetzungsgemäß nicht ändern, bleibt die aus der Lufterwärmung resultierende spez. Enthalpiedifferenz (4) über die gesamte Trocknungsdauer konstant:

$$\Delta h = h_{ZL} - h_{FL} = 60,9 - 38,4 = 22,5 \text{ kJ}/kg_L \quad (3.2)$$

Die bei idealer Trocknung erforderliche Wärmeleistung (5) ergibt sich aus der Multiplikation des Massenstroms der Zuluft (3) mit der spez. Enthalpiedifferenz (4):

$$\dot{Q}''_{ideal} = \dot{m}''_{ZL} \cdot \Delta h \quad (3.3)$$

Ein Ventilator wirkt thermisch auf die durchströmende Luft ähnlich wie ein Erhitzer. Liegt der Motor des Ventilators im Luftstrom, so wird die gesamte elektrische Leistung als nutzbare Wärmeleistung (6) wirksam und ist von der idealen Wärmeleistung (5) zu subtrahieren:

$$\dot{Q}''_{vent} = P''_{vent} \quad (3.4)$$

Für die Wärmeverlustleistung (7) wurden jeweils 5 % der bei idealer Trocknung erforderlichen Wärmeleistung angenommen:

$$\dot{Q}''_{\text{Verlust}} = 0,05 \cdot \dot{Q}''_{\text{theo}} \quad (3.5)$$

Man erkennt in **Tabelle 3.3**, dass die Wärmeverluste in diesem Fall die gleiche Größenordnung besitzen wie die Wärmeleistung des Ventilators. Beide Werte heben sich in etwa gegeneinander auf. Bei guter Wärmeisolierung können Wärmeverluste und die Wärmeleistung von Ventilatoren deshalb vernachlässigt werden. Dies ermöglicht eine Vereinfachung der Berechnung, da die gesamte Wärmeleistung (8) dann der idealen Wärmeleistung (5) entspricht.

$$\dot{Q}''_{\text{ges}} = \dot{Q}''_{\text{ideal}} - \dot{Q}''_{\text{Vent}} + \dot{Q}''_{\text{Verlust}} \quad (3.6)$$

Zur Berechnung der Wassergehaltsdifferenz (9) wurden die in **Abb. 3.2** dargestellten Luftzustände herangezogen (Punkte AL1 zu Beginn der Trocknung und AL3 nach ca. 40 Stunden). Die Wassergehaltsdifferenz sinkt von  $\Delta Y = 7,4 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_\text{L}$  auf  $\Delta Y = 2,4 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_\text{L}$ . Dies entspricht einer Reduzierung auf 33 %.

Die beiden Entfeuchtungsleistungen (10) ergeben sich aus der Multiplikation des jeweiligen Massenstroms der Zuluft (3) mit der entsprechenden Wassergehaltsdifferenz (9):

$$\dot{m}''_{\text{W}} = \dot{m}''_{\text{ZL}} \cdot \Delta Y \quad (3.7)$$

Die Entfeuchtungsleistung sinkt von 4,2 auf 1,7  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ . Dies entspricht einer Reduzierung auf 40 %.<sup>22</sup> Der aktuelle spez. Wärmebedarf der Trocknung (11) errechnet sich aus der gesamten Wärmeleistung dividiert durch die Entfeuchtungsleistung:

$$q_{\text{akt}} = \frac{\dot{Q}''_{\text{ges}}}{\dot{m}''_{\text{W}}} \approx \frac{\Delta h}{\Delta Y} \quad (3.8)$$

Der spez. Wärmebedarf (11) steigt von 3,01 auf 9,16  $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  und ist damit nach 40 Stunden Trocknungsdauer mehr als dreimal so groß wie zu Beginn der Trocknung. Bei Fortsetzung des reinen Frischluft-Betriebs steigt der spez. Wärmebedarf weiter. Die Trocknung mit Teilumluft sollte deshalb unbedingt realisiert werden, und zwar bereits ab einem früheren Zeitpunkt. Idealerweise sollte der Umluftanteil dabei dem Trocknungsverlauf angepasst werden.

### Heiz- und Brennwerte von Brennstoffen

In den bisher erläuterten Berechnungsbeispielen wurde die im Trocknungsprozess benötigte Wärmeleistung bestimmt. Im Unterschied dazu bezeichnet die Heizleistung die thermische Leistung eines Wärmeerzeugers bzw. Heizkessels, der bei konventioneller Lufterwärmung z.B. mit Heizöl oder Erdgas betrieben wird. Heizleistung und Wärmeleistung unterscheiden sich durch den thermischen Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers.

Für die Ermittlung des Brennstoffbedarfs bzw. der erforderlichen Brennstoffleistung sind folglich der thermische Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers (Gleichungen A.86 und A.87 im Anhang) und der Heizwert des jeweiligen Brennstoffs zu berücksichtigen. Dabei sind auch die

<sup>22</sup> Der Luftvolumenstrom – voraussetzungsgemäß ohne Drehzahlregelung des Ventilators – hat sich zu diesem Zeitpunkt erhöht. Ursache ist der im Vergleich zum Beginn der Trocknung deutlich geringere Druckverlust der Kamilleblüten.

Besonderheiten fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe zu beachten. Heiz- und Brennwerte von Heizöl und Erdgas bei 25 °C zeigt **Tabelle 3.4**. Schwankungsbreiten sowie Werte weiterer Brennstoffe sind in **Tabelle D.2** im Anhang zusammengestellt.

**Tabelle 3.4:** Heiz- und Brennwerte von Heizöl und Erdgas bei 25 °C.

Brennstoff	Brennwert bei 25 °C	Heizwert bei 25 °C	Heizwert bei 25 °C	Anmerkungen
Heizöl EL	<i>MJ/kg</i> 45,4	<i>MJ/kg</i> 42,6	<i>kWh/l</i> 10,0	bei einer Dichte von 0,845 <i>kg/l</i>
Erdgas	<i>MJ/kg</i> 43,0	<i>MJ/kg</i> 38,5	<i>kWh/m<sup>3</sup></i> 9,0	<i>kWh/m<sup>3</sup> i. N.</i> (1) 10,0 (2)

(1) i.N. = in Normbedingung (101.325 Pa, 0 °C);

(2) Bei 100.000 Pa und 25 °C ist der volumenbezogene Heizwert gasförmiger Brennstoffe um ca. 10 % kleiner als unter Normbedingungen.

Heiz- und Brennwerte werden in Tabellenwerken standardmäßig auf die Masse des Brennstoffs bei 25 °C bezogen.<sup>23</sup> Der Unterschied resultiert aus der Verdampfungswärme des von der Verbrennung herrührenden Wasserdampfes. Während der Brennwert als Brennstoffeigenschaft eine international festgelegte Normgröße darstellt, kommt dem Heizwert die Bedeutung einer praktischen Rechengröße zu, die auf die technischen Verbrennungsvorgänge mit ihren hohen Abgastemperaturen abgestimmt ist. Bei flüssigen und gasförmigen Brennstoffen kann der massenbezogene Heizwert (*MJ/kg*) mit Hilfe der Dichte in einen volumenbezogenen Heizwert umgerechnet werden (und umgekehrt), z.B. in Kilowattstunden je Liter (*kWh/l*). Die für Heizöl Extraleicht (EL) im Handel verwendete Referenzdichte ist wie bei Dieselkraftstoff mit 0,845 *kg/l* vereinbart.

Bei gasförmigen Brennstoffen beziehen sich volumenbezogene Angaben üblicherweise auf die Normbedingung bei 101.325 Pa und 0 °C. Die Angabe erfolgt dann in Megajoule pro Normkubikmeter (*MJ/m<sup>3</sup> i. N.*). Bei kleineren Gesamtdrücken und höheren Temperaturen des Brennstoffs ist der volumenbezogene Heizwert deutlich kleiner. Die Umrechnung auf z.B. 100.000 Pa und 25 °C nach dem idealen Gasgesetz führt zu einem volumenbezogenen Heizwert (in *kWh/m<sup>3</sup>*), der im Vergleich zur Normbedingung nur ca. 90 % beträgt (Gl. D.1 im Anhang sowie **Tabelle 3.4**).

Dieser Zusammenhang ist dann zu beachten, wenn der Volumenstrom des gasförmigen Brennstoffs aus der Wärmeleistung und dem volumenbezogenen Heizwert ermittelt werden soll. Besser ist es jedoch, den Massenstrom, die Dichte und den massenbezogenen Heizwert (in *MJ/kg*) zu verwenden. Die Berechnung der erforderlichen Brennstoffleistung kann dann wie bei flüssigen Brennstoffen erfolgen.

<sup>23</sup> Der Heizwert wurde früher als "unterer Heizwert", der Brennwert als "oberer Heizwert" bezeichnet.

### Primärenergetische Bewertung unterschiedlicher Energieträger

Erneuerbare Energiequellen wie z.B. Sonne, Wind und Wasserkraft, aber auch fossile Energieträger wie z.B. Erdöl, Erdgas und Kohle werden in der Energiewirtschaft als **Primärenergie** (PE) bezeichnet. Durch unterschiedliche, mit Verlusten behaftete Umwandlungsprozesse kann Primärenergie in **Sekundärenergie** umgewandelt werden. Beispiele für Sekundärenergie sind Koks und Kohlebriketts, Mineralölerzeugnisse wie Heizöl und Benzin, in Wärmekraftwerken erzeugter elektrischer Strom sowie Fernwärme. Bei allen Umwandlungsprozessen geht ein Teil der Primärenergie als Abwärme verloren und steht nicht mehr als **Nutzenergie** zur Verfügung. Mögliche Formen von Nutzenergie sind Wärme, Kälte, Licht mechanische Arbeit oder auch Schallwellen. Als **Endenergie** wird die Verwendung von Energieträgern in einzelnen Verbrauchersektoren bezeichnet, sofern sie unmittelbar zur Erzeugung von Nutzenergie oder für Energiedienstleistungen eingesetzt werden. Endenergie ist die am jeweiligen Zähler gemessene bzw. abgerechnete Energie und beinhaltet außer der Nutzenergie auch die unvermeidlichen Anlagenverluste.

Der Bedarf von Trocknungsanlagen an thermischer und elektrischer Energie kann auf unterschiedliche Art und Weise gedeckt werden. Prinzipiell kommen fossile Brennstoffe, nachwachsende Rohstoffe, Blockheizkraftwerke, Wärmepumpen und thermische Solaranlagen in Frage. Sollen die unterschiedlichen Energieformen und anlagentechnischen Varianten aus energetischer Sicht miteinander verglichen werden, so ist eine primärenergetische Bewertung erforderlich. Zu diesem Zweck wird die benötigte Endenergie mit sogenannten **Primärenergifaktoren** (PE-Faktoren) multipliziert und dadurch in Primärenergie umgerechnet.

PE-Faktoren unterschiedlicher Energieträger sind in der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV, 2013) festgelegt (**Tabelle D.3** im Anhang).

Die PE-Faktoren setzen sich jeweils aus einem nicht erneuerbaren bzw. konventionellen Anteil  $\Pi_{konv}$  und einem erneuerbaren bzw. regenerativen Anteil  $\Pi_{reg}$  zusammen:<sup>24</sup>

$$\Pi_{ges} = \Pi_{konv} + \Pi_{reg} \quad (3.9)$$

Bei Heizöl, Erdgas, Flüssiggas, und Steinkohle entspricht der nicht erneuerbaren Anteil jeweils dem gesamten PE-Faktor von 1,1. Dies bedeutet, dass der Zusatzaufwand für die Bereitstellung beim Endverbraucher mit 10 % angesetzt wird.

Für elektrischen Strom im allgemeinen deutschen Energiemix gilt in der aktuell gültigen EnEV ein gesamter PE-Faktor von 2,8. Mit diesem Wert werden die hohen Verluste an Primärenergie bei der Stromerzeugung berücksichtigt. Aufgrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien wurde der nicht erneuerbare Anteil zum 1.1.2016 auf 1,8 gesenkt. Bei der Berechnung der Primärenergie für den Bedarf an elektrischem Strom ist grundsätzlich der nicht erneuerbare Anteil zu verwenden. Für Strom, der durch Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugt und nach Abzug des Eigenbedarfs in das Verbundnetz eingespeist wird, gilt der sogenannte Verdrängungs-Strommix mit einem PE-Faktor von 2,8.

<sup>24</sup> Holz hat beispielsweise einen gesamten PE-Faktor von 1,2 mit einem nicht erneuerbaren Anteil von 0,2. Dies bedeutet, dass für 100 kWh Endenergie zusätzlich nur 20 kWh nicht erneuerbare Primärenergie benötigt werden. Je größer das Verhältnis vom gesamtem PE-Faktor zum nicht erneuerbaren Anteil, desto größer ist die Nachhaltigkeit.

### Primärenergiefaktoren für elektrisch angetriebene Wärmepumpen

Die Berechnung des PE-Faktors für Elektro-Wärmepumpen erfolgt nach der im Folgenden beschriebenen Methode. Gemäß Anhang VII der EU-Richtlinie (EU-2009/28/EG, 2009) ist die Menge der durch Wärmepumpen-Technologie gewonnenen Energie aus erneuerbaren Quellen  $E_{RES}$  nach folgender Formel zu berechnen (EU-2009/28/EG, 2013):

$$E_{RES} = Q_{usable} \cdot (1 - 1/SPF) \quad (3.10)$$

Dabei sind  $Q_{usable}$  die geschätzte durch Wärmepumpen erzeugte gesamte Nutzwärme in  $GWh$  und  $SPF$  der geschätzte durchschnittliche jahreszeitbedingte Leistungsfaktor. Ersetzt man  $Q_{usable}$  durch die nutzbare Wärmeleistung  $\dot{Q}_{nutz}$  und  $SPF$  durch die Leistungszahl  $COP$  der Wärmepumpe im Auslegungspunkt, so gilt für die aus regenerativen Energiequellen gewonnene Wärmeleistung  $\dot{Q}_{reg}$ :

$$\dot{Q}_{reg} = \dot{Q}_{nutz} \cdot (1 - 1/COP) \quad (3.11)$$

Die Leistungszahl  $COP$  (coefficient of performance) ist definiert als Verhältnis der nutzbaren Wärmeleistung  $\dot{Q}_{nutz}$  zur gesamten elektrischen Antriebsleistung der Wärmepumpe  $P_{ges}$ :

$$COP = \dot{Q}_{nutz} / P_{ges} \quad (3.12)$$

Gl. (3.11) lässt sich nach dem regenerativen und dem nicht erneuerbaren Anteil der nutzbaren Wärmeleistung umformen:

$$\text{Regenerativer Anteil:} \quad \frac{\dot{Q}_{reg}}{\dot{Q}_{nutz}} = 1 - \frac{1}{COP} \quad (3.13)$$

$$\text{Nicht erneuerbarer Anteil:} \quad 1 - \frac{\dot{Q}_{reg}}{\dot{Q}_{nutz}} = \frac{\dot{Q}_{nutz} - \dot{Q}_{reg}}{\dot{Q}_{nutz}} = \frac{1}{COP} = \frac{P_{ges}}{\dot{Q}_{nutz}} \quad (3.14)$$

Der nicht erneuerbare Anteil ist der aus konventionellen Energieträgern gewonnene Anteil der thermischen Wärmepumpenleistung. Er entspricht dem Kehrwert des  $COP$  bzw. der elektrischen Antriebsleistung bezogen auf die nutzbare Wärmeleistung. Damit gilt für den PE-Faktor von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen:

$$\Pi_{WP} = \Pi_{el,ges} - \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad \text{mit} \quad \Pi_{el,ges} = 2,8 \quad (3.15)$$

$$\text{bzw.} \quad \Pi_{WP} = \Pi_{el,konv} + \frac{1}{COP} \quad \text{mit} \quad \Pi_{el,konv} = 1,8 \quad (3.16)$$

Für Wärmepumpen mit Leistungszahlen im Bereich von  $COP = 4,0 \dots 6,0$  ergeben sich PE-Faktoren von  $\Pi_{WP} = 2,05 \dots 1,97$  (**Tabelle D.3** im Anhang). Der relative Primärenergiebedarf (PE-Bedarf) in Abhängigkeit vom  $COP$  ist im Abschnitt 5.2.5 dargestellt (**Abb. 5.6**).

### 3.4 Trocknungstechnische Kennzahlen

Zur Erläuterung trocknungstechnischer Kennzahlen werden nachfolgend die wichtigsten Formeln und Bilanzgleichungen aufgeführt, die zur Berechnung von Trocknungsprozessen erforderlich sind. Dabei müssen die Luftzustände der Trocknung bekannt sein. Für Details wird

auf die bisherigen Abschnitte des Leitfadens und auf den Anhang verwiesen.<sup>25</sup> Die Umrechnung von Energieeinheiten ist ebenfalls im Anhang dargestellt (**Tabelle D.1**).

Der **Massenstrom der Zuluft** (Gl. A.23) errechnet sich bei gegebenem Volumenstrom der Zuluft durch Multiplikation mit der Luftdichte:

$$\dot{m}_{ZL} = \rho_{ZL} \cdot \dot{V}_{ZL} \quad (3.17)$$

Bei der Berechnung der **Luftdichte** (Gl. A.21) sind der Gesamtdruck in Pa, die Temperatur der Zuluft in K, und, für sehr genaue Berechnungen, der Wassergehalt in kg/kg zu berücksichtigen:<sup>26</sup>

$$\rho_{ZL} = \frac{p \cdot (1 + Y)}{T \cdot (R_L + Y \cdot R_D)} \quad (3.18)$$

Die **Trocknungs- bzw. Entfeuchtungsleistung**, ausgedrückt in kg Wasserentzug pro Zeiteinheit, ergibt sich aus der Wasserbilanz der Luft (Gl. A.24):

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{ZL} \cdot (Y_{AL} - Y_{ZL}) = \dot{m}_{FL} \cdot (Y_{AL} - Y_{FL}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta Y \quad (3.19)$$

Im reinen Frischluft-Betrieb, d.h. bei Trocknung ohne Teilumlufte, entspricht der Massenstrom der Zuluft dem der Frischluft. Gleiches gilt für die Wassergehalte. Bei Trocknung mit Teilumlufte lassen sich im Mollier  $h, Y$ -Diagramm oder rechnerisch bereits zwei trockenungstechnische Kennzahlen ermitteln.

**Spez. Frischluftbedarf** pro kg verdunstetes Wasser (Gl. A.36):

$$l_{FL} = \frac{\dot{m}_{FL}}{\dot{m}_W} = \frac{1}{(Y_{AL} - Y_{FL})} \quad (3.20)$$

**Spez. Zuluftbedarf** pro kg verdunstetes Wasser (Gl. A.37):

$$l_{ZL} = \frac{\dot{m}_{ZL}}{\dot{m}_W} = \frac{1}{(Y_{AL} - Y_{ML})} \quad (3.21)$$

Je weiter der Abluftzustand im Mollier  $h, Y$ -Diagramm nach rechts zu liegen kommt, umso kleiner ist der spez. Luftbedarf. Dieser Zusammenhang, der zu einer kleineren Ventilatorleistung führt, gilt nicht nur für Trocknung mit Teilumlufte, sondern allgemein.

Die **normierte Luftfeuchte  $\Psi$**  (Gl. A.38) kann zu jedem Zeitpunkt der Trocknung aus gemessenen Luftzuständen berechnet werden.<sup>27</sup> Sie beschreibt das Verhältnis der aktuellen Wassergehaltsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft zur maximal möglichen Wassergehaltsdifferenz bei Sättigung der Abluft:

$$\Psi = \frac{Y_{AL} - Y_{ZL}}{Y_{AL,sat} - Y_{ZL}} = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_{max}} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} h_{AL} &= h_{ZL} = const \\ Y_{AL,sat} &= Y(h_{ZL}, \varphi = 100\%) \end{aligned} \quad (3.22)$$

<sup>25</sup> Die Erläuterungen beziehen sich teilweise auf Gleichungen, die in Tabellen zur kontinuierlichen Trocknung angegeben sind. Diese Gleichungen gelten jedoch auch für einen bestimmten Zeitpunkt der Chargentrocknung.

<sup>26</sup> Dabei ist nicht die Celsius-Temperatur  $\vartheta$ , sondern die Kelvin-Temperatur  $T = 273,15 + \vartheta$  zu verwenden. Der Wassergehalt der Zuluft kann vereinfachend gleich Null gesetzt werden.

<sup>27</sup> Weitere Zusammenhänge zur normierten Luftfeuchte  $\Psi$  werden in Anhang F erläutert (**Abb. F.5**).



Die ideale **Wärmeleistung bei Trocknung ohne Teilumluf** (Gl. A.27) errechnet sich aus dem Massenstrom der Zuluft und den gegebenen Luftzuständen:<sup>28</sup>

$$\dot{Q}_{ideal} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{FL}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta h \quad (3.23)$$

Die ideale **Wärmeleistung bei Trocknung mit Teilumluf** (Gl. A.42) errechnet sich analog, jedoch mit dem Unterschied, dass statt der spez. Enthalpie der Frischluft die spez. Enthalpie der Mischluft zu verwenden ist:

$$\dot{Q}_{ideal} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{ML}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta h \quad (3.24)$$

Die **gesamte Wärmeleistung** ergibt sich aus der Wärmebilanz des Trockners (Gl. A.69), wobei ggfs. die Wärmeleistung zur Guterwärmung  $\dot{Q}_{sens}$ , die durch Ventilatoren zugeführte Wärmeleistung  $\dot{Q}_{vent}$  und die Wärmeverlustleistung  $\dot{Q}_{verlust}$  berücksichtigt werden:<sup>29</sup>

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{ideal} + \dot{Q}_{sens} - \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{verlust} \quad (3.25)$$

Da es beim Trocknungsprozess keinen sinnvollen energetischen Nutzen gibt, ist der thermische Wirkungsgrad keine auf den Trocknungsprozess anwendbare Größe (Maltry et al., 1975). Stattdessen wird der spezifische Energiebedarf pro kg verdunstetes Wasser herangezogen. Dabei ist zwischen thermischer und elektrischer Energie zu unterscheiden.

Für den **spez. Wärmebedarf** (Gl. A.70) gilt bei idealer Trocknung:

$$q_{ideal} = \frac{\dot{Q}_{ideal}}{\dot{m}_W} = \frac{\Delta h}{\Delta Y} \quad (3.26)$$

Ebenso wie der spez. Luftbedarf ist auch der spez. Wärmebedarf der Trocknung umso kleiner, je weiter der Abluftzustand im Mollier  $h, Y$ -Diagramm nach rechts zu liegen kommt.

Der **gesamte spez. Wärmebedarf** des Trocknungsprozesses (Gl. A.85) kann aus der gesamten Wärmeleistung dividiert durch die Entfeuchtungsleistung berechnet werden:

$$q_{ges} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\dot{m}_W} = q_{ideal} + q_{sens} - q_{vent} + q_{verlust} \quad (3.27)$$

Im Unterschied dazu berücksichtigt der **spez. thermische Energiebedarf  $STB$**  (Gl. A.88) den thermischen Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung, z.B. des Heizkessels:

$$STB = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_W} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\eta_{th,H} \cdot \dot{m}_W} = \frac{q_{ges}}{\eta_{th,H}} \quad (3.28)$$

Der **spez. elektrische Energiebedarf  $SEB$**  (Gl. A.89) errechnet sich aus der benötigten elektrischen Leistung dividiert durch die Entfeuchtungsleistung. Bei der Leistungsregelung von Ventilatoren ist ggfs. der Wirkungsgrad der Frequenzumrichter zu berücksichtigen:

$$SEB = \frac{P}{\dot{m}_W} = \frac{P_{vent}}{\eta_{FU} \cdot \dot{m}_W} \quad (3.29)$$

<sup>28</sup> Der Index "ideal" bezieht sich immer auf Werte, die bei idealer Trocknung aus den Luftzuständen im Mollier  $h, Y$ -Diagramm berechnet werden können.

<sup>29</sup> Die Wärmeleistung zur Guterwärmung kann insbesondere bei Chargentrocknung vernachlässigt werden. Liegen die Motoren der Ventilatoren im Luftstrom, so wird die gesamte zugeführte elektrische Leistung als Wärmeleistung wirksam. Diesem Fall wird durch das Minuszeichen in Gl. (3.25) Rechnung getragen.

Der **spez. Primärenergiebedarf  $SPB$**  (Gl. A.90) wird durch Multiplikation mit PE-Faktoren aus dem spez. thermischen und dem spez. elektrischen Energiebedarf berechnet:

$$SPB = \Pi_{th} \cdot STB + \Pi_{el} \cdot SEB \quad (3.30)$$

Umgerechnet in Primärenergie können thermische und elektrische Energie addiert werden. Dies ermöglicht eine vergleichende Bewertung von unterschiedliche Varianten des Betriebs und der Energieversorgung von Trocknungsanlagen.

### 3.5 Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten

Aufgrund der Artenvielfalt, unterschiedlicher Qualitätsanforderungen und unterschiedlicher Verfahrensschritte der Vorbehandlung existiert eine Vielzahl von Trocknerbauarten in unterschiedlichen Baugrößen. Die Vielfalt der existierenden verfahrenstechnischen Trocknungsprobleme erfordert für jede Aufgabe eine individuelle Lösung (Maltry, 1996c).

#### Gemeinsame Merkmale von Konvektionstrocknern

Trocknung gilt als verfahrenstechnische Grundoperation. Die Thermodynamik des Trocknungsprozesses galt u.a. dem Wärme- und Stoffaustausch zwischen Gut und Luft. Die Vorgänge bei der Trocknung von Einzelkörpern wurden umfassend von vielen Autoren erforscht. Zu Beschreibung des Trocknungsverhaltens von Einzelkörpern wurden empirische, halbempirische und physikalische Modelle aufgestellt. Auch die Trocknung von Schüttgutschichten war insbesondere im Bereich der Agrarforschung mehrfach Gegenstand der Untersuchung, z.B. durch Maltry (1975). Aus dem außerordentlich umfangreichen Schrifttum über trocknungstechnische Grundlagen kommt den Arbeiten von Krischer (1978) und seinen Mitautoren (Kröll, 1978; Kröll & Kast, 1989) besondere Bedeutung zu.

Alle Trocknerbauarten, die im Leitfaden behandelt werden, sind Konvektionstrockner, in denen erwärmte Luft als Trocknungsmedium eingesetzt wird. Konvektive Trocknungsverfahren werden zum einen durch die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft, zum anderen durch die Wasserabgabefähigkeit der Trocknungsgüter bestimmt.

Die meisten Trocknerbauarten für Arznei- und Gewürzpflanzen sind sog. Durchströmtrockner für luftdurchlässiges Schüttgut. Rost- oder Bandtrockner bestehen aus einer luftdurchlässigen Auflage (dem Rost oder Siebband), auf der das zu trocknende Schüttgut aufliegt. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art der Gutbewegung (Maltry, 1996a):

- Ruhendes Schüttgut während der gesamten Trocknungsdauer (Satzrockner),
- Transport des Schüttgutes auf stillstehendem Rost (mechanisierte Darren),
- Transport des Schüttgutes auf umlaufenden Bändern (Bandtrockner).

Es gibt auch Mischformen, z.B. Bandtrockner, die während des Trocknungsprozesses stillstehen und nur zum Zwecke des Befüllens und Entleerens in Bewegung gesetzt werden, d.h. trocknungstechnisch wie Satzrockner betrieben werden. **Tabelle 3.5** zeigt einen Verfahrensvergleich zwischen Flächen- und Bandtrocknern.

**Tabelle 3.5:** *Verfahrensvergleich zwischen Flächen- und Bandtrocknern nach Mellmann & Fürll (2008).*

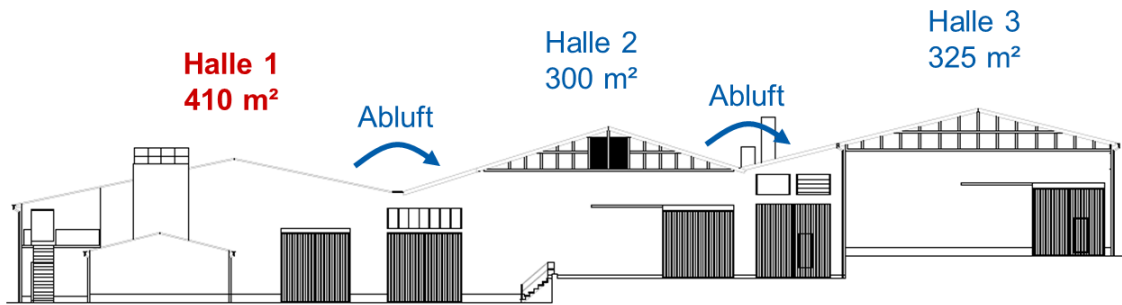
Trocknertyp	Flächentrockner	Bandtrockner
Kontaktierung Gut / Luft	ruhende durchströmte Schicht	bewegte durchströmte Schicht, Kreuz-Gegenstrom
Betriebsweise	diskontinuierlich (Satzbetrieb)	kontinuierlich
Trocknungsgut	überwiegend Ganzpflanzen	geschnittene Pflanzen, Stängel vor der Trocknung entfernt
Trocknungstemperatur	35 – 45 °C	45 – 110 °C
Trocknungsdauer	3 – 4 Tage	3 – 10 h
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>– schonende Trocknung durch ruhendes Gut, niedrige Temperaturen</li> <li>– geringer Arbeitskräftebedarf, einfache Bedienung</li> <li>– hohe Schlagkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kurze Trocknungszeiten</li> <li>– geringerer Energieverbrauch</li> <li>– Regelbarkeit</li> <li>– kompakte Bauweise</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>– lange Trocknungszeiten</li> <li>– höherer Energieverbrauch</li> <li>– große Volumina und Oberflächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Investitionskosten</li> <li>– Verluste an ätherischen Ölen durch Schneiden der Pflanzen, hohe Temperaturen</li> <li>– höherer Arbeitskräftebedarf durch kontinuierlichen Betrieb</li> </ul>

### Flächentrockner

Die schlagkräftige Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen ist ein sehr schonendes Trocknungsverfahren, das bereits in der 60er Jahren auf Grundlage der Belüftungstrocknung von Heu entwickelt wurde. Diese Art der Satzrocknung ist hinsichtlich der Investitionen relativ günstig und spielt aufgrund der hohen Qualitätsansprüche der Abnehmer unzerkleinerter Pflanzenbestandteile eine bedeutende Rolle. Die wichtigsten Vorteile dieses bewährten Verfahrens sind seine Einfachheit, die Anwendbarkeit für unterschiedliche Produktarten, sofortige Trocknung ohne Zwischenlagerung und niedrige Arbeitskosten (Ziegler & Mellmann, 2008). Bis 2006 variierte der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten zwischen 30 % und 55 %, wovon allein etwa 85 % auf den Brennstoffverbrauch entfielen (Mellmann & Fürll, 2008).

Nachteilig sind oftmals inhomogene Strömungsverteilungen der Luft und hohe Wärmeverluste aufgrund schlecht isolierter Anlagenteile. Aus einer ungleichmäßigen Trocknung kann ein hoher thermischer Energiebedarf entstehen. Hinzu kommen häufig unzureichende Messtechnik und manuelle Trocknersteuerungen. Hohe Trocknungskosten sind die Folge. Das Verfahren der Flächentrocknung wird nachfolgend am Beispiel einer Trocknungsanlage erläutert, die von der Agrargenossenschaft Nöbdenitz e.G. mit Sitz in Lohma (Ostthüringen) betrieben wird.

Die älteste von insgesamt drei Trocknungshallen wurde 2010 modernisiert. Eine Ansicht der Trocknungsanlage vor der Modernisierung zeigt **Abb. 3.6**. Die gesamte Anlage wird durch eine zentrale gas- und ölbeheizte Feuerungsanlage mit Warmwasser versorgt.

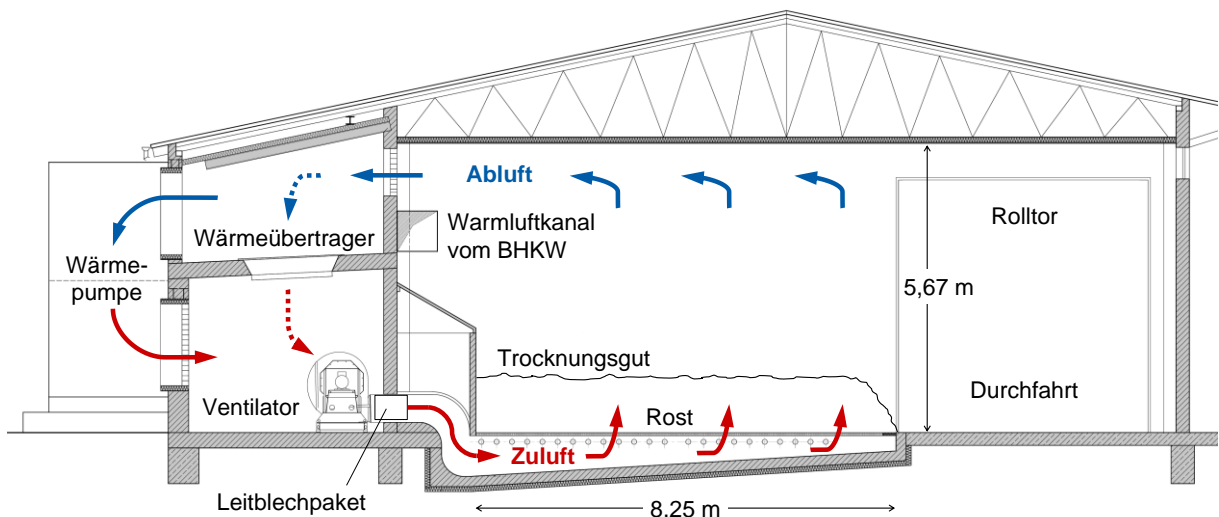


**Abb. 3.6:** Ansicht der Trocknungsanlage Nöbdenitz vor der Modernisierung.

Jede der drei Hallen besitzt einen Anbau, in dem die Ventilatoren und die Luft-Wasser-Wärmeübertrager untergebracht sind. Ein Teil der Abluft kann als Zuluft für die jeweils benachbarte Halle genutzt werden. Einen Schnitt durch Halle 1 nach der Modernisierung zeigt **Abb. 3.7**.

Neben der Erneuerung des befahrbaren Rostaufbaus in der gesamten Halle umfasste die Modernisierung ein BHKW, insgesamt 14 neue Ventilatoren und zwei hocheffiziente Wärmepumpen. Der Betonboden unter den Trocknungsrosten wurde mit Polystyrol-Hartschaumplatten (10 cm) isoliert. Zwei von insgesamt fünf Trocknungsrosten verfügen über eine isolierte Decke aus Polystyrol-Sandwichelementen (ebenfalls 10 cm) und zwei Rolltore, die während der Trocknung geschlossen werden. Dadurch wird ein komplett geschlossener Betrieb der Wärmepumpentrocknung mit Luftentfeuchtung realisiert.

In der Zwischendecke des zweigeschossigen Anbaus befinden sich Luft-Wasser-Wärmeübertrager, die nicht modernisiert wurden und von der zentralen Heizungsanlage mit Warmwasser versorgt werden. Auch die beiden Wärmepumpenroste verfügen über diese Wärmeübertrager, sodass die Trocknung auch dort mit konventioneller Lufterwärmung durchgeführt werden kann. In diesem Fall bleiben die Rolltore geöffnet.



**Abb. 3.7:** Schnitt durch Halle 1 der Trocknungsanlage Nöbdenitz nach der Modernisierung (PGF, 2010).

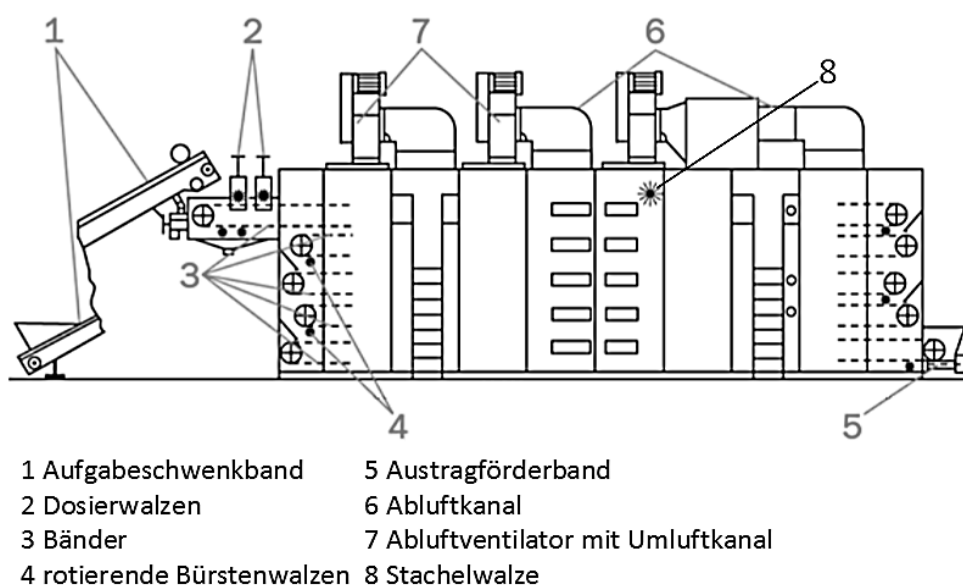
## Bandrockner

Zur schnellen Konservierung von Arznei- und Gewürzpflanzen sind auch kontinuierlich betriebene Mehrbandrockner weit verbreitet. Für Gewürzkräuter in geschnittener Form kommen Bandrockner in unterschiedlichen Bauformen zum Einsatz. Die umlaufenden, luftdurchlässigen Bänder werden dabei übereinander (z.B. Drei- oder Fünfbandrockner als Haupttrockner) und/oder hintereinander (z.B. Einbandrockner als Vortrockner) angeordnet. Die thermische Energieversorgung erfolgt meistens mit öl- oder gasbeheizten Warmluft-erzeugern. Oft wird Abwärme von Biogasanlagen mit eingebunden (Böhner et al., 2012).

Bei der Bandtrocknung wird das Gut kontinuierlich auf perforierten Förderbändern in einer Trockenkammer transportiert, wodurch große Produktdurchsätze möglich sind. Dies erfordert eine rieselfähige Gutstruktur, welche durch Schneide- und Sortieranlagen vorher aufbereitet wird. Die Trocknung von geschnittenem Material läuft schneller ab, zudem werden durch Klassierungsverfahren wertlose Grobstile aussortiert, die nicht mitgetrocknet werden müssen (Heindl & Hoppe, 2010).

Mehrbandrockner bieten den Vorteil einer kompakten Bauform (**Abb. 3.8**). Das vorher aufbereitete Trocknungsgut wird mit Hilfe von Schwenkförderbändern gleichmäßig auf das oberste Trocknerband verteilt. Anschließend wird das Gut serpentinenförmig durch den Trockner gefahren. Im Trockner wird das Gut durch die Umlagerung auf das darunter liegende Band aufgelockert, was zu einer Verbesserung der Homogenität führt. Mit Hilfe von eingebauten Stachelwalzen wird uneben aufgeschüttetes Gut auf eine gleichmäßige Schütthöhe gebracht, wobei auch Feuchtenester aufgebrochen werden.

Durch die etagenweise Anordnung können einzelne oder mehrere Bänder mit einer separaten Warmluftversorgung ausgestattet werden. Die Lufterwärmung erfolgt in der Regel über Heizregister. Für jeden Trocknungsbereich wird die erforderliche Luftmenge mit einer bestimmten Temperatur eingebracht. Zu Beginn kann mit vergleichsweise hohen Lufttemperaturen getrocknet werden, da sich das feuchte Gut durch den Verdunstungsvorgang stark abkühlt.



**Abb. 3.8:** Seitenansicht eines Fünfbandrockners (Heindl & Müller, 2010).

Auf dem weiteren Transportweg kann die Lufttemperatur von oben nach unten abnehmend eingestellt werden. Durch Abstufung der Bandgeschwindigkeiten von oben nach unten werden höhere Schichtdicken des trocknenden Gutes erreicht, wodurch die Trocknungsfläche der Bänder besser ausgenutzt wird (Heindl & Müller, 2010).

Der zeitliche Verlauf der Trocknung beeinflusst maßgeblich die Qualitätseigenschaften der getrockneten Produkte (z.B. Inhaltsstoffe, Farbe, mikrobielle Keimzahlen). Lufttemperaturen, Luftmengen und Produktdurchsatz müssen deshalb für jedes einzelne Band so angepasst werden, dass die geforderten Qualitätsparameter erzielt werden. Da unterschiedliche Produkte teilweise stark unterschiedliche Trocknungseigenschaften aufweisen, benötigt jedes Produkt ein optimiertes Trocknungsregime. Ziel ist es jeweils, einen möglichst hohen Durchsatz und gleichzeitig einen möglichst kleinen spezifischen Energiebedarf zu realisieren.

2016 ist ein umfangreiches "Praxisbuch Bandtrocknung" erschienen. Dieses Buch soll dem in der Praxis stehenden Techniker, Ingenieur oder Betriebsleiter einen Überblick über die Grundlagen und Anwendungen der Bandtrocknung geben (Heindl, 2016). Das Buch enthält u.a. Abschnitte über Bandtrockner in der Lebensmittelindustrie (Gemüse, Kartoffeln, Zwiebeln sowie Arznei- und Gewürzpflanzen), Bandtrockner in der Landwirtschaft (Hopfen, Gras), Zusammenhänge zwischen Trocknung und Qualität (Obst, Gemüse, Arznei- und Gewürzpflanzen) sowie zahlreiche weitere Detailinformationen zu einzelnen Pflanzenarten (z.B. Aromahopfen, Johanniskraut, Luzerne, Petersilie).

### **Weitere Trocknerbauarten**

In Schrank-, Kammer- und Kanaltrocknern wird das auf Horden oder Blechen lagernde Trocknungsgut vorwiegend konvektiv mittels Über- oder Durchströmung getrocknet. Schrank- und Kammertrockner unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Größe: Während erstere von außen beschickt werden müssen, sind letztere begehbar. Beide werden diskontinuierlich betrieben. Dagegen arbeiten Kanaltrockner kontinuierlich bzw. quasi-kontinuierlich. Die Horden sind hier auf Wagen angeordnet, die den Trockner kontinuierlich oder schrittweise durchlaufen, indem ein mit Frischgut beladener Hordenwagen alle im Trockenkanal befindlichen Wagen vor sich herschiebt und den letzten, mit getrocknetem Gut beladenen Wagen am anderen Trocknerende ausstößt (Militzer, 1996a).

Blüten wie Kamille können wie geschnittene Arznei- und Gewürzpflanzen auf halbkontinuierlichen Kipphordentrocknern getrocknet werden (Heindl & Müller, 2010). Auch Kipphordentrockner gibt es in unterschiedlichen Ausführungen und Abmessungen. Die Luftdurchströmung erfolgt von unten nach oben. Die Frischware wird auf die obere Horde aufgegeben, nach einer bestimmten Zeit mit Hilfe von Kippmechanismen auf die darunterliegende Horde abgekippt und so weiter. Nach Erreichen des gewünschten Endfeuchtegehalts auf der unteren Horde wird die Trockenware entnommen.

Etagentrockner sind ähnlich wie Mehrbandtrockner aufgebaut, oft jedoch bedeutend größer. Eine Ausführung, die vorrangig für die Ganzpflanzentrocknung entwickelt wurde, besteht aus einem mehrstöckigen Trocknergebäude mit drei Trocknungsetagen, auf denen jeweils zwei Trocknungsbänder laufen. Die Trocknungsbänder können einzeln oder parallel und auch mit Teilumluft betrieben werden (Mellmann & Füll, 2007).



### Spezifischer thermischer Energiebedarf

**Tabelle 3.6** zeigt Werte des spez. thermischen Energiebedarfs  $STB$  für unterschiedliche Trocknerbauarten. Bei Flächentrocknern fällt sofort die große Schwankungsbreite der Werte auf. Der  $STB$  liegt zwischen  $5,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Kamille und  $36 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Baldrian. Derart große Unterschiede können nicht auf Trocknungstemperaturen oder Eintrocknungsverhältnisse zurückgeführt werden. Die Ursache liegt vielmehr in den Betriebsbedingungen der jeweiligen Trockner.

Basierend auf Betreiberangaben ermittelten Mellmann & Fürll (2007) durchschnittliche Jahreswerte für Kamilleblüten ( $8,7 - 12,4 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ ), Pfefferminze ( $7,9 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) und andere Krautdrogen ( $8,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ ). Praxismessungen bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. belegen das große Einsparpotenzial der Trocknung mit Teilumluft: 25 % bei Baldrian im November, 29 % bei Kamille im Juli und sogar 51 % bei Melisse im August. Bei den Melisse-Messungen wurde allerdings Abluft von einem benachbarten Trocknungsrost genutzt, der bereits einen Tag zuvor in Betrieb gegangen war (Ziegler et al., 2011).<sup>30</sup>

Bei Bandtrocknern gibt es ebenfalls Unterschiede im spez. thermischen Energiebedarf: Nur  $3,8 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  bei Petersilie und bis zu  $8,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  bei Löwenzahn. Obwohl die einzelnen Werte der Einfachheit halber über die jeweiligen Pflanzenarten angesprochen werden, liegt die Ursache dieser Unterschiede nicht in dem produktspezifischen Trocknungsverhalten. Der sehr kleine  $STB$  für Petersilie resultiert zum einen aus den hohen Trocknungstemperaturen: ca.  $115^\circ\text{C}$  am 5-Band-Haupttrockner, ca.  $135^\circ\text{C}$  am zweiten Vortrockner (ein Band) und ca.  $65^\circ\text{C}$  am ersten Vortrockner (ebenfalls ein Band). Zum anderen ermöglichen die beiden Vortrockner eine nahezu vollständige Sättigung der Abluft (Jubaer & Ziegler, 2016b).

Natürlich haben auch die jeweiligen Frischluft- bzw. Außentemperaturen einen Einfluss auf den spez. thermischen Energiebedarf. Die bei der Bandtrocknung von Löwenzahn Anfang Juni 2015 gemessenen Außentemperaturen lagen zwischen ca.  $12^\circ\text{C}$  in der Nacht und ca.  $22^\circ\text{C}$  am Nachmittag. Der in der thermodynamischen Analyse des 5-Band-Trockners ermittelte  $STB$  variierte entsprechend:  $7,4 - 8,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Die Messungen zur Bandtrocknung von Melisse ergaben ebenfalls sehr unterschiedliche Werte im Tagesverlauf:  $4,4 - 5,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Dabei lagen die Außentemperaturen Ende Juni 2015 jedoch deutlich höher: ca.  $19^\circ\text{C}$  in der Nacht und ca.  $26^\circ\text{C}$  am Vormittag. Auch die unterschiedlichen Lufttemperaturen in der Hoch- und Niedertemperaturzone des untersuchten 5-Band-Trockners (ca.  $65/58^\circ\text{C}$  bei Löwenzahn und ca.  $55/42^\circ\text{C}$  bei Melisse) wirkten sich erheblich auf den spez. thermischen Energiebedarf aus (Halemba, 2015).

Diese wenigen Beispiele erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Der spez. thermische Energiebedarf von Arznei- und Gewürzpflanzen wird sehr viel stärker von der Betriebsweise der Trocknungsanlagen und von den Witterungsverhältnissen beeinflusst als von dem Trocknungsverhalten der einzelnen Gutarten. Dies gilt insbesondere für niedrige Trocknungstemperaturen.

<sup>30</sup> Für den hypothetischen Frischluft-Betrieb wurden jeweils die Heizleistung und der daraus resultierende thermische Energiebedarf berechnet, die auf Basis der durchgeführten Messungen bei reiner Frischluftherwärmung erforderlich gewesen wären.

**Tabelle 3.6:** Spezifischer thermischer Energiebedarf unterschiedlicher Trocknerbauarten nach Literaturangaben.

Größe Pflanzenart, Einheit	Temperatur °C	E –	STB $\frac{MJ}{kg_{H_2O}}$	Jahr	Anmerkungen
<u>Flächentrockner</u>					
Kamille (1)	55 – 60	4,45	11,5	–	Blüten
überw. Kamille (2)	45	3,56	12,4	2004	Abschätzung
	45	4,68	8,7		(3)
Kamille (4)	38	4,33	7,7	2010	Juli, FL (hypothetisch)
			5,5		71 % mit TUL (Messung)
Pfefferminze (5)	45	5,93	15,8	–	
Pfefferminze (2)	45	5,50	7,9	2005	(3) Ganzpflanzen
überw. Krautdrogen (2)	40 – 45	4,50	8,5	2005	(3) Ganzpflanzen
Thymian (5)	40 – 45	2,97	17,6	–	
Melisse (4)	42	4,30	12,1	2010	August, FL (hypothetisch)
			(5,9)		49 % mit TUL (Messung)
Baldrian (5)	45	2,97	36,0	–	Wurzeln
Baldrian (4)	36	3,61	20,5	2010	November, FL (hypothetisch)
			15,3		75 % mit TUL (Messung)
<u>Bandrockner</u>					
Artischocke (5)	50/48	5,11	7,9	–	5-BT mit TUL
Hopfen (5)	70/65	4,09	5,7	–	3-BT (Dolden)
Hopfen (2)	61 – 56	4,20	5,3	2005	3-BT (3)
Johanniskraut (5)	60/70	6,00	5,8	–	3-BT (gehäckselt)
Löwenzahn (6)	65/58	4,84	7,4	2015	5-BT mit TUL, Juni, Nachmittag
		4,89	8,6		Juni, Nacht
Melisse (6)	55/42	4,55	4,4	2015	5-BT mit TUL, Juni, Vormittag
		4,40	5,6		Juni, Nacht
Petersilie (7)	115/135/65	6,47	3,8	2014	5-BT mit 2 VT, Aug., Vormittag
Rotklee (5)	75/70	4,60	5,5	–	5-BT mit TUL (30 mm)
Zwiebelscheiben (5)	80/70/60	7,15	4,5	–	5-BT mit WRG (3 mm)
<u>Weitere Trockner</u>					
Hopfen (2)	60 – 56	4,20	8,5	2005	Etagentrockner
Hopfen (5)	65 – 70	4,09	4,7	–	Kipphordentrockner
Kamille (2)	35 – 40	4,45	9,5	2006	Kistentrockner
Melisse (5)	45 – 50	5,93	5,0	–	Kipphordentrockner

E = Eintrocknungsverhältnis; STB = spez. thermischer Energiebedarf pro kg Wasser; FL = reiner Frischluft-Betrieb; TUL = Teilumluf-Betrieb; Temperaturen bei Bandrocknern (BT): Hochtemp. / Niedertemp. / ggfs. Vortrockner (VT) ; WRG = rekuperative Wärmerückgewinnung.

Quellen: (1) Heindl (2005), zitiert in: Heindl & Müller (2010); (2) Mellmann & Fürll (2007); (3) durchschn. Werte nach Betreiberangaben; (4) Ziegler et al. (2011); (5) Heindl & Müller (2010); (6) Jubaer et al. (2016); (7) Jubaer & Ziegler (2016b).

- Es ist nicht möglich, auf der Basis von einzelnen Messungen allgemeingültige Aussagen über die Energieeffizienz von Trocknungsanlagen zu treffen.
- Rückschlüsse über den spez. Wärmebedarf einzelner Pflanzenarten, die auf dem spez. Wärmebedarf von bestimmten Trocknungsanlagen beruhen, sind problematisch.

Der spez. thermische Energiebedarf pro kg Trockengut  $STB_{TG}$  lässt sich über das Eintrocknungsverhältnis  $E$  aus dem spez. thermischen Energiebedarf pro kg Wasser  $STB$  berechnen:

$$STB_{TG} = STB \cdot (E - 1) \quad \text{MJ/kg}_{TG} \quad (3.31)$$

### Vorauswahl von Trocknern

Die Trocknerauswahl für das gesamtwirtschaftlich optimale Trocknen eines bestimmten Gutes ist letztlich ein Kompromiss zwischen in ihrer Wirkung einander entgegengesetzten Zielstellungen (Maltry, 1996c):

- Kurze Trocknungsdauern werden vor allem durch hohe Trocknungstemperaturen erreicht, die jedoch ihrerseits die thermische und mechanische Gutbelastung erhöhen.
- Gutschonende, niedrige Trocknungstemperaturen erfordern längere Trocknungsdauern und damit größere Gutmengen im Trockner.
- Wärmeenergie ist umso wertvoller, je höher ihre Temperatur ist. Die Nutzung von Abwärme und Solarenergie kommt deshalb vorwiegend für niedrige Trocknungstemperaturen in Frage.

Allgemein sind stoffliche und betriebliche Gesichtspunkte zu beachten. Maßgeblich für die Auswahl eines Trockners sind zunächst die stofflichen Eigenschaften:

- Mechanisch: z.B. Teilchengröße und -verteilung, fördertechnische Eigenschaften;
- Strömungstechnisch: z.B. Schüttdichte, Strömungswiderstand;
- Wärmetechnisch: z.B. spez. Wärmekapazität;
- Trocknungsphysikalisch: z.B. höchstzulässige Guttemperatur, Anfangs- und Endwasserhalt, Sorptionsisothermen.

Hinsichtlich der Staubbelastung der Abluft kommt es u.a. darauf an, keinen zusätzlichen Abrieb während des Transports durch die Trocknungsanlage freizusetzen. Die grundsätzliche Eignung zum Trocknen in durchströmter Schicht ergibt sich aus den strömungstechnischen Eigenschaften. In allen Durchströmtrocknern für Arznei- und Gewürzpflanzen ist im gesamten Verlauf der Trocknung eine möglichst gleichmäßige Schichtdicke zu gewährleisten, um ungleichmäßige Trocknung aufgrund örtlicher Dichteunterschiede zu vermeiden.

Aus betrieblicher Sicht ist die Entscheidung für kontinuierliche oder diskontinuierlich arbeitende Trockner von größter Bedeutung. Kontinuierliche Trocknungsverfahren lassen sich bei zahlreichen Produkten besser in den verfahrenstechnischen Gesamtprozess einordnen als Chargentrockner. Bei Arznei- und Gewürzpflanzen stellt dies jedoch hohe Anforderungen an die Logistik der Ernte und des Transports. Mehrere Chargentrockner ermöglichen eine größere Flexibilität und eine umgehende Kaltbelüftung zur Vermeidung der Eigenerwärmung auch bei ungleichmäßiger Anlieferung der Frischware. Weitere betriebliche Aspekte für die Auswahl von Trocknern werden in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben.

## 4 Lufttechnische Effizienzsteigerung der Chargentrocknung

Wesentliches Ziel des Leitfadens ist die primärenergetische Analyse und Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen, mit denen eine Effizienzsteigerung der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen erreicht werden kann. Um die Größenordnungen von Energieeinsparungen exemplarisch quantifizieren zu können, wurde eine modellbasierte Fallstudie zur Chargen- bzw. Flächentrocknung erarbeitet. Dabei wurden insbesondere die im Tagesverlauf veränderlichen Temperaturen der Außenluft berücksichtigt, die den Energiebedarf der Trocknung maßgeblich mitbestimmen.

In diesem Kapitel werden zunächst die klimatischen Bedingungen im Verlauf der Ernteperiode erläutert. Basierend auf meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2016) wurden repräsentative Tagesverläufe der Außentemperatur erarbeitet und den Berechnungen der Fallstudie zugrunde gelegt. Im Hinblick auf die Nutzung von Solarwärme beinhaltete die Analyse der Klimadaten auch Tagesverläufe und Tagessummen der Globalstrahlung.

Die untersuchten lufttechnischen Varianten zur Effizienzsteigerung umfassen die Trocknung mit Teilumluft, die Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern, die Reduzierung der Luftmenge sowie die Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden die Ergebnisse der Fallstudie zusammengefasst.

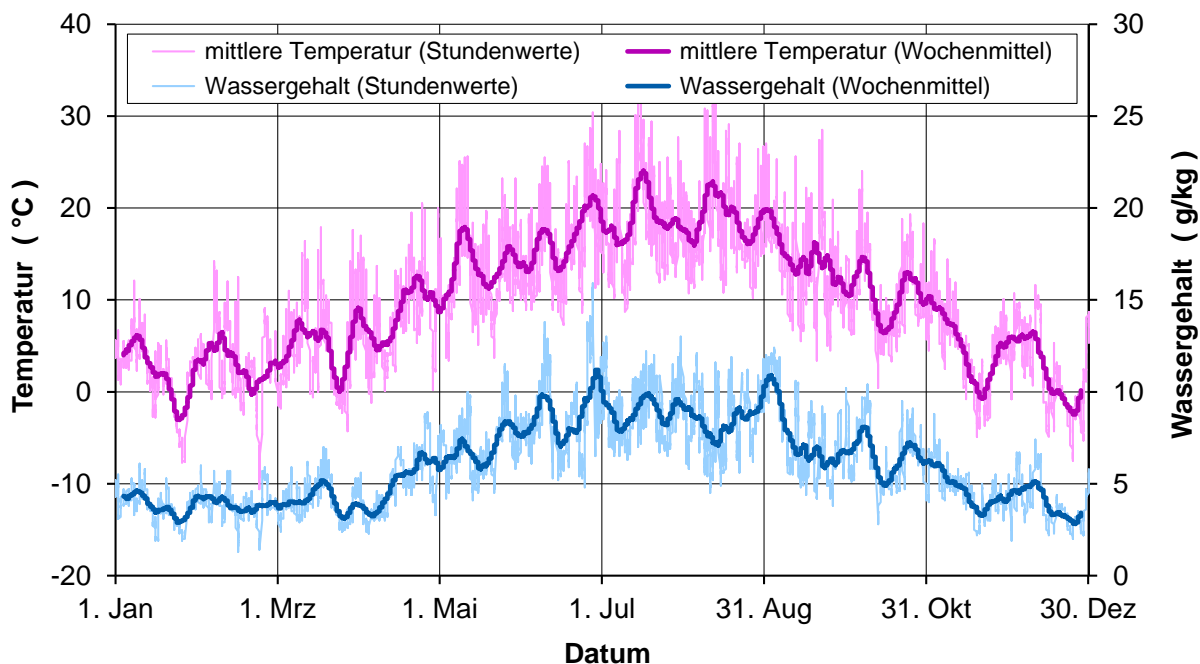
### 4.1 Klimatische Bedingungen im Verlauf der Ernteperiode

Das wesentliche Merkmal des mitteleuropäischen Klimas ist eine große Unbeständigkeit des Wetters, die durch häufigen Wechsel verschiedener Großwetterlagen hervorgerufen wird. Luftmassen polarer und subtropischer Herkunft gelangen in unterschiedlich temperierten Varianten nach Mitteleuropa und erwerben unterwegs, je nach ihrem Weg über Land oder Meer, ihre kontinentalen oder maritimen Eigenschaften. Das Klima Mitteleuropas ist das einer Übergangsregion, gelegen zwischen dem eurasischen Festland und dem Atlantik.

Europa liegt überwiegend in der gemäßigten Klimazone zwischen den Subpolargebieten und den Subtropen, Deutschland größtenteils in der sog. kühlgemäßigten Klimazone. In dieser Region sinkt die Lufttemperatur in den kältesten Monaten nur selten auf Werte unter  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im Sommer steigt die Lufttemperatur höchstens für einige Stunden über  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte liegen zwischen 60 % und 80 %. Bei Lufttemperaturen über  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  treten nur selten gleichzeitig hohe Werte der relativen Luftfeuchte ( $> 80\text{ }%$ ) auf.

Zur Analyse der Auswirkungen veränderlicher Außenluftzustände auf den Energiebedarf der Trocknung wurden Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen. Die vom DWD herausgegebenen Testreferenzjahre (TRY) sind speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres verschiedene meteorologische Daten enthalten (DWD, 2016). Sie sollen einen mittleren, aber für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Dazu zählen unter anderem die Lufttemperatur, die relative und die absolute Luftfeuchte (Wassergehalt) sowie der Luftdruck (Gesamtdruck) und die Sonnenbestrahlungsstärke in der Horizontalebene (direkte und diffuse Solarstrahlung). Unter Berücksichtigung der Höhenlage über Normalhöhennull (NHN) können die Daten einer bestimmten Wetterstation

auf die Verhältnisse in der untersuchten Region übertragen werden. Für die Berechnungen wurde der Standort Ranis in Thüringen gewählt (Höhe 380 m über NHN). Dabei wurden Daten der Wetterstation Chemnitz zugrunde gelegt. Die Jahresverläufe der mittleren Temperatur und des Wassergehalts der Außenluft eines mittleren Jahres zeigt **Abb. 4.1**.



**Abb. 4.1:** Jahresverläufe der mittleren Temperatur und des Wassergehalts der Außenluft am Standort Ranis (DWD, 2016).

Die Lufttemperatur ist ein Maß für den Wärmezustand der Luft und hängt ursächlich mit der Solarstrahlung zusammen. Der sinusförmige Verlauf der Solarstrahlung spiegelt sich im Jahrgang (und auch im Tagesverlauf) der Lufttemperatur wider (**Abb. D.2** im Anhang). Aufgrund der Speicherwirkung von Erdboden, Meer und Atmosphäre tritt zwischen beiden Verläufen eine Phasenverschiebung auf. In Deutschland erreicht die Sonne ihren Höchststand am 21. Juni. Die höchsten Tagestemperaturen werden jedoch erst mit ca. einem Monat Verzögerung im Juli erreicht.

Die Luftfeuchte ist ein Element des Wasserkreislaufs der Erde und hängt ursächlich mit dem Niederschlag und mit der Verdunstung zusammen. Die Mengenangabe kann z.B. als relative oder absolute Luftfeuchte bzw. Wassergehalt erfolgen. Aufgrund der bei höheren Temperaturen steigenden Fähigkeit der Luft, Wasser aufzunehmen, steigt bei höheren Temperaturen auch der Wassergehalt der Außenluft.<sup>31</sup> Dieser Trend wird in **Abb. 4.1** deutlich sichtbar. Zu erkennen ist auch, dass die gleitenden Wochenmittel der mittleren Temperaturen mit Perioden von einigen Tagen oder Wochen schwingen. Dies entspricht den für jeweils einige Tage oder Wochen anhaltenden Wetterlagen. Dabei folgen die Schwingungen des Wassergehalts näherungsweise den Schwingungen der Temperatur. Beispielhafte Klimadaten für eine Woche im Juni am Standort Ranis sind in **Abb. D.4** und **Abb. D.5** im Anhang dargestellt.

<sup>31</sup> Formeln zur Berechnung der Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft sind in **Tabelle A.3** im Anhang aufgeführt.

Durchschnittliche Temperaturen und Wassergehalte der Außenluft sowie Tagessummen der Globalstrahlungsdichte am Standort Ranis für die Monate April bis November zeigt **Tabelle 4.1**. Die angegebenen Monatswerte wurden aus den Stundenwerten der vom DWD (2016) bereitgestellten Datensätze berechnet. Die Minimal- und Maximalwerte beschreiben jeweils das Mittel aus den in den einzelnen Monaten auftretenden Extremwerten.

Im Zeitraum Mai bis Oktober liegen die Monatsmittel der Außentemperatur zwischen 10,7 °C (Oktober) und 18,9 °C (Juli). Die Monatsmittel der absoluten Luftfeuchte (Wassergehalt der Außenluft) bewegen sich zwischen 6,5 g/kg und 9,1 g/kg (ebenfalls Oktober bzw. Juli). Das größte Monatsmittel der Globalstrahlungsdichte (durchschnittliche Tagessumme in der Horizontalebene) tritt im Juni auf (21,8 MJ pro m<sup>2</sup> und Tag).

**Tabelle 4.1:** Durchschnittliche Temperaturen und Wassergehalte der Außenluft sowie Tagessummen der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene am Standort Ranis (DWD, 2016).

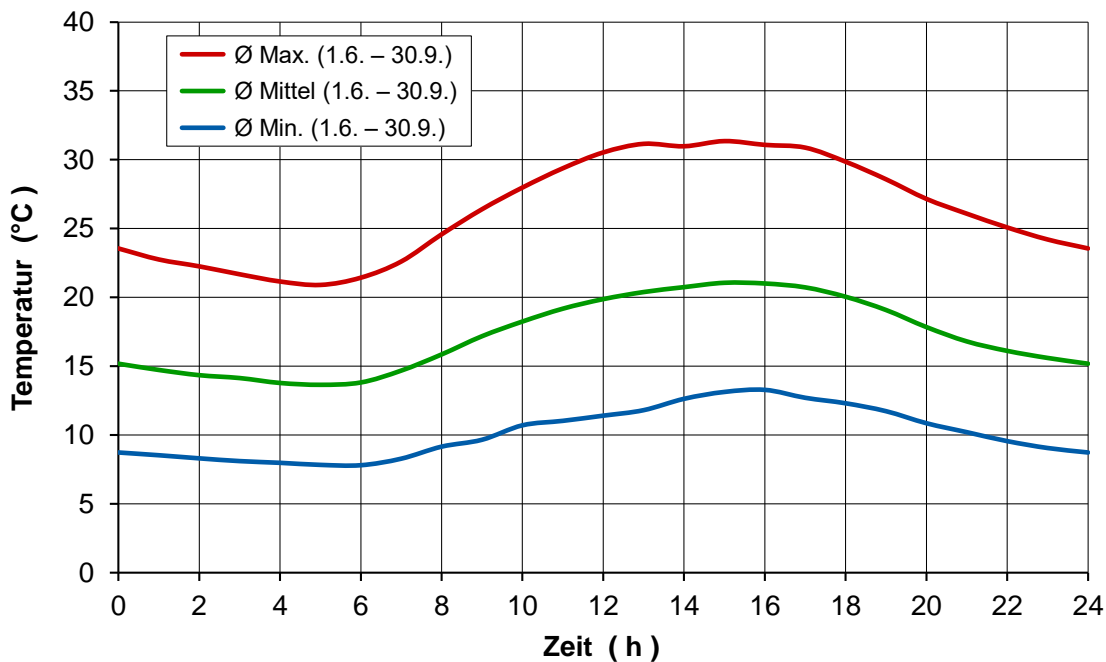
Größe, Symbol	Monat								Einheit	
	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov		
Temperatur der Außenluft										
Min. $\vartheta_{U,min}$	0,8	5,4	9,3	11,1	12,8	7,6	4,2	-3,2	°C	
Mittel $\vartheta_{U,m}$	8,3	13,7	16,5	18,9	18,8	14,7	10,7	4,9	°C	
Max. $\vartheta_{U,max}$	16,8	21,2	24,9	29,7	27,9	22,8	18,4	12,7	°C	
Wassergehalt der Außenluft										
Mittel $Y_m$	4,9	7,0	8,7	9,1	8,4	7,5	6,5	4,7	g <sub>H2O</sub> /kg <sub>L</sub>	
Tagessummen der Globalstrahlungsdichte (Horizontalebene)										
Min. $G''_{min}$	2,8	1,9	3,9	3,7	3,1	2,8	1,1	0,5	MJ/(m <sup>2</sup> · d)	
Mittel $G''_m$	14,2	19,0	21,8	19,9	17,3	13,6	7,3	3,9	MJ/(m <sup>2</sup> · d)	
Max. $G''_{max}$	24,8	32,2	33,7	31,9	26,3	21,2	13,7	8,2	MJ/(m <sup>2</sup> · d)	

Um die Auswirkungen veränderlicher Zustände der Außenluft untersuchen zu können, wurden für die einzelnen Monate des Jahres zunächst durchschnittliche Tagesverläufe erstellt. Hierfür wurden die Verläufe der Außentemperatur für jeden Tag des jeweiligen Monats berechnet und anschließend über alle Tage des Monats gemittelt. Entsprechende Tagesverläufe für die einzelnen Monate Mai bis Oktober zeigt **Abb. D.3** im Anhang.

Aus den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes wurden außerdem Tagesverläufe der minimalen und maximalen Außentemperaturen erarbeitet. Hierfür wurden in den Datensätzen die Extremwerte für jede Stunde und jeden Tag des jeweiligen Monats gesucht und anschließend über alle Tage des Monats gemittelt.<sup>32</sup> Die durchschnittlichen Tagesverläufe der maximalen, mittleren und minimalen Temperatur der Außenluft, gemittelt über die Monate Juni bis September, zeigt **Abb. 4.2**.

<sup>32</sup> Die entsprechenden Tagesverläufe (minimale und maximale Temperaturen der Außenluft für die einzelnen Monate) sind nicht dargestellt.





**Abb. 4.2:** Durchschnittliche Tagesverläufe der maximalen, mittleren und minimalen Außenlufttemperatur gemittelt über die Monate Juni bis September am Standort Ranis (DWD, 2016).

Die Tagesverläufe der Außentemperatur zeigen, ebenso wie der Jahresverlauf in **Abb. 4.1**, einen näherungsweise sinusförmigen Verlauf. Die Phasenverschiebung gegenüber dem Sonnenhöchststand um 12 Uhr beträgt im Sommer ca. drei Stunden. Das Temperaturmaximum tritt erst gegen 15 Uhr auf.<sup>33</sup>

Da die meisten Arznei- und Gewürzpflanzen im Zeitraum Ende Mai bis Anfang Oktober getrocknet werden, decken die in **Abb. 4.2** dargestellten Tagesverläufe nahezu die gesamte Ernteperiode ab.<sup>34</sup> In der Nacht kann die Außentemperatur auch unter 10 °C sinken. Das Temperaturminimum wird zwischen 5 und 6 Uhr morgens erreicht. Die Differenz zwischen der minimalen und der maximalen Außentemperatur beträgt bis zu ca. 20 K.

## 4.2 Trocknung mit Teilumluft

Der Teilumluft-Betrieb ist in zahlreichen Trocknungsverfahren gängige Praxis, so auch bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen. Wenn überhaupt, regeln Anlagenbetreiber den Umluftanteil bislang jedoch überwiegend auf der Grundlage von Erfahrungswerten. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass Teilumluft prinzipiell nicht nur den thermischen Energiebedarf zur Lufterwärmung, sondern auch die absolute Entfeuchtungsleistung des Trockners reduziert. Dies führt zu einer längeren Trocknungsdauer und damit auch zu einer längeren Laufzeit von Ventilatoren. Der Teilumluft-Betrieb ist deshalb in seinem zeitlichen Ablauf so zu gestalten, dass sowohl der thermische als auch der elektrische Energiebedarf minimiert werden.

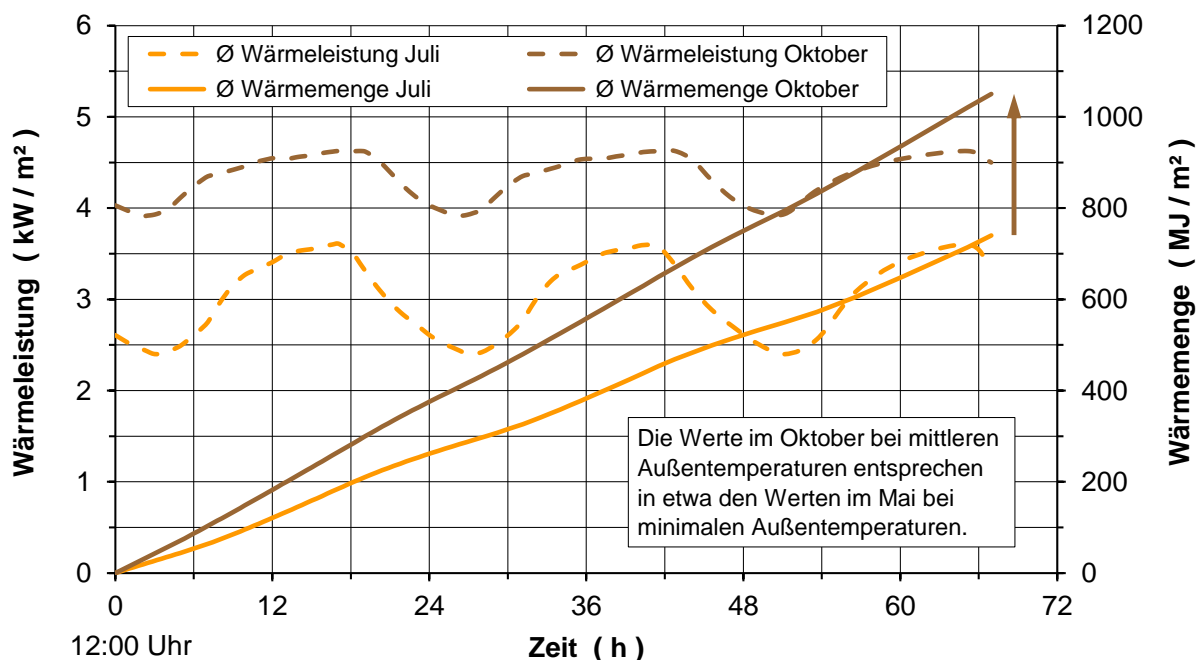
<sup>33</sup> Die Umstellung auf mitteleuropäische Sommerzeit ist in den Tagesverläufen nicht berücksichtigt.

<sup>34</sup> Der Tagesverlauf der minimalen Außenlufttemperatur in **Abb. 4.2** entspricht in etwa dem Tagesverlauf der mittleren Außenlufttemperatur im Oktober (vgl. **Abb. D.3** im Anhang).

### Trocknung mit Frischluft als Vergleichsbasis für den Ist-Zustand

Die luftseitigen Massen- und Energiebilanzen für einen Chargentrockner im reinen Frischluft-Betrieb wurden bereits anhand von **Tabelle 3.3** exemplarisch erläutert. Die Berechnungen ergaben u.a. eine für die Flächentrocknung benötigte Wärmeleistung von ca. 3,5 – 4,3 kW pro m<sup>2</sup> Rostfläche. Dabei wurden Temperaturen der Frischluft und der Zuluft von 18 °C bzw. 40 °C zugrunde gelegt. Bekanntlich schwanken die Außentemperaturen jedoch erheblich. Dies hat natürlich entsprechende Auswirkungen auf den Energiebedarf der Trocknung.

**Abb. 4.3** zeigt die Wärmeleistung in kW/m<sup>2</sup> und die summierte Wärmemenge in MJ/m<sup>2</sup> im reinen Frischluft-Betrieb, berechnet mit durchschnittlichen Tagesverläufen der mittleren Außenlufttemperatur für die Monate Juli und Oktober (**Abb. D.3**) und einer Zulufttemperatur von 38 °C. Bei niedrigen Außentemperaturen ist der Wärmebedarf der Trocknung größer als bei höheren Außentemperaturen. Die durchschnittlichen Werte im Oktober entsprechen in etwa der Wärmeleistung bzw. Wärmemenge, die im Mai bei ungünstigen bzw. niedrigen Temperaturen der Außenluft erforderlich ist.



**Abb. 4.3:** Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro m<sup>2</sup> Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb.

### Eckdaten der Fallstudie

Um die unterschiedlichen lufttechnischen Varianten zur Effizienzsteigerung vergleichend analysieren zu können, wurde ein möglichst einfaches Modell für die Flächen- bzw. Chargentrocknung entwickelt (Leifer, 2017). Das Modell basiert auf detaillierten Messdaten, die im Juli 2010 bei der Satz- bzw. Kamilleblüten gewonnen wurden (Ziegler et al., 2011). Für das Modell wurde der aus den Messdaten gewonnene zeitliche Verlauf der Trocknung abschnittsweise angenähert (**Abb. F.7** und **Abb. F.8** im Anhang). Dieser Trocknungsverlauf diente als Vergleichsbasis für die Trocknung im reinen Frischluft-Betrieb.

In den weiteren Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass sich die jeweiligen Trocknungsverläufe nur im Ergebnis der luftseitigen Massen- und Energiebilanzen ändern.<sup>35</sup> Dabei wurden die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen.

- Die Trocknung beginnt jeweils um 12:00 Uhr.
- Die Temperatur der Zuluft beträgt 38 °C. Die Luftdichte errechnet sich aus:

$$\rho_{ZL} = \frac{p}{T \cdot R_L} = \frac{100.000}{(273,15 + 38) \cdot 287,1} = 1,12 \text{ kg/m}^3 \quad (4.1)$$

- Der Volumenstrom der Zuluft wird auf einen konstanten Wert von 500 m<sup>3</sup>/(h · m<sup>2</sup>) geregelt. Der Massenstrom der Zuluft ist damit ebenfalls zeitlich konstant und beträgt:

$$\dot{m}''_{ZL} = \rho_{ZL} \cdot \dot{V}''_{ZL} = 1,12 \cdot 500 = 560 \text{ kg/(h} \cdot \text{m}^2) \quad (4.2)$$

- Für den schwankenden Zustand der Frischluft wurde jeweils der durchschnittliche Tagesverlauf der mittleren Außenlufttemperatur im Zeitraum Juni bis September (**Abb. 4.2**) und ein mittlerer Wassergehalt von  $Y_{FL} = 8,4 \text{ g/kg}$  zugrunde gelegt.
- Wärmeverluste und durch Ventilatoren zugeführte Wärme wurden vernachlässigt. Wie anhand von **Tabelle 3.3** erläutert, heben sich beide Werte bei guter Wärmeisolierung in etwa gegeneinander auf. Für die insgesamt erforderliche Wärmeleistung im reinen Frischluft-Betrieb gilt somit vereinfacht:

$$\dot{Q}''_{ges} = \dot{m}''_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{FL}) = \dot{m}''_{ZL} \cdot \Delta h \quad (4.3)$$

- Bei Trocknung mit Teilumluft wurde die Wärmeleistung analog berechnet, jedoch mit der spez. Enthalpie der Mischluft an Stelle der spez. Enthalpie der Frischluft:

$$\dot{Q}''_{ges} = \dot{m}''_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{FL}) = \dot{m}''_{ZL} \cdot \Delta h \quad (4.4)$$

- Die spez. Frischgut-Belegung pro m<sup>2</sup> Rostfläche zu Beginn der Trocknung beträgt  $m''_{FG} = m_{FG}/A_{Rost} = 168 \text{ kg}_{FG}/\text{m}^2$ , der Feuchtegehalt des Frischgutes  $F_{FG} = 80 \%$ , der Feuchtegehalt des Trockengutes  $F_{TG} = 10 \%$ . Mit den Wassergehalten pro kg Trockensubstanz (TS)  $X_{FG} = 4,0 \text{ kg}_{H2O}/\text{kg}_{TS}$  und  $X_{TG} = 0,111 \text{ kg}_{H2O}/\text{kg}_{TS}$  (Gl. A.4) beträgt das Eintrocknungsverhältnis (Gl. A.7):

$$E = \frac{X_{FG} + 1}{X_{TG} + 1} = \frac{5,0}{1,111} = 4,5 \quad (4.5)$$

- Die nach dem Ende der Trocknung verbleibende Trockengut-Masse pro m<sup>2</sup> Rostfläche errechnet sich nach Gl. (A.5) aus:

$$m''_{TG} = m_{TG}/A_{Rost} = \frac{m''_{FG}}{E} = \frac{168}{4,5} = 37,3 \text{ kg}_{TG}/\text{m}^2 \quad (4.6)$$

- Die pro m<sup>2</sup> Rostfläche zu entziehende Wassermenge beträgt nach Gl. (A.8):

$$\Delta m''_W = \Delta m_W/A_{Rost} = m''_{FG} - m''_{TG} = 168 - 37,3 = 130,7 \text{ kg}_{H2O}/\text{m}^2 \quad (4.7)$$

- Der gesamte spez. Wärmebedarf der Trocknung errechnet sich aus der insgesamt benötigten Wärmemenge dividiert durch insgesamt entzogene Wassermenge:

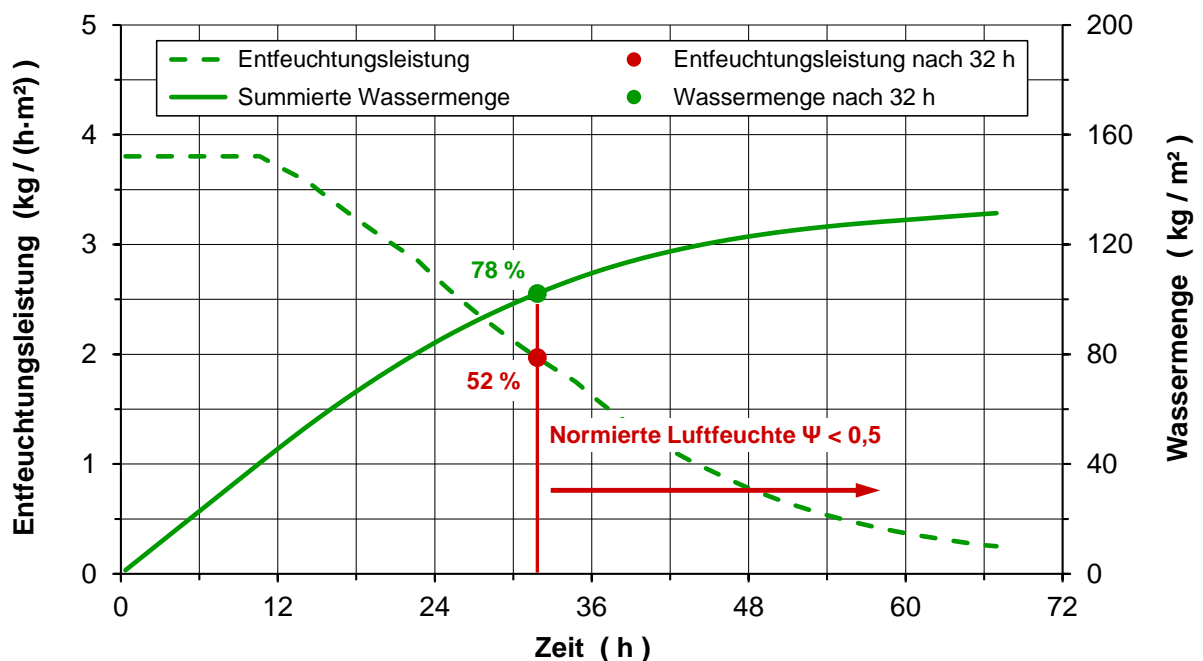
<sup>35</sup> Auf eine ausführliche Beschreibung von weiteren Details der Modellierung wird verzichtet.

$$q_{ges} = \frac{Q''_{ges}}{\Delta m''_w} \quad \text{mit} \quad Q''_{ges} = \int_0^t \dot{Q}''_{ges} dt \quad (4.8)$$

- Bei der Berechnung der elektrischen Ventilatorleistung (Gl. A.62) wurde ein Wirkungsgrad des Frequenzumrichters von  $\eta_{FU} = 0,95$  angenommen und der im Verlauf der Trocknung fallende Druckverlust berücksichtigt:

$$P'' = \frac{P''_{vent}}{\eta_{FU}} = \frac{\Delta p_{total} \cdot \dot{V}''_{ZL}}{\eta_{Vent} \cdot \eta_{FU}} \quad (4.9)$$

Die zeitlichen Verläufe der Entfeuchtungsleistung und des den Kamilleblüten im reinen Frischluft-Betrieb entzogenen Wassers zeigt **Abb. 4.4**. Zwei Punkte sind hervorgehoben. Nach ca. 32 h sind bereits ca. 78 % des Wassers herausgetrocknet, die Entfeuchtungsleistung ist auf ca. 52 % des Maximalwerts von  $\dot{m}''_{w,max} = 3,8 \text{ kg}_{H_2O}/(h \cdot m^2)$  gesunken. Die normierte Luftfeuchte (vgl. **Abb. F.7** im Anhang) hat sich zu diesem Zeitpunkt auf einen Wert von  $\Psi < 0,5$  reduziert. Danach ist es sinnvoll, mit dem Teilumluf-Betrieb zu beginnen.



**Abb. 4.4:** Entfeuchtungsleistung und gesamte Wassermenge pro  $m^2$  Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb.

### Regelung des Umluftanteils

Die grundsätzlichen lufttechnischen Zusammenhänge bei der Trocknung mit Teilumluf wurden bereits anhand von **Abb. 3.2** beschrieben. Sollen im Vergleich zum reinen Frischluft-Betrieb maximale Energieeinsparungen erzielt werden, so ist der Umluftanteil den äußeren klimatischen Bedingungen und dem Fortschritt des Trocknungsprozesses anzupassen (Ziegler et al., 2016b). Eine möglichst minimale Verlängerung Trocknungsdauer im Teilumluf-Betrieb erfordert dabei die Berücksichtigung der normierten Luftfeuchte.

Ein Regelungsprinzip, das dem theoretischen Optimum sehr nahe kommt, zeigt **Abb. 4.5**. In der Darstellung verläuft die Trocknung von rechts nach links. Um am ersten Tag eine maximale Entfeuchtungsleistung zu erreichen, erfolgt die Trocknung zunächst im reinen Frischluft-

Betrieb. Bei einer normierten Luftfeuchte von  $\Psi = 0,5$  wird auf Trocknung mit Teilumluft umgeschaltet. Im weiteren Verlauf der Trocknung wird der Umluftanteil  $ULA$  linear von 30 % auf 90 % erhöht. Dabei steigt die Temperatur der Mischluft, wodurch die Wärmeleistung sinkt (Abb. 4.6).

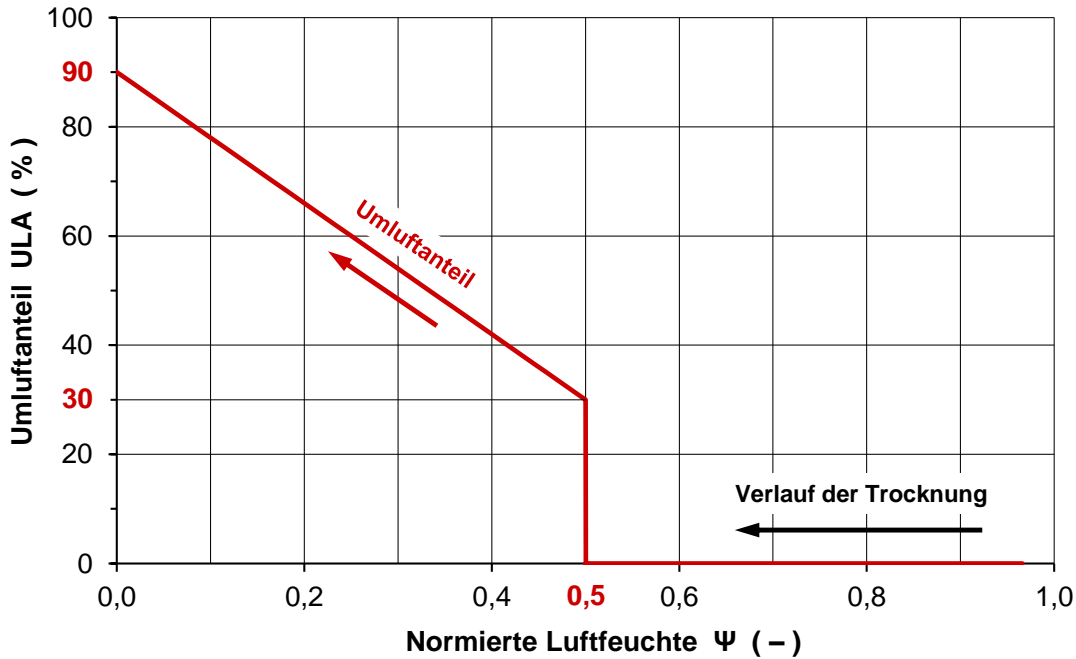


Abb. 4.5: Regelung des Umluftanteils bei Trocknung mit Teilumluft in Abhängigkeit von der normierten Luftfeuchte  $\Psi$ .

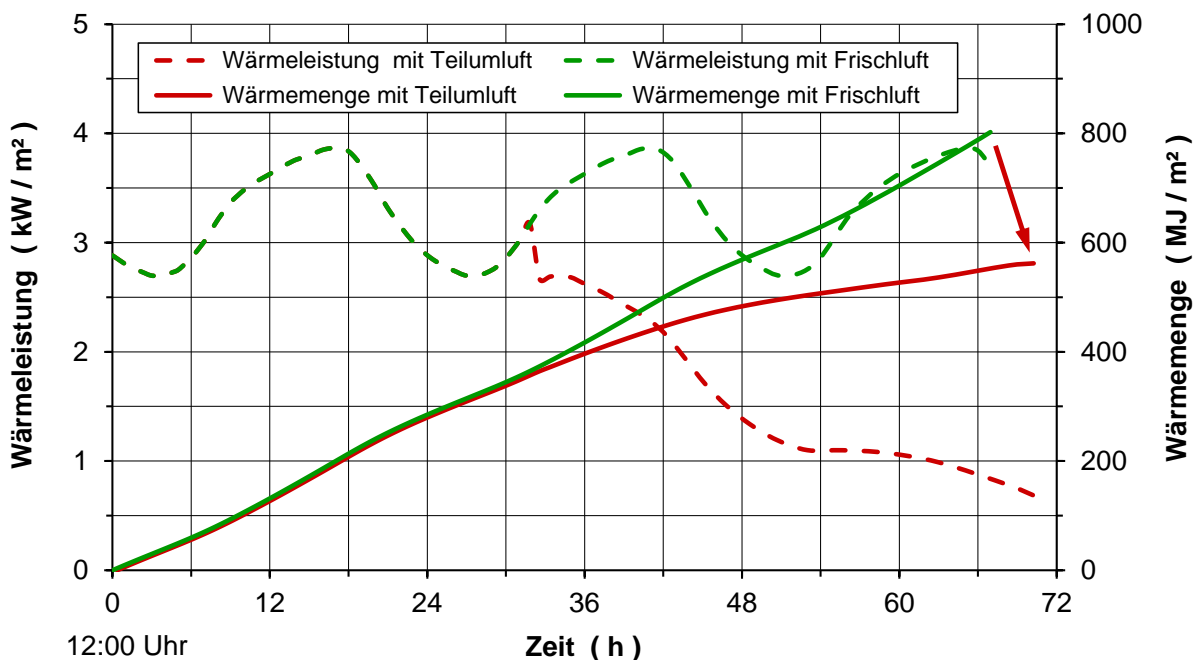


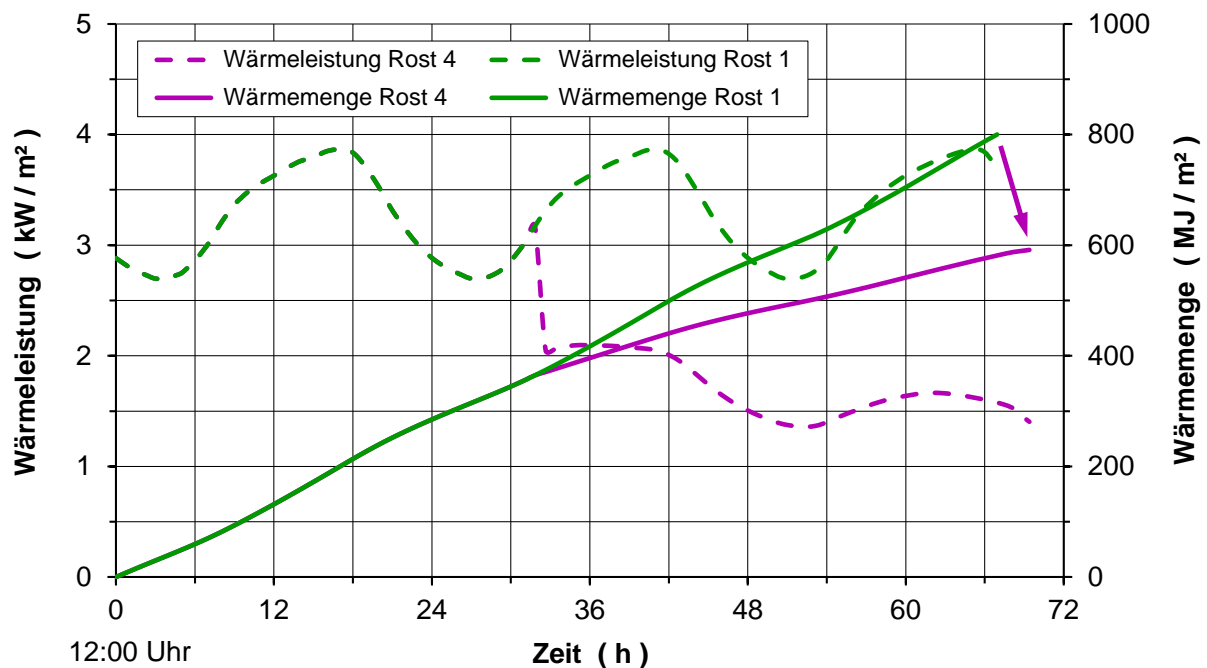
Abb. 4.6: Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro  $m^2$  Rostfläche im reinen Frischluft-Betrieb und im geregelten Teilumluft-Betrieb.

Im Vergleich zum reinen Frischluft-Betrieb (ca. 67 h) verlängert sich die gesamte Trocknungsdauer im geregelten Teilumluf-Betrieb (ca. 70 h) um lediglich etwa drei Stunden. Die insgesamt benötigte Wärmemenge sinkt hingegen von  $802 \text{ MJ/m}^2$  auf  $569 \text{ MJ/m}^2$ . Dies entspricht einer thermischen Energieeinsparung von ca. 29 %.

### 4.3 Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern

Diese Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern ist eine Alternative zur Trocknung mit Teilumluf. Stehen mehrere Rostflächen oder Chargentrockner zur Verfügung, so kann z.B. die Abluft des ersten Trockners ganz oder teilweise als Zuluft für den zweiten, die Abluft des zweiten als Zuluft für den dritten, und die Abluft des dritten Trockners als Zuluft für den vierten Trockner genutzt werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass sich dabei der Wassergehalt der Zuluft für die nachgeschalteten Trockner jeweils erhöht. Dadurch verschiebt sich die Trocknung im Mollier  $h, Y$ -Diagramm nach rechts, und die Wassergehaltsdifferenz  $\Delta Y$  sinkt (**Abb. F.5**). Dies wiederum führt, wie bereits erläutert, zu einer kleineren Entfeuchtungsleistung, sofern die Temperatur und der Massenstrom der Zuluft und nicht verändert werden. Die entsprechenden Luftzustände und Entfeuchtungsleistungen sind im Anhang exemplarisch für den Fall dargestellt, dass jeweils 60 % der Abluft in nachgeschalteten Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer genutzt werden (**Abb. F.9** und **Abb. F.10**). Diese Variante ist jedoch nicht zu empfehlen.

Analog zur Trocknung mit Teilumluf sollte erst dann mit der Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern begonnen werden, wenn die normierte Luftfeuchte einen Wert von  $\Psi = 0,5$  unterschritten hat. Dies ist nach ca. 32 h der Fall. Den resultierenden Wärmebedarf für einen zeitlich konstanten Abluftanteil von 60 % ab diesem Zeitpunkt zeigt **Abb. 4.7**.



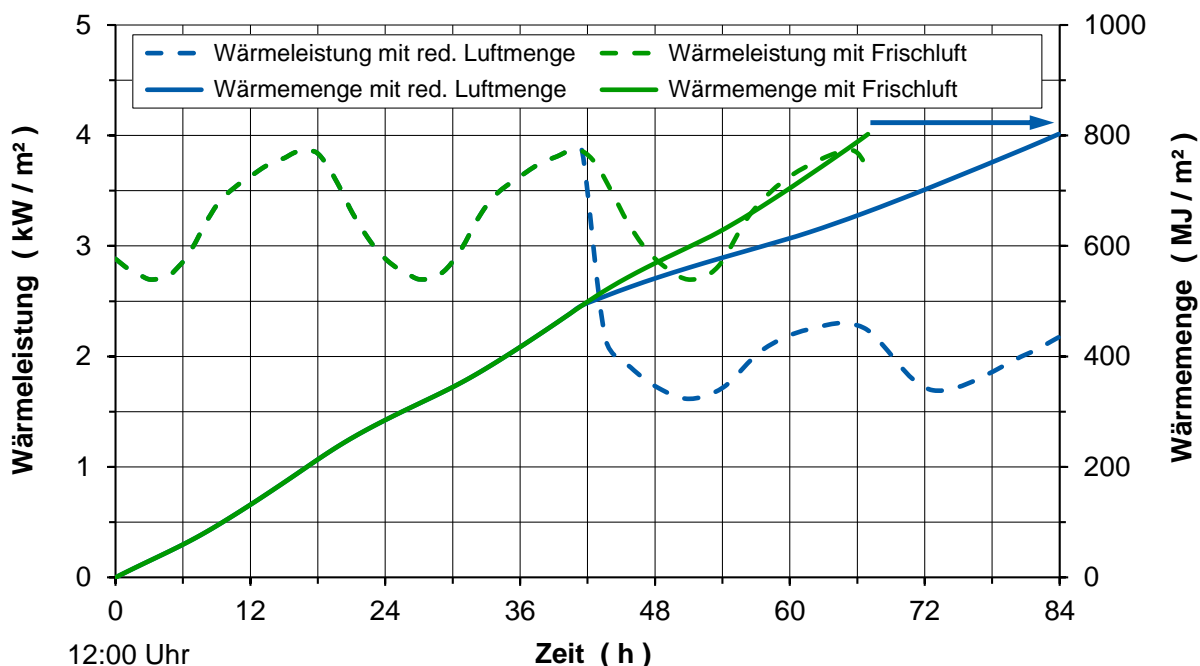
**Abb. 4.7:** Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro  $\text{m}^2$  Rostfläche bei der Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern ab einer normierten Luftfeuchte von  $\Psi = 0,5$ .



Dargestellt sind die Wärmeleistungen und die gesamte Wärmemenge pro  $m^2$  Rostfläche für die Roste 1 und 4 im zeitlichen Verlauf der Trocknung.<sup>36</sup> Die gesamte Trocknungsdauer von Rost 4 (ca. 67 h) verlängert sich im Vergleich zu Rost 1 (ca. 69 h) nur um etwa zwei Stunden. Die zeitlichen Verläufe für die Roste 2 und 3 (nicht dargestellt) entsprechen in etwa dem zeitlichen Verlauf für Rost 4, wobei die gesamte Trocknungsdauer etwas kürzer ist. Die insgesamt von Rost 4 benötigte Wärmemenge beträgt  $591 \text{ MJ}/m^2$ . Im Vergleich zu Rost 1 ( $802 \text{ MJ}/m^2$ ) entspricht dies einer thermischen Energieeinsparung von ca. 26 %.

#### 4.4 Reduzierung der Luftmenge

Eine Reduzierung der Luftmenge ermöglicht eine Reduzierung der elektrischen Ventilatorleistung.<sup>37</sup> Bei einem reduzierten Luftmassenstrom kann jedoch pro Zeiteinheit weniger Wasser mit der Trocknungsluft abtransportiert werden. Dadurch verlängert sich die gesamte Trocknungsdauer. Ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf des Wärmebedarfs ist in **Abb. 4.8** dargestellt. Der Luftmassenstrom pro  $m^2$  Rostfläche wird nach ca. 41 h auf 60 % reduziert. Dabei sinkt jedoch nicht nur die benötigte Wärmeleistung, sondern auch die Entfeuchtungsleistung (nicht dargestellt). Die Trocknung muss fortgesetzt werden, bis die gesamte Wassermenge entfernt ist. Dies ist in **Abb. 4.8** nach ca. 84 h der Fall. Die gesamte Trocknungsdauer verlängert sich damit im Vergleich zum reinen Frischluft-Betrieb (ca. 67 h) um etwa 17 Stunden. Die insgesamt benötigte Wärmemenge ( $802 \text{ MJ}/m^2$ ) ist genauso groß wie im Frischluft-Betrieb ohne Reduzierung der Luftmenge.



**Abb. 4.8:** Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge pro  $m^2$  Rostfläche nach Reduzierung der Luftmenge auf 60 %.

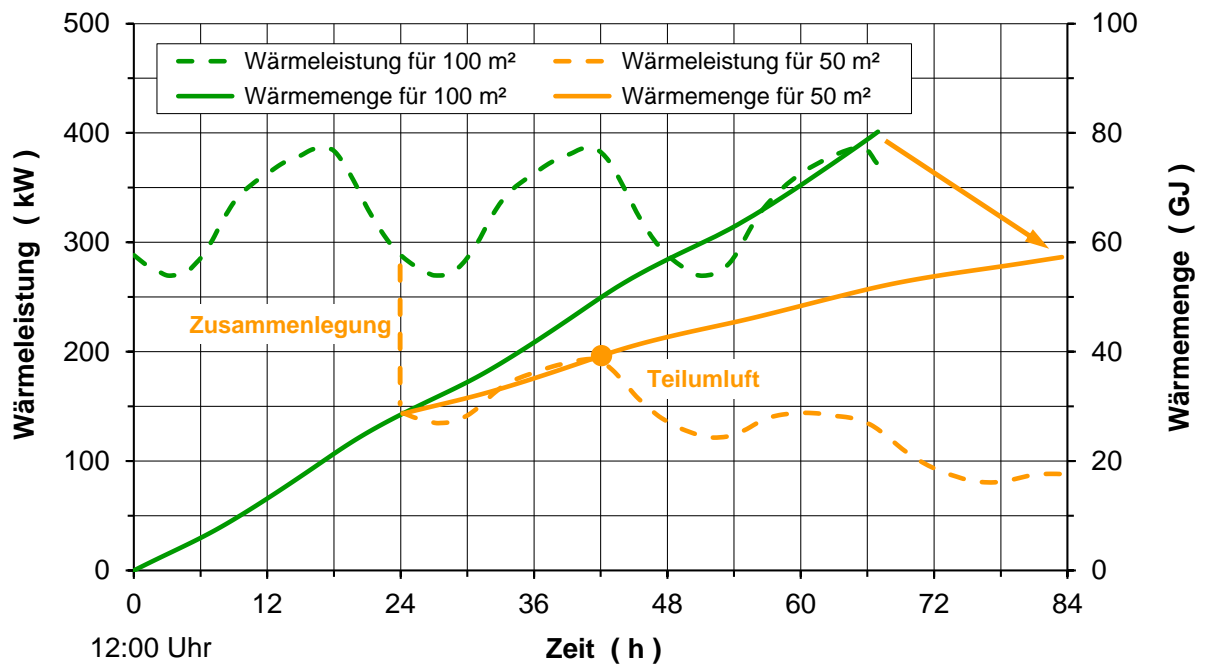
<sup>36</sup> Wärmeleistung und Wärmemenge für Rost 1 in **Abb. 4.7** entsprechen den Verläufen im reinen Frischluft-Betrieb in **Abb. 4.6** (grüne Kurven).

<sup>37</sup> Der in den einzelnen lufttechnischen Varianten benötigte elektrische Energiebedarf für Ventilatoren wird zusammenfassend in Abschnitt 4.6 erläutert.

#### 4.5 Umlagerung und Zusammenlegung

Die Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche hat mehrere Vorteile. Bei der Umlagerung werden die Pflanzen aufgelockert, was im weiteren Verlauf der Trocknung aufgrund einer leichteren Durchströmung der Schüttung auch zu einer größeren Entfeuchtungsleistung führen kann. Das Umlagern ist sehr sorgfältig durchzuführen, da durch eine Verdichtung der angetrockneten Ware neue Feuchtenester entstehen können.<sup>38</sup> Da nach der Zusammenlegung nur noch wesentlich weniger Trocknungsluft zu erwärmen ist, sinkt die erforderliche Wärmeleistung. Außerdem kann durch die Zusammenlegung eine höhere Auslastung der Trocknungsanlage erreicht werden. Drei Beispiele zur Bewirtschaftung mehrerer Trocknungsroste wurden bereits erläutert (**Abb. C.1**, **Abb. C.2** und **Abb. C.3** im Anhang).

Kamilleblüten werden im Gegensatz zu Ganzpflanzen üblicherweise nicht zusammengelegt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den bisher beschriebenen Varianten zur lufttechnischen Effizienzsteigerung werden die energetischen Auswirkungen im Folgenden trotzdem am Beispiel der Satz Trocknung von Kamilleblüten erläutert. Da die Fallstudie im Wesentlichen auf den luftseitigen Massen- und Energiebilanzen basiert, gelten die Ergebnisse zumindest qualitativ auch für andere Pflanzenarten. In den Berechnungen wurde angenommen, dass die gesamte Rostfläche vor der Umlagerung  $100\text{ m}^2$  und nach der Zusammenlegung  $50\text{ m}^2$  beträgt (**Abb. 4.9**).



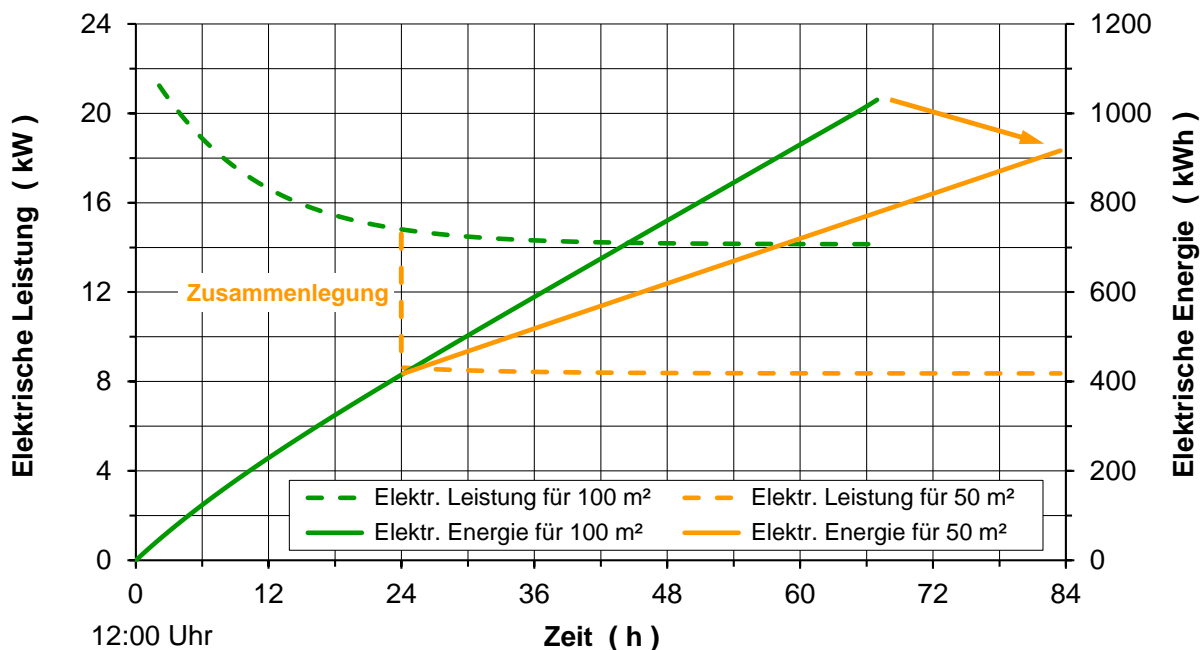
**Abb. 4.9:** Wärmeleistung und gesamte Wärmemenge nach Umlagerung und Zusammenlegung auf einer kleineren Rostfläche.

<sup>38</sup> Auch bei sehr gleichmäßiger Belegung verbleiben örtliche Dichteunterschiede im inhomogenen Trocknungsgut, die sich im Verlauf der Trocknung vergrößern. Da die Trocknungsluft bevorzugt durch Bereiche geringerer Schüttdichte strömt, schreitet die Trocknung an anderen Stellen deutlich langsamer voran, und das Trocknungsgut bleibt dort länger vergleichsweise feucht.

Zum Vergleich ist in **Abb. F.10** wiederum der Wärmebedarf im Frischluft-Betrieb dargestellt, jedoch nicht pro  $m^2$  Rostfläche, sondern für eine Rostfläche von  $100 m^2$ . Die Wärmeleistung schwankt im Tagesverlauf zwischen ca.  $270 kW$  und  $380 kW$ , die insgesamt erforderlichen Wärmemenge summiert sich auf  $80 GJ$ . Werden die angetrockneten Pflanzen nach 24 h auf  $50 m^2$  zusammengelegt, so muss nur noch halb soviel Luft erwärmt werden, und die Wärmeleistung sinkt auf die Hälfte. Zusätzlich wurde Trocknung mit Teilumlufung angenommen, nachdem die normierte Luftfeuchte einen Wert von  $\psi = 0,5$  unterschritten hat. Dies ist nach ca. 42 h der Fall. Bis zum Ende der Trocknung nach ca. 84 h summiert sich die gesamte Wärmemenge auf  $57 GJ$ . Im Vergleich zum Frischluft-Betrieb entspricht dies einer thermischen Energieeinsparung von ca. 29 %.

Hinsichtlich der Verlängerung der gesamten Trocknungsdauer von ca. 67 h auf ca. 84 h ist zu beachten, dass die Auslastung der Trocknungsanlage durch die Zusammenlegung erhöht werden kann. Bei zwei Trocknungsrosten mit jeweils  $50 m^2$  sind im Frischluft-Betrieb sechs Rosttage erforderlich. Da ein Rost am zweiten Tag wieder mit einer neuen Charge belegt werden kann, sind in der beispielhaft beschriebenen Variante mit Umlagerung und Zusammenlegung insgesamt nur vier Rosttage erforderlich.

Die elektrische Leistung und die insgesamt erforderliche elektrische Energie für Ventilatoren zeigt **Abb. 4.10**.<sup>39</sup> Da der Strömungswiderstand und damit Druckverlust der Schüttung im Verlauf der Trocknung abnimmt, sinkt die elektrische Leistung der Ventilatoren.<sup>40</sup>



**Abb. 4.10:** Elektrische Leistung und Energie für Ventilatoren im reinen Frischluft-Betrieb sowie nach Umlagerung und Zusammenlegung auf einer kleineren Rostfläche.

<sup>39</sup> Den Berechnungen wurden die Leistungsdaten des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Radialventilators zugrunde gelegt (vgl. **Abb. 3.5** und **Tabelle 3.2**). Für eine Rostfläche von  $100 m^2$  sind insgesamt vier Ventilatoren erforderlich.

<sup>40</sup> Die Drehzahl der Ventilatoren wird auf einen konstanten Volumenstrom der Zuluft geregelt.

Im reinen Frischluft-Betrieb ohne Umlagerung summiert sich die elektrische Energie für Ventilatoren auf 1.030 kWh, mit Umlagerung und Zusammenlegung auf 916 kWh. Trotz der insgesamt verlängerten Trocknungsdauer entspricht dies einer elektrischen Energieeinsparung von ca. 11 %.

#### 4.6 Vergleich der lufttechnischen Varianten

Zur Reduzierung des Energiebedarfs von Trocknungsanlagen sollten zuerst die jeweiligen Trocknungsprozesse optimiert werden. In allen konvektiven Trocknungsverfahren beinhaltet die Luftführung bzw. die Nutzung von unzureichend gesättigter Abluft erhebliche energetische Potenziale. In einer modellbasierten Fallstudie wurden deshalb unterschiedliche Varianten zur lufttechnischen Effizienzsteigerung vergleichend analysiert:

- 0 Trocknung mit Frischluft als Vergleichsbasis für den Ist-Zustand;
- I Teilumluft-Betrieb mit Regelung des Umluftanteils;
- II Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern ;
- III Reduzierung der Luftmenge auf 60 %;
- IV Umlagerung und Zusammenlegung auf der halben Rostfläche.

Die Quantifizierung der energetische Potenziale erfolgte am Beispiel der Flächentrocknung von Kamilleblüten. Die in der Fallstudie berechneten Werte für Wärme und elektrische Energie sind in **Tabelle 4.2** zusammengefasst.

**Tabelle 4.2:** Bedarf an Wärme und elektrischer Energie für unterschiedliche lufttechnische Varianten am Beispiel der Flächentrocknung von Kamilleblüten.

Größe, Variante	Frischluft-Betrieb 0	Teilumluft-Betrieb I	Nutzung von Abluft II	Reduzierte Luftmenge III	Zusammenlegung IV	Einheit
Trocknungsdauer (1)	67	70	69	84	84	h
elektrische Energie pro kg Trockengut (2)	0,28	0,29	0,28	0,26	0,25	kWh/kg <sub>TG</sub>
spez. elektrischer Energiebedarf (3)	0,079	0,082	0,081	0,075	0,070	kWh/kg <sub>H2O</sub>
	0,28	0,29	0,29	0,27	0,25	MJ/kg <sub>H2O</sub>
Wärmemenge pro kg Trockengut (2)	21,5	15,2	15,8	21,5	15,3	MJ/kg <sub>TG</sub>
spez. Wärmebedarf $q_{ges}$ (3)	6,14	4,35	4,53	6,14	4,39	MJ/kg <sub>H2O</sub>
	1,71	1,21	1,26	1,71	1,22	kWh/kg <sub>H2O</sub>
Einsparung Wärme (4)		29	26	0	29	%

- (1) Kamilleblüten; (2) Eintrocknungsverhältnis  $E = 4,5$ ; (3) pro kg Wasser;  
 (4) bezogen auf den reinen Frischluft-Betrieb.

Im geregelten Teilumluft-Betrieb (I) und bei der Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern (II) verlängert sich die gesamte Trocknungsdauer nur unwesentlich. Dies ist bei einer Reduzierung der Luftmenge (III) nicht mehr der Fall. Bei Variante (IV) gilt die angegebene Trocknungsdauer nur für einen von zwei Trocknungsrosten. Insgesamt kann durch

Umlagerung und Zusammenlegung auf der halben Rostfläche eine höhere Auslastung der Trocknungsanlage erreicht werden.

### Primärenergetische Bewertung lufttechnischer Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Der spez. elektrische Energiebedarf pro kg Wasser liegt in einer Größenordnung, die auch in der Literatur zu finden ist.<sup>41</sup> Für den spez. Wärmebedarf sind aus der Praxis jedoch deutlich größere Werte als in **Tabelle 4.2** bekannt. Heindl & Müller (2010) geben folgende Werte bei allerdings stark unterschiedlichen Trocknungsbedingungen an:  $11,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Kamille,  $15,8 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Pfefferminze,  $17,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Thymian sowie  $36,0 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Baldrian (**Tabelle 3.6**). Obwohl in jedem Einzelfall die jeweiligen Betriebsbedingungen zu berücksichtigen sind, belegen diese hohen Werte auch das erhebliche Potenzial zur Energieeinsparung bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen.

Die mögliche Einsparung an Wärme, die mit den untersuchten lufttechnischen Maßnahmen erreicht werden kann, liegt in einem Bereich von 26 – 29 %. Die Einsparung an Primärenergie bei konventioneller Lufterwärmung (**Tabelle 4.3**) ist etwas kleiner (24 – 27 %).<sup>42</sup> Dies liegt daran, dass sich der spez. elektrische Energiebedarf *SEB* in den einzelnen Varianten nur geringfügig ändert, in der Berechnung des spez. Primärenergiebedarfs *SPB* jedoch mit einem PE-Faktor von  $\Pi_{el} = 1,8$  überproportional bewertet wird.

**Tabelle 4.3:** Primärenergieeinsparung für unterschiedliche lufttechnische Varianten der Flächentrocknung bei konventioneller Lufterwärmung (exemplarisch).

Größe, Variante	Frischluf-Betrieb 0	Teilumluf-Betrieb I	Nutzung von Abluft II	Reduzierte Luftmenge III	Zusammenlegung IV	Einheit
spez. thermischer Energiebedarf <i>STB</i> (1)	6,75	4,79	4,97	6,75	4,82	$\text{MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
spez. elektrischer Energiebedarf <i>SEB</i>	0,28	0,29	0,29	0,27	0,25	$\text{MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
spez. Primärenergiebedarf <i>SPB</i> (2, 3, 4)	7,93	5,79	5,99	7,91	5,76	$\text{MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
Einsparung Primärenergie (5)		27	24	0	27	%

(1) Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung  $\eta_{th,H} = 91 \%$ ; (2)  $SPB = \Pi_{th} \cdot STB + \Pi_{el} \cdot SEB$ ;

(3) thermischer PE-Faktor  $\Pi_{th} = 1,1$ ; (4) elektrischer PE-Faktor  $\Pi_{el} = 1,8$ ;

(5) bezogen auf den reinen Frischluft-Betrieb.

In diesem Abschnitt wurden zunächst nur die energetischen Auswirkungen der untersuchten lufttechnischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung behandelt. Eine primärenergetische Bewertung von unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung erfolgt im Abschnitt 5.4.

<sup>41</sup> Heindl & Müller (2010) geben für den spez. elektrischen Energiebedarf Werte zwischen  $0,05 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Kamille und  $0,20 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  für Baldrian an.

<sup>42</sup> Mit konventioneller Lufterwärmung ist die Erwärmung der Trocknungsluft mittels Ergas oder Heizöl gemeint.

## 5 Planung und Betrieb von Trocknungsanlagen

Der Energiebedarf und die Energieversorgung sind von besonderer Bedeutung für die Planung von Trocknungsanlagen. Dabei müssen die verfügbaren Energiequellen, aber auch weitere Ressourcen wie vorhandene Gebäude und bereits bestehende Trocknungsanlagen berücksichtigt werden. Umgekehrt müssen die Gegebenheiten die vom Trockner gestellten Forderungen erfüllen (Kröll, 1978).

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Bereitstellung und Nutzung thermischer und elektrischer Energie sowie zur Betriebsoptimierung von Trocknungsanlagen erläutert. Exemplarische Varianten zur Nutzung von konventionellen Energieträgern (Erdgas), elektrisch angetriebenen Wärmepumpen, Blockheizkraftwerken und Solarwärme werden miteinander verglichen und primärenergetisch bewertet.

### 5.1 Allgemeine Grundlagen der Planung

Vor der eigentlichen Auswahl und Dimensionierung einer Trocknungsanlage sollten die grundlegenden Voraussetzungen und Anforderungen geklärt werden. Dabei sind allgemeine Grundlagen der Planung zu beachten:

- (a) Qualitätsanforderungen der unterschiedlichen Kulturen
- (b) Art und Eigenschaften der Trocknungsgüter (frisch und getrocknet)
- (c) Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung
- (d) Chargenweiser oder kontinuierlicher Betrieb
- (e) Entfeuchtungsleistung bzw. angestrebter Durchsatz an Trocknungsgut
- (f) Platzbedarf für die Anordnung und Unterbringung der Trockner
- (g) Einordnung der Trockner in den Produktionsablauf
- (h) Personalbedarf und Arbeitsorganisation
- (i) Klimatische Bedingungen
- (j) Energiebedarf und Energieversorgung
- (k) Nutzung konventioneller und erneuerbarer Energiequellen
- (l) Reduzierung von Wärmeverlusten
- (m) Betrieb, Steuerung und Regelung der Trockner
- (n) Reinigung und Einhaltung von Hygienestandards
- (o) Wartung der Trockner
- (p) Umweltverträglichkeit (Staub, Abgas, Lärm)
- (q) Sicherheit
- (r) Trocknungskosten

Die für die Auswahl von geeigneten Trocknern erforderlichen Punkte (a) bis (e) wurden bereits in den Kapiteln 2 und 3 erläutert. Zunächst ist festzulegen, welche Pflanzenarten in welchen Mengen getrocknet werden sollen. Neben den Qualitätsanforderungen und den unterschiedlichen Eigenschaften der Trocknungsgüter sind dabei auch die erforderlichen Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung sowie der Platzbedarf für die Anordnung und Unterbringung der Trockner (f) zu beachten.



Die meisten Trockner arbeiten mit vor- oder nachgeschalteten Geräten zusammen. Zu klären ist, welcher Art diese Geräte sind, welche Anschlussmaße sie haben und wie der Transport des Gutes zwischen den Geräten und dem Trockner zu bewerkstelligen ist. Zu prüfen ist weiter, ob und wie sich der Trockner in den dafür vorgesehenen Räumen anordnen lässt, welche Belastung die Gebäudeböden vertragen wie der Trockner oder seine Teile zur Montagestelle transportiert werden können, und welche Hilfsgeräte evtl. vorhanden sind (Kröll, 1978).

Für die Auswahl des Trocknungsverfahrens (chargenweiser oder kontinuierlicher Betrieb) ist zunächst der angestrebte Durchsatz an Trocknungsgut (pro Stunde oder Tag) abzuschätzen. Bei Chargentrocknern ist die Kombination von mehreren Trocknermodulen und die Umlagerung der Produkte im Verlauf der Trocknung zu berücksichtigen. Bei der Einordnung der Trockner in den Produktionsablauf (g) sind insbesondere der Personalbedarf (h) und betriebswirtschaftliche und arbeitsorganisatorische Aspekte zu berücksichtigen (Kapitel 6). Die wechselnden klimatischen Bedingungen im Verlauf der Ernteperiode (i) wurden bereits in Abschnitt 4.1 dargestellt. Die Punkte (j) bis (m) werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

Die Reinigung und die Einhaltung von Hygienestandards (n) ist bei der Trocknung von Arzneipflanzen besonders wichtig. Selbst kleine Fremdbestandteile anderer Gutarten dürfen sich nicht wiederfinden. Rückstände im Trockner oder gar Anbackungen müssen vermieden bzw. beseitigt werden. Auch zur Wartung (o) sollten einzelne Anlagenteile gut zugänglich sein. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit (p) sind Belastungen der Umgebung durch Staub- und Abgas zu minimieren. Achten sollte man auch auf das Geräusch und die Schwingungen, die von manchen Trocknern und von Ventilatoren ausgehen. Zur Sicherheit (q) darf kein Trockner für die Personen, die sich in seiner Umgebung aufhalten, Gefahren bringen, die über das unvermeidliche Maß hinausgehen. Die Trocknungskosten (r) werden maßgeblich von den Energiekosten bestimmt.

## 5.2 Energiebedarf und Energieversorgung

Die Auswahl der Energiequellen ist sorgfältig vorzubereiten. Die zur Trocknung benötigte thermische Energie wird überwiegend aus konventionellen Energieträgern bereitgestellt (Erdgas, Heizöl). Prozesse mit Kraft-Wärme-Kopplung sind von besonderem Interesse für die Trocknung, da elektrische und thermische Energie gleichzeitig nutzbar gemacht werden. Beim Einsatz von Blockheizkraftwerken ist zu unterscheiden, ob bisher nicht genutzte Abwärme (z.B. aus einer Biogasanlage) zur Verfügung steht oder ob ein neues BHKW errichtet werden soll.

Der elektrische Energiebedarf von konvektiven Trocknungsverfahren wird maßgeblich von den Ventilatoren bestimmt. Eine Ausnahme ist die Trocknung mit elektrisch angetriebenen Wärmepumpen. Hinsichtlich der Versorgung mit elektrischer Energie ist zu entscheiden, ob der Strom aus dem öffentlichen Netz oder aus einem BHKW bezogen werden soll.

Bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Abluft und Frischluft ist Wärmerückgewinnung mit rekuperativen Wärmeübertragern nur von geringem Nutzen. Die Trocknung mit Teilumluft ist für Arzneipflanzen die wesentlich bessere Option. Rekuperative Wärmerückgewinnung

kommt deshalb nur für Gewürzpflanzen in Frage, die bei höheren Temperaturen getrocknet werden, z.B. in Bandtrocknungsanlagen.

Zur Trocknung mit Wärmepumpen werden das Prinzip und die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Schaltungs- und Betriebsvarianten erläutert. Wichtig für die Bewertung von Wärmepumpentrocknern ist die Leistungszahl *COP*, die das Verhältnis der nutzbaren Wärme zur eingesetzten elektrischen Energie beschreibt und u.a. von der Trocknungstemperatur abhängt.

Die Nutzung von Solarwärme hat Vor- und Nachteile. Bei reinen Solartrocknern haben die naturgegebenen zeitlichen Änderungen der Solarenergiebereitstellung entsprechende Schwankungen der Trocknungsbedingungen zur Folge. Solartrockner sollten deshalb mit einer zusätzlichen Heizung ausgestattet werden.

### 5.2.1 Konventionelle Energieträger

Der deutsche Endenergieverbrauch wird von fossilen Energieträgern dominiert. Ein großer Teil der Wärmeerzeugung findet in der Industrie statt. 2014 lag der Endenergieverbrauch der deutschen Industrie bei 2.508,4 PJ mit einem Anteil von 64,4 % für Prozesswärme. 46,1 % der Prozesswärme wurden durch Gas, 20,7 % durch Kohle und 6,2 % durch Öl bereitgestellt (BMWi, 2016b).

Erdgas ist der Hauptenergieträger in der konventionellen Heiztechnik. Hinsichtlich der Bereitstellung von Prozesswärme hat der Einsatz von Warmluftheizern und Heizkesseln mit Erdgas Vorteile gegenüber anderen fossilen Energieträgern. Durch das gut ausgebaute Verteilernetz stellt Erdgas besonders bei großen Wärme- bzw. Brennstoffmengen eine logistisch günstige Variante dar. Für Heizöl und Flüssiggas sind hingegen Lagertanks erforderlich. Bezogen auf den Heizwert ist Erdgas außerdem preiswerter als Heizöl (Kapitel 7).

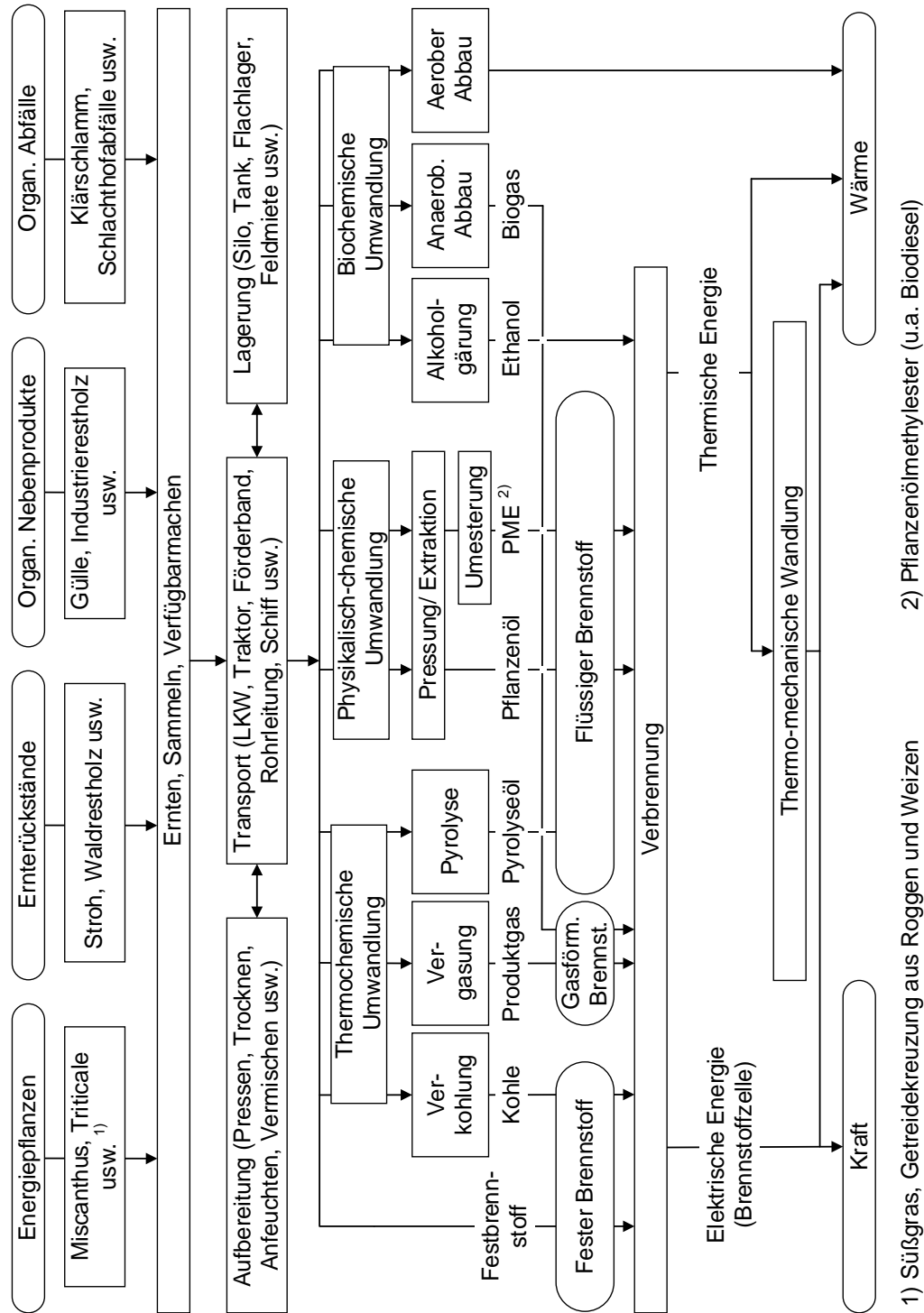
Die wichtigsten Eigenschaften von festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen wurden bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die Notwendigkeit einer primärenergetischen Bewertung der unterschiedlichen Energieträger mit Hilfe von Primärenergiefaktoren wurde dort ebenfalls erläutert. Heiz- und Brennwerte sind im Anhang zusammengestellt (**Tabelle D.2**).

### 5.2.2 Energie aus nachwachsenden Rohstoffen

Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) sind land- und forstwirtschaftliche Produkte auf pflanzlicher und tierischer Basis, die stofflich oder zur Erzeugung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen genutzt werden. Der Begriff Biomasse bezeichnet alle Stoffe organischer Natur. Biomasse als kohlenstoffhaltige Materie umfasst Energiepflanzen (z.B. Miscanthus, Triticale), Ernterückstände (z.B. Stroh, Waldrestholz), organische Nebenprodukte (z.B. Gülle, Industrierestholz) sowie organische Abfälle (z.B. Klärschlamm, Schlachthofabfälle).

Im weiteren Sinne umfasst Biomasse alle Stoffe, die durch ihre Nutzung oder durch eine technische Umwandlung entstehen bzw. anfallen (z.B. Biokohle, Pflanzenöl, Ethanol, Biogas). Die Abgrenzung wird durch den fossilen Status definiert. Torf als sekundäres Produkt der Verrottung zählt streng genommen nicht mehr zur Biomasse, obwohl dies in Ländern wie z.B. Finnland und Schweden auch anders definiert werden kann (Kaltschmitt et al., 2009).

Aus Biomasse können durch unterschiedliche Umwandlungsprozesse feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe gewonnen werden. Ein Schema typischer Bereitstellungsketten für Brennstoffe aus Biomasse zeigt **Abb. 5.1**. Die Heizwerte von festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen aus Biomasse (z.B. Holzpellets, Biodiesel, Biogas) sind durchweg kleiner als die Heizwerte von Brennstoffen aus fossilen Energieträgern (**Tabelle D.2**).



**Abb. 5.1:** Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten für Brennstoffe aus Biomasse (Kaltschmitt et al., 2009).

Mit der Ausnahme von Biogas und Holzhackgut spielen Brennstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen eine eher untergeordnete Rolle. Eine Verbrennung von Stroh, welches ausschließlich als Raufutter und Einstreu für die Tierhaltung genutzt wird, kommt so gut wie nicht in Frage. Der erhöhte Aschegehalt in Verbindung mit dem geringeren Temperaturniveau der Ascheerweichung von Halmgut-Brennstoffen erschwert die Nutzung von technischen Anlagen zur Verbrennung von holzbasierten Brennstoffen. Um einer Belegung der Feuerungs- und Wärmeübertragungstechnik mit Asche und der damit begünstigten Hochtemperaturkorrosion entgegenzuwirken, ist eine leistungsstarke Entaschung erforderlich (Kaltschmitt et al., 2009).

Der Einsatz von Stückholzfeuerungen spielt ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da der Automatisierungsgrad im Wärmeleistungsbereich  $> 100 \text{ kW}_{th}$  bisher noch unzureichend ist. Ähnliches gilt auch für Holzpellets, welche eher in kleineren Anlagen zum Einsatz kommen (FNR, 2014b).

### **Biomassekessel**

Grundsätzlich kann jede Art von Holz zu Holzhackgut verarbeitet werden. Der überwiegende Anteil von Hackgut wird jedoch aus Schwachholz und Waldrestholz gewonnen. Neben Rohmaterial aus dem Wald wird auch Industrierestholz und Altholz zu Hackgut verarbeitet, welches größtenteils als "weißes Hackgut" nicht der energetischen Verwertung, sondern der Pressspan-Industrie zugeführt wird (Kaltschmitt et al., 2009). Holzackschnitzel werden in den Qualitätsklassen A1 (20 % Feuchtegehalt) und A2 (35 % Feuchtegehalt) angeboten. Im Januar 2017 lagen die Preise pro Tonne bei ca. 130 €/t bzw. ca. 80 €/t (TFZ, 2017).

Kessel mit thermischen Leistungen  $> 100 \text{ kW}_{th}$  werden größtenteils mit automatischer Brennstoffzufuhr angeboten. Zusätzlich verfügen diese größeren Kessel meistens über einen nachgeschalteten Entstaubungsprozess. 2012 lagen die spezifischen Investitionskosten zwischen 141 €/kW<sub>th</sub> und 620 €/kW<sub>th</sub> (Median: 327 €/kW<sub>th</sub>, Leistungsbereich: 100 – 500 kW<sub>th</sub>). Die spezifischen Investitionskosten fallen nicht zwangsläufig mit zunehmender Leistung. Anlagen  $> 1 \text{ MW}_{th}$  verfügen über eine automatische Entaschung und werden teilweise als Rostfeuerungen ausgeführt, die mit höheren Kosten als z.B. Unterschubfeuerungen verbunden sind (FNR, 2014b).

Bei den Investitionen müssen weitere Kosten berücksichtigt werden, wobei von folgenden Größenordnungen ausgegangen werden kann: 10 – 15 % der Investitionskosten für Planung, Bauleitung und Abnahmen; 10 – 20 % für Elektro- und Leittechnik; 5 – 10 % für Unvorhergesehenes. Je nach Anlagengröße können die Planungs- und Bauzeiten bis zu zwei Jahre dauern (FNR, 2014b).

### **Biogasanlagen**

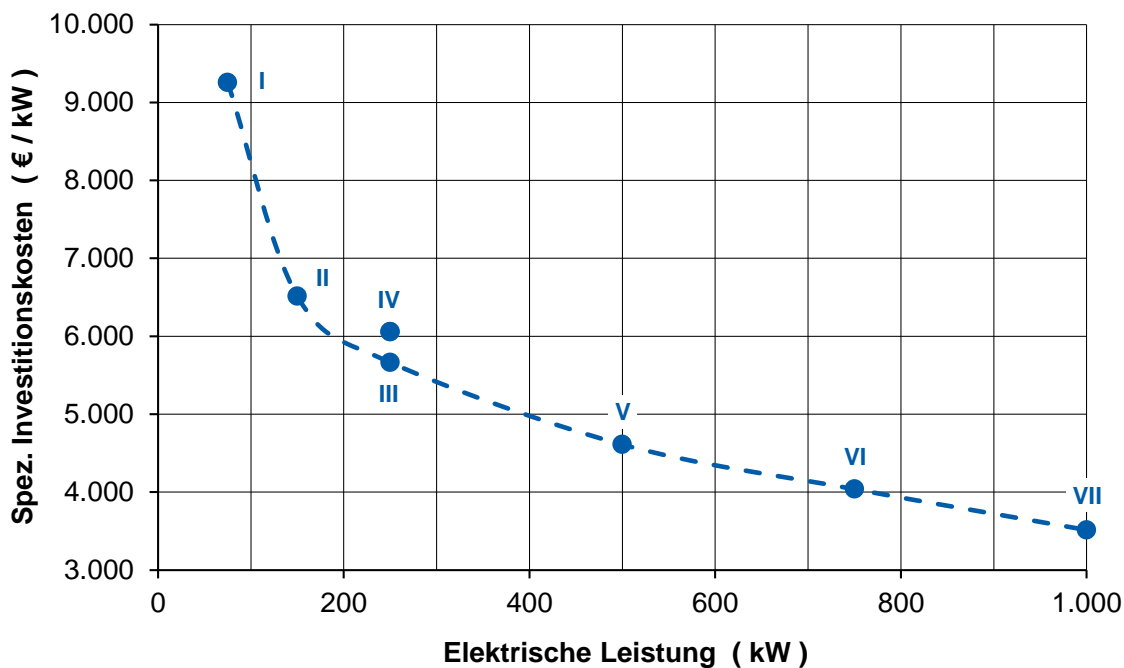
Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurden unterschiedliche Modellanlagen untersucht (FNR, 2016). Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse werden nachfolgend auszugsweise zusammengefasst.

Es wurden ausschließlich Nassvergärungsanlagen mit voll durchmischten, stehenden Fermentern betrachtet, die im mesophilen Temperaturbereich arbeiten. Die Modellanlagen umfassen kleine Gülleanlagen mit einer elektrischen Leistung von 75 kW<sub>el</sub> sowie Anlagen, die mit unterschiedlich hohen Gülle-Anteilen oder als reine NawaRo-Anlagen betrieben werden.

Außerdem wurden Anlagen mit Strom-Direktvermarktung sowie mit Biogasaufbereitung und -einspeisung in das Erdgasnetz betrachtet.

Die Anlagenleistung hat sich in den letzten Jahren sukzessive auf bis zu  $1\text{ MW}_{el}$  erhöht. Als Gärsubstrate der Modellanlagen wurden in der Landwirtschaft gängige und für den Einsatz in Biogasanlagen geeignete Biomassen ausgewählt. Hierzu zählen die originär aus der Landwirtschaft stammenden Wirtschaftsdünger und Silagen nachwachsender Rohstoffe.

Bei der Ermittlung des Investitionsbedarfs wurden folgende Baugruppen berücksichtigt: Substratlagerung und Einbringung, Fermenter, Blockheizkraftwerk inkl. Peripherie zur Gasverwertung und Steuerung sowie Anlagen zur Gärückstandslagerung. Außerdem wurden weitere Aufwendungen eingerechnet: Anlagenplanung und -genehmigung, Inbetriebnahme, Grundstück und die Grundstückerschließung (z.B. Strom, Wasser), Straßen- und Wegebau. Der Investitionsbedarf für sieben Modellanlagen ist in **Abb. 5.2** dargestellt. Die spezifischen Investitionskosten fallen mit der Anlagengröße.



**Abb. 5.2:** Spezifische Investitionskosten für Biogasanlagen im Jahr 2013 (FNR, 2016).

Abgesehen von Gaseinspeiseanlagen ist die Haupteinnahmequelle von Biogasanlagen der Verkauf von elektrischer Energie. Höhe und Dauer des Vergütungsanspruchs sind im Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien geregelt (EEG, 2017). Je nach Art und Menge der eingesetzten Substrate, Leistung der Anlage und Erfüllung weiterer Kriterien unterliegt der Vergütungspreis jedoch erheblichen Schwankungen. Die angenommenen EEG-Vergütungsansprüche der Modellanlagen beziehen sich auf eine Inbetriebnahme der Anlagen im Jahr 2013 (**Tabelle 5.1**).

**Tabelle 5.1:** Spezifischer Investitionsbedarf und EEG-Vergütungssätze für Biogas sowie kalkulatorischer Gewinnbeitrag und Gesamrentabilität unterschiedlicher Modellanlagen im Jahr 2013 (FNR, 2016).

Substrat Größe, Modellanlage	80 % Gülle 20 % NawaRo	30 % Gülle 70 % NawaRo	20 % Gülle 80 % NawaRo	60 % Gülle 40 % NawaRo	20 % Gülle 80 % NawaRo	20 % Gülle 80 % NawaRo	100 % NawaRo
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Elektr. Leistung $kW_{el}$	75	150	250	250	500	750	1.000
Spez. Investition $€/kW_{el}$	9.256	6.514	5.665	6.057	4.610	4.038	3.514
Vergütungssatz $Cent/kW_{el}$	24,50	20,14	19,45	19,75	18,79	17,94	17,35
Kalk. Gewinn $€/a$	- 31.219	- 48.717	- 9.344	1.836	67.754	127.444	177.086
Rentabilität %	- 4,8	- 5,7	- 3,2	4,7	10,5	13,1	14,8

Der Absatz von Wärme gestaltet sich gegenüber dem Stromverkauf deutlich schwieriger. Deshalb sollten bereits bei der Standortwahl mögliche Wärmeabnehmer berücksichtigt werden. Für die Inanspruchnahme der EEG-Vergütung ist in der novellierten Fassung des EEG eine Mindestwärmenutzung in Höhe von 60 % der produzierten Wärmemenge vorgeschrieben, wobei pauschal 25 % für die Fermenterheizung angerechnet werden können. Dementsprechend müssen 35 % der produzierten Wärme extern genutzt werden (FNR, 2016).

In Leistungs-Kosten-Rechnungen wurde u.a. die Gesamrentabilität der Modellanlagen ermittelt (**Tabelle 5.1**). Die Modelle I, II und III können aus unterschiedlichen Gründen kein positives Betriebsergebnis erzielen. Die Modellanlagen III und IV unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihren Substrateinsatz. Trotz höherer spez. Investitionen wirken sich die geringeren Substratkosten deutlich auf die Rentabilität aus. Anlage IV kann jedoch nur einen sehr geringen Gewinn erwirtschaften.

Die Anlagen V, VI und VII erzielen Gewinne zwischen rund 67.000 € und 177.000 €. Die steigende Gesamtkapitalrentabilität zeigt, dass die Größendegression der Vergütungssätze durch die Degression des spezifischen Investitionsbedarfs, steigende elektrische Wirkungsgrade und einen dadurch geringeren Substratbedarf überkompensiert werden.

### Wärmenutzungspfad Trocknung

Die Nutzung der beim KWK-Prozess anfallenden Wärme ist neben dem Stromerlös zunehmend eine ausschlaggebende Größe für den wirtschaftlichen Erfolg einer Biogasanlage. Wärmenutzungskonzepte von Biogasanlagen sind verstärkt darauf ausgerichtet, einen größeren Teil der Wärmemenge außerhalb des Biogasprozesses zu nutzen. Dies steigert die Gesamteffizienz der Biogasanlagen. Ein wichtiger Wärmenutzungspfad ist die Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten. Bei der Trocknung von Getreide ist bereits die Nutzung eines sehr kleinen Anteils der gesamten Biogaswärme aus KWK wirtschaftlich. Durch Nutzung von größeren Wärmemengen zu Trocknungszwecken können auch schon mit kleinen Biogasanlagen ( $150 kW_{el}$ ) achtbare Gewinne erzielt werden (FNR, 2016).



Arznei- und Gewürzpflanzen muss pro kg Trockengut ca. 50-mal so viel Wasser entzogen werden wie lagerfähigem Getreide. Dies soll anhand eines Rechenbeispiels verdeutlicht werden. Nach Gl. (A.6) und Gl. (A.11) errechnet sich der spez. Wasserentzug pro kg Trockengut aus:

$$\text{spez. Wasserentzug pro kg Trockengut: } W_{TG} = E - 1 = \frac{100 \% - F_{TG}}{100 \% - F_{FG}} - 1 \quad \frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}} \quad (5.1)$$

Getreide muss typischerweise von 20 % Kornfeuchte auf 14 % Restfeuchte getrocknet werden. Der spez. Wasserentzug beträgt damit 0,075:

$$\text{spez. Wasserentzug von Getreide: } W_{TG} = \frac{100 \% - 14 \%}{100 \% - 20 \%} - 1 = 0,075 \quad \frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}} \quad (5.2)$$

Für Arzneipflanzen ergibt sich hingegen bei einer Frischgutfeuchte von  $F_{FG} = 80 \%$  und einer Trockengutfeuchte von  $F_{TG} = 10 \%$  ein spez. Wasserentzug von 3,5:

$$\text{spez. Wasserentzug von Arzneipflanzen: } W_{TG} = \frac{100 \% - 10 \%}{100 \% - 80 \%} - 1 = 3,5 \quad \frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}} \quad (5.3)$$

Die Division der beiden Werte ergibt:

$$\frac{\text{spez. Wasserentzug Arzneipflanzen}}{\text{spez. Wasserentzug Getreide}} = \frac{3,5}{0,075} = 46,7 \quad (5.4)$$

Bei höheren Eintrocknungsverhältnissen steigt dieser Faktor auf Werte deutlich über 50. Mit anderen Worten: 20 kg getrockneten Arzneipflanzen ist so viel Wasser entzogen worden wie einer Tonne lagerfähigem Getreide. Absolut betrachtet sind die insgesamt zu trocknenden Getreidemengen natürlich erheblich größer. Trotzdem zeigt das Rechenbeispiel, mit welcher großen Wassermengen man es bei der Trocknung von Arzneipflanzen zu tun hat.

### 5.2.3 Blockheizkraftwerke und Abwärmenutzung

Besonderes Merkmal von Blockheizkraftwerken ist die gleichzeitige Bereitstellung und Nutzung von elektrischer Energie und Wärme. Sie haben deshalb höhere Gesamtwirkungsgrade als Kraftwerke, aus denen die gesamte Abwärme z.B. über Kühltürme an die Umgebung abgegeben wird. Durch das erstmals 2002 verabschiedete Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG, 2017) soll u.a. der Anteil der dezentralen Stromerzeugung erhöht werden: "Dieses Gesetz dient der Erhöhung der Nettostromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf 110 Terawattstunden bis zum Jahr 2020 sowie auf 120 Terawattstunden bis zum Jahr 2025 im Interesse der Energieeinsparung sowie des Umwelt- und Klimaschutzes."

Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren erzeugen über einen Generator elektrischen Strom, der zur Eigenversorgung genutzt oder in das öffentliche Netz eingespeist werden kann. Die Auskopplung der Nutzwärme erfolgt zum einen über den Kühlkreislauf des Motors, zum anderen über die Abgasleitung mit jeweils einem Wärmeübertrager. Aufgrund des stationären Einsatzes ist ein hoher Anteil der Abwärme für Heizzwecke oder als Prozesswärme nutzbar.

Der elektrische Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken errechnet sich aus der abgegebenen elektrischen Leistung und der zugeführten Brennstoffleistung:

$$\eta_{el,BHKW} = P_{BHKW} / \dot{Q}_B \quad (5.5)$$

Der thermische Wirkungsgrad ist der Quotient aus der abgegebenen Nutzwärmeleistung und der zugeführten Brennstoffleistung:

$$\eta_{th,BHKW} = \dot{Q}_{nutz} / \dot{Q}_B \quad (5.6)$$

Damit lässt sich ein Gesamtwirkungsgrad bilden:

$$\eta_{ges,BHKW} = \eta_{el,BHKW} + \eta_{th,BHKW} \quad (5.7)$$

Die leistungsbezogene Stromkennzahl ist das Verhältnis der abgegebenen elektrischen Leistung zur abgegebenen Nutzwärmeleistung:

$$\sigma = P_{BHKW} / \dot{Q}_{nutz} \quad (5.8)$$

Der Kehrwert der Stromkennzahl wird als Wärmekennzahl bezeichnet.

Blockheizkraftwerke werden nach der elektrischen Modulleistung in drei Gruppen eingeteilt: 30 – 400 kW<sub>el</sub>, 400 – 1.00 kW<sub>el</sub> und darüber hinaus (Meixner & Stein, 2002). Die elektrischen Wirkungsgrade liegen je nach Baugröße bei 25 – 38 %. Bei Gesamtwirkungsgraden von 80 – 90 % liegen die thermischen Wirkungsgrade bei ca. 52 – 55 %.

Beim Betrieb von Blockheizkraftwerken werden Stromführung und Wärmeführung unterschieden. Stromführung zielt auf maximale Stromeinspeisung. Zahlreiche Blockheizkraftwerke, die nachwachsende Rohstoffe als Brennstoff nutzen, werden stromgeführt betrieben. Nicht nutzbare Wärme wird dabei über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben. Durch das aktuelle EEG wird diese Möglichkeit der Energievergeudung minimiert. Richtet sich die elektrische Leistungsabgabe nach dem lokalen Wärmebedarf, so spricht man von Wärmeführung. Dabei wird entweder die elektrische Leistung entsprechend geregelt, oder ein Wärmespeicher wird im Intervallbetrieb geladen. Der erzeugte Strom wird möglichst selbst verbraucht, der Überschuss wird in das öffentliche Netz eingespeist und entsprechend verrechnet.

Die Abschätzung von Investitions- und Wartungskosten für Blockheizkraftwerke wird in Abschnitt 7.2 erläutert.

#### 5.2.4 Wärmerückgewinnung

Durch Wärmerückgewinnung (WRG) kann in einem Prozess nicht mehr nutzbare Wärme für einen anderen Prozess nutzbar gemacht werden. In lufttechnischen Anlagen wird die Abluft zur Erwärmung der Frischluft genutzt. Hierfür werden Wärmeübertrager unterschiedlicher Bauart eingesetzt. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Frischluft, desto größer ist die erreichbare Energieeinsparung.

Man unterscheidet passive und aktive Verfahren der Wärmerückgewinnung. In passiven Verfahren ist keine bzw. eine nur sehr geringe äußere Energiezufuhr notwendig (rekuperative oder regenerativen Systeme). Durch aktive Wärmerückgewinnung unter Einsatz von Arbeitsmaschinen (z.B. Wärmepumpen) können hohe Nutzwärmeströme erreicht werden.

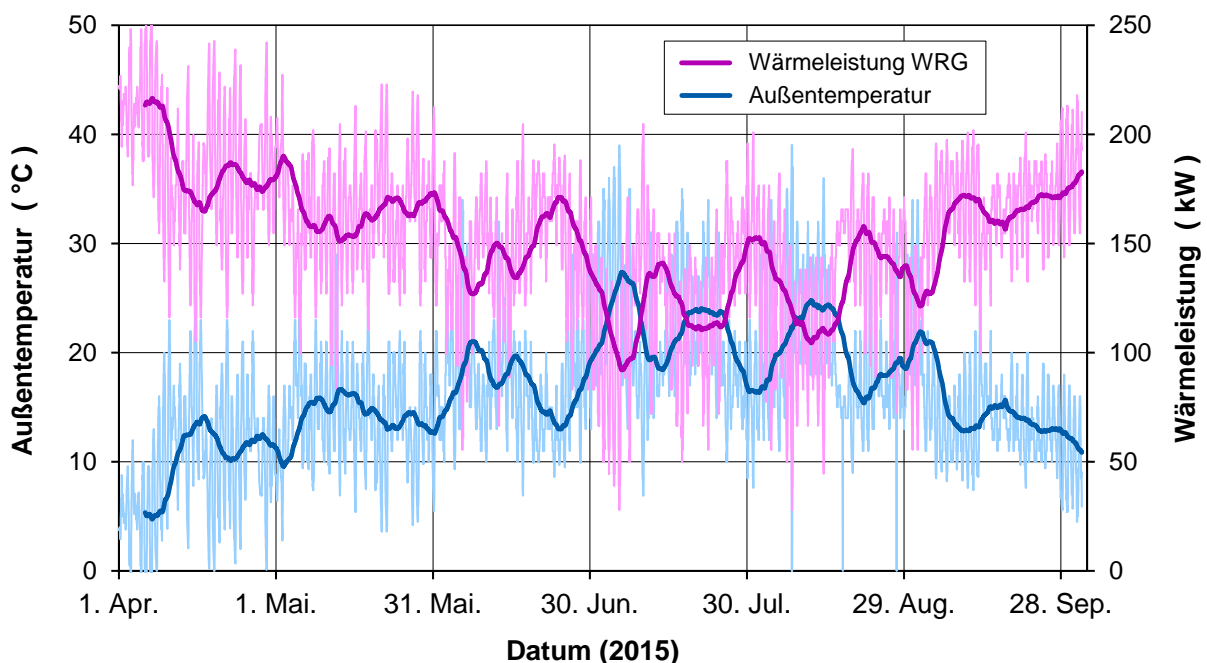
Mit rekuperativen Wärmeübertragern wird Wärme von einem Fluid höherer Temperatur auf ein kälteres Fluid übertragen. Die Wärmeübertragung kann über Trennwände direkt von dem einen Stoffstrom auf den anderen oder indirekt erfolgen. Indirekte rekuperative Verfahren werden unter Zwischenschaltung von Wärmeträgermedien (meistens Wasser) ausgeführt.

Hinsichtlich der Bauart unterscheidet man Rohrbündel- und Platten-Wärmeübertrager. In Rohrbündel-Wärmeübertragern strömen die Medien im Gleich- oder Gegenstrom, wobei Gleichstrom selten angewendet wird. Kreuzströmung wird mit Platten-Wärmeübertragern verwirklicht. Die Fluide strömen dann senkrecht zueinander durch aufeinanderfolgende profilierte Platten.

Die Dimensionierung von Wärmeübertragern erfolgt durch Fachfirmen. Bei gegebenen Stoffströmen und Eintrittstemperaturen lassen sich Wärmeströme und Austrittstemperaturen näherungsweise mit Hilfe von bekannten Berechnungsgleichungen und dimensionslosen Kennzahlen nachrechnen (Baehr & Stephan, 2013).

### Rekuperative Wärmerückgewinnung bei Bandtrocknern

Im Rahmen einer Masterarbeit (Halemba, 2015) wurden unterschiedliche Varianten zur Durchsatz- und Effizienzsteigerung eines Fünfbandrockners für Arznei- und Gewürzpflanzen untersucht. Die Varianten umfassten die Installation eines Vortrockners, die Integration einer Wärmepumpe sowie rekuperative Wärmerückgewinnung. Die Simulationsergebnisse in **Abb. 5.3** basieren auf Angaben eines Herstellers zu zwei Wärmeübertragern mit zwischengeschaltetem Wasser-Glykol-Kreislauf sowie auf Daten einer Wetterstation in Darmstadt (HLUG, 2015). Je niedriger die Temperaturen der Frischluft, desto größer ist die Wärmeleistung der Wärmerückgewinnung.



**Abb. 5.3:** Simulation eines Systems zur rekuperativen Wärmerückgewinnung bei unterschiedlichen Temperaturen der Außenluft im Jahresverlauf (Halemba, 2015).

Variantenrechnungen ergaben folgende Einsparungen an Primärenergie im Vergleich zur konventionellen Luftherwärmung (Heizöl): Rekuperative Wärmerückgewinnung ca. 28 %, Installation eines Vortrockners ca. 20 – 33 % (je nach Ausführung), Integration einer Wärmepumpe ca. 18 %. Die pro Tonne Trockenware eingesparten Energiekosten lagen in einer ähnlichen Größenordnung. Mit einem Vortrockner könnten Durchsatzsteigerungen von ca. 30 – 60 % erreicht werden, auch ohne Zwischenerwärmung (Ziegler et al., 2016a).

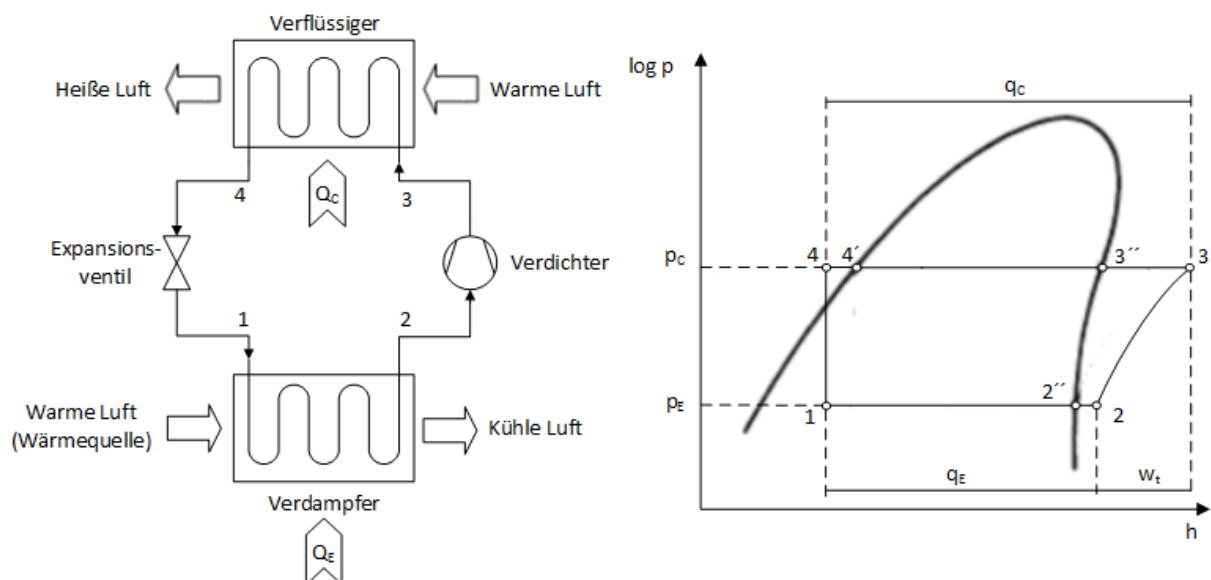
Hervorzuheben ist, dass der untersuchte Fünfbandtrockner eine sehr geringe Trocknungseffizienz aufwies (geringe Abluftsättigung, hohe Ablufttemperatur). Unter diesen Bedingungen wäre rekuperative Wärmerückgewinnung auch aufgrund der kürzesten Amortisationszeit zu bevorzugen. Im Hinblick auf eine mögliche Produktionserweiterung sollte jedoch zuerst der Trocknungsprozess optimiert werden, z.B. durch die Installation eines Vortrockners.

### 5.2.5 Trocknung mit Wärmepumpen

Mit Wärmepumpen wird Wärme auf einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau bei höheren Temperaturen nutzbar gemacht. Da die Wärmeübertragung entgegengesetzt zum natürlichen Temperaturgefälle erfolgt, werden ein Hilfsprozess und Antriebsenergie benötigt. Die technische Umsetzung des Wärmepumpenprinzips kann auf vielfältige Art und Weise erfolgen (**Abb. D.1** im Anhang). Elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen werden in der Industrie häufig eingesetzt (Lambauer et al., 2008).

#### Kompressionswärmepumpen

Die prinzipielle Funktionsweise ist in **Abb. 5.4** dargestellt. In der Wärmepumpe zirkuliert ein Kältemittel als Arbeitsmedium. Im Verdampfer nimmt das Kältemittel Wärme aus der Wärmequelle auf und ändert dabei seinen Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig. Die hierfür benötigte Verdampfungswärme wird der Wärmequelle auf einem niedrigen Temperaturniveau entzogen. Luft als Wärmequelle kühlt sich dabei ab. Um sicherzustellen, dass der Verdichter kein flüssiges Kältemittel ansaugt, wird das gasförmige Kältemittel leicht überhitzt.



**Abb. 5.4:** Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe und Kältemittelkreislauf im log p-h-Diagramm (Kirn, 1983).

Durch die anschließende Kompression im Verdichter steigen der Druck und die Temperatur des Kältemittelgases. Im Verflüssiger kondensiert das Kältemittel und gibt die Kondensationswärme auf einem hohen Temperaturniveau an die sogenannte Wärmesenke ab. Verflüssiger werden deshalb auch als Kondensatoren bezeichnet. Luft als Wärmesenke wird dabei erwärmt. Das Kältemittel strömt über ein Expansionsventil zurück zum Verdampfer und wird dabei wieder auf das niedrige Druckniveau entspannt. Der Kältemittelkreislauf ist geschlossen und kann von Neuem beginnen.

### Leistungszahlen

Ein Wirkungsgrad ist allgemein als das Verhältnis aus Nutzen und Aufwand definiert. Der Nutzen von Wärmepumpen ist die vom Verflüssiger bereitgestellte Wärme. Der Aufwand ist die für den Hilfsprozess erforderliche Energie. Bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen ist dies die elektrische Energie für den Kältemittelverdichter und für weitere Hilfsantriebe.

Zusätzliche elektrische Energie wird in wärmepumpenunterstützten Trocknungsverfahren insbesondere für Hilfsventilatoren benötigt. Wie in anderen lufttechnischen Anlagen haben Ventilatoren die Aufgabe, die Luft zu transportieren und Strömungswiderstände zu überwinden. Strömungswiderstände entstehen durch Druckverluste im Verdampfer und im Verflüssiger der Wärmepumpe sowie in weiteren Bauteilen des Luftkanalsystems.

Das Verhältnis aus Nutzen und Aufwand wird bei Wärmepumpen als Leistungszahl oder *coefficient of performance* (COP) bezeichnet. Die Leistungszahl ist folglich ein Maß für die Effizienz einer Wärmepumpe in einem bestimmten Betriebspunkt. Dabei sind die Heizleistungszahl  $\varepsilon_H$  und der COP zu unterscheiden. Die Heizleistungszahl  $\varepsilon_H$  beinhaltet nur die elektrische Energie für den Kältemittelverdichter:

$$\varepsilon_H = \frac{\dot{Q}_{\text{nutz}}}{P_K} \quad (5.9)$$

Der COP berücksichtigt außerdem die elektrische Energie für weitere Hilfsantriebe, insbesondere für den Hilfsventilator der Wärmepumpe:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{nutz}}}{P_K + P_{\text{Vent}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{nutz}}}{P_{\text{ges}}} \quad (5.10)$$

Der COP einer Wärmepumpe ist folglich kleiner als ihre Heizleistungszahl  $\varepsilon_H$ . Die Heizleistungszahl einer idealen Wärmepumpe entspricht dem reziproken Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$ , der aus der Verflüssigungstemperatur  $T_1$  und der Verdampfungstemperatur  $T_2$  berechnet wird:

$$\varepsilon_{H,\text{ideal}} = \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (5.11)$$

Da reale Prozesse mit Verlusten behaftet sind, können ideale Heizleistungszahlen in der Praxis niemals erreicht werden. Verluste entstehen durch Strömungswiderstände, endliche Temperaturdifferenzen in Wärmeübertragern, nicht isentrope Verdichtung und nicht isenthalpe Drosselung. Das Verhältnis der realen zur idealen Heizleistungszahl wird Gütegrad genannt. Nach Wolf et al. (2014) liegen die Gütegrade moderner Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei 0,45 – 0,50, die von Luft-Wasser-Wärmepumpen bei 0,35 – 0,40.

### Primärenergiebedarf von Elektro-Wärmepumpen

Abb. 5.5 zeigt den Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe (unten) im Vergleich mit einer konventionellen Heizung (oben). Die Wärmepumpe hat eine Leistungszahl von  $COP = 4,0$ , der thermische Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers beträgt 91 %. Unter diesen Bedingungen benötigt die Wärmepumpe bei gleicher Wärmeleistung nur ca. 42 % der für eine konventionelle Heizung erforderlichen Primärenergie.

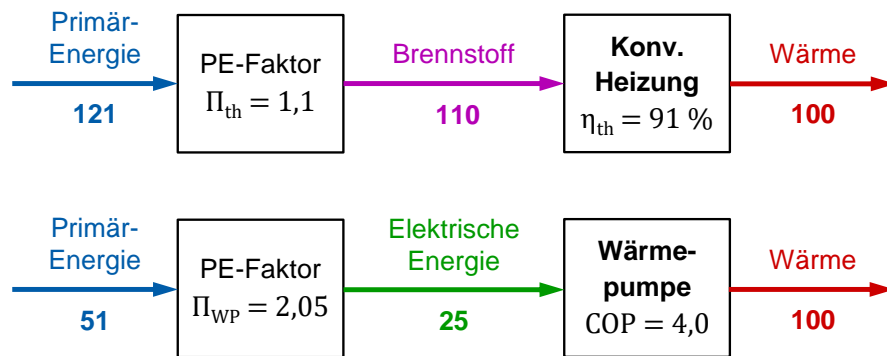


Abb. 5.5: Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe im Vergleich zu einer konventionellen Heizung.

Abb. 5.6 zeigt den relativen PE-Bedarf in Abhängigkeit von der Leistungszahl  $COP$ . Dabei wurde von einer elektrischen Leistung des Verdichters von  $87\text{ kW}_{el}$  ausgegangen. Für den Hilfsventilator der Wärmepumpe wurde eine elektrische Leistung von  $13\text{ kW}_{el}$  angenommen. Je größer der  $COP$ , desto größer ist die erreichbare Wärmeleistung (rote Kurve, ca. 250 – 550  $\text{kW}_{th}$ ). Die jeweils von einer Wärmepumpe benötigte Primärenergie in  $\text{kW}$  (blau) wurde nach Gl. (3.16) mit PE-Faktoren von  $\Pi_{WP} = 2,15 \dots 1,96$  berechnet.

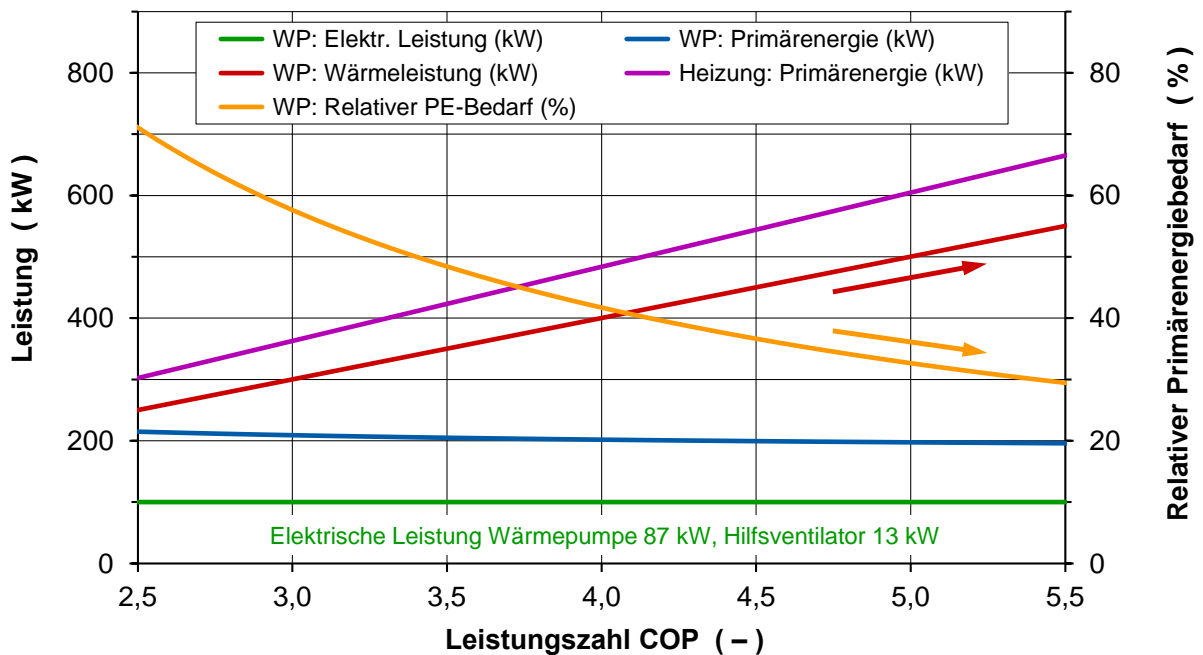


Abb. 5.6: Relativer Primärenergiebedarf von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen in Abhängigkeit von der Leistungszahl  $COP$ .



Für die gleiche Wärmeleistung wäre mit einer konventionellen Heizung (z.B. Erdgas oder Heizöl) wesentlich mehr Primärenergie erforderlich (violette Kurve: thermischer Wirkungsgrad  $\eta_{th,H} = 91\%$ , PE-Faktor  $\Pi_{th} = 1,1$ ). Der relative PE-Bedarf von Elektro-Wärmepumpen (orange) sinkt im dargestellten Bereich ( $COP = 2,5 \dots 5,5$ ) von ca. 71 % auf 30 %.

### Besonderheiten der Trocknung mit Wärmepumpen

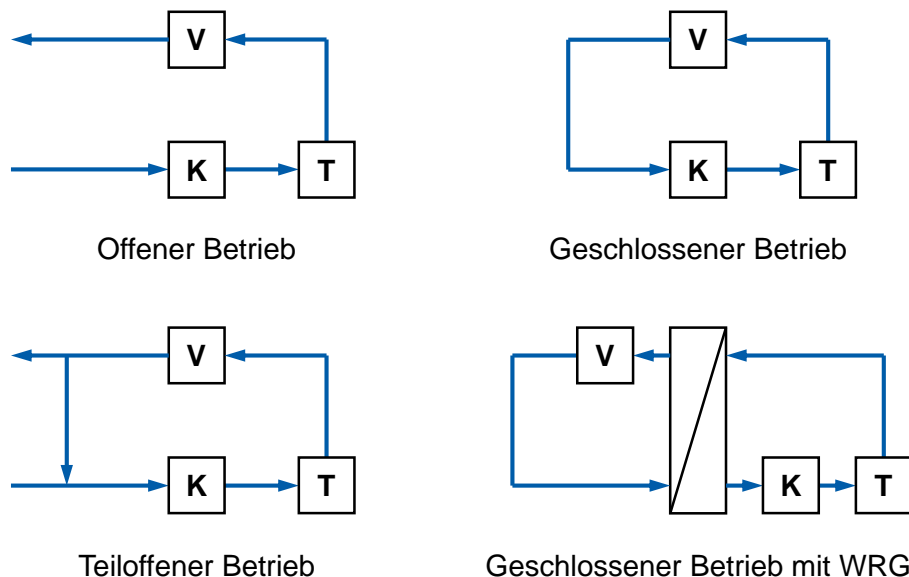
Die Trocknung mit Wärmepumpen hat grundsätzlich folgende Vorteile (Mujumdar, 2006):

- Hohe Energieeffizienz,
- größere Trocknungsgeschwindigkeiten bei niedrigen Temperaturen,
- bessere Produktqualität insbesondere bei temperaturempfindlichen Produkten,
- weiter Bereich möglicher Betriebsbedingungen.

Nachteile wärmepumpenunterstützter Trocknungsverfahren sind in jedem einzelnen Anwendungsfall zu prüfen bzw. zu optimieren:

- Hohe Investitionskosten für Wärmepumpen,
- erhöhter Wartungsaufwand, z.B. für Kältemittel, Filter und Wärmeübertrager,
- komplexere Betriebsbedingungen im Vergleich zur einfachen Konvektionstrocknung,
- erhöhter Platzbedarf, auch für die Luftkanäle.

Bei Trocknungstemperaturen um 40 °C können Wärmepumpen mit hohen Leistungszahlen betrieben werden. Prinzipiell lässt sich jeder Konvektionstrockner mit einer Wärmepumpe ergänzen. Der Wärmepumpen- und der Trocknungsprozess sind energetisch jedoch eng miteinander verknüpft. Dimensionierung und Steuerung müssen anlagen- und produktspezifisch sehr sorgfältig abgestimmt werden. Bezüglich der Luftführung gibt eine Vielzahl möglicher Schaltungsvarianten. Eine Auswahl ist in **Abb. 5.7** dargestellt.



**Abb. 5.7:** Auswahl möglicher Schaltungsvarianten bei der Trocknung mit Wärmepumpen ( $K = \text{Kondensator}$ ,  $T = \text{Trockner}$ ,  $V = \text{Verdampfer}$ ,  $WRG = \text{interne Wärmerückgewinnung}$ ).

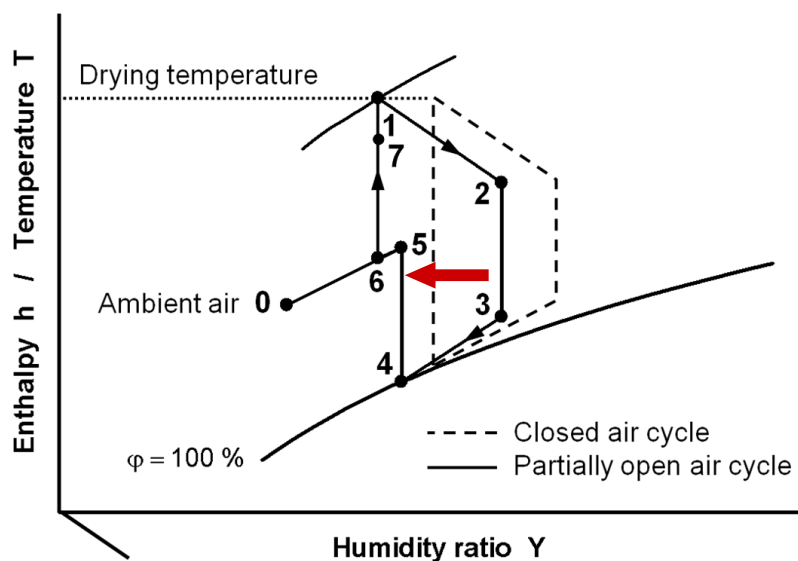
In allen dargestellten Schaltungsvarianten wird die Trocknerabluft als Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe genutzt. Im offenen Betrieb besteht bei kalten Außenluftbedingungen Vereisungsgefahr für den Verdampfer. Im teiloffenen Betrieb, bei dem nur ein Teil der Trocknerabluft im Kreislauf gefahren wird, ist die Wärmepumpentrocknung abhängig von den jeweiligen Außenluftbedingungen. Damit hat der Umluftanteil einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz und auf den erreichbaren Durchsatz an Trocknungsgut.

### Teiloffener Betrieb mit interner Wärmerückgewinnung

Durch interne Wärmerückgewinnung lässt sich die Leistungszahl von Wärmepumpen beträchtlich steigern. Eine Möglichkeit bei der Trocknung ist die Integration eines Kreuzstrom-Wärmeübertragers (**Abb. 5.7** rechts unten). Dabei wird die Abluft vor ihrem Eintritt in den Verdampfer vorgekühlt und anschließend vorgewärmt. Dadurch sinkt die erforderliche Heizleistung der Wärmepumpe.

Eine weitere Effizienzsteigerung wird in der teiloffenen Betriebsart erreicht, die auch eine anlagentechnische Vereinfachung ermöglicht (Ziegler et al., 2013a). Der Prozess ist exemplarisch in **Abb. 5.8** dargestellt. Die Trocknerabluft wird zunächst im Kreuzstrom-Wärmeübertrager vorgekühlt (2-3). Im Falle einer hohen Abluftfeuchte erfolgt hier bereits eine Teilentfeuchtung. Die Hauptentfeuchtung geschieht im Verdampfer durch Taupunktunterschreitung (3-4). Danach wird die Luft zunächst durch die im Kreuzstrom-Wärmeübertrager zurückgewonnene Wärme vorgewärmt (4-5). Durch das Mischen von Frischluft (0) mit der vorgewärmten Luft (5) ergibt sich ein neuer Luftzustand vor dem Kondensator bzw. Verflüssiger (6). Der Zustand der Mischluft (6) hängt von den aktuellen Luftzuständen (0) und (5) sowie von dem aktuellen Mischungsverhältnis ab. Der resultierende Luftstrom wird anschließend im Verflüssiger erwärmt (6-7). Durch den Hilfsventilator der Wärmepumpe und durch die Hauptventilatoren der Trocknung erfolgt eine weitere Lufterwärmung bis auf die erforderliche Trocknungstemperatur (7-1).

Durch das Mischen von Frischluft (0) mit der vorgewärmten Luft (5) ergibt sich ein neuer Luftzustand vor dem Kondensator bzw. Verflüssiger (6). Der Zustand der Mischluft (6) hängt von den aktuellen Luftzuständen (0) und (5) sowie von dem aktuellen Mischungsverhältnis ab. Der resultierende Luftstrom wird anschließend im Verflüssiger erwärmt (6-7). Durch den Hilfsventilator der Wärmepumpe und durch die Hauptventilatoren der Trocknung erfolgt eine weitere Lufterwärmung bis auf die erforderliche Trocknungstemperatur (7-1).



**Abb. 5.8:** Wärmepumpentrocknung mit interner Wärmerückgewinnung im Mollier  $h, Y$ -Diagramm (schematisch).

Der dem System als Frischluft (0) zugeführte Massenstrom wird als Trocknerabluft (2) in die Umgebung entlassen. Dadurch strömt nur ein reduzierter Luftmassenstrom durch den Vorkühler (2-3), durch den Verdampfer (3-4) und durch den Vorwärmer (4-5). Im Vergleich zum geschlossenen Betrieb wird der reduzierte Luftmassenstrom somit einer größeren spezifischen Wärmeübertragerfläche ausgesetzt.

Praxismessungen zeigten eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen für unterschiedliche Betriebsbedingungen. Die theoretischen Analysen umfassten nahezu alle Außenluftbedingungen, die für die Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen relevant sind (Ziegler et al., 2012). Durch den teiloffenen Betrieb wurde der Primärenergiebedarf im Vergleich zum geschlossenen Betrieb um ca. 25 % reduziert. Außerdem wurde die Entfeuchtungsleistung der Trocknungsanlage gesteigert. Bei typischen Betriebsbedingungen wurde eine Leistungszahl der Wärmepumpen von  $COP = 5,4$  ermittelt (Jubaer et al., 2013).

### **Anlagentechnische Vereinfachung**

In geschlossenen Wärmepumpensystemen entspricht die Heizleistung des Verflüssigers der Kälteleistung des Verdampfers. Die elektrische Antriebsenergie des Verdichters wird jedoch ebenfalls als Wärmeleistung wirksam. Diese bei Trocknung im geschlossenen Betrieb "überschüssige" Wärme muss über einen externen Verflüssiger abgeführt werden.

Im teiloffenen Betrieb ist dies nicht erforderlich. Auf einen externen Verflüssiger kann daher verzichtet werden. Mit einer einfachen Frischluftklappe wird nicht nur das natürliche Trocknungspotenzial der Außenluft optimal genutzt, sondern auch die Trocknungstemperatur präzise geregelt. Außerdem sinkt dadurch die erforderliche Heizleistung der Wärmepumpe. Der teiloffene Betrieb ermöglicht somit eine kleinere Dimensionierung und eine anlagentechnische Vereinfachung zukünftiger Wärmepumpentrockner.

### **5.2.6 Nutzung von Solarwärme**

Rein solare Trocknung unterscheidet sich von anderen Trocknungsprozessen insoweit, dass die naturgegebenen zeitlichen Änderungen der Solarenergiebereitstellung entsprechende Schwankungen der Trocknungsbedingungen zur Folge haben. Die technischen Möglichkeiten der Umwandlung von Solarenergie in Wärme, wie sie thermischen Solarkollektoren stattfindet, sind bekannt (Duffie & Beckman, 1991). Ein besonderes Kennzeichen der solaren Lufterwärmung ist, dass die je  $m^2$  Kollektorfläche gewinnbare Wärmeleistung umso größer wird, je geringer die im Kollektor erreichte Erhöhung der Lufttemperatur ist. Solare Trockner kommen deshalb vor allem als Niedertemperaturtrockner in Frage (Müller, 1992; Maltry, 1996b).

Bei der Trocknung mit solar erwärmter Luft steht der Einsparung fossiler Energieträger die Forderung nach einer kontinuierlichen, qualitätserhaltenden Trocknung bei möglichst ganz-tägig gleichbleibendem Zustand der Trocknungsluft gegenüber (Ziegler, 1999). Grundsätzlich ist es für Mitteleuropa deshalb empfehlenswert, Solartrockner mit einer Zusatzheizung auszustatten, um schlechte Witterung überbrücken zu können (Heindl & Müller, 2010).

### Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung des Absorbers

Das Prinzip thermischer Solarkollektoren besteht darin, dass Strahlungsenergie durch einen dunklen Absorber aufgenommen wird, der sich dadurch aufheizt. Verluste durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung können durch eine transparente Abdeckung und durch Isolierung des Kollektors reduziert werden. Die Nutzwärme wird durch Konvektion an das Wärmeträgermedium (z.B. Wasser oder Luft) übertragen. Solarkollektoren, die Luft als Wärmeträgermedium nutzen, werden als Luftkollektoren bezeichnet. Je nach Anordnung des Absorbers im Kollektor unterscheidet man Bauarten mit überströmtem, unterströmtem oder durchströmtem Absorber. Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung werden in Modulbauweise gefertigt und vertrieben.<sup>43</sup> Durch Reihenschaltung mehrerer Module hintereinander (oder auch durch Umluftbetrieb) lassen sich relativ hohe Austrittstemperaturen erzielen.<sup>44</sup>

Für flüssigkeitsführende Solarkollektoren wurden detaillierte Methoden zur energetischen Vermessung erarbeitet und in europäischen und weltweit gültigen Normen festgeschrieben. Obwohl auch Luftkollektoren bereits seit Jahrzehnten im Einsatz sind, liegen entsprechende Normen erst seit 2014 vor. Die Grundlagen für eine objektive und einheitliche energetische Bewertung von Solarluftsystemen wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE erarbeitet (Stryi-Hipp et al., 2014). Die im März 2014 veröffentlichte Überarbeitung der Solarkollektornorm als weltweit einheitlicher EN-ISO-Standard enthält erstmals auch Richtlinien für abgedeckte und unabgedeckte Luftkollektoren (DIN EN ISO 9806-2:2014-03).

Zertifikate für Solarkollektoren werden von akkreditierten Zertifizierungsstellen wie der Zertifizierungsstelle des Deutschen Instituts für Normung vergeben (DIN-CERTCO, 2017). Für einige Luftkollektoren liegen mittlerweile Zertifikate vor. Wirkungsgradkennlinien eines Luftkollektors mit unterströmtem Absorber sind im Anhang E dargestellt und erläutert (**Abb. D.6**).

### Austrittstemperaturen von Luftkollektoren

Solarkollektoren sollten immer so ausgerichtet werden, dass über die gesamte Nutzungsdauer ein möglichst hoher Energieertrag erzielt wird (Südausrichtung auf der Nordhalbkugel der Erde). Dabei sind meistens Kompromisse erforderlich. Auf geneigten Dächern ergibt sich der Anstellwinkel normalerweise aus der Dachneigung. Bei Freiaufstellung oder Flachdachmontage ist eine Aufständigung möglich, z.B. in einem Winkel von 45° oder 60° gegenüber der Horizontalen. Liegt der Anstellwinkel fest, so lassen sich die Nutzwärmeleistung und die Austrittstemperaturen von Solarkollektoren für einen bestimmten Tag des Jahres recht genau berechnen. Dabei sind die im Tagesverlauf veränderlichen Einstrahlungswinkel zu berücksichtigen, unter denen die Solarstrahlung auf die Kollektorebene trifft.<sup>45</sup>

---

<sup>43</sup> Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung des Absorbers werden auch als geschlossene Kollektoren bezeichnet. Bei den sogenannten offenen Luftkollektoren ohne transparente Abdeckung wird die Luft üblicherweise durch einen perforierten Absorber angesaugt. Diese Anlagen werden meist in größeren Fassaden eingesetzt.

<sup>44</sup> Mit Vakuumröhren-Luftkollektoren werden für Prozesswärmeanwendungen Austrittstemperaturen von über 120 °C bei guten Wirkungsgraden erreicht (Stryi-Hipp et al., 2014).

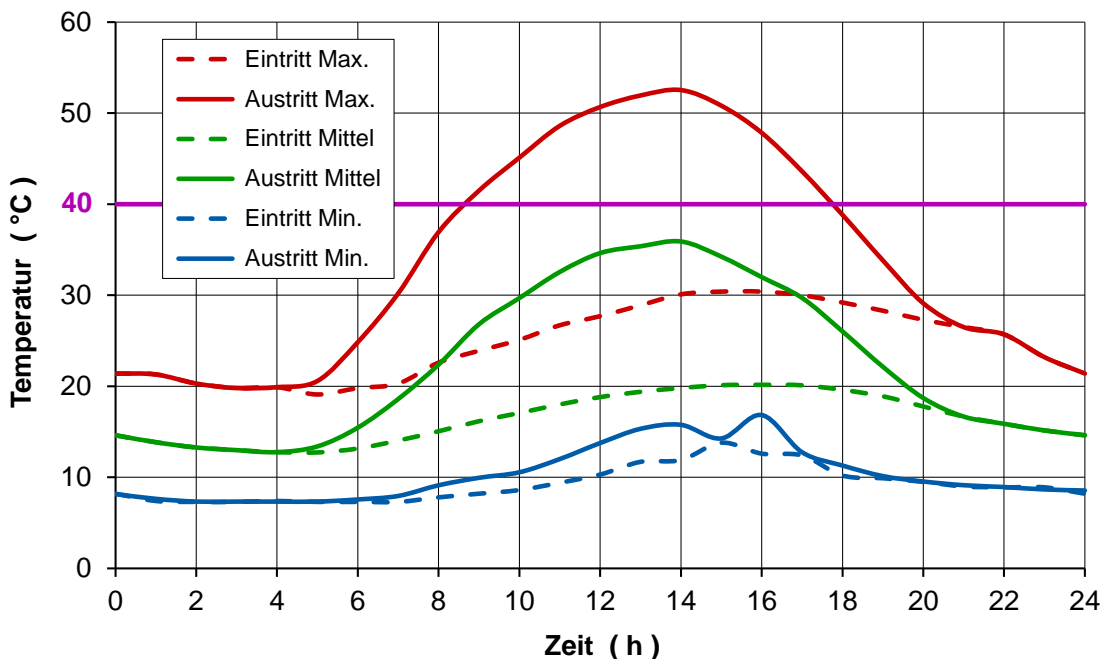
<sup>45</sup> Auf eine detaillierte Darstellung dieser geometrischen Zusammenhänge wird verzichtet (Duffie & Beckman, 1991).

Die der modellbasierten Fallstudie zur Chargentrocknung zugrunde gelegten klimatischen Bedingungen im Verlauf der Ernteperiode wurden bereits im Abschnitt 4.1 erläutert. Analog zu den durchschnittlichen Tagesverläufen der mittleren Außenlufttemperatur für die einzelnen Monate Mai bis Oktober (**Abb. D.3** im Anhang) wurden aus den Datensätzen des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2016) durchschnittliche Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene erarbeitet (**Abb. D.7** im Anhang).

Mit Hilfe des von Stryi-Hipp et al. (2014) beschriebenen Wirkungsgradmodells wurden anschließend Austrittstemperaturen aus einem Luftkollektor mit transparenter Abdeckung simuliert (**Abb. 5.9**). Die Berechnungsformeln sind im Anhang aufgeführt (**Tabelle D.4**).

Die Austrittstemperaturen in **Abb. 5.9** basieren auf folgenden Modellparametern:

- Eintrittstemperaturen: Durchschnittliche Tagesverläufe der minimalen, mittleren und maximalen Außenlufttemperatur im Juni;
- Globalstrahlung: Durchschnittliche Tagesverläufe der minimalen, mittleren und maximalen Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene im Juni (**Abb. D.8** im Anhang);
- Südausrichtung des Kollektors; Anstellwinkel: 45°; Datum: 11. Juni;<sup>46</sup>
- Brutto-Kollektorfläche pro Modul: 2,51 m<sup>2</sup> inkl. Rahmen; Aperturfläche: 2,33 m<sup>2</sup> ohne Rahmen (92,8 %);<sup>47</sup>
- Luftmassenstrom pro m<sup>2</sup> Aperturfläche: 100 kg/(h · m<sup>2</sup>).



**Abb. 5.9:** Tagesverläufe der Ein- und Austrittstemperaturen eines Luftkollektors im Juni.

<sup>46</sup> Im langjährigen Mittel entspricht der Tagesverlauf der Globalstrahlungsdichte am 11. Juni den durchschnittlichen Werten des Monats (Duffie & Beckman, 1991).

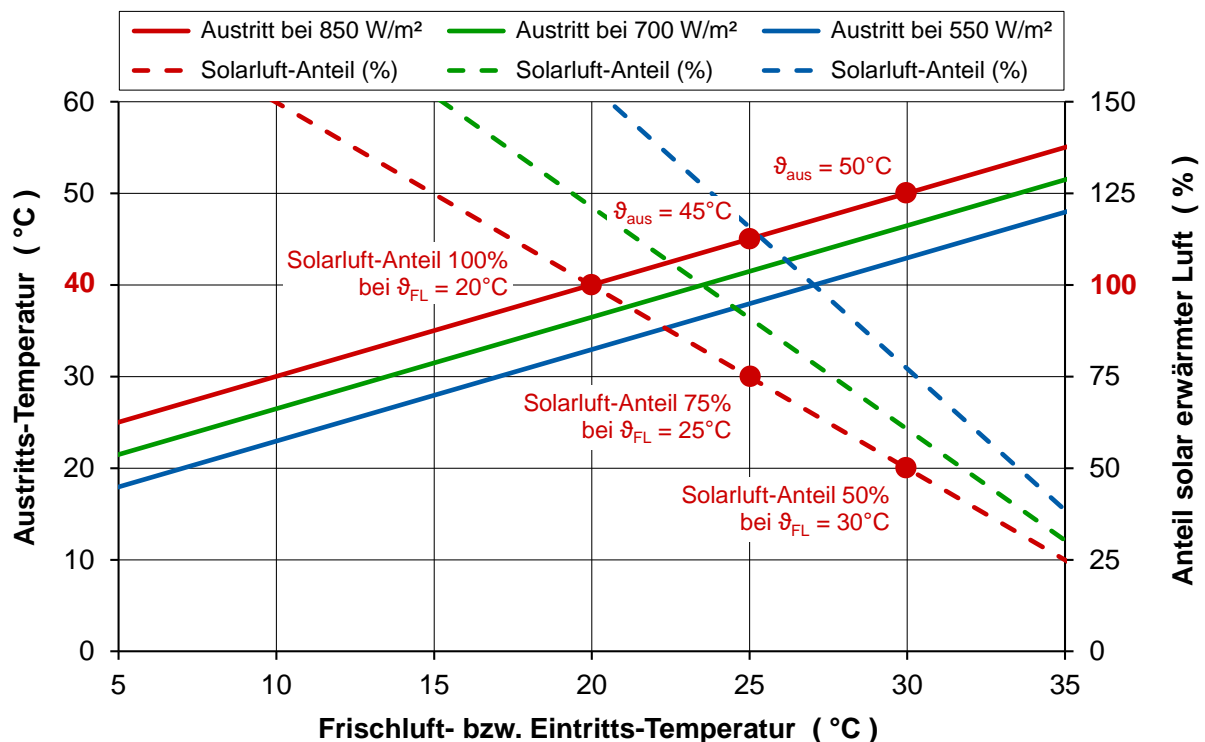
<sup>47</sup> Register-Nr. des Zertifikats: 011-7S2347 L (DIN-CERTCO, 2017).

Um den Verlust an ätherischen Ölen zu minimieren, sollte bei Arzneipflanzen eine Trocknungstemperatur von typischerweise  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  nicht überschritten werden. Dies gilt natürlich auch für die Trocknung mit solar erwärmter Luft. Der Luftmassenstrom pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche sollte bei Luftkollektoren deshalb immer möglichst groß gewählt werden, um möglichst niedrige Austrittstemperaturen zu erreichen. Dadurch wird gleichzeitig die größte Nutzwärmeleistung erzielt. Der den Simulationsrechnungen zugrunde gelegte Luftmassenstrom von  $100\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  liegt in der Nähe des vom Hersteller für diesen Kolleortyp angegebenen Maximalwerts (Grammer-Solar, 2017b).

Bei mittleren Außentemperaturen (grüne Kurven in **Abb. 5.9**) und mittleren Werten der Globalstrahlung (**Abb. D.8** im Anhang) steigt die Kollektoraustrittstemperatur nicht über ca.  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .<sup>48</sup> Bei höheren Außentemperaturen (rote Kurven) und gleichzeitig höheren Werten der Globalstrahlung über  $900\text{ W}/\text{m}^2$  in der Horizontalebene werden Austrittstemperaturen von  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  jedoch deutlich überschritten, und zwar von morgens bis abends.

### Anteil solar erwärmter Luft bei der Trocknung von Arzneipflanzen

Unter diesen Bedingungen muss die zu warme Luft aus der Luftkollektoranlage mit vergleichsweise kühlerer Frischluft vermischt werden, um die zulässige Trocknungstemperatur nicht zu überschreiten. Daraus folgt, dass die Trocknungsanlage bei günstigen Witterungsverhältnissen nur mit einem bestimmten Anteil solar erwärmter Luft betrieben werden darf. Dies ist bei der Dimensionierung der Solaranlage zu beachten.



**Abb. 5.10:** Austrittstemperaturen aus einem Luftkollektor und Anteile solar erwärmter Luft für eine Trocknungstemperatur von  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

<sup>48</sup> Kleinere Luftmassenströme würden zu deutlich höheren Austrittstemperaturen führen.



Zur Erläuterung sind in **Abb. 5.10** Kollektoraustrittstemperaturen und zulässige Anteile solar erwärmter Luft dargestellt, aus denen bei der Luftmischung eine Temperatur der Trocknungsluft von  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  resultiert. Den Simulationsrechnungen wurden Werte der Globalstrahlungsdichte in der Kollektorebene von 850, 700 sowie  $550\text{ W/m}^2$  zugrunde gelegt.

Je höher die Eintrittstemperatur, desto höher ist auch die Temperatur der aus dem Kollektor austretenden Luft. Bei einer Temperatur der Frischluft von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Globalstrahlungsdichte von  $850\text{ W/m}^2$  beträgt die Austrittstemperatur  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In diesem Fall kann die gesamte solar erwärmte Luft für die Trocknung genutzt werden.<sup>49</sup> Bei einer Temperatur der Frischluft von  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $850\text{ W/m}^2$  wird eine Austrittstemperatur von  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht. In diesem Fall können nur 50 % der solar erwärmten Luft für einen bestimmten Trockner genutzt werden.

### Exemplarische Dimensionierung der Kollektorfläche

Die Dimensionierung der Kollektorfläche wird im Folgenden exemplarisch abgeschätzt.

Luftvolumenstrom der Trocknung für eine Rostfläche von  $100\text{ m}^2$ :

$$\dot{V}_{L,Rost} = 50.000\text{ m}^3/\text{h} = 13,89\text{ m}^3/\text{s} \quad (5.12)$$

Luftmassenstrom der Trocknung für eine Rostfläche von  $100\text{ m}^2$ :

$$\dot{m}_{L,Rost} = \rho_L(40\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot \dot{V}_{L,Rost} = 1,112\text{ kg/m}^3 \cdot 13,89\text{ m}^3/\text{s} = 15,44\text{ kg/s} \quad (5.13)$$

Luftmassenstrom der solar erwärmten Luft bei einem Anteil von 50 %:

$$\dot{m}_{L,Koll} = 50\% \cdot \dot{m}_{L,Rost} = 7,72\text{ kg/s} \quad (5.14)$$

Temperaturerhöhung der solar erwärmten Luft:

$$\Delta T_{Koll} = \vartheta_{L,aus} - \vartheta_{L,ein} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 20\text{ K} \quad (5.15)$$

Gesamte Aperturfläche der Solaranlage nach Gl. (D.8) im Anhang:<sup>50</sup>

$$A_{Ap} = \frac{\dot{m}_{L,Koll} \cdot c_{pL} \cdot \Delta T_{Koll}}{\eta_{Koll} \cdot \dot{G}_{Ap}} = \frac{7,22\text{ kg/s} \cdot 1,006\text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 20\text{ K}}{0,6584 \cdot 850\text{ W/m}^2} = 278\text{ m}^2 \quad (5.16)$$

Gesamte Brutto-Kollektorfläche der Solaranlage:

$$A_{Koll} = A_{Ap} \cdot \frac{A_{brutto,Modul}}{A_{Ap,Modul}} = 278\text{ m}^2 \cdot \frac{2,51\text{ m}^2}{2,33\text{ m}^2} = 299\text{ m}^2 \quad (5.17)$$

Nutzwärmeleistung bei  $0,850\text{ kW/m}^2$  in der Kollektorebene nach Gl. (D.7) im Anhang:

$$\dot{Q}_{Nutz} = \eta_{Koll} \cdot A_{Ap} \cdot \dot{G}_{Ap} = 0,6584 \cdot 278\text{ m}^2 \cdot 0,850\text{ kW/m}^2 = 156\text{ kW} \quad (5.18)$$

Der gleiche Wert ergibt sich aus der Luftbilanz:

$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{m}_{L,Koll} \cdot c_{pL} \cdot \Delta T_{Koll} = 7,72\text{ kg/s} \cdot 1,006\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 20\text{ K} = 156\text{ kW} \quad (5.19)$$

<sup>49</sup> Solarluft-Anteile von mehr als 100 % bedeuten, dass die Luftkollektoranlage mehr solar erwärmte Luft bereitstellt, als von einem bestimmten Trockner benötigt wird.

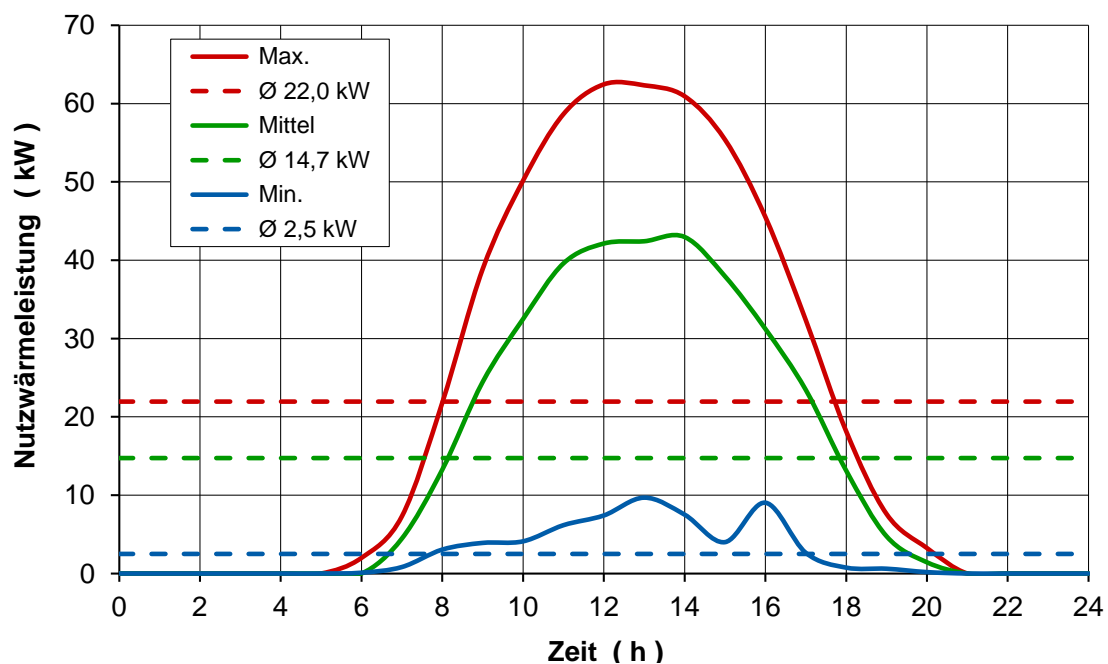
<sup>50</sup> Der thermische Wirkungsgrad des Solarkollektors resultiert aus dem von Stryi-Hipp et al. (2014) beschriebenen Wirkungsgradmodell.

Mit anderen Zahlenwerten der Frischluft-Temperatur, der Luftmassenströme und der Globalstrahlungsdichte ergäbe sich eine andere Brutto-Kollektorfläche der Solaranlage. Aus der Abschätzung (Gl. 5.17) resultiert eine Kollektorfläche von ca.  $3,0 \text{ m}^2$  pro  $\text{m}^2$  Rostfläche. Wird die Luftkollektoranlage für einen Solarluft-Anteil von ca. 50 % ausgelegt, so ist zu beachten, dass die zulässige Trocknungstemperatur bei sehr hohen Außentemperaturen und Strahlungswerten trotzdem überschritten würde. Hierfür sind entsprechende regelungstechnische Vorkehrungen zu treffen. Am einfachsten ist es, die Solaranlage abzuschalten.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen Teil der Kollektorausstrittsluft anderen Trocknern zuzuführen, die nur im Bedarfsfall teilweise mit solar erwärmter Luft betrieben werden. Diese Variante sollte insbesondere auch für Solarluft-Anteile von mehr als 100 % in Betracht gezogen werden. Diese treten immer dann auf, wenn die Temperatur der Frischluft kleiner ist als im Schnittpunkt der Kollektoraustrittstemperatur mit der jeweiligen Geraden des Solarluft-Anteils, also bei vergleichsweise weniger günstigen Witterungsverhältnissen. Die Solaranlage kann dann ggfs. auch größer dimensioniert werden. Im Einzelfall ist der Nutzen der erforderlichen Maßnahmen dem zusätzlichen Aufwand, z.B. für Hilfsventilatoren und Luftkanäle, gegenüberzustellen.

### Nutzwärmeleistung und nutzbare Solarwärme pro Tag

**Abb. 5.11** zeigt die Nutzwärmeleistung einer Luftkollektoranlage mit  $100 \text{ m}^2$  Brutto-Kollektorfläche im Juni. Die dargestellten Tagesverläufe basieren auf den bereits beschriebenen Modellparametern. Die Kollektoren sind nach Süden ausgerichtet, der Anstellwinkel beträgt  $45^\circ$ . Insbesondere im Herbst ist dadurch die Globalstrahlungsdichte in der Kollektorebene (**Abb. D.9**) deutlich größer als in der Horizontalebene (**Abb. D.7**). Die Tagesverläufe der Nutzwärmeleistung in den Monaten Mai bis September (**Abb. D.10**) unterscheiden sich quantitativ deshalb nur vergleichsweise wenig voneinander.



**Abb. 5.11:** Tagesverläufe der Nutzwärmeleistung einer Luftkollektoranlage mit  $100 \text{ m}^2$  Brutto-Kollektorfläche im Juni.

Bezieht man die Tagesverläufe auf 24 Stunden, so ergeben sich für den Monat Juni die in **Abb. 5.11** angegebenen Durchschnittswerte der Nutzwärmeleistung:  $\varnothing 14,7 \text{ kW}$  bei mittleren Witterungsverhältnissen,  $\varnothing 22,0 \text{ kW}$  an Tagen mit hohen Außentemperaturen und gleichzeitig hohen Werten der Globalstrahlung.

Die mittleren Temperaturen der Außenluft und die durchschnittlich zu erwartenden Tagessummen der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene am Standort Ranis wurden bereits in **Tabelle 4.1** aufgeführt. **Tabelle 5.2** zeigt entsprechende Werte der Globalstrahlung in der Kollektorebene, der nutzbaren Solarwärme pro Tag und  $\text{m}^2$  Brutto-Kollektorfläche sowie der durchschnittlichen Nutzwärmeleistung, wenn man die nutzbare Solarwärme auf den ganzen Tag umrechnet. Die Neigung der Kollektoren um  $45^\circ$  bewirkt, dass im September immer noch ca. 89 % der Juniwerte erreicht werden.

**Tabelle 5.2:** Nutzbare Solarwärme pro Tag und durchschnittliche Nutzwärmeleistung einer Luftkollektoranlage mit  $100 \text{ m}^2$  Brutto-Kollektorfläche (Mai – Oktober).

Größe	Symbol	Monat						Einheit
		Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	
Außentemperatur (1)	$\vartheta_{U,m}$	13,7	16,5	18,9	18,8	14,7	10,7	$^\circ\text{C}$
Globalstrahlung horizontal (2)	$G''_m$	19,0	21,8	19,9	17,3	13,6	7,3	$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
Globalstrahlung in Kollektorebene (3)	$G''_{Ap}$	19,1	20,4	18,8	18,4	18,0	11,8	$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
Nutzbare Solarwärme (4)	$Q''_{\text{nutz}}$	11,7	12,7	11,8	11,5	11,3	7,2	$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
$\varnothing$ Nutzwärmeleistung bei $100 \text{ m}^2$ (5)	$\dot{Q}_{\text{nutz}}$	13,5	14,7	13,7	13,4	13,1	8,3	$\text{kW}$
		91	100	93	91	89	56	%

- (1) mittlere Temperatur der Außenluft; (2) mittlere Tagessummen pro  $\text{m}^2$  in der Horizontalebene; (3) mittlere Tagessummen pro  $\text{m}^2$  Aperturfläche, Südausrichtung, Anstellwinkel:  $45^\circ$ , Luftmassenstrom:  $100 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ; (4) mittlere Tagessummen pro  $\text{m}^2$  Brutto-Kollektorfläche; (5) durchschnittliche Nutzwärmeleistung für eine Brutto-Kollektorfläche von  $100 \text{ m}^2$ .

### Besonderheiten der solar unterstützten Trocknung von Arzneipflanzen in der Praxis

Unabhängig von den vielfältigen technischen Ausführungen solar unterstützter Trocknungsanlagen ist die Tagessumme der nutzbaren solaren Strahlungsenergie entscheidend für den Beitrag, den Solarwärme zur Energieeinsparung leisten kann. Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung des Absorbers sind bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und haben sich als robust, zuverlässig und wartungsarm erwiesen. Bei der Aufstellung bzw. Aufständigung mit einem optimalen Anstellwinkel ist u.a. der Breitengrad des Aufstellorts zu berücksichtigen, wobei meistens Kompromisse erforderlich sind.

Luftkollektoren sollten immer mit einem möglichst großen Luftvolumenstrom betrieben werden, um eine maximale Nutzwärmeleistung und gleichzeitig niedrige Austrittstemperaturen zu erzielen. Dabei ist jedoch die elektrische Leistung der Hilfsventilatoren zu berücksichtigen. Da auch die Druckverluste von Luftkollektoren bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten steigen, ist eine Optimierung der Reihenlänge des Kollektorfeldes unerlässlich.

Es sollte immer nur ein Teil der Trocknungsluft solar erwärmt werden, um eine Überschreitung der zulässigen Trocknungstemperatur zu vermeiden. Eine Zusatzheizung bietet nicht nur Sicherheit für strahlungsarme Schlechtwetterperioden, sondern ermöglicht auch die Regelung der Trocknungstemperatur auf den gewünschten Wert. An warmen Tagen mit klarem Himmel und entsprechend hohen Werten der Globalstrahlung muss die Solaranlage ggfs. abgeschaltet werden.

Bei der Dimensionierung ist außerdem zu beachten, dass die benötigte Wärmeleistung im Verlauf der Trocknung erheblich sinken kann, z.B. bei Trocknung mit Teilumluft (vgl. **Abb. 4.6**). Zusammenfassend sollte die Kollektorfläche zumindest für die chargenweise Trocknung von Arzneipflanzen aus folgenden Gründen eher unterdimensioniert werden:

- Vermeidung zu hoher Austrittstemperaturen;
- Sinkender thermischer Energiebedarf im Verlauf der Trocknung;
- Reduzierung der Investitionskosten für die Solaranlage.

### 5.3 Betriebsoptimierung

Auf den Energiebedarf landwirtschaftlicher Trocknungsanlagen wirkt eine Vielzahl von Einflussfaktoren, insbesondere Art, Größe, Ausrüstung, Betriebsweise und Zustand der Anlage. Ferner ist der Trocknungsvorgang in starkem Maß vom Verständnis und Einfühlungsvermögen des Bedienungspersonals und den stark veränderlichen Witterungsbedingungen abhängig. Diese Einflüsse voll zu quantifizieren, ist nicht möglich (Maltry, 1975).

Wesentlich für die Energieeffizienz von Trocknungsanlagen sind eine maximale Auslastung, eine weitgehende Reduzierung von Wärmeverlusten, eine kontinuierliche Erfassung, Aufzeichnung und Kontrolle von Messwerten und Verbrauchsdaten sowie nicht zuletzt eine energieoptimierte Prozessregelung.

#### Auslastung von Trocknungsanlagen

Trocknungsanlagen sollten im Verlauf der Ernteperiode möglichst weitgehend ausgelastet werden. Für die unterschiedlichen Pflanzenarten sind die Zeiten der Aussaat bzw. Anpflanzung (Herbst oder Frühjahr), die Nutzungsdauern (ein- oder mehrjährig), die Erntezeiträume, die Ernteerträge und die Anzahl der Ernteschnitte zu berücksichtigen. Die Größe der Anbaufläche, die pro Tag abgeerntet werden kann, wird maßgeblich bestimmt von der Kapazität der vorhandenen Maschinen und Anlagen zur Ernte und Vorbehandlung der frisch geernteten Pflanzen. Der Saisoncharakter der Produktion erfordert von allen Mitarbeitern einen hohen Einsatz.

Anbau-, Ernte- und Trocknungspläne sind aufeinander abzustimmen. Die Bewirtschaftung mehrerer Trocknungsroste erfordert ebenfalls vorausschauende Planung, aber auch Flexibilität. Dabei ist auch die unterschiedliche Trocknungsdauer der einzelnen Pflanzenarten zu beachten, die bei der Flächentrocknung zwischen ca. drei und zehn Tagen liegt. Generell sollten bei chargenweisen Trocknungsverfahren mehrere Trockner zur Verfügung stehen, um flexibel auf unterschiedliche Erntemengen reagieren zu können. Auch Zeiten für die Belegung, Beräumung und Reinigung der einzelnen Roste sind zu berücksichtigen.

### Reduzierung von Wärmeverlusten

Wärmeverluste sollten so weit wie möglich reduziert werden. In modernen Flächentrocknungsanlagen ist der Boden unter den Rostflächen wärmeisoliert. Bei Nutzung der Abluft wie bei der Trocknung mit Teilumluft und bei der Trocknung mit Wärmepumpen sollte auch die Hallendecke isoliert werden. Luftkanäle und Warmwasserleitungen zur Verteilung und Nutzung der Wärme benötigen ebenfalls eine gute Wärmedämmung, und zwar insbesondere dann, wenn sie außerhalb von Gebäuden verlaufen. Nicht oder nur unzureichend isolierte Bandtrockner haben aufgrund der hohen Trocknungstemperaturen besonders große Wärmeverluste.

### Messwerterfassung und Datenaufzeichnung

Automatische Messwerterfassungssysteme ermöglichen die kontinuierliche Anzeige und Aufzeichnung von Messdaten und Verbrauchswerten. Der gesamte Strom- und Gasverbrauch einer Trocknungsanlage wird zur Abrechnung mit den Energieversorgungsunternehmen sowieso erfasst. Bei Blockheizkraftwerken sind Strom-, Gas- und Wärmemengenzähler Stand der Technik. Werden Fördermittel in Anspruch genommen, sind Energieeinsparungen messtechnisch nachzuweisen. Bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen sind hierfür ebenfalls Strom- und Wärmemengenzähler erforderlich. Darüber hinaus ist es insbesondere hinsichtlich einer optimalen Prozessregelung sinnvoll, auch die Stoff- und Energieströme einzelner Trockner kontinuierlich zu erfassen.

Luftmengen können in Trocknungsanlagen im Allgemeinen nur indirekt ermittelt werden. Zwar lassen sich Strömungsgeschwindigkeiten z.B. mit Anemometern messen. Eine darauf basierende Quantifizierung von Luftvolumenströmen ist jedoch aufgrund von Strömungsprofilen und Verwirbelungen normalerweise nicht möglich. Eine verlässliche Messung z.B. mit Messblenden erfordert sehr lange, gerade Luftkanäle, die insbesondere bei großen Kanalquerschnitten in der Praxis nicht realisierbar sind.

Viele Ventilatorhersteller geben für manche ihrer Baureihen den Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck am Saugstutzen und dem Luftvolumenstrom an. Der jeweilige Luftvolumenstrom wird dann durch Differenzdruckmessung zuverlässig bestimmt. Dies ist z.B. auch bei Hilfsventilatoren für Wärmepumpen Stand der Technik. Wird die Drehzahl über Frequenzumrichter geregelt, so kann auch der Stromverbrauch von Ventilatoren kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet werden.

Für die indirekte Ermittlung von Luftmassenströmen gibt es mehrere Möglichkeiten, die auf der Messung von Temperaturen und relativen Luftfeuchten basieren. Werden Luft-Wasser-Wärmeübertrager wasserseitig mit Wärmemengenzählern ausgestattet, so kann der Luftmassenstrom mit Hilfe der luftseitigen Temperatur- bzw. Enthalpiedifferenz und der Massen- und Energiebilanz des Wärmeübertragers ermittelt werden.<sup>51</sup> Dies gilt analog auch für dezentrale Warmluftherhitzer, bei denen die aktuelle Heizleistung aus der Brennstoffleistung errechnet wird.

---

<sup>51</sup> Der Luftvolumenstrom ergibt sich dann aus der Berücksichtigung der Luftdichte.

Der insgesamt einem Trockner zugeführte Luftmassenstrom und die gesamte Wärmeleistung lassen sich folglich im Rahmen der Messgenauigkeit relativ gut quantifizieren. Auch weitere Luftmassenströme, deren Kenntnis für eine energieoptimierte Prozessregelung erforderlich ist, können mit Hilfe des Mollier  $h, Y$ -Diagramms bzw. den zugrunde liegenden Berechnungsgleichungen ermittelt werden. Voraussetzung hierfür sind möglichst genaue Messungen von Temperaturen und relativen Luftfeuchten, die auch die Grundlage bilden für die Bestimmung von Umluftanteilen. Die Kontrolle des im Verlauf der Trocknung veränderlichen spezifischen Energiebedarfs erfordert ebenfalls eine zuverlässige Berechnung von Luftzuständen.

### **Temperatur- und Feuchtesensoren**

Die lufttechnischen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung von Trocknungsanlagen wurden ausführlich erläutert. Voraussetzung zur Realisierung des Teilumluf-Betriebs sind mindestens drei regelbare Luftklappen (Frischluf, Abluf, Umluf) je Trockner sowie drei Temperatur-Feuchte-Sensoren (Frischluf, Zuluft, Abluf). Bei mehreren Trocknern mit Teilumluf reicht ein Frischluf-Sensor aus. Andererseits ist es immer sinnvoll, jeden Luftzustand an zwei unterschiedlichen Orten zu messen. Dies bietet auch Sicherheit für den eventuellen Ausfall einzelner Sensoren.

Alle Messorte sind so auszuwählen, dass repräsentative Messwerte gewonnen werden können. Messorte mit relativ großen Strömungsgeschwindigkeiten sind zu bevorzugen. Gerade in großen Trocknungsanlagen können theoretisch gleiche Luftzustände örtlich voneinander abweichen. Da warme Luft aufsteigt, gibt es in großen Räumen dichtebedingte Unterschiede der Temperatur und auch des Wassergehalts der Luft.

Temperatur-Sensoren sind normalerweise relativ genau, robust und langzeitstabil. Für gute Feuchte-Sensoren wird meistens eine Genauigkeit von  $\pm 2\% r.F.$  angegeben, die oft jedoch nur im mittleren Feuchtebereich zutrifft. Manche Feuchtefühler sind nicht betauungsresistent. Insbesondere bei hohen relativen Luftfeuchten können die Abweichungen größer sein. Es wird deshalb empfohlen, Feuchte-Sensoren wenigstens einmal im Jahr zu justieren. Hierfür eignen sich Feuchtestandards mit hygroskopischen Salzen.

Je nach Höhenlage herrscht an unterschiedlichen Standorten ein unterschiedlicher Luftdruck. Der Luftdruck wird für die Umrechnung der relativen Luftfeuchte in den absoluten Wassergehalt benötigt. Normalerweise ist es nicht erforderlich, den Luftdruck kontinuierlich zu messen. Der Luftdruck des jeweiligen Standorts sollte jedoch im Messwerverfassungssystem berücksichtigt werden.

### **Energieoptimierte Regelung**

Energieoptimierte Regelungssysteme sind eine wichtige Grundvoraussetzung für den effektiven Betrieb neuer und auch bereits bestehender Trocknungsanlagen. Relativ geringe Investitionen können sich durch eingesparte Energiekosten innerhalb sehr kurzer Zeit amortisieren. Standardsysteme der Mess-, Steuer und Regelungstechnik werden den komplexen Anforderungen veränderlicher Trocknungsbedingungen oft jedoch nicht gerecht. Die Prozessregelung muss zunächst den anlagen- und betriebsspezifischen Erfordernissen



angepasst werden. Spätere Erweiterungen, die meistens aus individuellen Erfahrungen der Betreiber resultieren, sollten von Anfang an berücksichtigt werden.

Wie beschrieben, sollte der Umluftanteil dem jeweiligen Betriebszustand der Trockner angepasst werden. Im Idealfall werden dabei auch die aktuellen Witterungsverhältnisse bzw. der Zustand der Frischluft berücksichtigt. Die notwendige Drehzahlregelung von Ventilatoren wurde ebenfalls erläutert.

Blockheizkraftwerke sollten wärmegeführt betrieben werden, um eine maximale Abwärmenutzung zu gewährleisten. Je nach Anlagengröße sind mehrere Wärmeübertrager erforderlich, um die Abwärme bedarfsgerecht verteilen zu können. Bei Nutzung von Solarwärme ist sicherzustellen, dass die zulässige Trocknungstemperatur nicht überschritten wird.

Die Kombination unterschiedlicher Energiequellen erfordert zwar einen höheren mess- und regelungstechnischen Aufwand, ermöglicht aber hohe Energieeinsparungen. Dies gilt insbesondere für die Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen. Bereits durch die Kombination von einfachen Wärmepumpen (geschlossener Betrieb) mit konventioneller Lufterwärmung (Erdgas) kann bei der Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen eine Primärenergieeinsparung von ca. 15 – 31 % erzielt werden. Bei einem im Jahr 2009 für Wärmepumpen noch relativ günstigen Preisverhältnis Strom / Erdgas lagen die eingesparten Energiekosten bei ca. 20 – 35 % (Ziegler et al., 2010).

Im energetischen Monitoring einer anderen Flächentrocknungsanlage mit hocheffizienten Wärmepumpen (teiloffener Betrieb mit interner Wärmerückgewinnung) und BHKW wurde für den Verlauf einer ganzen Ernteperiode eine Reduzierung des spezifischen Primärenergiebedarfs um durchschnittlich 38 % nachgewiesen (Ziegler et al., 2013b). Ohne Effizienzverluste, z.B. durch suboptimalen BHKW-Betrieb, nicht geschlossene Hallentore und Leerlaufzeiten nicht belegter Roste, wären die Einsparungen noch höher ausgefallen. Suboptimale Betriebsbedingungen lassen sich in der Praxis jedoch nicht immer vermeiden.

Kombinierte Trocknungsverfahren beinhalten weiterhin große, auch anlagentechnische Optimierungspotenziale. Je nach Betriebsart sind unterschiedliche Regelungsstrategien möglich. Bei Trocknung mit Wärmepumpen im teiloffenen Betrieb kann auf externe Verflüssiger zur Regelung der Trocknungstemperatur verzichtet werden. Dies führt zu einer wesentlichen anlagentechnischen Vereinfachung.

Auch Minea (2012) hob die begrenzte Anwendbarkeit von zu komplizierten Wärmepumpentrocknern hervor. Er betonte, dass eine enge Kooperation von akademischer Forschung, Industrie und Betreibern für industriell anwendbare Lösungen von größter Bedeutung ist. Bei der Überführung von Forschungsergebnissen in die Praxis sind jedoch auch andere Hindernisse zu überwinden. Neben der für Wärmepumpen ungünstigen Entwicklung der Energiepreise zählen hierzu u.a. ein Mangel an Know-how bei Betreibern, eine unzureichende Kenntnis des gesamten Wärmebedarfs und eine manchmal ablehnende Haltung gegenüber neuen Technologien (Jubaer & Ziegler, 2016a). Es bedarf erheblicher Anstrengungen, um die bestehenden Probleme zu lösen. Wenn die genannten Hindernisse überwunden werden, bieten Wärmepumpen nicht nur energetische, sondern auch wirtschaftliche Vorteile sowohl für die Hersteller als auch für die Betreiber von Trocknungsanlagen.

## 5.4 Vergleich unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung

Der Vergleich unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung erfolgt für eine Rostfläche von  $100 \text{ m}^2$  bei einer spez. Luftmenge von  $500 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$ . Um  $50.000 \text{ m}^3 / \text{h}$  Frischluft von  $15 \text{ °C}$  auf  $40 \text{ °C}$  zu erwärmen, ist eine Wärmeleistung von ca.  $400 \text{ kW}_{th}$  erforderlich. Diese Wärmeleistung stellt den Auslegungsfall dar und ist in allen untersuchten Varianten gleich groß (**Tabelle 5.3**). Die Einspeisung von BHKW-Strom in das öffentliche Netz wird in den Bilanzen mit negativem Vorzeichen berücksichtigt. Der relative PE-Bedarf bezieht sich auf die Trocknung im reinen Frischluft-Betrieb mit konventioneller Lufterwärmung (100 % Erdgas, Variante 0). Die im Einzelnen getroffenen Annahmen werden nachfolgend erläutert.

### Leistungsdaten der Energieversorgung

#### Variante 0: Gesamte Wärmeleistung mit Erdgas

- Reiner Frischluft-Betrieb;
- Bezug der gesamten elektrischen Leistung aus dem öffentlichen Netz;
- $20 \text{ kW}_{el}$  elektrische Leistung für insgesamt vier Hauptventilatoren der Trockner.

#### Variante A–0: Gesamte Wärmeleistung mit Elektro-Wärmepumpe

- Bezug der gesamten elektrischen Leistung aus dem öffentlichen Netz;
- $\varepsilon_H = 4,6$  Heizleistungszahl der Wärmepumpe;
- $COP = 4,0$  Leistungszahl der Wärmepumpe;
- $87 \text{ kW}_{el}$  elektrische Leistung der Wärmepumpe;
- $13 \text{ kW}_{el}$  elektrische Leistung für Hilfsventilatoren.

#### Variante B–0: 60 % der gesamten Wärmeleistung mit Elektro-Wärmepumpe

- Bereitstellung der verbleibenden 40 % Wärmeleistung mit Erdgas;
- Bezug der gesamten elektrischen Leistung aus dem öffentlichen Netz;
- $\varepsilon_H = 4,6$  Heizleistungszahl der Wärmepumpe;
- $COP = 4,0$  Leistungszahl der Wärmepumpe;
- $52 \text{ kW}_{el}$  elektrische Leistung der Wärmepumpe;
- $8 \text{ kW}_{el}$  elektrische Leistung für Hilfsventilatoren.

#### Variante C–0: 40 % der gesamten Wärmeleistung mit BHKW-Abwärme

- Bereitstellung der verbleibenden 60 % Wärmeleistung mit Erdgas;
- Bereitstellung der gesamten elektrischen Leistung durch das BHKW;
- 36 % elektrischer BHKW-Wirkungsgrad;
- 53 % thermischer BHKW-Wirkungsgrad.

#### Variante D–0: Kombination 60 % Wärmepumpe + 40 % BHKW-Abwärme

- Bereitstellung von 60 % der gesamten Wärmeleistung durch Elektro-Wärmepumpe;
- Bereitstellung von 40 % der gesamten Wärmeleistung durch BHKW-Abwärme;
- Bereitstellung der gesamten elektrischen Leistung durch das BHKW;
- Leistungsdaten der Wärmepumpe wie in Variante B–0;
- BHKW-Wirkungsgrade wie in Variante C–0.

**Tabelle 5.3:** Leistungsdaten unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung.

alle Werte in kW	Konv. Frischluf- Betrieb	100 % WP	60 % WP	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
Größe, Variante	0	A-0	B-0	C-0	D-0	E-0
<u>Wärmeleistung</u>						
Konventionelle Heizung	400	—	160	240	—	340
Wärmepumpe	—	400	240	—	240	—
Abwärme BHKW	—	—	—	160	160	—
Solarwärme	—	—	—	—	—	60
Summe Wärmeleistung	400	400	400	400	400	400
<u>Elektrische Leistung</u>						
Hauptventilatoren Trockner (Netz)	20	20	20	—	—	20
Wärmepumpe (Netz)	—	87	52	—	—	—
Hilfsventilatoren (Netz)	—	13	8	—	—	4
BHKW	—	—	—	109	109	—
Stromeinspeisung	—	—	—	- 89	- 29	—
Summe elektrische Leistung	20	120	80	20	80	24
<u>Brennstoffleistung</u>						
Konventionelle Heizung	440	—	176	264	—	374
BHKW	—	—	—	302	302	—
Summe Brennstoffleistung	440	—	176	566	302	374
<u>Primärenergie</u>						
Brennstoff konventionelle Heizung	484	—	193	290	—	411
Brennstoff BHKW	—	—	—	332	332	—
Strom für Hauptventilatoren (Netz)	36	36	36	—	—	36
Strom für Wärmepumpe (Netz)	—	175	105	—	—	—
Strom für Hilfsventilatoren (Netz)	—	26	16	—	—	7
Stromeinspeisung BHKW	—	—	—	- 248	- 80	—
Summe Primärenergie	520	238	350	374	252	454
Relativer PE-Bedarf (1)	100 %	46 %	67 %	72 %	48 %	87 %

(1) Bezug: Reiner Frischluft-Betrieb mit 100 % Erdgas.

#### Variante E-0: 15 % der gesamten Wärmeleistung mit Solarwärme

- Bereitstellung von 67 % der insgesamt für Trocknung benötigten Luftmenge durch solar erwärmte Luft (tagsüber);
- Bereitstellung der verbleibenden 85 % Wärmeleistung mit Erdgas;
- Bezug der gesamten elektrischen Leistung aus dem öffentlichen Netz.

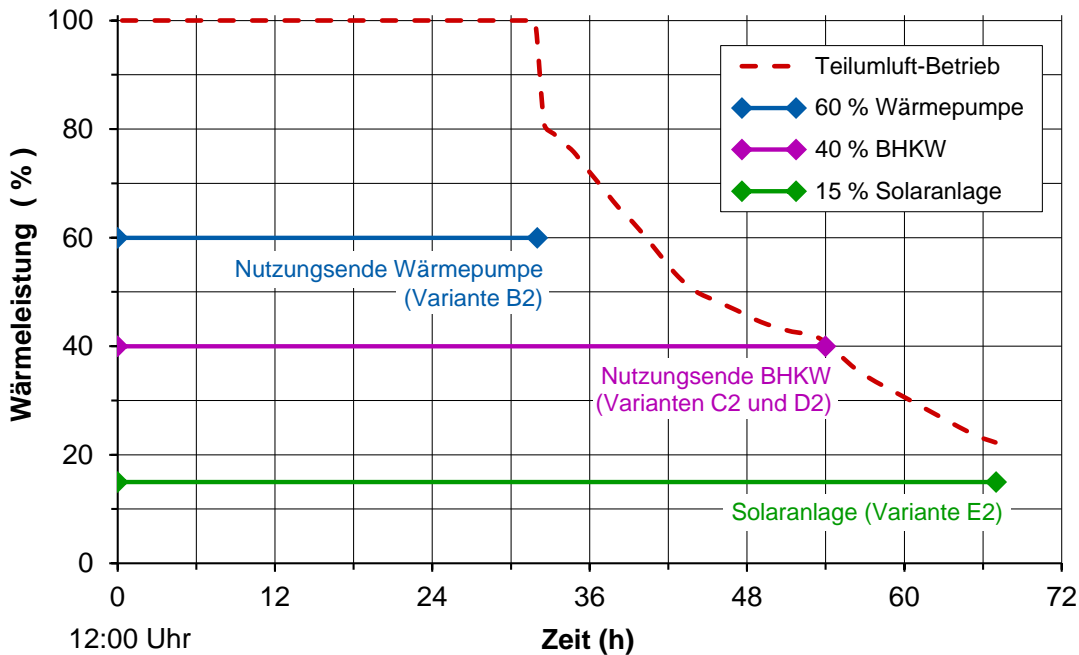
Zur Berechnung der für die konventionelle Heizung erforderlichen Brennstoffleistung wurde ein thermischer Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung von  $\eta_{th,H} = 91\%$  angenommen. Für die primärenergetischen Leistungswerte wurden die bereits erläuterten PE-Faktoren verwendet: Heizung (Erdgas):  $\Pi_{th} = 1,1$ ; BHKW (Erdgas):  $\Pi_{th} = 1,1$ ; Strom aus dem Netz für Ventilatoren:  $\Pi_{el} = 1,8$ ; Strom aus dem Netz für Wärmepumpen:  $\Pi_{WP} = 2,017$ ; Einspeisung von BHKW-Strom in das öffentliche Netz:  $\Pi_{el} = 2,8$  (Verdrängungsstrommix).

- Im reinen Frischluft-Betrieb mit konventioneller Lufterwärmung (Variante 0) summiert sich die primärenergetische Leistung auf  $520 \text{ kW}_{PE}$ . Dieser Wert ist im Auslegungsfall die Vergleichsbasis für den relativen PE-Bedarf der anderen Varianten.
- Die Wärmepumpen-Varianten A–0 und D–0 kommen ohne konventionelle Lufterwärmung aus. Die Regelung der Trocknungstemperatur erfolgt mit der Wärmepumpe.
- Die Wärmepumpen-Varianten A–0 und D–0 haben den kleinsten PE-Bedarf. Bei größeren Leistungszahlen würde noch weniger Primärenergie benötigt (**Abb. 5.6**).
- In der Variante B–0 werden 60 % der gesamten Wärmeleistung ( $400 \text{ kW}_{th}$ ) durch die Wärmepumpe bereitgestellt ( $240 \text{ kW}_{th}$ ). Die Regelung der Trocknungstemperatur erfolgt mit der konventionellen Heizung. Im Vergleich zur rein konventionellen Lufterwärmung (Variante 0) beträgt der relative PE-Bedarf ca. 67 %.
- Ein Anteil von 40 % BHKW-Abwärme (Varianten C–0 und D–0) gewährleistet eine Grundversorgung der Trocknungsanlage mit Wärme. Die Abwärmeleistung des Blockheizkraftwerks ( $160 \text{ kW}_{th}$ ) ermöglicht eine Erwärmung der Frischluft ( $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $15,5 \text{ kg/s}$ ) um ca. 10 K. Bei Frischlufttemperaturen unter  $30^\circ\text{C}$  muss entsprechend nachgeheizt werden.
- In den Varianten C–0 und D–0 wird keine elektrische Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen, sondern vom BHKW bereitgestellt. Die elektrische Leistung des Blockheizkraftwerks beträgt jeweils  $109 \text{ kW}_{el}$ . In der Kombination mit konventioneller Lufterwärmung (Variante C–0) werden  $89 \text{ kW}_{el}$  in das öffentliche Netz eingespeist. Da die Wärmepumpe und ihr Hilfsventilator wie in Variante B–0 eine elektrische Leistung von  $60 \text{ kW}_{el}$  benötigen, beträgt die Stromeinspeisung in Variante D–0 nur  $29 \text{ kW}_{el}$ .
- Für die Variante E–0 wurde eine Brutto-Kollektorfläche der Solaranlage von  $400 \text{ m}^2$  statt  $300 \text{ m}^2$  angenommen. Im Juni kann damit eine Nutzwärmeleistung von durchschnittlich ca.  $60 \text{ kW}_{th}$  bereitgestellt werden. Wie im Abschnitt 5.2.6 erläutert, muss die Solaranlage an warmen Tagen mit hohen Werten der Globalstrahlung ggfs. jedoch abgeschaltet werden, um eine Trocknungstemperatur von  $40^\circ\text{C}$  nicht zu überschreiten. Für die Hilfsventilatoren der Solaranlage wurde eine elektrische Leistung von insgesamt  $4 \text{ kW}_{el}$  angenommen.<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Bei einer Reihenlänge von 15 m und einem Luftvolumenstrom von  $2.300 \text{ m}^3/\text{h}$  ist eine Ventilatorleistung von ca. 400 W erforderlich (Grammer-Solar, 2017a). Für eine Brutto-Kollektorfläche von  $400 \text{ m}^2$  errechnet sich daraus eine Ventilatorleistung von ca. 10,7 kW. Die Berechnungen zur solaren Lufterwärmung wurden jedoch mit deutlich kleineren Luftmengen durchgeführt.

## Energiebedarf der Trocknung

Die Leistungs- bzw. Auslegungsdaten der Energieversorgung in **Tabelle 5.3** sind zu Beginn der Trocknung erforderlich, um im reinen Frischluft-Betrieb eine maximale Entfeuchtungsleistung zu erreichen. Im Teilumluft-Betrieb verändern sich die thermischen und elektrischen Leistungen je nach Variante mit der Zeit jedoch erheblich. Zur Ermittlung der gesamten Mengen an Wärme und elektrischer Energie in MWh sind die Leistungswerte im Verlauf der Trocknung über die jeweilige Zeiträume zu integrieren. Die entsprechende Vorgehensweise wird nachfolgend erläutert, und zwar wiederum exemplarisch für eine Charge Kamilleblüten.



**Abb. 5.12:** Prozentuale Wärmeleistung bezogen auf den reinen Frischluft-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.

**Abb. 5.12** zeigt die prozentuale Wärmeleistung im geregelten Teilumluft-Betrieb bezogen auf den reinen Frischluft-Betrieb (rote Kurve, vgl. **Abb. 4.6**). In den ersten 32 Stunden erfolgt die Trocknung ohne Teilumluft (100 % Wärmeleistung). Anschließend wird der Umluftanteil kontinuierlich erhöht (vgl. **Abb. 4.5**). Die benötigte Wärmeleistung ist nach ca. 54 Stunden auf ca. 40 % gesunken und fällt bis zum Ende der Trocknung weiter ab.

Der Energiebedarf der untersuchten Varianten ist in **Tabelle 5.4** dargestellt. Die Mengenangaben in MWh für Wärme, elektrische Energie, Brennstoff und Primärenergie wurden durch Multiplikation der jeweils durchschnittlichen Leistungswerte (**Tabelle 5.3**) mit der Dauer der entsprechenden Zeitabschnitte berechnet.

### Variante I: Teilumluft-Betrieb mit konventioneller Luftherwärmung

Um die Energieversorgung unabhängig von lufttechnischen Maßnahmen bewerten zu können, ist die Trocknung mit Teilumluft die Vergleichsbasis für die Varianten A–I bis E–I. Im reinen Frischluft-Betrieb mit einer Wärmeleistung von  $400 \text{ kW}_{th}$  über die gesamte Trocknungsdauer wäre eine Wärmemenge von  $26,8 \text{ MWh}_{th}$  erforderlich. Mit Teilumluft sinkt die insgesamt erforderliche Wärmemenge auf  $19,1 \text{ MWh}_{th}$ . Dies entspricht einer thermischen Energieeinsparung von ca. 29 %. Für die Hauptventilatoren werden  $1,03 \text{ MWh}_{el}$  benötigt.

Unter Berücksichtigung des thermischen Wirkungsgrads der Wärmeerzeugung ( $\eta_{th,H} = 91\%$ ) beträgt die gesamte Brennstoffmenge  $21,0 \text{ MWh}_{th}$ . Die Primärenergie summiert sich mit den bereits aufgeführten PE-Faktoren auf  $25,0 \text{ MWh}_{pE}$  (100 %).

#### Variante A–I: Teilumluft-Betrieb mit 100 % Wärmepumpe

Die benötigte Wärmeleistung wird über die gesamte Trocknungsdauer mit einer Elektrowärmepumpe bereitgestellt. Die Regelung der Trocknungstemperatur erfolgt mit der Wärmepumpe. Die elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Die Primärenergie summiert sich auf  $11,5 \text{ MWh}_{pE}$ . Bezogen auf den Teilumluft-Betrieb beträgt die PE-Einsparung der Variante A–I damit ca. 54 %.

#### Variante B–I: Teilumluft-Betrieb mit 60 % Wärmepumpe

Für wärmepumpenunterstützte Trocknungsanlagen gibt es zahlreiche Möglichkeiten der Luftführung und der Prozessregelung. Dabei kann sich auch der *COP* verändern. Bei einfachen Anlagenkonfigurationen sollte die Wärmepumpe dann abgeschaltet werden, wenn die Leistungszahl unter einen bestimmten Wert sinkt oder wenn der spez. Energiebedarf über einen bestimmten Wert steigt. Diese beiden Fälle können auch gleichzeitig auftreten.

Für die Variante B–I wurde deshalb angenommen, dass die Wärmepumpe nur in den ersten 32 Stunden der Trocknung betrieben und mit Beginn des Teilumluft-Betriebs abgeschaltet werden (**Abb. 5.12**). Die Regelung der Trocknungstemperatur erfolgt mit der konventionellen Heizung. Auch in den verbleibenden 35 Stunden der Trocknung wird die Trocknungsluft konventionell erwärmt. Die elektrische Energie wird wiederum aus dem öffentlichen Netz bezogen. Im Vergleich zum geregelten Teilumluft-Betrieb mit 100 % Erdgas (Variante I) beträgt die PE-Einsparung der Variante B–I ca. 22 %.

#### Variante C–I: Teilumluft-Betrieb mit 40 % BHKW-Abwärme

In dieser Variante erfolgt die Wärmeversorgung der Trocknungsanlage zunächst zu 40 % mit BHKW-Abwärme ( $160 \text{ kW}_{th}$ ) und zu 60 % mit einer konventionellen Heizung ( $240 \text{ kW}_{th}$ ). Nach 54 Stunden unterschreitet die im Teilumluft-Betrieb benötigte Wärmeleistung die Abwärmeleistung des Blockheizkraftwerks (**Abb. 5.12**). Die BHKW-Abwärme kann dann nicht mehr für den betrachteten Trocknungsprozess genutzt werden, ohne die zulässige Trocknungstemperatur ( $40\text{ °C}$ ) zu überschreiten. In den verbleibenden 13 Stunden der Trocknung wird die Trocknungsluft deshalb nur konventionell erwärmt. In den ersten 54 Stunden wird die elektrische Energie durch das BHKW bereitgestellt, danach aus dem öffentlichen Netz bezogen. Die elektrische Leistung des Blockheizkraftwerks ( $109 \text{ kW}_{el}$ , **Tabelle 5.3**) ist mehr als fünfmal so groß wie die elektrische Leistung der Hauptventilatoren ( $20 \text{ kW}_{el}$ ). Aufgrund des relativ großen Anteils der Stromeinspeisung ( $5,02 \text{ MWh}_{el}$ ) beträgt die PE-Einsparung der Variante C–I ca. 32 %.

#### Variante D–I: Teilumluft-Betrieb mit 60 % Wärmepumpe und 40 % BHKW-Abwärme

In dieser Variante wird keine konventionelle Heizung benötigt. Zu Beginn der Trocknung werden 40 % der gesamten Wärmeleistung durch BHKW-Abwärme und 60 % durch eine Wärmepumpe bereitgestellt.



**Tabelle 5.4:** Energiebedarf pro Charge Kamilleblüten bei der Trocknung mit Teilumluft und unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.

alle Werte in MWh/Charge	Konv. Teilumluft- Betrieb	100 % WP	60 % WP	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
Größe, Variante	I	A-I	B-I	C-I	D-I	E-I
<u>Wärmemenge</u>						
Konventionelle Heizung	19,1	—	11,5	10,5	—	15,1
Wärmepumpe	—	19,1	7,7	—	10,5	—
Abwärme BHKW	—	—	—	8,6	8,6	—
Solarwärme	—	—	—	—	—	4,0
Summe Wärmemenge	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
<u>Elektrische Energie</u>						
Hauptventilatoren Trockner (Netz)	1,03	1,03	1,03	0,18	0,18	1,03
Wärmepumpe (Netz)	—	4,16	1,67	—	0,34	—
Hilfsventilatoren (Netz)	—	0,62	0,25	—	0,05	0,21
BHKW	—	—	—	5,87	5,87	—
Stromeinspeisung	—	—	—	- 5,02	- 3,48	—
Summe elektrische Energie	1,03	5,82	2,95	1,03	2,95	1,24
<u>Brennstoffmenge</u>						
Konventionelle Heizung	21,0	—	12,6	11,5	—	16,6
BHKW	—	—	—	16,3	16,3	—
Summe Brennstoffmenge	21,0	—	12,6	27,8	16,3	16,6
<u>Primärenergie</u>						
Brennstoff konventionelle Heizung	23,1	—	13,9	12,7	—	18,3
Brennstoff BHKW	—	—	—	17,9	17,9	—
Strom für Hauptventilatoren (Netz)	1,9	1,9	1,9	0,3	0,3	1,9
Strom für Wärmepumpe (Netz)	—	8,4	3,4	—	0,7	—
Strom für Hilfsventilatoren (Netz)	—	1,3	0,5	—	0,1	0,4
Stromeinspeisung BHKW	—	—	—	- 14,0	- 9,8	—
Summe Primärenergie	25,0	11,5	19,6	16,9	9,3	20,5
Relativer PE-Bedarf (1)	100 %	46 %	78 %	68 %	37 %	82 %
Einsparung Primärenergie (1)		54 %	22 %	32 %	63 %	18 %

(1) Bezug: Geregelter Teilumluft-Betrieb mit 100 % Erdgas.

Die Regelung der Trocknungstemperatur erfolgt über die gesamte Trocknungsdauer mit der Wärmepumpe. Für die letzten 13 Stunden der Trocknung wurde angenommen, dass das BHKW abgeschaltet wird. Die elektrische Energie für die Ventilatoren und für die Wärmepumpe muss dann aus dem Netz bezogen werden. In den ersten 54 Stunden wird die gesamte elektrische Energie wie in Variante C-I durch das BHKW bereitgestellt.

Von der Wärmepumpe und ihrem Hilfsventilator wird deutlich mehr elektrische Energie benötigt als von den Hauptventilatoren. Die Stromeinspeisung ( $3,48 \text{ MWh}_{el}$ ) ist deshalb kleiner als in Variante C–I. Trotzdem ist die PE-Einsparung der Variante D–I mit ca. 63 % erheblich größer. Ursache ist die große primärenergetische Effizienz der Kombination von einer Wärmepumpe mit einem Blockheizkraftwerk. In den beiden Varianten wird von dem BHKW jeweils die gleiche Brennstoffmenge ( $16,3 \text{ MWh}_{th}$ ) und auch die gleiche Primärenergie ( $17,9 \text{ MWh}_{pE}$ ) benötigt. Durch die Wärmepumpe entfällt jedoch das Erdgas für die konventionelle Heizung ( $11,5 \text{ MWh}_{th}$  bzw.  $12,7 \text{ MWh}_{pE}$  in Variante C–I).

#### Variante E–I: Teilumluf-Betrieb mit 15 % Solarwärme

Nach **Tabelle 5.2** beträgt die pro Tag nutzbare Wärme einer Luftkollektoranlage mit  $100 \text{ m}^2$  Brutto-Kollektorfläche im Juni durchschnittlich  $12,7 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Die Umrechnung auf  $400 \text{ m}^2$  und 67 Stunden Trocknungsdauer ergibt eine Wärmemenge von ca.  $4,0 \text{ MWh}_{th}$ . Bezogen auf die insgesamt erforderliche Wärmemenge von  $19,1 \text{ MWh}_{th}$  entspricht dies einer thermischen Energieeinsparung von ca. 21 %. Für die Hilfsventilatoren werden ca.  $210 \text{ kWh}_{el}$  elektrische Energie benötigt. Die PE-Einsparung der Variante E–I beträgt ca. 18 %.

#### **Primärenergetische Bewertung unterschiedlicher Varianten der Energieversorgung**

Wie erläutert, ist der reine Frischluft-Betrieb die Vergleichsbasis zur primärenergetischen Bewertung luft- bzw. trocknungstechnischer Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Durch Trocknung mit Teilumluf lässt sich eine PE-Einsparung von ca. 27 % erzielen.<sup>53</sup> Will man die Energieversorgung unabhängig von lufttechnischen Maßnahmen bewerten, so ist die Trocknung mit Teilumluf die Vergleichsbasis.

Die entsprechende Auswertung ist in **Tabelle 5.5** anhand des spez. Primärenergiebedarfs  $SPB$  dargestellt.<sup>54</sup> Hierfür wurde die in den einzelnen Varianten zur Trocknung einer Charge Kamilleblüten erforderliche Primärenergie durch die insgesamt entzogene Wassermenge dividiert:  $100 \text{ m}^2 \cdot 130,7 \text{ kg}_{H_2O}/\text{m}^2 = 13.070 \text{ kg}_{H_2O}$ .<sup>55</sup> Zusammenfassend wurden unter den getroffenen Annahmen folgende PE-Einsparungen ermittelt:

- 27 % PE-Einsparung durch Teilumluf-Betrieb;
- 18 – 63 % PE-Einsparung bei der Energieversorgung;
- 27 – 73 % gesamte PE-Einsparung.

Die größten PE-Einsparungen sind durch die Kombination einer Wärmepumpe mit einem BHKW erreichbar. Solaranlagen für die Trocknung von Arzneipflanzen dürfen wegen der relativ niedrigen Trocknungstemperatur von ca.  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  nicht zu groß dimensioniert werden.

<sup>53</sup> Die PE-Einsparungen durch Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern oder durch Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche liegen in einer ähnlichen Größenordnung (**Tabelle 4.3**).

<sup>54</sup> Die Werte des spez. PE-Bedarfs sind um ca. 20 % größer als in **Tabelle 4.3**, da im Vergleich zu der in Kapitel 4 beschriebenen Fallstudie ein um ca. 20 % größerer Wärmebedarf angenommen wurde.

<sup>55</sup> Das Eintrocknungsverhältnis (4,5) und die pro  $\text{m}^2$  Rostfläche zu entziehende Wassermenge ( $130,7 \text{ kg}_{H_2O}/\text{m}^2$ ) entsprechen den Werten der Fallstudie.

**Tabelle 5.5:** Spezifischer Primärenergiebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.

alle Werte pro kg verdunstetes Wasser		Frischluff-Betrieb	Teilumluff-Betrieb	100 % WP	60 % WP	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
Größe, Einheit, Variante		0	I	A-I	B-I	C-I	D-I	E-I
<u>Primärenergiebedarf</u>								
spez. PE-Bedarf <i>SPB</i>	<i>kWh/kg</i>	2,62	1,91	0,88	1,50	1,29	0,71	1,57
	<i>MJ/kg</i>	9,44	6,89	3,17	5,40	4,66	2,56	5,65
relativer spez. PE-Bedarf	%	100	73	34	57	49	27	60
<u>PE-Einsparung durch Teilumluff</u>								
spez. PE-Einsparung	<i>MJ/kg</i>		2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
bez. auf Frischluft-Betrieb	%		27	27	27	27	27	27
<u>PE-Einsparung Energieversorgung</u>								
spez. PE-Einsparung	<i>MJ/kg</i>			3,72	1,49	2,23	4,33	1,24
bez. auf Teilumluff-Betrieb	%			54	22	32	63	18
<u>Gesamte PE-Einsparung</u>								
spez. PE-Einsparung	<i>MJ/kg</i>		2,55	6,27	4,04	4,78	6,88	3,79
bez. auf Frischluft-Betrieb	%		27	66	43	51	73	40

Die möglichen Einsparungen von Energiekosten werden in Kapitel 7 abgeschätzt.

## 6 Betriebswirtschaftliche Aspekte der Produktion von Arzneipflanzen

Die Entwicklung des Anbauumfangs von Arznei- und Gewürzpflanzen unterlag in den vergangenen Jahren im Bundes- und Landesmaßstab bis hin zum einzelnen Landwirtschaftsbetrieb erheblichen Schwankungen. Für eine stabile Produktion und Kontinuität der Entwicklung ist die Beachtung betriebswirtschaftlicher Aspekte von großer Bedeutung.

### 6.1 Einordnung in die Organisationsstruktur des Betriebs

Ausgangspunkt betriebswirtschaftlicher Betrachtungsweise für den Anbau von Arznei- und Gewürzpflanzen ist die Standorteignung. Diese besitzt einen hohen Stellenwert. Die große Artenvielfalt ermöglicht auf vielen Standorten einen Anbau. In den zurückliegenden Jahren hat sich der Anbau vorrangig auf den hochwertigen Ackerstandorten etabliert.

Die Produktions- und Organisationsstruktur des jeweiligen Landwirtschaftsunternehmens muss sicherstellen, dass die spezifischen Anforderungen des Arzneipflanzenanbaus hinsichtlich Anbau, Ernte, technischer Trocknung, Lagerung, Aufbereitung und Vermarktung gesichert und erfolgreich bewältigt werden. In multifunktionalen Landwirtschaftsunternehmen hat sich die Bildung einer eigenen Produktionsabteilung für Sonderkulturen bewährt. Dieser fruchtartenspezifische Leitungsbereich muss gleichzeitig die Vorzüge verfahrensorientierter und territorialer Gesichtspunkte in der Organisation der Produktion sicherstellen.

Es ist vorteilhaft, die Arznei- und Gewürzpflanzen in die allgemeine Fruchtfolge landwirtschaftlicher Kulturen einzuordnen. Fruchtfolgegrundsätze können so besser Berücksichtigung finden. Die Einhaltung der Anforderungen an die Fruchtfolge (z.B. Anbaupausen) hat eine große Bedeutung für einen erfolgreichen Anbau.

Die Humusversorgung der Böden erfolgt in der Regel über wirtschaftseigenen Dünger aus der Viehhaltung, über Ernterückstände und aus Gründüngung. Beim Einsatz von wirtschaftseigenem Dünger ist jedoch darauf zu achten, dass dieser aus hygienischen Gründen nicht im Fruchtfolgeglied der einzelnen Arzneipflanze zum Einsatz gelangt, sondern stets in der allgemeinen landwirtschaftlichen Vor- oder Nachkultur.

Weitere wichtige Aspekte zur Bestimmung des konkreten Anbaustandortes für die jeweiligen Arzneipflanzen sind die räumliche Entfernung zur Trocknungsanlage, Berechnungsmöglichkeiten für berechnungswürdige Pflanzen und das Risikosplitting. Risikosplitting führt unter Umständen auch zu kleineren Schlageinheiten für die jeweilige Kultur.

Eine optimale Organisationsstruktur muss sicherstellen, dass neben den natürlichen Standortfaktoren und den technologischen Voraussetzungen auch die Arbeitsaufgaben im Verantwortungsbereich der Sonderkulturen uneingeschränkt erfüllt werden können. Wichtige Gesichtspunkte sind dabei der Saisoncharakter und die Witterungsabhängigkeit der Produktion sowie die daraus resultierenden Arbeitsspitzen und Arbeitstäler. Die Organisationsstruktur muss demzufolge der Führungsstruktur des Unternehmens entsprechen.

Die Einordnung des Arzneipflanzenanbaus in die Organisationsstruktur der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. zeigt **Abb. 6.1**.

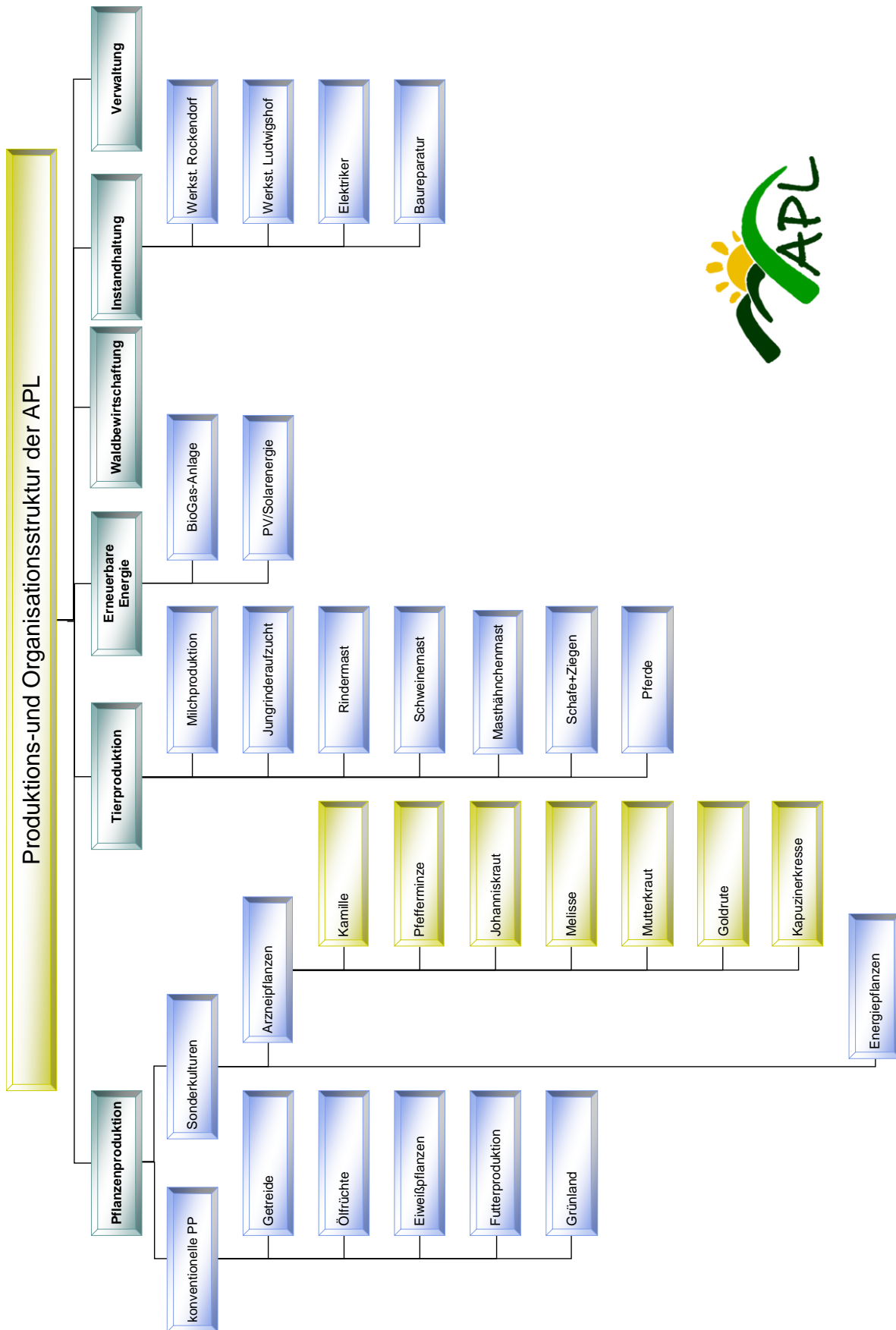


Abb. 6.1: Produktions- und Organisationsstruktur der Agrarprodukte Ludwighof e.G.

## 6.2 Anforderungen des kontrollierten Vertragsanbaus

Qualitätssicherungssysteme haben sich zu einem unverzichtbaren Element zur Produktion qualitativ hochwertiger Arznei- und Gewürzpflanzen entwickelt. Die Berücksichtigung der gesamten Verfahrenskette vom Anbau über die Ernte, die technische Trocknung und Lagerung bis hin zur Erstverarbeitung führt zu einer hohen Sicherheit im Verbraucherschutz und zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise.

Die kontrollierte integrierte Produktion nach eigens für die einzelnen Kulturarten erarbeiteten Leitlinien hat sich in der Praxis seit vielen Jahren durchgesetzt. Es handelt sich hier "um eine geplante, kontrollierte, dokumentierte und wissensbasierte Produktionsweise zum Schutz der Verbraucher, der Umwelt und des Erhalts der natürlichen Ressourcen (Bodenfruchtbarkeit, Bodenstruktur, Biodiversität, Schutz des Oberflächen- und Grundwassers). Die kontrollierte integrierte Produktion (...) stellt keine starre Vorschrift dar, sondern (ist) ein dynamisches Konzept." (Hoppe, 2010a)

Die Vertragspartner der abnehmenden Hand reagieren entsprechend und bekunden ihr Interesse an einem kontrollierten Vertragsanbau. Hierfür ist eine langfristige und vertrauensvolle Zusammenarbeit erforderlich, was auch den Interessen der Anbauunternehmen entspricht. Es entwickeln sich weiterführende und tiefgreifende Qualitätssicherungssysteme, mit denen der Verbraucher gezielt erreicht werden soll. Dabei stellen die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen und deren Dokumentation die Mindestanforderungen dar. Darüber hinaus werden interne Standards vertraglich geregelt. Der kontrollierte Vertragsanbau entwickelt sich immer stärker zum Wettbewerbsbestandteil auf dem Arznei- und Gewürzpflanzenmarkt (Hauke, 2010).

Der kontrollierte Vertragsanbau hat zum Ziel, auf der Grundlage einer vertrauensvollen und langfristigen Zusammenarbeit die vom Markt benötigte Rohware in einer hohen Qualität für die einzelnen Marktsegmente (Phytopharmaka, Tee u.a. Lebensmittel, Kosmetika etc.) bereitzustellen. Anbauer von Arznei- und Gewürzpflanzen müssen sich dieser Situation stellen.

Der kontrollierte Vertragsanbau wird wesentlich von folgenden Aspekten bestimmt:

- Anbau- und Abnahmeverträge über langfristige Zeiträume (mindestens fünf Jahre);
- Anbau der Vertragskulturen entsprechend gemeinsamer Sortenabstimmung;
- Gemeinsame Festlegungen zur Beschaffung von Saat- und Pflanzgut;
- Anbau auf ausschließlich für Arznei- und Gewürzpflanzen geeigneten Standorten;
- Sicherung des integrierten Pflanzenschutzes;
- Düngung nach guter fachlicher Praxis unter dem besonderen Aspekt der Pflanzensicherheit;
- Einsatz von Maschinen, Technik und Ausrüstungen, die für den Arznei- und Gewürzpflanzenanbau geeignet sind;
- Nutzung von Bewässerungsmöglichkeiten zur Erhöhung der Anbausicherheit;
- Abstimmung logistischer Aufgaben, insbesondere in der Lagerung und beim Transport;
- Durchführung von gemeinsamen Audits;
- Lückenlose Dokumentation aller Prozessdaten und deren Offenlegung gegenüber dem Vertragspartner.



Mit dem kontrollierten Vertragsanbau entwickelt sich eine hohe Transparenz bis hin zum Verbraucher.

### 6.3 Personelle und arbeitsorganisatorische Aspekte

Der Arznei- und Gewürzpflanzenanbau unterliegt analog der allgemeinen landwirtschaftlichen Produktion den Besonderheiten der Landwirtschaft:

- Saisoncharakter der Produktion;
- Witterungsabhängigkeit;
- die Produktion erfolgt bis zur Ernte unter freiem Himmel;
- Arznei- und Gewürzpflanzen sind lebende Organismen.

Diese Besonderheiten haben unmittelbare Wechselwirkungen mit der technischen Trocknung von Arzneipflanzen. Im Vertragsanbau sollte mit entsprechenden vertraglichen Regelungen zum Anbau der einzelnen Kulturarten eine vom Ansatz her kontinuierliche Auslastung der Trocknungsanlage möglich sein. Dies betrifft insbesondere:

- Die Auswahl der unterschiedlichen Kulturen (Marktbedürfnis vorausgesetzt);
- bei mehrjährigen Kulturen: gestaffelte Stand- und Nutzungsjahre;
- eine gezielte Sortenwahl zur Steuerung der Erntetermine.

Mit vertraglichen Regelungen für eine gezielte Bestandsetablierung werden entscheidende Voraussetzungen geschaffen, die arbeitsorganisatorischen Maßnahmen optimal gestalten und die zwangsläufig entstehenden Arbeitsspitzen und Arbeitstäler besser brechen zu können. Dies setzt bei allen Mitarbeitern hohes spezifisches Fachwissen und Flexibilität in der Arbeitszeit voraus.

Empfehlenswert ist die Erstellung eines Ernte- und Trocknungsplans für die Gesamtheit aller Kulturen mit ihren Erntemengen an zu trocknender Frischware in den jeweiligen Erntezeiträumen (vgl. **Abb. 2.2** und **Abb. 2.3**). Die erforderlichen Verfahrensschritte zur Vorbehandlung der Frischware (Abschnitt 2.2) ordnen sich in die Arbeitskette von der Ernte bis zur Trocknung ein und sind auf die zu beschickenden Trocknungskapazitäten auszurichten.

Die maximal mögliche Auslastung der Trocknungsanlage im Verlauf der Ernteperiode besitzt absolute Priorität. Dies erfordert saisonbedingt einen erhöhten Arbeitskräftebedarf. Die Besonderheiten der Trocknung von Arzneipflanzen stellen hohe Anforderungen an die spezifischen Kenntnisse des Personals. Insbesondere technisches Fachwissen über die unterschiedlichen Anlagenteile und Aggregate der Trocknungsanlage ist erforderlich. Bei eventuell auftretenden technischen Problemen ist ein schnelles Reagieren von hohem Stellenwert, um Störzeiten so gering wie möglich zu halten.

Wenn Erntearbeiten auf Grund längerer Regenperioden nicht möglich sind, kann es zu Stillstandszeiten in der Trocknung kommen. Hier liegt es in der Entscheidung des jeweiligen Unternehmens, die Arbeitsorganisation kurzfristig auf die Erstverarbeitung umzustellen. Aufgrund kurzfristiger Marktnachfragen kann es auch erforderlich sein, die Erstverarbeitung zusätzlich zur Trocknung durchzuführen. Dieser zusätzliche Arbeitskräftebedarf kann nicht über Saisonkräfte ausgeglichen werden, sondern muss gesamtbetrieblich organisiert werden.

## 6.4 Maschinen- und anlagentechnische Anforderungen

Der Erfolg der Arzneipflanzenproduktion wird neben den Standorteigenschaften, den klimatischen Bedingungen und dem fachlichen Wissen und Können der Mitarbeiter insbesondere auch durch spezielle Maschinen und technische Ausrüstungen bestimmt. Auf Grund der relativ kleinen Anbaufläche im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Kulturen befasst sich die Landmaschinenindustrie nur sehr zurückhaltend mit der Entwicklung der erforderlichen Spezialmaschinen und Anlagen. Einzelbetriebliche Lösungen und Kooperationen mit anderen Anbauern oder Anbaugemeinschaften sollten miteinander verbunden werden.

Von besonderer Bedeutung ist der Einsatz satellitengestützter Fahrsysteme beginnend bei der Aussaat bzw. Pflanzung, über die mechanische Pflege bis hin zu weiteren bestandsführenden Maßnahmen.

Ein multifunktionales Landwirtschaftsunternehmen verfügt in der Regel über ein breites Spektrum von Ausrüstungen. Dies eröffnet die Möglichkeit, Produktionslinien für Arzneipflanzen aufzubauen, die eine effektive Arbeit ermöglichen. Dazu ist es jedoch notwendig, die neuesten Ergebnisse von Forschung und Entwicklung mit einfließen zu lassen. Hier kann eine enge Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Einrichtungen von großem Nutzen sein.

Die Erntemaschinen sind speziell für die unterschiedlichen Kulturarten konzipiert. Für die Ernte von Krautdrogen kommen vorrangig Futtererntemaschinen zum Einsatz, die jedoch modifiziert werden müssen. Für Blütendrogen, insbesondere für Kamille, wurden spezielle Erntemaschinen entwickelt, ebenso für die Ernte von Wurzeldrogen. Die Schaffung dieser technischen Voraussetzungen erfordert einen engen Schulterschluss zwischen Praxisbetrieb und wissenschaftlichen Einrichtungen. Fachliche Verbände und Vereinigungen sollten diesbezüglich als Plattform für eine enge Wissenschafts-Praxis-Kooperation genutzt werden.

Alle zum Einsatz kommenden Maschinen und Anlagen müssen mit einer schonenden Arbeitsweise sicherstellen, dass die Qualität der Frischware erhalten wird. Diese wichtige Anforderung wird auch an die Verfahrensschritte der Vorbehandlung gestellt.

Die technische Trocknung ist das Nadelöhr der Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen. Erntemengen und Trocknungskapazitäten müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Hier sei nochmals auf einen langfristigen Vertragsanbau hingewiesen. Die Schaffung von Trocknungskapazitäten kann nur unter betriebspezifischen Bedingungen erfolgen. Dabei sollte geprüft werden, ob vorhandene Bausubstanz und weitere technische Anlagen mit nutzbar sind. Wichtige Kriterien für den Aufbau von Trocknungskapazitäten sind eine hohe Energieeffizienz, eine umweltschonende Trocknung, ein schonender Umgang mit den zu trocknenden Erntegütern, eine rationelle Arbeitsweise und ein störungsfreies Arbeiten der Trocknungsanlagen.

Vorbehandlung, technische Trocknung und Erstverarbeitung sollten möglichst an einem Standort konzentriert werden. Dies ermöglicht eine höhere Flexibilität bei allen Entscheidungen der operativen Arbeitserledigung, bringt positive Arbeitseffekte und minimiert Zwischentransporte. Der Aufbau von Erstverarbeitungsanlagen erfolgt unter dem Gesichtspunkt, in welcher Form die Produkte auf den Markt gelangen. Die Anforderungen der abnehmenden Hand sind hierbei von entscheidender Bedeutung.

An alle Maschinen und technischen Anlagen der Produktionskette werden hohe Anforderungen hinsichtlich Wartung und Pflege gestellt, um eine ständige Verfügbarkeit der Technik zu sichern. Die Reinigung und Sauberkeit aller Maschinen und Anlagen ist ein wichtiger Arbeitsbestandteil in der Organisation der Produktion. Hier geht es vor allem darum, die Reinheit der Produkte zu sichern und Fremdbestandteile anderer Kulturarten fernzuhalten. Diese Herangehensweise ermöglicht auch die Einhaltung der Hygienestandards. In der Praxis hat sich bewährt, Reinigungspläne für die Maschinen und technischen Anlagen zu erarbeiten, ebenso für die Lagerstätten. Die Umsetzung muss kontrollfähig in die Leitungsorganisation eingebunden werden.

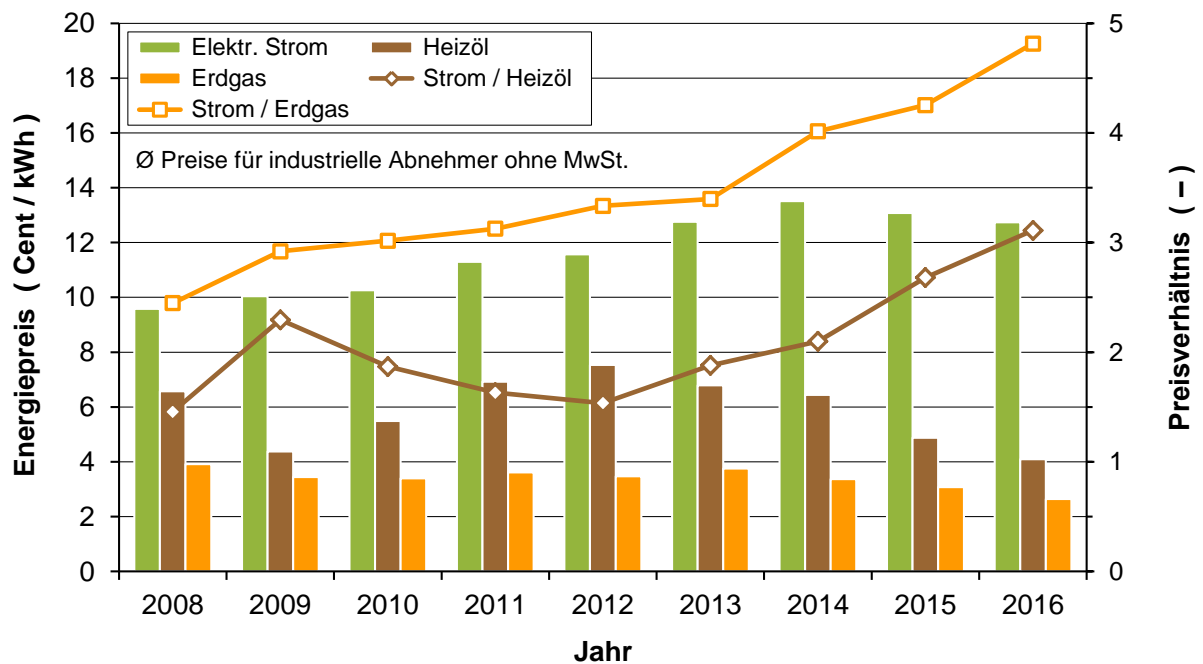
## 7 Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Trocknungskosten hängen im Einzelfall von der Art, der Menge und der Beschaffenheit der Ausgangsstoffe und der Endprodukte, vom Preis- und Lohnniveau und von anderen Gegebenheiten ab (Kröll, 1978). Je nach Pflanzenart, Standort und Umfang der Produktion sind diese Faktoren örtlich und zeitlich veränderlich. Die in diesem Kapitel zusammengestellten Informationen sollen jedoch helfen, die Betriebskosten zu überschlagen und die Realisierbarkeit von Investitionsvorhaben abzuschätzen. Zu diesem Zweck wurden exemplarische Amortisationsrechnungen für einzelne Varianten der Energieversorgung durchgeführt. Dabei wurden auch Fördermittel aus öffentlichen Förderprogrammen berücksichtigt (Kapitel 8).

### 7.1 Abschätzung der Betriebskosten

#### Energiepreise

Abb. 7.1 zeigt die Entwicklung der deutschen Industriepreise für elektrischen Strom, Erdgas und Heizöl für den Zeitraum 2008 – 2016 nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).<sup>56</sup> Die durchschnittlichen Preise der einzelnen Jahre sind im Anhang aufgelistet (Tabelle E.1).



**Abb. 7.1:** Durchschnittliche Energiepreise und Preisverhältnisse für industrielle Abnehmer in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).

<sup>56</sup> Elektrischer Strom: Abgabe an industrielle Abnehmer, Jahresverbrauch 2.000 – 20.000 MWh, einschließlich Verbrauchssteuern, ohne Mehrwertsteuer;  
Erdgas: Abgabe an industrielle Abnehmer, Jahresverbrauch 100.000 – 1.000.000 GJ bzw. 27.778 – 277.778 MWh, einschließlich Verbrauchssteuern, ohne Mehrwertsteuer;  
Leichtes Heizöl: Bei Lieferung in Tankkraftwagen an Verbraucher, 40 – 50 Hektoliter pro Auftrag, frei Verbraucher, einschließlich Mineralölsteuer und Erdölbevorratungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer.

Seit 2014 sind die Strompreise leicht, die Preise für Heizöl und Erdgas jedoch sehr viel stärker gesunken. Dadurch steigen die Preisverhältnisse Strom / Heizöl bzw. Strom / Erdgas. Dies benachteiligt den Einsatz von Elektro-Wärmepumpen, da deren energetische Vorteile sich nur unterproportional in eingesparten Energiekosten niederschlagen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Wärme aus Erdgas ersetzt bzw. durch Wärmepumpen mit Strom aus dem öffentlichen Netz bereitgestellt werden soll. Das Preisverhältnis Strom / Erdgas für industrielle Abnehmer ist seit 2010 von 3,0 auf 4,8 gestiegen.

Die durchschnittlichen Strom- und Erdgaspreise privater Haushalte im Zeitraum 2008 – 2016 sind ebenfalls im Anhang aufgeführt (**Tabelle E.2**). Das Preisverhältnis Strom / Erdgas lag bereits 2010 bei 4,24 und ist bis 2016 auf 4,56 gestiegen (**Abb. E.1**). Durchschnittspreise für das Jahr 2016 zeigt **Tabelle 7.1**. Die Strom- und Erdgaspreise sind für industrielle Abnehmer netto nur etwa halb so hoch wie für private Haushalte.

**Tabelle 7.1:** Durchschnittliche Preise und Preisverhältnisse für elektrischen Strom und Erdgas nach Daten des Statistischen Bundesamtes für 2016 (DESTATIS, 2017).

Ø Energiepreise 2016		Strom Cent/kWh	Erdgas Cent/kWh	Preisverhältnis –
Ø Private Haushalte	inkl. MwSt.	29,73	6,52	4,56
	ohne MwSt.	24,98	5,47	
Ø Industrielle Abnehmer	ohne MwSt.	12,74	2,65	4,81
		51 %	48 %	

### EEG-Umlage

Nach dem Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG, 2017) müssen grundsätzlich alle Stromverbraucher die sogenannte EEG-Umlage bezahlen. Die EEG-Umlage ist Teil des Strompreises und lag in den Jahren 2015 und 2016 bei brutto 6,17 bzw. 6,354 Cent/kWh. 2017 steigt die EEG-Umlage auf 6,88 Cent/kWh. Stromkostenintensive Unternehmen des produzierenden Gewerbes können auf Antrag bei einem Stromverbrauch von mehr als einer Gigawattstunde pro Jahr eine Ermäßigung der EEG-Umlage erhalten. Der selbst verbrauchte Strom muss dabei von einem Elektrizitätsversorgungsunternehmen bzw. aus dem öffentlichen Netz bezogen werden. Eine zweite Voraussetzung ist, dass das Verhältnis der von dem Unternehmen zu tragenden Stromkosten zur Bruttowertschöpfung des Unternehmens mindestens 14 % betragen hat.

Für 2015 haben 2.462 Unternehmen einen entsprechenden Antrag gestellt, 2.239 Unternehmen und Unternehmensteile wurden begünstigt. Die tatsächliche Inanspruchnahme lag bei 110.247 GWh bzw. 110 TWh, die resultierenden Entlastungen der Unternehmen bei 4,8 Mrd. Euro (BMW, 2016a). Bezogen auf den gesamten Stromverbrauch in Deutschland von 521 TWh (UBA, 2017) bedeutet dies, dass 2015 ca. 21 % der gesamten Strommenge größtenteils von der EEG-Umlage befreit war. Bezieht man die tatsächliche Inanspruchnahme auf den Sektor Industrie (228 TWh), so ergibt sich sogar ein Anteil von ca. 48 %.

## Energiekosten

Der Berechnung der Energiekosten wurden die in **Tabelle 7.2** dargestellten Energiepreise zugrunde gelegt. In den Varianten mit Blockheizkraftwerk (C–I und D–I) wurden die Vergütung von KWK-Strom nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG, 2017), die Steuerentlastung für Erdgas nach dem Energiesteuergesetz (EnergieStG, 2016) sowie die Steuerbefreiung für den Selbstverbrauch nach dem Stromsteuergesetz (StromStG, 2016) berücksichtigt. Für die Vergütung des KWK-Stroms wurde ein üblicher Strompreis der European Energy Exchange AG (EEX) in Leipzig angenommen (EEX, 2017).

**Tabelle 7.2:** Energiepreise, Vergütungen und Steuerentlastungen zur Berechnung der Energiekosten.

Preis bzw. Vergütung	Cent/kWh	Anmerkungen
Erdgas	4,0	Annahme
Elektrischer Strom	20,0	Annahme, Preisverhältnis <i>Strom/Erdgas</i> = 5,0
Vergütung für KWK-Strom	4,132	EEX-Preis im I. Quartal 2017
KWK-Zuschlag	8,0	Leistungsanteil bis 50 kW
	6,0	Leistungsanteil 50 – 100 kW
Steuerentlastung für Erdgas	0,55	nur Brennstoff für das BHKW
Stromsteuerbefreiung	2,05	für den selbst verbrauchten Strom

Die resultierenden Energiekosten der Trocknung mit Teilumlufte zeigt **Tabelle 7.3**. Vergleichsbasis zur Bewertung der unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung ist der geregelte Teilumlufte-Betrieb mit 100 % Erdgas (Variante I). Die einzelnen Bestandteile der Energiekosten ergeben sich aus der Multiplikation des jeweiligen Bedarfs an Brennstoff und elektrischer Energie in MWh (**Tabelle 5.4**) mit den jeweiligen Energiepreisen (**Tabelle 7.2**). Die gesamten Energiekosten  $K_{Energie}$  pro Charge wurden jeweils aus den Brennstoffkosten  $K_{Brennstoff}$ , den Stromkosten  $K_{Strom}$  und der KWK-Förderung  $K_{KWK}$  berechnet:

$$\frac{K_{Energie}}{Charge} = \frac{K_{Brennstoff} + K_{Strom} - K_{KWK}}{Charge} \quad \text{€/Charge} \quad (7.1)$$

In Variante I sind Brennstoffkosten in Höhe von 841 € erforderlich. In Variante C–I mit 40 % BHKW-Abwärme sind die Brennstoffkosten größer (1.114 €), die Kosten für elektrischen Strom aus dem Netz hingegen kleiner (36 € statt 207 €).<sup>57</sup> Ohne Berücksichtigung der KWK-Förderung liegen die Energiekosten der untersuchten Varianten zwischen 766 € (Variante D–I) und 1.164 € (Variante A–I) und damit in einem Bereich von 73 – 111 % der Trocknung im Teilumlufte-Betrieb. Mit KWK-Förderung sinken die relativen Energiekosten in der Variante C–I von 110 % auf 46 %, in der Variante D–I sogar von 73 % auf 21 %. Dies entspricht einer Kosteneinsparung von 54 % bzw. 79 %.

<sup>57</sup> In Variante C–I wurden die Brennstoffkosten für das BHKW für die ersten 54 Stunden der Trocknung, die Stromkosten für die Hauptventilatoren für die letzten 13 Stunden bilanziert.



**Tabelle 7.3:** *Energiekosten pro Charge Kamilleblüten bei der Trocknung mit Teilumluft und unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.*

alle Werte in €/Charge	Konv. Teilumluft- Betrieb	100 % WP	60 % WP	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
Größe, Variante	I	A-I	B-I	C-I	D-I	E-I
<u>Brennstoffkosten</u>						
Brennstoff konventionelle Heizung	841	—	504	462	—	665
Brennstoff BHKW	—	—	—	652	652	—
Summe Brennstoffkosten	841	—	504	1.114	652	665
<u>Stromkosten Netz</u>						
Hauptventilatoren Trockner	207	207	207	36	36	207
Wärmepumpe	—	832	334	—	67	—
Hilfsventilatoren	—	125	50	—	10	41
Summe Stromkosten Netz	207	1.164	591	36	114	248
<u>Energiekosten</u>						
Summe Brennstoff + Strom aus Netz	1.048	1.164	1.095	1.150	766	913
Relative Energiekosten (1)	100 %	111 %	104 %	110 %	73 %	87 %
<u>Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung</u>						
Vergütung für KWK-Strom	—	—	—	- 562	- 407	—
Steuerentlastung für Erdgas	—	—	—	- 90	- 90	—
Stromsteuerbefreiung	—	—	—	- 17	- 49	—
Summe KWK-Förderung	—	—	—	- 669	- 545	—
<u>Energiekosten gesamt</u>						
Energiekosten inkl. KWK-Förderung	1.048	1.164	1.095	481	220	913
Relative Energiekosten gesamt (1)	100 %	111 %	104 %	46 %	21 %	87 %
Einsparung Energiekosten (1)		- 11 %	- 4 %	54 %	79 %	13 %

(1) Bezug: Geregelter Teilumluft-Betrieb mit 100 % Erdgas.

### Einsparung von Energiekosten im Vergleich zur Einsparung von Primärenergie

Vergleicht man die eingesparten Energiekosten (**Tabelle 7.3**) mit der eingesparten Primärenergie (**Tabelle 5.4**), so fallen erhebliche Diskrepanzen auf (**Tabelle 7.4**). In den Wärmepumpenvarianten A-I und B-I sind die gesamten Energiekosten größer als im geregelten Teilumluft-Betrieb mit 100 % Erdgas (negative Werte der Kosteneinsparung). Ursache ist das für Wärmepumpen ungünstige Preisverhältnis Strom / Erdgas.

Bei reiner Wärmepumpentrocknung mit Strom aus dem öffentlichen Netz (Variante A-I) werden unter den getroffenen Annahmen 54 % Primärenergie eingespart. Es wird jedoch keine Einsparung von Energiekosten erreicht, im Gegenteil. Dies gilt auch dann, wenn nur ein Teil der benötigten Wärmeleistung mit einer Elektro-Wärmepumpe bereitgestellt wird (Variante B-I).

**Tabelle 7.4:** *Eingesparte Energiekosten im Vergleich mit der eingesparten Primärenergie bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung.*

Größe, Variante		100 % WP	60 % WP	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
		A-I	B-I	C-I	D-I	E-I
Einsparung Primärenergie (1)	%	54	22	32	63	18
Einsparung Energiekosten (1)	%	- 11	- 4	54	79	13

(1) Bezug: Geregelter Teilumluf-Betrieb mit 100 % Erdgas.

Bei Nutzung von 40 % BHKW-Abwärme ist es umgekehrt (Variante C-I). Hier werden 32 % Primärenergie, im Ergebnis der KWK-Förderung jedoch 54 % Energiekosten eingespart. Auch in Variante D-I ist die Einsparung von Energiekosten größer als die Einsparung von Primärenergie. Ursache ist auch hier die KWK-Förderung. Bei Nutzung von 15 % Solarwärme (Variante E-I) werden 18 % Primärenergie, aber nur 13 % Energiekosten eingespart.

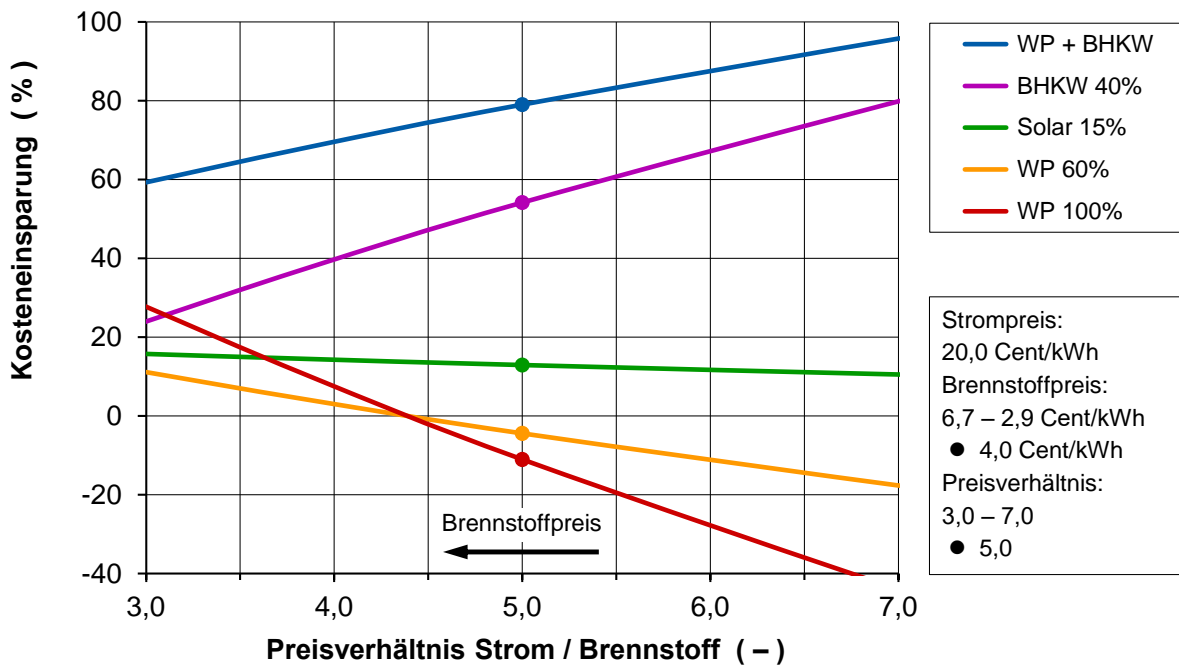
### Einsparung von Energiekosten bei unterschiedlichen Energiepreisen

**Abb. 7.2** zeigt die möglichen Einsparungen von Energiekosten bei variierten Brennstoffpreisen. Die Darstellung erfolgt über dem Preisverhältnis Strom / Brennstoff: Je kleiner der Brennstoffpreis, desto größer das Preisverhältnis und umgekehrt. Beträgt der Brennstoffpreis beispielsweise *3,33 Cent/kWh*, so ergibt sich bei einem Strompreis von *20,0 Cent/kWh* ein Preisverhältnis von 6,0. In diesem Fall würde reine Wärmepumpentrocknung mit Strom aus dem öffentlichen Netz Mehrkosten in Höhe von ca. 28 % verursachen (rote Kurve in **Abb. 7.2**). Wird die elektrische Energie hingegen von einem Blockheizkraftwerk bereitgestellt, so könnte bei diesem Preisverhältnis sogar eine Kosteneinsparung von ca. 88 % erreicht werden (blaue Kurve).

Wärmepumpentrocknung mit Strom aus dem öffentlichen Netz würde unter den getroffenen Annahmen erst bei einem Preisverhältnis kleiner als 4,4 zu einer Einsparung von Energiekosten führen. Hierfür müsste der Brennstoffpreis über *4,55 Cent/kWh* steigen (bei einem Strompreis von *20,0 Cent/kWh*). Dies könnte bei Heizöl schon bald der Fall sein. Da mit den Varianten A-I und B-I gegenwärtig jedoch keine Kosteneinsparungen möglich sind, werden diese beiden Fälle nicht weiter betrachtet.

In den Varianten C-I, D-I und E-I werden die Energiekosten der Trocknung nur geringfügig von den Strompreisen beeinflusst. Eine Variation der Strompreise ist im Anhang für einen Brennstoffpreis von *4,0 Cent/kWh* exemplarisch dargestellt (**Abb. E.2**).

Die Punkte in **Abb. 7.2** kennzeichnen das der Berechnung der Energiekosten zugrunde gelegte Preisverhältnis (5,0). Dieses Preisverhältnis wurde gewählt, da kleine Betriebe häufig höhere Brennstoffpreise zu bezahlen haben als große industrielle Abnehmer und oft auch keine Ermäßigung der EEG-Umlage erhalten können. Außerdem ist tendenziell von wieder steigenden Brennstoffpreisen auszugehen.



**Abb. 7.2:** Einsparung von Energiekosten im Teilumluft-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung und Brennstoffpreisen.

## 7.2 Abschätzung der Investitionskosten

Mit Elektro-Wärmepumpen, die Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen, kann bei der Trocknung von Arzneipflanzen derzeit keine Reduzierung der Betriebskosten erreicht werden. Amortisationsrechnungen wurden deshalb nur für folgende Varianten durchgeführt:

- Variante I: Teilumluft-Betrieb mit konventioneller Lufterwärmung;
- Variante C-I: Teilumluft-Betrieb mit 40 % BHKW-Abwärme;
- Variante D-I: Teilumluft-Betrieb mit 60 % Wärmepumpe und 40 % BHKW-Abwärme;
- Variante E-I: Teilumluft-Betrieb mit 15 % Solarwärme.

Die Abschätzung der Investitions- und Wartungskosten wird nachfolgend beschreiben.

### Investitionen und Wartungskosten für Blockheizkraftwerke

Die Angabe allgemeingültiger Ansätze zum erforderlichen Investitionsvolumen ist aufgrund der vielfältigen Einflüsse schwierig. Einzelfallabhängig sind hier nur konkrete Anfragen aussagefähig. Schaumann & Schmitz (2010) geben spezifische Investitionskosten für KWK-Gesamtanlagen an, die auf Erfahrungswerten ausgeführter und kalkulierter Anlagen basieren. Die Kosten für die Anschaffung, Wartung und Instandhaltung der einzelnen Anlagengruppen sind je nach Projekt unterschiedlich. Anhaltswerte sind in **Tabelle E.3** im Anhang aufgeführt. Für BHKW-Anlagen, die mit Erdgas betrieben werden, konnte 2010 von folgendem Richtpreis in €/kW<sub>el</sub> ausgegangen werden:

$$\text{Richtpreis} \approx 4.361 \cdot P_{BHKW}^{-0,33} \quad \text{€/kW}_{el} \quad (7.2)$$

Für ein Blockheizkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 109 kW<sub>el</sub> ergeben sich Investitionskosten von ca. 100.000 €. Weitere Investitionen sind für Betriebsmittelversorgungsanlagen, Heizwasser-Kreislauf-Komponenten und für Gebäudetechnik wie z.B. Heizungs-,

Lüftungs- und Sanitäreanlagen erforderlich. Diesbezüglich wurde von den Maximalwerten in **Tabelle E.3** ausgegangen (40 % der Investitionen für das BHKW).

Hinzu kommen Kosten für Wärmeübertrager zur Nutzung der Abwärme an den einzelnen Trocknungsrosten, für möglichst isolierte Warmwasserleitungen sowie für die Unterbringung des Blockheizkraftwerks und weiterer Anlagenkomponenten, beispielsweise in einem wetterfesten Container. Basierend auf Angaben der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. wurden hierfür Zuschläge in Höhe von noch einmal 60 % angenommen. In der Summe ergibt sich ein Zuschlag von 100.000 € auf die Investitionskosten für das BHKW (100 %).

Hinsichtlich Wartung und Instandhaltung stellt der Motor den größten Kostenfaktor dar. Schaumann & Schmitz (2010) geben folgende Näherungsfunktion für Instandhaltungsverträge an:

$$\text{Wartungskosten} \approx 5,88 \cdot P_{\text{BHKW}}^{-0,27} \quad \text{Cent}/kW_{el} \quad (7.3)$$

Die Kosten für die jährliche Wartung in  $\text{Cent}/kW_{el}$  beziehen sich wiederum auf die elektrische Leistung. Für  $109 kW_{el}$  ergeben sich Wartungskosten von ca. 18.000 € pro Jahr. Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen werden selten länger als insgesamt sechs Monate pro Jahr betrieben. In den Amortisationsrechnungen wurden deshalb Wartungskosten für das BHKW in Höhe von 9.000 €/a angenommen.

### Investitionen und Wartungskosten für Wärmepumpen

Verglichen mit brennerbasierten Wärmeherzeugungstechnologien ist die technische Umsetzung des Wärmepumpenprinzips mit einem höheren anlagentechnischen Aufwand verbunden. Dieser Umstand schlägt sich in vergleichsweise hohen Anschaffungskosten für eine Wärmepumpenanlage nieder. Kosten- und Leistungsdaten für 254 Wärmepumpen von acht Herstellern wurden von Wolf et al. (2014) in einer Datenbank erfasst und analysiert. Die Daten aus dem Jahr 2012 umfassen einen thermischen Leistungsbereich von  $4,7 - 183 kW_{th}$ . Bis zu einer Heizleistung von ca.  $50 kW_{th}$  liegen zahlreiche Preisangaben vor. Für Wärmepumpen mit größeren Heizleistungen gibt es nur wenige Kostendaten, da solche Anlagen zumeist den Kundenwünschen angepasst und individuell gebaut werden. Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen kann in Abhängigkeit von der Heizleistung von folgendem Richtpreis in €/kW<sub>th</sub> ausgegangen werden (Wolf et al., 2014):

$$\text{Richtpreis} \approx 3.468,35 \cdot \dot{Q}_{WP}^{-0,53} \quad \text{€}/kW_{th} \quad (7.4)$$

Die Preisentwicklung von kleineren Haushaltswärmepumpen zeigt seit 2010 ein deutliches Absinken der Preise. Bei Industrierärmepumpen mit großen Heizleistungen konnten die Hersteller die spez. Investitionskosten auf einem konstanten Niveau halten. Für eine Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von  $240 kW_{th}$  ergibt sich aus Gl. (7.4) somit eine Investition von ca. 46.000 €. Da die Leistung der Wärmepumpen für Variante D–I geregelt werden muss, wurde der Richtpreis um ca. 30 % auf insgesamt 60.000 € erhöht. Dieser Preis entspricht spez. Investitionskosten für Industrierärmepumpen von bis zu  $250 \text{ €/kW}_{th}$  (Wolf et al., 2014).

Für die Integration der Wärmepumpe in den jeweiligen Prozess einschließlich Planung und Installation durch das ausführende Unternehmen kommen noch einmal ca. 60 – 100 % der

Investitionskosten hinzu. Legt man auch hier den höheren Wert zugrunde, so beträgt der Zuschlag 60.000 €.

Die meisten Betreiber von Kälteanlagen oder Wärmepumpen schließen Wartungsverträge mit Fachfirmen ab, bei denen zweimal pro Jahr eine Wartung bzw. Inspektion durchgeführt wird. Die Wartung umfasst u.a. eine Dichtheitskontrolle (Kältemittel), die Kontrolle von Sicherheitseinrichtungen (Druckwächter), den Abgleich von Sensoren und Drucktransmittern und die Überprüfung des Schaltschranks. Außerdem wird ein Betriebstest unter Voll-Last durchgeführt und protokolliert. Eine Inspektion beschränkt sich oft auf die gesetzlich vorgeschriebene Dichtheitskontrolle und auf eine allgemeine Überprüfung der Anlage. Für die Amortisationsrechnungen wurden Wartungskosten in Höhe von 1.500 €/a angenommen.

### **Investitionen für Luftkollektoranlagen**

Große Luftkollektoranlagen der Fa. Grammer Solar werden mit spezifischen Investitionskosten von ca. 300 – 350 €/m<sup>2</sup> Brutto-Kollektorfläche kalkuliert. Die Zuschläge für die Anbindung der Solaranlage an eine Trocknungsanlage bewegen sich erfahrungsgemäß in einem Bereich von 20 – 30 % (Grammer-Solar, 2017a). Für eine Kollektorfläche von 400 m<sup>2</sup> ergeben sich daraus Investitionen von bis zu 140.000 € und Zuschläge von bis zu 42.000 €.

Die Wartungskosten für Luftkollektoranlagen sind sehr gering. Für Filterwechsel können ca. 500 €/a veranschlagt werden.

### **Investitionen für die Trocknung mit Teilumluft**

Die Investitionen für die Realisierung des Teilumluft-Betriebs sind schwierig zu verallgemeinern. Je nach baulichen Gegebenheiten sind für jeden Trockner mindestens drei regelbare Luftklappen (Frischluff, Abluff, Umluff) sowie drei Temperatur-Feuchte-Sensoren (Frischluff, Zuluft, Abluff) erforderlich. Bei mehreren Trocknern mit Teilumluff reicht ein Frischluff-Sensor aus.

Investitionen für die Datenerfassung, Aufzeichnung und Visualisierung von Messwerten, für die Reglerprogrammierung sowie für den Einbau und die Ansteuerung der Luftklappen können nur im konkreten Einzelfall ermittelt werden. Für die zugrunde gelegte Rostfläche von 100 m<sup>2</sup> wurden Investitionen in Höhe von 10.000 € und Zuschläge von nochmals 10.000 € veranschlagt. Auch diese Investitionskosten sind eher großzügig angesetzt. Für die Wartung des Regelungssystems wurden jährliche Kosten von 1.000 €/a angenommen.

### **Fördermittel**

Förderprogramme, die für Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen in Frage kommen, werden in Kapitel 8 beschrieben. Dies umfasst auch die technischen Effizienzkriterien für die unterschiedlichen förderfähigen Maßnahmen.

Im Bundesprogramm Energieeffizienz der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE, 2017b) können im Rahmen einer systemischen Optimierung folgende Investitionszuschüsse gewährt werden:

- 20 % Zuschuss für eine Energieeinsparung von mindestens 25 %,
- 30 % Zuschuss für eine Energieeinsparung von mindestens 35 %.

Die gegenüber dem Ist-Zustand nachzuweisende Energieeinsparung bezieht sich dabei auf alle Anlagen bzw. Anlagenteile, die dazu beitragen, den Energieverbrauch des Systems Trocknungsanlage zu verringern. Die Förderung umfasst damit sowohl Investitionen zur Realisierung des Teilumluf-Betriebs als auch Investitionen für Blockheizkraftwerke zur Optimierung der Warmluftherzeugung und für Wärmepumpen (BLE, 2017a).

Im KfW-Programm Erneuerbare Energien "Premium" (KfW, 2017) kann unter bestimmten technischen Voraussetzungen u.a. die Errichtung und Erweiterung von großen effizienten Wärmepumpen mit mehr als 100 kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt gefördert werden. Der Tilgungszuschuss beträgt

- bis zu 80 € je kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt.

Für eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 240 kW<sub>th</sub> ergibt sich eine Förderung von 19.200 €.

Im Rahmen der BAFA-Innovationsförderung zur Bereitstellung von Prozesswärme (BAFA, 2017b) können Fördermittel für große Solarthermieanlagen beantragt werden. Die Förderung beträgt

- bis zu 50 % der Netto-Investitionskosten.

Die in den einzelnen Förderprogrammen möglichen Fördermittel wurden in den nachfolgend erläuterten Amortisationsrechnungen berücksichtigt.

### 7.3 Wirtschaftliche Bewertung

Statische Investitionsrechenverfahren werden in der Praxis vor allem aufgrund ihrer einfachen Handhabung und des damit verbundenen geringeren Kosten- und Zeitaufwands häufig eingesetzt. Sie orientieren sich an durchschnittlichen Erfolgsgrößen (Gewinn, Kosten, Erlöse, Rendite). Als statisch werden sie bezeichnet, weil sie bei den Einzahlungen und Auszahlungen deren unterschiedlichen zeitlichen Anfall nicht oder nur teilweise berücksichtigen und ferner repräsentativ nur die Erlöse und Kosten einer durchschnittlichen Planperiode berücksichtigen. Zu den statischen Investitionsrechenverfahren gehören die statische Amortisationsrechnung und die Rentabilitätsrechnung (Wöltje, 2013).

Nachteile der statischen Investitionsrechnungen liegen in der Nichtberücksichtigung des zeitlichen Anfalls von Ein- und Auszahlungen und in der Verwendung von Durchschnittsgrößen. Für einen längeren Zeitraum werden konstante Verhältnisse z.B. der Rohstoffpreise, Löhne und Erlöse unterstellt, die in der Praxis aber hohen Schwankungen unterliegen. Wenn entsprechende Entwicklungen vorhergesagt werden können, sind dynamische Verfahren besser geeignet. Hierfür wären jedoch zahlreiche Annahmen für die Zukunft erforderlich gewesen.

#### Statische Amortisationsrechnung

Die Amortisationsrechnung ermittelt den Zeitraum, in dem das investierte Kapital über die Rückflüsse wieder in das Unternehmen zurückfließt (Amortisationsdauer). In der Durchschnittsrechnung wird der für die Investition eingesetzte Betrag ins Verhältnis zum durchschnittlichen jährlichen Rückfluss gesetzt:



$$\text{Amortisationsdauer (Jahre)} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{Rückfluss}} \quad (7.5)$$

Der Rückfluss ist die Summe aus dem durchschnittlichen jährlichen Gewinn und der kalkulatorischen Abschreibung:

$$\text{Rückfluss (€/a)} = \text{Abschreibung} + \text{Gewinn} \quad (7.6)$$

Durch die jährlich kalkulierte Abschreibung werden die Investitionskosten gleichmäßig auf die Jahre der Nutzungsdauer aufgeteilt (lineare Abschreibung):

$$\text{Abschreibung (€/a)} = \frac{\text{Kapitaleinsatz} - \text{Resterlös}}{\text{Nutzungsdauer}} \quad (7.7)$$

Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalysen beschränken sich auf luft- und anlagentechnische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Um die jeweiligen Einzelinvestitionen objektiv beurteilen zu können, wird als jährlicher Gewinn ausschließlich die Differenz aus den eingesparten Energiekosten und den Gesamtkosten berücksichtigt:

$$\text{Gewinn (€/a)} = \text{Einsparung Energiekosten} - \text{Gesamtkosten} \quad (7.8)$$

Die Gesamtkosten setzen sich somit aus den Fixkosten (Abschreibung und kalkulatorische Zinsen) und den variablen Kosten (Wartungskosten) zusammen:

$$\text{Gesamtkosten (€/a)} = \text{Fixkosten} + \text{variable Kosten} \quad (7.9)$$

Die kalkulatorischen Zinsen berechnen sich aus:

$$\text{Kalk. Zinsen (€/a)} = \frac{\text{Kapitaleinsatz} + \text{Resterlös}}{2} \cdot \text{Zinssatz (\%)} \quad (7.10)$$

### Rentabilitätsrechnung

Die Rentabilitätsrechnung berücksichtigt, dass Investitionsobjekte unterschiedlich viel Kapital binden. Es gibt eine Vielzahl von Vorschlägen, die Rentabilität von Investitionen zu ermitteln. Die Rentabilität bzw. die durchschnittliche jährliche Verzinsung des eingesetzten Kapitals lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Rentabilität (\%)} = \frac{\text{Gewinn} + \text{kalk. Zinsen}}{\text{Ø gebundenes Kapital} / 2} \cdot 100 \quad (7.11)$$

Die Rentabilitätsrechnung setzt nach herrschender Meinung den "durchschnittlichen Periodengewinn vor Zinsen" eines Investitionsobjekts zum Kapitaleinsatz ins Verhältnis (Wöltje, 2013). Die kalkulatorischen Zinsen wurden bereits mit Gl. (7.8) bzw. Gl. (7.9) berücksichtigt und müssen deshalb wieder zum Gewinn addiert werden. Das gebundene Kapital in Gl. (7.11) beinhaltet den Kapitaleinsatz sowie ggfs. einen Liquidationserlös. Dieser Resterlös ist beispielsweise der Betrag, der am Ende der Nutzungsdauer durch Verkauf erzielt werden kann. Ein erwarteter Resterlös verkürzt die Amortisationsdauer.

### Amortisationsdauer der untersuchten Varianten

Die vollständigen Amortisationsrechnungen für die untersuchten Varianten sind im Anhang dargestellt (**Tabelle E.4**). Dabei wurden jeweils eine Nutzungsdauer von zehn Jahren, ein Resterlös von 0 €, ein kalkulatorischer Zinssatz von 5 %, ein Strompreis von 20,0 Cent/kWh,

ein Erdgaspreis von 4,0 Cent/kWh sowie 3.000 Betriebsstunden pro Jahr angenommen. Die Ergebnisse der Amortisationsrechnungen zeigt **Tabelle 7.5**.

Die abgeschätzten Investitionskosten liegen zwischen 20.000 € für die Realisierung des Teilumluf-Betriebs (Variante I) und 330.000 € für Variante D-I mit Wärmepumpe, BHKW und Teilumluf. Mit Fördermitteln reduziert sich der Kapitaleinsatz auf Summen zwischen 16.000 € und 218.800 €. Für die jährlichen Betriebsstunden wurden Erfahrungswerte der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. zugrunde gelegt. Die 2008 neu errichtete Halle 4 verfügt über sechs Trocknungsroste mit jeweils 52,8 m<sup>2</sup> Rostfläche. 2016 lag die durchschnittliche Betriebsdauer der einzelnen Roste bei 3.423 Stunden. Die minimale Betriebsdauer lag im Zeitraum 2009 – 2016 nur in zwei Ausnahmefällen unter ca. 2.700 h/a.

**Tabelle 7.5:** *Einsparung von Energiekosten, Rentabilität und Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung bei 3.000 Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung).*

Werte für 100 m <sup>2</sup> Rostfläche		Konv. Teilumluf- Betrieb I	40 % BHKW C-I	60 % WP + 40 % BHKW D-I	15 % Solar E-I
Größe, Einheit, Variante					
<u>Investitionen &amp; Fördermittel</u>					
Hauptkomponenten (1, 2)	€	10.000	110.000	170.000	150.000
Zuschläge (1)		100 %	100 %	100 %	35 %
Gesamte Investitionskosten	€	20.000	220.000	340.000	202.000
Fördermittel (3)	€	4.000	66.000	121.200	91.000
Gesamte Förderquote (3)		20 %	30 %	36 %	45 %
Kapitaleinsatz (4)	€	16.000	154.000	218.800	111.000
<u>Rentabilität und Amortisation</u>					
Einsparung Energiekosten (5)	€/a	14.425	38.747	49.907	20.225
Rentabilität	%	147,8	17,3	15,1	13,7
Amortisationsdauer	Jahre	1,3	7,3	8,0	8,4

(1) Quellen: Schaumann & Schmitz (2010), Wolf et al. (2014), Grammer-Solar (2017a);  
 (2) Teilumluf: pauschale Abschätzung; (3) Teilumluf, BHKW und Wärmepumpe: BLE-Förderung;  
 Wärmepumpe: zusätzlich KFW-Förderung; Solaranlage: BAFA-Förderung; (4) Investitionen abzgl.  
 Förderung; (5) Strompreis: 20,0 Cent/kWh ; Erdgaspreis: 4,0 Cent/kWh.

Die gesamten Energiekosten pro Jahr  $K_{Energie}$  ergeben sich aus **Tabelle 7.3** und der Anzahl der pro Jahr getrockneten Chargen:

$$K_{Energie} = \frac{K_{Energie}}{Charge} \cdot \frac{Anzahl\ Chargen}{Jahr} \quad \text{€/a} \quad (7.12)$$

In der modellbasierten Fallstudie zur lufttechnischen Effizienzsteigerung wurde für die Trocknung einer Charge Kamilleblüten im geregelten Teilumluf-Betrieb eine Trocknungsdauer von ca. 70 h ermittelt (Abschnitt 4.2). Legt man diese Trocknungsdauer zugrunde, so entspricht eine Betriebsdauer von 3.000 h/a etwa 43 Chargen pro Jahr.

Die insgesamt pro Jahr eingesparten Energiekosten  $K_{Einsparung}$  resultieren aus den Energiekosten für den reinen Frischluftbetrieb  $K_{Frischluft}$  und den für die einzelnen Varianten erforderlichen Energiekosten  $K_{Variante}$  (**Tabelle 7.5**):

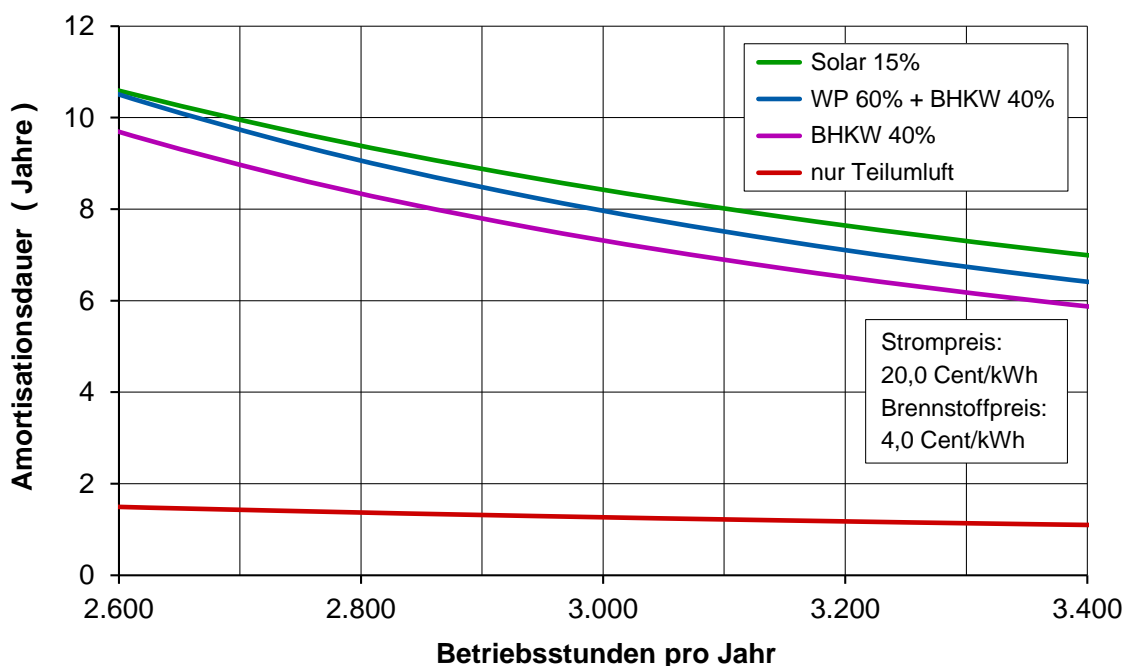
$$K_{Einsparung} = K_{Frischluft} - K_{Variante} \quad \text{€/a} \quad (7.13)$$

Die Abschätzung ergibt jährliche Einsparungen von Energiekosten zwischen ca. 14.000 € (Teilumluft-Betrieb mit konventioneller Lufterwärmung) und ca. 50.000 € (Teilumluft-Betrieb mit 60 % Wärmepumpe und 40 % BHKW-Abwärme). Die Amortisationsdauern liegen zwischen nur 1,3 Jahren für die Realisierung des Teilumluft-Betriebs (Variante I) und 8,4 Jahren für Variante D–I mit Wärmepumpe, BHKW-Abwärme und Teilumluft.

### Auslastung und Amortisation

Bei der Ermittlung der jährlichen Nutzungsdauer müssen der Tagesrhythmus der Bewirtschaftung und witterungsbedingte Betriebsunterbrechungen berücksichtigt werden. Setzt man durchschnittlich vier Tage pro Charge an, so ergeben 43 Chargen pro Jahr 172 Betriebstage bzw. ca. 5,7 Monate. Dieser Zeitraum entspricht in etwa der jährlichen Ernteperiode von Arznei- und Gewürzpflanzen. Der Anbau mehrerer Pflanzenarten und eine optimale Bewirtschaftung der Trocknungsroste, so wie bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G., ermöglicht jedoch auch eine höhere Auslastung von Flächentrocknungsanlagen (ca. 3.400 Betriebsstunden pro Jahr).

Amortisationsdauern bei unterschiedlichen Betriebsstunden pro Jahr zeigt **Abb. 7.3**. Bei 3.400 h/a sind unter den getroffenen Annahmen Amortisationsdauern von weniger als sieben Jahren erreichbar (Varianten C–I, D–I und E–I) Bei einer jährlichen Nutzungsdauer von weniger als 2.600 h/a steigen die Amortisationsdauern auf über zehn Jahre. Ohne Fördermittel sind die Amortisationsdauern jedoch erheblich länger (**Abb. E.3** im Anhang).



**Abb. 7.3:** Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung bei unterschiedlichen Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung).

Eine möglichst hohe Auslastung ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Trocknungsanlagen. Eine Ausnahme ist die luft- bzw. trocknungstechnische Optimierung, die sich innerhalb kurzer Zeit amortisiert. Die am Beispiel des geregelten Teilumluft-Betriebs beschriebenen Kosteneinsparungen sind in einer ähnlichen Größenordnung auch durch die Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern oder durch Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche erreichbar.

### **Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Varianten**

Bei den Investitionen für das Blockheizkraftwerk und für die Wärmepumpe wurde von Richtpreisen ausgegangen. Richtpreise für Blockheizkraftwerke werden in der Literatur in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung angegeben. Für Wärmepumpen erfolgt die Angabe in Abhängigkeit von der thermischen Leistung. Der spezifische Investitionsbedarf fällt jeweils mit der Anlagengröße. Die Investitionskosten für die Solaranlage basieren auf Herstellerangaben. Investitionen zur Realisierung des Teilumluft-Betriebs wurden pauschal abgeschätzt.

Für Planung, Integration und Installation der Hauptkomponenten wurden Zuschläge in Höhe von jeweils 100 % (Teilumluft-Betrieb, BHKW, Wärmepumpe) bzw. 30 % (Solaranlage) angenommen. In allen Varianten wurden die Trocknung mit Teilumluft, Wartungskosten und Investitionszuschüsse aus Förderprogrammen berücksichtigt. In Abhängigkeit von den jährlichen Betriebsstunden liegen die Amortisationsdauern zwischen ca. sechs und zehn Jahren. Kosteneinsparungen resultieren dabei ausschließlich aus eingesparten Energiekosten unter Berücksichtigung der Vergütung für KWK-Strom, der Steuerentlastung für Erdgas und der Stromsteuerbefreiung.

Die höchste Einsparung von Energiekosten wird durch die Kombination einer Wärmepumpe mit einem BHKW erzielt. Die absolute Kosteneinsparung durch Einsatz solarer Prozesswärme ist erwartungsgemäß deutlich kleiner. Ursache ist der hohe thermische Energiebedarf der Trocknung.

Die Ergebnisse, die auf relativ hohen spezifischen Investitionskosten und Zuschlägen basieren, gelten für eine Rostfläche von  $100 \text{ m}^2$ . Trocknungshallen für Arznei- und Gewürzpflanzen verfügen oft über Rostflächen von insgesamt  $300 \text{ m}^2$  und mehr. Anlagen in dieser Größenordnung würden erfahrungsgemäß eine entsprechend höhere Einsparung von Energiekosten, geringere spezifische Investitionskosten und damit auch kürzere Amortisationsdauern ermöglichen.

## 8 Fördermöglichkeiten

Zunächst wird eine Auswahl von Förderprogrammen beschrieben, die für Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen in Frage kommen. Anschließend werden technische Effizienzkriterien für förderfähige Maßnahmen in den einzelnen Förderprogrammen erläutert. Die beschriebenen Maßnahmen betreffen insbesondere Trocknungsanlagen, aber auch Wärmepumpen, thermische Solaranlagen und Blockheizkraftwerke.

### 8.1 Förderprogramme

Einen umfassenden und aktuellen Überblick über alle Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union gibt die Bundesregierung mit ihrer Förderdatenbank.

- Internet (BMW, 2017b): [Förderdatenbank](#)

#### Bundesprogramm Energieeffizienz der BLE

Die Geschäftsstelle des Bundesprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau ist bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) angesiedelt. Sie ist zuständig für die administrative Durchführung der Maßnahmen. Die aktuell gültige Richtlinie vom 22.08.2016 bezieht sich u.a. explizit auf Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Trocknungsanlagen, die insbesondere im Rahmen einer systemischen Optimierung gefördert werden können.

#### Förderfähige Maßnahmen

1. Investitionen
  - 1.1 Einzelmaßnahmen (Modernisierung)
  - 1.2 Systemische Optimierung (Modernisierung)
  - 1.3 Niedrigenergie-Gebäude zur pflanzlichen Erzeugung (Neubau)
2. Energieberatung und Erstellung von Energieeinsparkonzepten
3. Wissenstransfer und Informationsvermittlung durch Energieeffizienztische

#### Technische Bereiche

- 1.1 Investitionen in Einzelmaßnahmen:
  - a) Elektrische Motoren und Antriebe, b) Pumpen, c) Ventilatoren, d) Anlagen zur Kälteerzeugung, e) Wärmespeicher, f) Umdeckung der Gewächshaushülle von Einfacheindeckung auf festinstallierte Mehrfachbedachung, g) Einbau von Energieschirmen in ein bestehendes Gewächshaus, h) Vorkühler in Milchkühlanlagen, i) Umrüstung von Beleuchtungssystemen auf LED-Technik, j) Installation einer computergestützten Klimaregelung, k) Einsatz von LED-Beleuchtungssystemen zur Assimilationsbelichtung.
- 1.2 Investitionen zur Optimierung von Systemen oder Teilsystemen:
 

Im Rahmen der systemischen Optimierung werden auf der Grundlage eines betriebsindividuellen Energieeinsparkonzepts der Ersatz und die Erneuerung technischer Systeme auf der Basis energiesparender Technologien gefördert. Die systemische Optimierung umfasst dabei alle Anlagen bzw. Anlagenteile, die dazu beitragen, den Energieverbrauch eines Systems zu verringern.

### Fördervoraussetzungen

Förderfähig sind Investitionen in langlebige Wirtschaftsgüter, die ausschließlich der Produktion landwirtschaftlicher Primärerzeugnisse dienen und durch Schaffung der baulichen und technischen Voraussetzungen die Energieeffizienz im Produktionsprozess signifikant erhöhen.<sup>58</sup>

#### 1.1 Einzelmaßnahmen:

Die verbindlichen fachlichen Details der förderfähigen Maßnahmen sind in der Anlage der Richtlinie aufgeführt.

#### 1.2 Systemische Optimierung:

Das Energieeinsparkonzept muss durch eine von der BLE anerkannte, unabhängige sachverständige Person in Energieeffizienzfragen im Rahmen einer detaillierten Energieberatung erstellt werden.<sup>59</sup> Die Maßnahmen sind nur förderfähig, wenn mit dem Einsatz der energiesparenden Technologien eine Energieeinsparung von mindestens 25 % gegenüber dem Ist-Zustand des vorhandenen, in die Optimierung einbezogenen Teil- oder Gesamtsystems erzielt und nachgewiesen wird.

### Förderart

- Investitionszuschüsse (Anteilfinanzierung)

### Höhe der Zuwendung<sup>60</sup>

- 30 % Zuschuss für investive Einzelmaßnahmen;<sup>61</sup>
- 20 % Zuschuss für Maßnahmen zur systemischen Optimierung, wenn die Investition zu einer nachgewiesenen Energieeinsparung von mindestens 25 % gegenüber dem Ist-Zustand führt;
- 30 % Zuschuss für Investitionen zur systemischen Optimierung, wenn eine Energieeinsparung von mindestens 35 % erreicht wird;
- 80 % der förderfähigen Netto-Beratungskosten für die Energieberatung.<sup>62</sup>

### Kumulierung

Energieberatungen und Energieeffizienztische dürfen nicht aus Mitteln anderer öffentlicher Förderprogramme gefördert werden. Investitionen dürfen gleichzeitig auch aus Mitteln anderer öffentlicher Förderprogramme gefördert werden, wenn und soweit durch die Kumulation die

---

<sup>58</sup> Die Förderung von Investitionen, die die Verarbeitung und Vermarktung landwirtschaftlicher Erzeugnisse betreffen, ist ausgeschlossen.

<sup>59</sup> Die Energieberatung und die Erstellung von Energieeinsparkonzepten sind ebenfalls förderfähig.

<sup>60</sup> Die Zuschusshöhe bemisst sich jeweils nach den zuwendungsfähigen Ausgaben. Das zuwendungsfähige Investitionsvolumen muss mindestens 3.000 Euro betragen und ist auf maximal 2,5 Mio. Euro begrenzt. Die Höchstgrenze für die einem Zuwendungsempfänger für alle seine Investitionen nach der Richtlinie gewährte Zuwendung beträgt 500.000 Euro.

<sup>61</sup> Ausnahme: Für die Umstellung der Beleuchtung auf LED beträgt der Zuschuss 15 %.

<sup>62</sup> Für eine Beratung beträgt die maximal mögliche Zuwendung 6.000 Euro.



maximale Beihilfeintensität von 40 % des zuwendungsfähigen Investitionsvolumens nicht überschritten wird.<sup>63</sup>

#### Antragsberechtigte

Unternehmen, die in der landwirtschaftlichen Primärproduktion tätig sind, eine Niederlassung in Deutschland haben und Kleinunternehmen oder KMU sind.

#### Ansprechpartner

- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)
- Internet (BLE, 2017b): [Bundesprogramm Energieeffizienz](#)

#### **Marktanreizprogramm (MAP)**

Das Marktanreizprogramm "Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt" zielt hauptsächlich auf die Modernisierung bestehender Gebäude und gewerblicher bzw. industrieller Prozesse ab. Eine Innovationsförderung wird jedoch auch für Anlagen in Neubauten gewährt. Die Förderung beruht auf zwei Säulen.

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) ist überwiegend für kleinere Anlagen in Privathaushalten und in Unternehmen zuständig.<sup>64</sup> Darunter fallen z.B. Solarthermiekollektoren auf dem Dach, Pelletheizungen im Keller und effiziente Erdsonden im Garten für die Wärmepumpe im Haus. Für größere Wärmelösungen, die zumeist im gewerblichen und kommunalen Bereich realisiert werden, ist die KfW-Bankengruppe zuständig. Beispiele sind Investitionen in erneuerbare Prozesswärme, Biomasse-Heizkraftwerke, große thermische Solaranlagen und große effiziente Wärmepumpen.

#### Förderarten

- Investitionszuschüsse (BAFA)
- Zinsgünstige Darlehen mit Tilgungszuschüssen (KfW)

#### Kumulierung

Die Förderungen sind untereinander kumulierbar, sofern im Einzelnen andere Regelungen nicht getroffen wurden. Die Kombination mit anderen öffentlichen Fördermitteln ist unter Beachtung der EU-Beihilfegrenzen ebenfalls möglich.

#### Antragsberechtigte

Unternehmen, Privatpersonen und Freiberufler, Landwirte, Kommunen, kommunale Gebietskörperschaften und Gemeindeverbände, Gemeinnützige Antragsteller und Genossenschaften.

#### Ansprechpartner

- Internet (BMW, 2017a): [Marktanreizprogramm \(MAP\)](#)

---

<sup>63</sup> Ausnahme: Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GAK) und der Verordnung (EU) Nr. 1308/2013 über eine gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse.

<sup>64</sup> Ausnahme: Große Solarthermieanlagen mit einer Bruttokollektorfläche von mindestens 20 m<sup>2</sup> im Rahmen der BAFA-Innovationsförderung zur Bereitstellung von Prozesswärme.

## **BAFA-Förderung im Marktanreizprogramm**

Dieses Förderprogramm bildet die erste Säule des Marktanreizprogramms.

### Technische Bereiche

1. Kleine Anlagen zur Verbrennung fester Biomasse;
2. Thermische Solaranlagen;
3. Effiziente Wärmepumpen bis einschließlich 100 kW Nennwärmeleistung;
4. Visualisierung des Ertrags von erneuerbaren Energien.

### Förderart

- Investitionszuschüsse

### Höhe der Zuwendung

Die Höhe der möglichen Zuwendungen für die Bereitstellung von Prozesswärme mit Solarthermie wird zusammen mit den technischen Effizienzkriterien im Abschnitt 8.2 erläutert.

### Kumulierung

Bei Maßnahmen, die über das BAFA gefördert werden, darf die Gesamtförderung höchstens das Doppelte des nach den Richtlinien gewährten Förderbetrages betragen (insbesondere bei Inanspruchnahme ergänzender Förderprogramme der Bundesländer). Für den Fall, dass diese Höchstgrenze überschritten würde, werden die Fördermittel des Bundes auf die vorstehende Förderhöchstgrenze gekürzt.

### Ansprechpartner

- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
- Internet (BAFA, 2017a): [Heizen mit erneuerbaren Energien](#)

## **KFW-Programm Erneuerbare Energien "Premium"**

Dieses Förderprogramm bildet die zweite Säule des Marktanreizprogramms.

### Technische Bereiche

1. Große Anlagen zur Verbrennung oder Vergasung fester Biomasse mit mehr als 100 kW Nennwärmeleistung einschließlich Anlagen zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK);
2. Tiefengeothermieanlagen einschließlich KWK-Anlagen;
3. Große effiziente Wärmepumpen mit mehr als 100 kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt;
4. Nahwärmenetze, die mit Wärme aus erneuerbaren Energien gespeist werden;
5. Große thermische Solaranlagen mit mehr als 40 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche;
6. Große Wärmespeicher mit einem Speichervolumen von mehr als 10 m<sup>3</sup> Wasservolumen;
7. Biogasleitungen für unaufbereitetes Biogas mit einer Länge von mindestens 300 m Luftlinie.

### Förderart

- Zinsgünstige Darlehen mit Tilgungszuschüssen

### Höhe der Zuwendung

Die Höhe der möglichen Zuwendungen für große effiziente Wärmepumpen wird zusammen mit den technischen Effizienzkriterien im Abschnitt 8.2 erläutert.

### Kumulierung

Die Kombination mit anderen öffentlichen Fördermitteln ist unter Beachtung der EU-Beihilfegrenzen möglich.

### Ansprechpartner

- KfW-Bankengruppe
- Internet (KfW, 2017): [Programm Erneuerbare Energien "Premium"](#)

## **8.2 Technische Effizienzkriterien für förderfähige Maßnahmen**

### **BLE-Förderung von Trocknungsanlagen**

Im Bundesprogramm Energieeffizienz der BLE bzw. in der Anlage zur Richtlinie werden detaillierte technische Effizienzkriterien für förderfähige Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Trocknungsanlagen aufgeführt (BLE, 2017b).

### Einzelmaßnahmen

- Modernisierung der Trocknung durch Austausch oder Ergänzung einzelner Komponenten

### Systemische Optimierung

Umfassende Modernisierung der Trocknung im Rahmen einer systemischen Optimierung, beispielsweise durch

- die Verbesserung der Wärmedämmung des Trockners;
- die Vorwärmung und Vortrocknung des Ausgangsmaterials;
- die Anpassung der Luftmenge an die notwendige Wasserverdampfung über Frequenzumrichter, drehzahlgeregelte Ventilatoren und/oder eine Abluftfeuchte- oder Zeitsteuerung;
- die Trocknung im Teilumlufbetrieb durch Einbau von Temperatur- und Feuchtesensoren (z.B. Messung der Abluftfeuchte) und entsprechende Regelungsmöglichkeiten;
- den Einsatz von Mess-, Steuer- und Regelungssystemen zur Trocknersteuerung, Energieoptimierung und Prozesskontrolle;
- den Einsatz von Vortrocknern zur Nutzung unzureichend gesättigter Trocknerabluft;
- die Wärmerückgewinnung im Abluftstrom durch rekuperative Wärmeübertrager (z.B. Kreuzstromwärmetauscher);
- die Abwärmenutzung, z.B. aus Biogasanlagen;
- die solare Vorwärmung der Trocknungsluft;
- den Einsatz von effizienten Wärmepumpen;

- den Einbau von Stromzählern, Wärmemengenzählern und Gaszählern;
- die Installation von Systemen zur Speicherung von Messwerten und technischen Betriebsdaten sowie zur Fernüberwachung;
- den Einsatz von Produktkühlern und die Nutzung der Kühlluft als Trocknerzuluft.

#### Niedrigenergie-Gebäude zur pflanzlichen Erzeugung

Im Falle eines Neubaus umfassende Modernisierung der Trocknung durch

- optimale Auslegung und Zusammenführung o.g. Beispiele oder
- die Realisierung von neueren Konzepten wie das Hohenheimer System eines solaren Gewächshaustrockners zur Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen.

#### Warmluftherzeugung

Da die Warmluftherzeugung bei den meisten Trocknungssystemen wesentlicher und integraler Bestandteil ist, wäre hier die Optimierung der Warmluftherzeugung förderfähig. Dazu zählen auch Blockheizkraftwerke (BLE, 2017a). Detaillierte technische Effizienzkriterien für eine förderfähige Warmluftherzeugung durch Brenner sind ebenfalls in der Anlage zur Richtlinie aufgeführt.

#### Höhe der Zuwendung

Die Höhe der möglichen Zuwendungen im Bundesprogramm Energieeffizienz der BLE wurde bereits im Abschnitt 8.1 erläutert.

#### **BAFA-Innovationsförderung – Bereitstellung von Prozesswärme mit Solarthermie**

Solarthermieanlagen zur Erzeugung von Prozesswärme stellen überwiegend Wärme für industrielle oder gewerbliche Zwecke zur Verfügung. Die BAFA-Innovationsförderung kann ausschließlich für große Solarthermieanlagen mit einer Bruttokollektorfläche von mindestens 20 m<sup>2</sup> beantragt werden. Die Förderung gilt insbesondere auch für die Integration von Luftkollektoren in solar unterstützte Trocknungsanlagen.

- Internet (BAFA, 2017b): [Innovationsförderung – Bereitstellung von Prozesswärme](#)

#### Höhe der Zuwendung

Als Förderung können bis zu 50 % der Netto-Investitionskosten für die Erstinstallation oder Erweiterung von Solarthermieanlagen zur überwiegenden Prozesswärmebereitstellung gewährt werden. Unter die Netto-Investitionskosten fallen auch die Planungskosten, Mehrkosten für die Einbindung der Solarthermieanlage in den vorhandenen Prozess und die zur Ertragsüberwachung und Fehlererkennung installierte Mess- und Datenerfassungseinrichtungen.

#### **KFW-Förderung von großen effizienten Wärmepumpen**

Gegenstand der Förderung im KFW-Programm Erneuerbare Energien "Premium" ist u.a. die Errichtung und Erweiterung von großen effizienten Wärmepumpen mit mehr als 100 kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt (Nr. V.3 der Richtlinie).

### Technische Voraussetzungen

Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme für Trocknungsanlagen sind meistens Sonderbauformen, die mit Abwärme betrieben werden. Für eine Förderung von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen müssen folgende technische Voraussetzungen erfüllt sein:

- Einbau eines Stromzählers zur Erfassung aller von der Wärmepumpe aufgenommenen Strommengen sowie mindestens eines Wärmemengenzählers. Die Messung aller durch die Wärmepumpe abgegebenen Wärmemengen wird verbindlich gefordert.<sup>65</sup>
- Vorliegen einer Fachunternehmererklärung, dass eine Jahresarbeitszahl von mindestens 3,8 erreicht wird. Außerdem sind Maßnahmen zur Fernüberwachung nachzuweisen (Nr. V.3.3.8 der Richtlinie).
- Der zur Berechnung der Jahresarbeitszahl elektrisch angetriebener Wärmepumpen benötigte COP-Wert ist mit einem Prüfbericht eines unabhängigen Prüfinstituts nachzuweisen. Solange für Wärmepumpen mit mehr als 100 kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt noch kein normiertes Verfahren zur Verfügung steht, sind diese von der Nachweispflicht noch ausgenommen.
- Für Wärmepumpen mit mehr als 100 kW Wärmeleistung ist die Wärmeleistung im Auslegungspunkt vom Hersteller anzugeben, sowie eine Bestätigung des Anlagenbetreibers beizufügen, dass dieser Auslegungspunkt mit den Einsatzbedingungen der Wärmepumpe übereinstimmt.

### Höhe der Zuwendung

- Der Tilgungszuschuss beträgt bis zu 80 € je kW Wärmeleistung im Auslegungspunkt.
- Die Förderung beträgt mindestens 10.000 € und höchstens 50.000 € je Einzelanlage.

---

<sup>65</sup> Falls notwendig, sind hierzu mehrere Wärmemengenzähler vorzusehen.

## 9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Energiebedarf zur Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen ist erheblich. Dies liegt vor allem an den hohen Feuchtegehalten der Frischware. Einer Tonne Trockenware muss **ca. 50-mal so viel Wasser** entzogen werden wie einer Tonne lagerfähigem Getreide. Der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten kann 30 – 50 % betragen. Für eine wirtschaftliche Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen sind Maßnahmen zur trocknungstechnischen und energetischen Effizienzsteigerung deshalb zwingend erforderlich.

### Qualitätsanforderungen

Frisch geerntete Arznei- und Gewürzpflanzen sind sehr empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen oder Beschädigungen und anfällig für mikrobiellen Verderb. Aufgrund der hohen Anforderungen an **Produktqualität und Hygiene** haben Qualitätssicherungssysteme eine große Bedeutung. Wichtige Qualitätskriterien sind der Gehalt an wertbestimmenden Inhaltsstoffen, die Farbe und die mikrobiologische Reinheit.

Die Qualitätssicherung muss die gesamte Produktion umfassen. Dazu zählen die Ernte, der Transport, die gutartspezifischen Verfahrensschritte der **Vorbehandlung und Erstverarbeitung** ebenso wie die Trocknung. Alle Bearbeitungsschritte bis zur Trocknung sind möglichst gutschonend und in möglichst kurzer Zeit durchzuführen.

Entscheidend für das Erhalten der wirksamen Inhaltsstoffe von Arzneipflanzen sind ein unverzüglicher Beginn der Trocknung und das Einhalten der maximal zulässigen **Trocknungstemperatur**. Bei einer eventuell erforderlichen Zwischenlagerung sollte die Frischware mit nicht erwärmter Außenluft belüftet werden, um eine Eigenerwärmung zu vermeiden. Kaltbelüftung ist auch vor dem eigentlichen Beginn der Trocknung zu empfehlen, um einheitliche Ausgangstemperatur der zu trocknenden Pflanzen zu erreichen.

### Weitere Produktspezifische Aspekte

Je nach Pflanzenart unterscheiden sich die **Nutzungsdauern**, die Erntezeiträume, die Anzahl der Ernteschnitte und die **Ernteerträge** pro Hektar beträchtlich. Die **Feuchtegehalte** der frisch geernteten Pflanzen liegen zwischen ca. 67 % und 85 %. Das Eintrocknungsverhältnis variiert entsprechend von ca. 2,8 – 6,0. Werden geschnittene Gewürzpflanzen vor der Trocknung gewaschen und auf sehr niedrige Feuchtegehalte getrocknet, so wie bei der kontinuierlichen Bandtrocknung mancher Kräuterarten, sind noch höhere Eintrocknungsverhältnisse zu bewältigen.

Die gesamte Größe als auch der Teil der Anbaufläche, der pro Tag abgeerntet werden kann, haben großen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf der einzelnen Ernteschnitte. Um im Verlauf der Ernteperiode eine möglichst hohe Auslastung der jeweiligen Trocknungsanlage zu erreichen, sind Anbau-, **Ernte- und Trocknungspläne** aufeinander abzustimmen.

Die Berechnung täglicher Erntemengen wird am Beispiel der Flächentrocknung erläutert. Grundlage sind Erfahrungswerte der Schichthöhe, der Schüttdichte und der spezifischen **Frischgut-Belegung** pro m<sup>2</sup> Rostfläche für ausgewählte Gutarten. Diese Werte variieren ebenfalls erheblich. Ihre Kenntnis ermöglicht die Abschätzung der insgesamt zu entziehenden Wassermengen und damit der für die Trocknung erforderlichen Entfeuchtungsleistung.



### **Betriebswirtschaftliche Aspekte**

Die Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen muss sich die **Organisationsstruktur** landwirtschaftlicher Betriebe einordnen. Die Standorteignung, die Fruchtfolge, Berechnungsmöglichkeiten, der Einsatz von wirtschaftseigenem Dünger und die Entfernung der Anbauflächen zur Trocknungsanlage sind zu berücksichtigen. Der Saisoncharakter und die Witterungsabhängigkeit der Produktion führen zu Arbeitsspitzen und Arbeitstälern. Besondere Fachkenntnisse und eine hohe Flexibilität des Personals sind mitentscheidend für den Erfolg.

Der kontrollierte **Vertragsanbau** mit eigens für die einzelnen Kulturarten erarbeiteten Leitlinien führt zu einer langfristigen und vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen Anbauunternehmen und Abnehmern. Vertragliche Regelungen ermöglichen ein Qualitätsmanagement, das weit über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausreicht.

Die gesamte Verfahrenskette erfordert spezielle Maschinen und Anlagentechnik. Einzelbetriebliche Lösungen und Kooperationen mit anderen Anbauern sollten miteinander verbunden werden. Die technische Trocknung ist das Nadelöhr der Produktion.

### **Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten**

Es existiert eine Vielzahl von Trocknerbauarten in unterschiedlichen Baugrößen. Man unterscheidet Chargentrockner (z.B. Satzrockner, **Flächentrockner**, Hordentrockner) und kontinuierlich betriebene Trockner (z.B. **Ein- und Mehrbandtrockner**, Etagentrockner). Bandtrockner werden hauptsächlich für große Trocknungsleistungen eingesetzt.

Chargentrockner können auch für sehr kleine Erntemengen dimensioniert werden. Für größere Entfeuchtungsleistungen werden entsprechend große Rostflächen realisiert. Wenn mehrere Chargentrockner zur Verfügung stehen, kann flexibel auf variierende Erntemengen reagiert werden. Hinsichtlich der **Kombination unterschiedlicher Kulturen** sind zahlreiche Varianten möglich.

Die Errichtung neuer Trocknungsanlagen für Einsteiger erfordert eine andere Herangehensweise als die Erweiterung bereits bestehender Trocknungsanlagen. In jedem einzelnen Fall sind betriebsspezifische Lösungen erforderlich.

### **Spezifischer Energiebedarf**

Der **spezifische thermische Energiebedarf** wird sehr viel stärker von der Betriebsweise der Trocknungsanlagen und von der Witterung beeinflusst als von dem Trocknungsverhalten der einzelnen Pflanzenarten. Dies gilt insbesondere für die vergleichsweise niedrigen Temperaturen bei der Trocknung von Arzneipflanzen. Rückschlüsse über den spezifischen Wärmebedarf einzelner Pflanzenarten, die auf dem spezifischen Wärmebedarf von bestimmten Trocknungsanlagen beruhen, sind daher problematisch.

Mit Ausnahme wärmepumpenunterstützter Trocknungsverfahren wird der spezifische elektrische Energiebedarf maßgeblich von den **Ventilatoren** bestimmt. Der **Strömungswiderstand von Schüttungen** bzw. dicken Schichten von Arzneipflanzen nimmt im Verlauf der Trocknung deutlich ab. Ohne Drehzahlregelung verschiebt sich der **Betriebspunkt eines Ventilators** dadurch zu ungewollt hohen Luftmengen und zu einer höheren elektrischen Leistung. Die Drehzahl von Ventilatoren sollte deshalb geregelt werden.

## Trocknungstechnische Optimierung

Zur Reduzierung des Energiebedarfs von Trocknungsanlagen sollten zuerst die jeweiligen Trocknungsprozesse luftseitig und regelungstechnisch optimiert werden. Die Realisierung einer effizienten Energieversorgung ist dann der zweite Schritt.

Die Luftführung bzw. die Nutzung von unzureichend gesättigter Abluft beinhaltet in allen konvektiven Trocknungsverfahren erhebliche Potenziale. Zu den Möglichkeiten der lufttechnischen Effizienzsteigerung zählen die [Trocknung mit Teilumluft](#), die [Nutzung von Abluft in nachgeschalteten Trocknern](#) und die [Umlagerung und Zusammenlegung](#) von angetrockneten Arzneipflanzen auf einer kleineren Rostfläche. Bei der Chargentrocknung lassen sich durch diese Maßnahmen im Vergleich zum reinen Frischluft-Betrieb Energieeinsparungen von mehr als 25 % erzielen.

Fortschrittliche landwirtschaftliche Unternehmen nutzen diese Möglichkeiten bereits seit Jahren. Im Teilumluft-Betrieb sollte der [Umluftanteil](#) in Abhängigkeit vom Zustand der Abluft geregelt werden. Bei optimaler Ausführung und Anwendung verlängert sich die gesamte Trocknungsdauer nur geringfügig. Eine weitergehende Optimierung ist durch Einbeziehung des veränderlichen Zustands der Frischluft (Außenluft) möglich. Der geregelte Teilumluft-Betrieb ist auch bei bereits bestehenden Trocknungsanlagen durch nachträglichen Einbau der erforderlichen Luftklappen realisierbar.

Bei der Bandtrocknung kann durch Teilumluft eine höhere Sättigung der Abluft und dadurch ein kleinerer spezifischer Energiebedarf erreicht werden. Bei hohen Trocknungstemperaturen ist jedoch die Brandgefahr zu beachten, da sich Staub oder Rückstände im Trockner an Wärmeübertragern oder anderen heißen Flächen entzünden können.

## Energie aus nachwachsenden Rohstoffen

Für die Versorgung von Trocknungsanlagen mit thermischer und elektrischer Energie gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Wärme wird bisher überwiegend mit fossilen Energieträgern bereitgestellt. Mit der Ausnahme von Biogas und Holzhackgut spielen Brennstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bisher eine eher untergeordnete Rolle. Die [Heizwerte](#) von Holzpellets, Biodiesel oder Biogas sind durchweg kleiner als die Heizwerte von Heizöl oder Erdgas.

Große [Biomassekessel](#) zur Verbrennung von holzbasierten Brennstoffen werden größtenteils mit automatischer Brennstoffzufuhr angeboten. Zusätzlich ist ein nachgeschalteter Entstaubungsprozess erforderlich. Die spezifischen Investitionskosten fallen nicht zwangsläufig mit der Anlagengröße.

Bei [Biogasanlagen](#) gibt es eine ausgeprägte [Kostendegression](#): Je höher die elektrische Leistung, desto kleiner ist der spezifische Investitionsbedarf. Im Vergleich zum Stromverkauf gestaltet sich der Absatz von Wärme jedoch schwierig. Wärmenutzungskonzepte von Biogasanlagen sind deshalb verstärkt darauf ausgerichtet, einen größeren Teil der Wärmemenge außerhalb des Biogasprozesses zu nutzen. Ein wichtiger Wärmenutzungspfad ist die Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten.

### **Blockheizkraftwerke, Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung**

Mit **Blockheizkraftwerken** werden elektrische und thermische Energie gleichzeitig nutzbar gemacht. Je nach Anlagengröße liegen die Gesamtwirkungsgrade bei ca. 80 – 90 %. Bei Biogasanlagen ist bereits die Nutzung eines kleinen Anteils der gesamten KWK-Abwärme wirtschaftlich, z.B. für die Trocknung von Getreide. Bei nachgewiesener Abwärmenutzung werden hohe Vergütungssätze für die Stromeinspeisung gezahlt.

Aus energetischer Sicht ist es jedoch sinnvoller, nicht nur die Wärme, sondern auch die elektrische Energie selbst zu nutzen. Auch bei Blockheizkraftwerken fällt der spezifische **Investitionsbedarf** mit der Anlagengröße. Insbesondere die Verteilung und Nutzung der Wärme für die Trocknung (möglichst isolierte Warmwasserleitungen, Wärmeübertrager) erfordert jedoch zusätzliche Investitionen in erheblicher Größenordnung.

**Passive Wärmerückgewinnung** kommt nur für Gewürzpflanzen in Frage, die bei höheren Temperaturen getrocknet werden, z.B. in Bandtrocknungsanlagen.

### **Wärmepumpenunterstützte Trocknungsverfahren**

**Wärmepumpen** ermöglichen beträchtliche Einsparungen von **Primärenergie**. Investitionen in Elektro-Wärmepumpen, die Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen, sind gegenwärtig jedoch nicht wirtschaftlich. Dies liegt an den Preisen für elektrischen Strom im Verhältnis zu den Preisen für Wärme aus fossilen Energieträgern. Je kleiner das **Preisverhältnis**, desto größer ist die mögliche Einsparung von Energiekosten. Da die Brennstoffpreise pro kWh für Heizöl höher sind als für Erdgas, ist das Preisverhältnis Strom / Heizöl kleiner als das Preisverhältnis Strom / Erdgas. Bei wieder steigenden Heizölpreisen kann es deshalb sehr wohl sinnvoll sein, Wärme aus Heizöl durch Wärmepumpen zu ersetzen. Die weitere Entwicklung der Energiepreise bleibt jedoch abzuwarten.

Wird der Strom für Elektro-Wärmepumpen hingegen aus Blockheizkraftwerken bereitgestellt, so ändern sich die Verhältnisse. Die primärenergetischen Vorteile von Wärmepumpen schlagen sich dann auch in eingesparten Energiekosten nieder. Voraussetzung ist jedoch eine hohe **Leistungszahl (COP)**, die durch optimale Auslegung und Betriebsweise erreicht werden kann. Dies belegen wärmepumpenunterstützte Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen, die bereits seit Jahren in Betrieb sind.

Effiziente Wärmepumpen mit größeren Heizleistungen werden für den jeweiligen Anwendungsfall individuell konzipiert und gebaut. Die spezifischen **Investitionskosten** sind für große Anlagen ebenfalls kleiner als für kleine Anlagen. Das Preisniveau von Industriewärmepumpen ist seit einigen Jahren relativ konstant.

### **Solar unterstützte Trocknung**

**Luftkollektoren** zur Erzeugung solarer Prozesswärme sind bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und haben sich als robust, zuverlässig und wartungsarm erwiesen. In Mitteleuropa sollten Solartrockner grundsätzlich mit einer Zusatzheizung ausgestattet sein, um Zeiten mit wenig Sonnenschein überbrücken zu können. Bei der Trocknung von Arzneipflanzen darf jedoch immer nur ein Teil der Trocknungsluft solar erwärmt werden, um **an warmen Tagen** mit klarem Himmel und entsprechend hohen Werten der Globalstrahlung eine Überschreitung der zulässigen Trocknungstemperatur zu vermeiden. Dies kann durch **Mischung** der zu warmen

Luft aus der Luftkollektoranlage mit vergleichsweise kühlerer Frischluft erreicht werden. An sehr warmen Tagen muss die Solaranlage abgeschaltet werden.

Bei der Flächentrocknung von Arzneipflanzen ist eine Brutto-Kollektorfläche von ca. 3 – 4 m<sup>2</sup> pro m<sup>2</sup> Rostfläche ein guter Kompromiss, auch hinsichtlich der [Investitionskosten](#). Ununterbrochene Trocknung über mehrere Tage erfordert jedoch insbesondere auch in der Nacht eine kontinuierliche Erwärmung der Trocknungsluft. Der Beitrag, den Solarwärme zur Energieeinsparung leisten kann, ist dann relativ klein.

### **Betrieboptimierung**

Die maximale Auslastung von Trocknungsanlagen im Verlauf der Ernteperiode besitzt absolute Priorität. Dies erfordert eine konsequente Ausschöpfung aller Möglichkeiten der Rationalisierung und arbeitsorganisatorischen Optimierung. Dabei sind betriebspezifische Besonderheiten der Bewirtschaftung zu berücksichtigen. Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs sind unverzichtbar. Hierzu zählen eine gute Wärmedämmung, die beschriebenen Möglichkeiten zur lufttechnischen Effizienzsteigerung sowie die für eine [energieoptimierte Regelung](#) erforderliche Mess-, Steuer und Regelungstechnik.

### **Varianten der Energieversorgung**

Basierend auf Simulationsergebnissen zur Flächentrocknung von Kamilleblüten wurden verschiedene [Varianten der Energieversorgung](#) miteinander verglichen und primärenergetisch bewertet. Dabei wurde von thermischen und elektrischen Leistungsdaten ausgegangen, die bei mittleren Außentemperaturen zu Beginn der Trocknung erforderlich sind. Die untersuchten Varianten umfassen die Trocknung ohne und mit Teilumluft bei konventioneller Lufterwärmung (Erdgas), den Einsatz von Wärmepumpen mit Strom aus dem öffentlichen Netz, die Nutzung von BHKW-Abwärme, die Kombination von Wärmepumpen und BHKW sowie die Nutzung von Solarwärme.

Die Auswertung ergab [Primärenergieeinsparungen](#) zwischen 27 % für den geregelten Teilumluft-Betrieb und 73 % bei Kombination einer Wärmepumpe mit einem BHKW und Teilumluft. Der reine Frischluft-Betrieb mit Erdgas diente jeweils als Vergleichsbasis. Bei den beiden Varianten mit BHKW wurde die Stromeinspeisung primärenergetisch berücksichtigt.

### **Wirtschaftlichkeit der untersuchten Varianten zur Effizienzsteigerung**

Basierend auf den Ergebnissen der energetischen Analyse wurden [Amortisationsrechnungen](#) für die Trocknung mit Teilumluft, für die Nutzung von BHKW-Abwärme, für die Kombination einer Wärmepumpe mit einem BHKW und für die Nutzung von Solarwärme durchgeführt. Der Berechnung der Energiekosten wurden ein Strompreis von 20,0 Cent / kWh und ein Erdgaspreis von 4,0 Cent / kWh zugrunde gelegt. Die Vergütung für KWK-Strom, die Steuerentlastung für Erdgas und die Stromsteuerbefreiung wurden eingerechnet. Investitionskosten, Zuschläge und Wartungskosten wurden abgeschätzt. Fördermittel aus unterschiedlichen Förderprogrammen wurden ebenfalls berücksichtigt.

Um die jeweiligen Einzelinvestitionen objektiv beurteilen zu können, wurde ausschließlich die Differenz aus den eingesparten Energiekosten und den Gesamtkosten als jährlicher Gewinn gewertet. Der geregelte Teilumluft-Betrieb amortisiert sich in weniger als zwei Jahren. In

Abhängigkeit von den jährlichen Betriebsstunden liegen die [Amortisationsdauern](#) der anderen drei Varianten zwischen ca. sechs und zehn Jahren. Die höchste Einsparung von Energiekosten wird durch die Kombination einer Wärmepumpe mit einem BHKW erzielt.

Die Ergebnisse gelten für eine relativ kleine Rostfläche von 100 m<sup>2</sup>. Trocknungshallen für Arznei- und Gewürzpflanzen verfügen oft über Rostflächen von insgesamt 300 m<sup>2</sup> und mehr. Aufgrund der Kostendegression des spezifischen Investitionsbedarfs sollten für größere Anlagen auch kürzere Amortisationsdauern erreichbar sein.

### **Gesetzliche Rahmenbedingungen**

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen schaffen Planungssicherheit für Unternehmen. Durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG), das Energiesteuergesetz (EnergieStG) und das Stromsteuergesetz (StromStG) sind die Vergütung von KWK-Strom, die Höhe und die Dauer des Vergütungsanspruchs, die EEG-Umlage, die Steuerentlastung für Erdgas sowie die Steuerbefreiung für den Selbstverbrauch verbindlich geregelt.

### **Primärenergetische Bewertung von Maßnahmen zur Energieeinsparung**

Je nach Trocknungsverfahren und Energieversorgung unterscheiden sich der thermische und der elektrische Energiebedarf erheblich, und zwar sowohl absolut als auch in ihrem Verhältnis zueinander. Die vergleichende Bewertung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung sollte deshalb auf Basis der eingesparten [Primärenergie](#) erfolgen. Endenergie, die z.B. mit Gas- oder Stromzählern gemessen und abgerechnet wird, ist hierfür nur bedingt geeignet. Dies gilt nicht nur für die Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen, sondern allgemein für die Bewertung des thermischen Energiebedarfs zur Warmluftzeugung und des elektrischen Energiebedarfs, z.B. für Ventilatoren. Endenergie kann mit Hilfe von [Primärenergiefaktoren](#) in Primärenergie umgerechnet werden. Eine [Berechnungsformel für Wärmepumpen](#) wird ausführlich erläutert.

### **Fördermöglichkeiten**

Die Möglichkeiten der [Förderung von Investitionen](#) zur Energieeinsparung haben sich für Unternehmen, die in der landwirtschaftlichen Primärproduktion tätig sind, in den letzten Jahren stark verbessert. Für eine Energieeinsparung von mindestens 25 % bzw. 35 % betragen die möglichen Investitionszuschüsse 20 % bzw. 30 % (Bundesprogramm Energieeffizienz der BLE). Förderfähig sind dabei alle Anlagen bzw. Anlagenteile, die dazu beitragen, den Energieverbrauch des Systems Trocknungsanlage zu verringern (systemische Optimierung). Auch für Wärmepumpen (KfW-Förderung) und für die Bereitstellung von Prozesswärme mit Solarthermie (BAFA-Innovationsförderung) können hohe Tilgungs- bzw. Investitionszuschüsse gewährt werden.

### **Ausblick**

Bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen gibt es große Potenziale zur Steigerung der energetischen und wirtschaftlichen Effizienz. Insbesondere zur energieoptimierten Regelung und zur Realisierung wärmepumpenunterstützter Trocknungsanlagen besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf. Hier sind die Potenziale noch lange nicht ausgeschöpft.



## Literaturverzeichnis

- Arabhosseini, A., Huisman, W., van Boxtel, A., Müller, J. (2005). Modeling of the Equilibrium Moisture Content (EMC) of Tarragon (*Artemisia Dracunculus* L.). *International Journal of Food Engineering*, 1 (5), 1556-3758. DOI: 10.2202/1556-3758.1025
- Argyropoulos, D., Alex, R., Kohler, R., Müller, J. (2012). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) established by dynamic vapor sorption. *LWT - Food Science and Technology*, 47 (2), 324-331. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.01.026
- Baehr, H.D., Stephan, K. (2013). *Wärme- und Stoffübertragung* (8. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-36557-7
- BAFA (2017a). Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Heizen mit Erneuerbaren Energien. Online: [http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen\\_mit\\_Erneuerbaren\\_Energien/heizen\\_mit\\_erneuerbaren\\_energien\\_node.html](http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/heizen_mit_erneuerbaren_energien_node.html) [Abruf: 13.04.2017]
- BAFA (2017b). Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Innovationsförderung – Bereitstellung von Prozesswärme. Online: [http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen\\_mit\\_Erneuerbaren\\_Energien/Solarthermie/Gebaeudebestand/Innovationsfoerderung\\_Prozesswaerme/prozesswaerme\\_node.html](http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Solarthermie/Gebaeudebestand/Innovationsfoerderung_Prozesswaerme/prozesswaerme_node.html) [Abruf: 13.04.2017]
- BBodSchG (2015). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz). Online: <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/> [Abruf: 24.01.2017]
- BLE (2017a). [Persönliche Kommunikation zum Bundesprogramm Energieeffizienz, 08.05.2017].
- BLE (2017b). Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung: Bundesprogramm zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau. Online: [http://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Bundesprogramm-Energieeffizienz/bundesprogramm-energieeffizienz\\_node.html](http://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Bundesprogramm-Energieeffizienz/bundesprogramm-energieeffizienz_node.html) [Abruf: 13.04.2017]
- BMWi (2016a). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Hintergrundinformationen zur Besonderen Ausgleichsregelung – Antragsverfahren 2015 auf Begrenzung der EEG-Umlage 2016, Stand: 25. Mai 2016. Online: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/hintergrundinformationen-zur-besonderen-ausgleichsregelung-antragsverfahren-2015.html> [Abruf: 19.04.2017]
- BMWi (2016b). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi. Online: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe.did=476134.html> [Abruf: 02.03.2016]
- BMWi (2017a). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Marktanreizprogramm (MAP) – Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. Online: <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Foerderung/Marktanreizprogramm/marktanreizprogramm.html> [Abruf: 13.04.2017]
- BMWi (2017b). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Förderdatenbank – Förderprogramme und Finanzhilfen des Bundes, der Länder und der EU. Online: <http://www.foerderdatenbank.de/> [Abruf: 13.04.2017]
- Böhner, M., Heindl, A., Müller, J. (2012). Reduktion des fossilen Energieverbrauchs eines Bandrockners für Arznei- und Gewürzpflanzen durch die Abwärmenutzung eines Biogasblockheizkraftwerkes. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 17 (3), 115-121.
- Bomme, U., Brenndörfer, M., Heindl, A., Jäger, P., Reichardt, I., Schaub, B., Schimmel, U., Weiershäuser, L., Winter, P. (2002). *Heil- und Gewürzpflanzen – Daten für die Kalkulation von Deckungsbeiträgen und einzelkostenfreien Leistungen* (1. Aufl.). Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). ISBN: 3-7843-3213-6
- Bošnjaković, F. (1971). *Technische Thermodynamik, II. Teil* (5. Aufl.). Dresden: Verlag Theodor Steinkopff
- Böttcher, H. (2010). Nachernteprozesse. In: B. Hoppe (Hrsg.), *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II* (pp.



- 226-235). Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3
- Carrier, W.H. (1921). The theory of atmospheric evaporation – with special reference to compartment dryers. *The journal of industrial and engineering chemistry*, 13 (5), 432-438.
- DAB (2015). *Deutsches Arzneibuch*. Stuttgart: Mediengruppe Deutscher Apotheker Verlag. ISBN: ISBN 978-3-7692-6227-8
- Dachler, M., Pelzmann, H. (1999). *Arznei- und Gewürzpflanzen: Anbau, Ernte, Aufbereitung*. Klosterneuburg: Österr. Agrarverl. ISBN: 3-7040-1360-9
- DESTATIS (2017). Statistisches Bundesamt: Publikationen im Bereich Daten zur Energiepreisentwicklung. Online: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/Energiepreisentwicklung.html> [Abruf: 13.04.2017]
- DIN-CERTCO (2017). Zertifizierungsstelle des Deutschen Instituts für Normung, Datenbank. Online: [http://www.dincertco.de/de/dincertco/zertifikate\\_registrierungen/din\\_certco\\_datenbank/din\\_certco\\_datenbank.html](http://www.dincertco.de/de/dincertco/zertifikate_registrierungen/din_certco_datenbank/din_certco_datenbank.html) [Abruf: 13.02.2017]
- DLMB (2016). *Deutsches Lebensmittelbuch – Leitsätze 2016*. Hamburg: Behr's Verlag. ISBN: 978-3-95468-391-8
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1991). *Solar engineering of thermal processes* (2. Aufl.). New York: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-51056-4
- DWD (2016). Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Online: <http://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> [Abruf: 28.11.2016]
- EAB (2016). *Europäisches Arzneibuch Pharmacopoea Europaea (Ph. Eur.)*. Stuttgart: Mediengruppe Deutscher Apotheker Verlag. ISBN: 978-3-7692-6511-8
- EEG (2017). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Online: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html) [Abruf: 19.04.2017]
- EEX (2017). European Energy Exchange AG: Üblicher Strompreis gemäß KWKG-Gesetz. Online: <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/kwk-index> [Abruf: 19.04.2017]
- Elsner, N., Dittmann, A. (1993). *Grundlagen der Technischen Thermodynamik – Band 1: Energielehre und Stoffverhalten* (8. Aufl.). Berlin: Akademie Verlag GmbH. ISBN: 3-05-501390-5
- EnergieStG (2016). Energiesteuergesetz. Online: <http://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/> [Abruf: 19.04.2017]
- EnEV (2013). Energieeinsparverordnung: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Online: [https://www.gesetze-im-internet.de/enev\\_2007/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/index.html) [Abruf: 03.02.2017]
- Epperlein, H. (1989). Strömung im Luftkanal (Luftleitung). In: Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik (Hrsg.), *Handbuch der Klimatechnik – Band 1: Grundlagen* (pp. 137-184). Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH. ISBN: 3-7880-7336-5
- EU-852/2004 (2004). Verordnung (EG) Nr. 852/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Lebensmittelhygiene. Online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=URISERV%3Af84001> [Abruf: 24.01.2017]
- EU-2009/28/EG (2009). Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. Online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0028> [Abruf: 10.04.2017]
- EU-2009/28/EG (2013). Beschluss der Kommission vom 1. März 2013 zur Festlegung von Leitlinien für die Mitgliedstaaten zur Berechnung der durch verschiedene Wärmepumpen-Technologien aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Energie gemäß Artikel 5 der Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32013D0114> [Abruf: 10.04.2017]
- Fisher, E.A. (1935). Some fundamental principles of drying. *Journal of the society of chemical industry, London*, 54, 343-348.

- FNR (2013). Arzneipflanzen – Anbau und Nutzen (3. Aufl.). Gülzow: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.). Online: <https://mediathek.fnr.de/arzneipflanzen-anbau-und-nutzen.html> [Abruf: 26.04.2017]
- FNR (2014a). Tagungsband zur 2. Tagung Arzneipflanzenanbau in Deutschland – mit koordinierter Forschung zum Erfolg. 16./17. Oktober 2013, Bad Blankenburg. Gülzower Fachgespräche Band 44. Gülzow: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), ISBN: 978-3-942147-14-9. Online: <https://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/arzneipflanzen/arzneipflanzenanbau-in-deutschland-mit-koordinierter-forschung-zum-erfolg.html> [Abruf: 01.06.2017]
- FNR (2014b). Leitfaden Feste Biobrennstoffe (4. Aufl.). Gülzow: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), ISBN: 9783000153891. Online: <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/feste-biobrennstoffe/leitfaden-feste-biobrennstoffe.html> [Abruf: 26.04.2017]
- FNR (2016). Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung (7. Aufl.). Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), ISBN: 3-00-014333-5. Online: <https://mediathek.fnr.de/leitfaden-biogas.html> [Abruf: 26.04.2017]
- Grammer-Solar (2017a). [Persönliche Kommunikation zum GLK-Luftkollektor, 20.04.2017].
- Grammer-Solar (2017b). Datenblatt JumboSolar – Technische Daten zum GLK Luftkollektor. Online: <http://www.grammer-solar.com/de/solarluft/der-kollektor.html> [Abruf: 13.02.2017]
- HAB (2016). *Homöopathisches Arzneibuch*. Stuttgart: Mediengruppe Deutscher Apotheker Verlag. ISBN: 978-3-7692-6536-1
- Halemba, R. (2015). *Thermodynamische Analyse eines Bandtrockners und ökonomische Bewertung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung*. Masterthesis, Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- Hauke, L. (2010). *Vertragsanbau von Arzneipflanzen – Erfahrungen aus einem thüringischen Landwirtschaftsbetrieb*. BMELV-Tagung "Arzneipflanzenanbau in Deutschland – mit koordinierter Forschung zum Erfolg", 25.-26. Oktober 2010, Neustadt an der Weinstraße.
- Heindl, A. (2005). Drying of chamomile flowers (*Matricaria recutita* L.). In: R. Franke, H. Schilcher (Hrsg.), *Chamomile Industrial Profiles* (pp. 190-202). Boca Raton: CRC Press
- Heindl, A., Hoppe, B. (2010). Aufbereitung vor der Trocknung. In: B. Hoppe (Hrsg.), *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II* (pp. 235-239). Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3
- Heindl, A., Müller, J. (2010). Technische Trocknung. In: B. Hoppe (Hrsg.), *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II* (pp. 239-294). Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3
- Heindl, A. (2016). *Praxisbuch Bandtrocknung – Grundlagen, Anwendung, Berechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-53904-6
- HLUG (2015). Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Online: [www.hlug.de](http://www.hlug.de) [Abruf: 02.09.2015]
- Hoppe, B. (2005). *Studie zum Stand des Anbaus von Arznei- und Gewürzpflanzen in Deutschland (2003) und Abschätzung der Entwicklungstrends in den Folgejahren. Abschlussbericht zum BMVEL/FNR-Projekt 22006604*. Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V.
- Hoppe, B. (2010a). Charakteristik der kontrollierten integrierten Produktion. In: B. Hoppe (Hrsg.), *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II* (pp. 15-17). Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3
- Hoppe, B. (Hrsg.) (2009). *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 1: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil I*. Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-54-6
- Hoppe, B. (Hrsg.) (2010b). *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II*. Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3

- IAPT (2012). *International Association for Plant Taxonomy: International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Melbourne Code)*. Oberreifenberg: Koeltz Scientific Books. ISBN: 978-3-87429-425-6
- Jubaer, H., Ziegler, T., Mellmann, J. (2013). *Saving primary energy in batch-type drying of medicinal plants*. Sixth Nordic Drying Conference (NDC 2013), 5-7 June 2013, USB Proceedings, Copenhagen, Denmark.
- Jubaer, H., Ziegler, T. (2016a). *Drying of Medicinal and Spice Plants – Branch-specific Technical and Economic Feasibility. Deliverable for Work Package 6 of the CORNET-project "Energetic and Environmental Optimisation of Drying Processes by Integration of Heat Pumps (HP4Drying)"*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Jubaer, H., Ziegler, T. (2016b). *Industrial Case Study – Continuous Drying of Parsley. Deliverable for Work Package 7 of the CORNET-project "Energetic and Environmental Optimisation of Drying Processes by Integration of Heat Pumps (HP4Drying)"*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Jubaer, H., Ziegler, T., Halemba, R. (2016). *Industrial Case Study – Continuous Drying of Lemon Balm and Dandelion. Deliverable for Work Package 7 of the CORNET-project "Energetic and Environmental Optimisation of Drying Processes by Integration of Heat Pumps (HP4Drying)"*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Hrsg.). (2009). *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3540850946
- Katz, P., Schedwill, H., Epperlein, H. (1989). Kanalnetzrechnung. In: Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik (Hrsg.), *Handbuch der Klimatechnik – Band 2: Berechnung und Regelung* (3. Aufl., pp. 149-205). Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH. ISBN: 3-7880-7324-1
- KFW (2017). KFW-Bankengruppe: Programm Erneuerbare Energien "Premium". Online: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/Erneuerbare-Energien-Premium-\(271-281\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/Erneuerbare-Energien-Premium-(271-281)/) [Abruf: 13.04.2017]
- Kirn, H. (1983). *Wärmepumpen – Grundlagen der Wärmepumpentechnik* (6. Aufl.). Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH. ISBN: 9783788072094
- Krischer, O. (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik - Trocknungstechnik, Erster Band* (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 3-540-08280-8
- Kröll, K. (1978). *Trockner und Trocknungsverfahren – Trocknungstechnik, Zweiter Band* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 3-540-08108-9
- Kröll, K., Kast, W. (1989). *Trockner und Trocknungsverfahren – Trocknungstechnik, Dritter Band* (1. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 3-540-18472-4
- Kullen, A., Albrich, H. (1988). Ventilatoren. In: Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik (Hrsg.), *Handbuch der Klimatechnik – Band 3: Bauelemente* (pp. 241-275). Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH. ISBN: 3-7880-7336-5
- KWKG (2017). Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. Online: [https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg\\_2016/](https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/) [Abruf: 19.04.2017]
- Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M., Voß, A. (2008). *Industrielle Großwärmepumpen – Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele. Forschungsbericht*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
- Leifer, A. (2017). *Energetische Effizienzanalyse der Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen anhand eines thermodynamischen Modells*. Masterthesis, Universität Kassel.
- Lykow, A.W. (1955). *Experimentelle und theoretischen Grundlagen der Trocknung*. Berlin: VEB Verlag Technik
- Maltry, W. (1975). *Wirtschaftliches Trocknen – Verfahrenstechnische und energiewirtschaftliche Grundlagen*. Dresden: Verlag Theodor Steinkopff
- Maltry, W., Pötke, E., Schneider, B. (1975). *Landwirtschaftliche Trocknungstechnik* (2. Aufl.). Berlin: VEB Verlag Technik
- Maltry, W. (1996a). Rost- und Bandtrockner. In: S. Weiß (Hrsg.), *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Thermisches Trennen – Ausrüstungen und ihre Berechnung* (2. Aufl., pp. 519-538). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. ISBN: 3-342-00680-3

- Maltry, W. (1996b). Trockner mit Solarenergie. In: S. Weiß (Hrsg.), *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Thermisches Trennen – Ausrüstungen und ihre Berechnung* (2. Aufl., pp. 599-610). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. ISBN: 3-342-00680-3
- Maltry, W. (1996c). Auswahl von Trocknern. In: S. Weiß (Hrsg.), *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Thermisches Trennen – Ausrüstungen und ihre Berechnung* (2. Aufl., pp. 509-513). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. ISBN: 3-342-00680-3
- Matthies, H.J. (1956). *Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH
- Meixner, H., Stein, R. (2002). *Blockheizkraftwerke – Ein Leitfaden für den Anwender* (5. Aufl.). Köln: TÜV-Verlag. ISBN: 9783824906406
- Mellmann, J., Fürll, C. (2007). *Ermittlung des Optimierungsbedarfes bei der Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen in Agrarbetrieben der neuen Bundesländer. Schlussbericht zum BMVEL/FNR-Projekt 22003904*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Mellmann, J., Fürll, C. (2008). Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen – spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial / Drying facilities for medicinal and aromatic plants – specific energy consumption and potential for optimisation. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 13 (3), 127-133.
- Meyer, U., Blum, H., Gärber, U., Hommes, M., Pude, R., Gabler, J. (2010). *Praxisleitfaden "Krankheiten und Schädlinge im Arznei- und Gewürzpflanzenanbau"*. Braunschweig: Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft e.V. (DPG), Selbstverlag. ISBN: 978-3-941261-09-9
- Militzer, K.-E. (1996a). Schrank-, Kammer- und Kanaltrockner. In: S. Weiß (Hrsg.), *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Thermisches Trennen – Ausrüstungen und ihre Berechnung* (2. Aufl., pp. 513-519). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. ISBN: 3-342-00680-3
- Militzer, K.-E. (1996b). Grundlagen der mathematischen Modellierung von Trocknern. In: S. Weiß (Hrsg.), *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Thermisches Trennen – Ausrüstungen und ihre Berechnung* (2. Aufl., pp. 491-509). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. ISBN: 3-342-00680-3
- Minea, V. (2012, 11-15 November 2012). *Drying heat pumps: Future R&D needs and challenges*. 18th International Drying Symposium (IDS 2012), 11-15 November 2012, CD-ROM Proceedings, Xiamen, China.
- Mollier, R. (1923). Ein neues Diagramm für Dampfluftgemische. *VDI-Zeitschrift*, 67, 869-872.
- Mollier, R. (1929). Das i,x-Diagramm für Dampfluftgemische. *VDI-Zeitschrift*, 73, 1009-1013.
- Mujumdar, A.S. (2006). Some recent developments in drying technologies appropriate for postharvest processing. *Int. J. Postharvest Technology and Innovation*, 1 (1), 76-92. DOI: 10.1504/IJPTI.2006.009185
- Müller, J. (1992). *Trocknung von Arzneipflanzen mit Solarenergie*. Dissertation, Universität Hohenheim. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co. ISBN: 3-8001-8234-3.
- Müller, J., Heindl, A. (2006). Drying of medicinal plants. In: R.J. Bogers, L.E. Craker, D. Lange (Hrsg.), *Medicinal and Aromatic Plants* (pp. 237-252): Springer. ISBN: 978-1-4020-5448-8
- PGF (2010). Planungsgruppe Fölsche, Architekten + Ingenieure, Weimar – Neubau Pfefferminztrocknung in Ostthüringen. Online: [http://pgf-bauplanung.de/cms.de/index.php?option=com\\_projectshow&act=object&task=showEO&id=40](http://pgf-bauplanung.de/cms.de/index.php?option=com_projectshow&act=object&task=showEO&id=40) [Abruf: 24.04.2017]
- Plescher, A. (2004). *Einfluss nacherntetechnologischer Prozesse auf die Produktqualität Artern: Pharmaplant GmbH*
- Sagemüller, F., Heindl, A. (2010). Mechanische und pneumatische Verfahren. In: B. Hoppe (Hrsg.), *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus – Band 2: Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus, Teil II* (pp. 340-352). Bernburg: Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. ISBN: 978-3-935971-55-3
- Schaumann, G., Schmitz, K.W. (2010). *Kraft-Wärme-Kopplung* (4. Aufl.). Heidelberg: Springer. ISBN: ISBN 978-3-642-01424-6



- Schedwill, H. (1989). Wärmeübertrager. In: Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik (Hrsg.), *Handbuch der Klimatechnik – Band 3: Bauelemente* (pp. 1-47). Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH. ISBN: 3-7880-7336-5
- Schlünder, E.-U., Tsotsas, E. (1988). *Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten*. Stuttgart, New York: Georg Thieme. ISBN: 3-13-713001-8
- Schmitz, N., Pforte, L. (2014). Pharmazeutische Produkte. In: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), *Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 34* (pp. 573-674). Gülzow. ISBN: 978-3-942147-18-7
- Soysal, Y., Ötzeekin, S. (2001). Comparison of Seven Equilibrium Moisture Content Equations for some Medicinal and Aromatic Plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78 (1), 57-63. DOI: 10.1006/jaer.2000.0636
- StromStG (2016). Stromsteuergesetz. Online: <https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/index.html> [Abruf: 19.04.2017]
- Stryi-Hipp, G., Thoma, C., Welz, C., Kramer, K., Fortuin, S. (2014). *Luko-E – Grundlagen zur Luftkollektorentwicklung. Abschlussbericht zum BMU-Projekt 0325959A*. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
- Sturm, B. (2010). *Einfluss der Führung des Trocknungsprozesses auf den Trocknungsverlauf und die Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter*. Dissertation, Universität Kassel, Witzenhausen. Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 491 des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG).
- TFZ (2017). Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe – Entwicklung der Brennstoffpreise. Online: <http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/energetischenutzung/035092/index.php> [Abruf: 24.04.2017]
- UBA (2017). Umweltbundesamt: Stromverbrauch in Deutschland. Online: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/stromverbrauch> [Abruf: 19.04.2017]
- VDI-GVC (2013). *Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas* (Hrsg.: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen GVC, 11. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-19980-6
- Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A., Jakobs, R. (2014). *Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland. Endbericht zum BMWi-Forschungsprojekt 0327514A*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) und Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW), Abteilung Energiewirtschaft und Systemtechnische Analysen (ESA)
- Wöltje, J. (2013). *Investition und Finanzierung – mit Arbeitshilfen online: Grundlagen, Verfahren, Übungsaufgaben und Lösungen*. Freiburg, München: Haufe Lexware. ISBN: 9783648032336
- Ziegler, T. (1999). *Modellierung und Simulation der solar unterstützten Schüttgutdrying am Beispiel Weizen*. Dissertation, TU Dresden. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3 Nr. 620, Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 3-18-362003-3.
- Ziegler, T., Mellmann, J. (2008). Thermodynamische Wechselbeziehungen bei einem Flächentrocknungsprozess mit Wärmepumpen – Grundlagen und Anwendung / Thermodynamic interactions in a fixed bed drying process using heat pumps – fundamentals and implementation. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 13 (4), 167-172.
- Ziegler, T., Teodorov, T., Mellmann, J. (2010). *Efficient drying of medicinal plants by combining heat pumps with conventional air heating*. 17th International Drying Symposium (IDS 2010), 3-6 October 2010, Proceedings vol. B, 755-762, Poster, Magdeburg, Germany.
- Ziegler, T., Teodorov, T., Schütz, M., Mellmann, J. (2011). *Untersuchungen zur Optimierung einer Flächentrocknungsanlage. Schlussbericht zum BMELV/FNR-Teilvorhaben 22006107 im Verbundprojekt "Optimierung von Trocknungsverfahren für Arznei- und Gewürzpflanzen hinsichtlich Energieeinsatz, Wirtschaftlichkeit und Produktqualität"*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Ziegler, T., Jubaer, H., Mellmann, J. (2012). *Performance analysis of a heat pump dryer operated in partially open mode*. 18th International Drying Symposium (IDS 2012), 11-15 November 2012, CD-ROM Proceedings, Xiamen, China.

- Ziegler, T., Jubaer, H., Mellmann, J. (2013a). Simulation of a heat pump dryer for medicinal plants. *Chemie Ingenieur Technik*, 85 (3), 353-363. DOI: 10.1002/cite.201200123
- Ziegler, T., Jubaer, H., Teodorov, T., Mellmann, J. (2013b). *Effizienzsteigerung der Flächentrocknung. Schlussbericht zum BMELV/FNR-Teilvorhaben 22012609 im Verbundprojekt "Zeitnahe und nachhaltige Verbesserung bestehender Band-, Kippborden und Flächentrockner für Kamille, Melisse und Baldrian"*. Potsdam: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
- Ziegler, T., Jubaer, H., Halemba, R. (2016a). *Effizienzsteigerung der Bandtrocknung – Energetische und wirtschaftliche Analyse von zwei Praxisanlagen*. 26. Bernburger Winterseminar für Arznei- und Gewürzpflanzen, 23.-24. Februar 2016, Tagungsband, 30-31, Bernburg-Strenzfeld.
- Ziegler, T., Jubaer, H., Schütz, M. (2016b). Increasing the energy efficiency of batch-type drying with partial air recirculation. *Chemie Ingenieur Technik*, 88 (1-2), 208-214. DOI: 10.1002/cite.201400150
- Zimmer, S., Müller, J. (2004). Erntetechnologie von Arznei- und Gewürzpflanzen. *Gülzower Fachgespräche Band 22*. Gülzow: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.)



## Anhang

Der Anhang enthält Detailinformationen zum Nachschlagen, inhaltliche Ergänzungen zu den einzelnen Kapiteln sowie Kontaktadressen.

Tabellenverzeichnis Anhang .....	143
Abbildungsverzeichnis Anhang .....	145
Verzeichnis der Symbole und Indizes .....	147
A Allgemeine Tabellen .....	150
B Produktspezifische Tabellen und Abbildungen.....	161
C Trocknerspezifische Tabellen und Abbildungen.....	167
D Energetische und anlagentechnische Tabellen und Abbildungen .....	171
E Wirtschaftliche Tabellen und Abbildungen .....	180
F Inhaltliche Ergänzungen .....	185
F.2 Ergänzungen zu Kapitel 2: Produktspezifische Aspekte .....	185
F.3 Ergänzungen zu Kapitel 3: Trocknungstechnische Grundlagen .....	191
F.4 Ergänzungen zu Kapitel 4: Lufttechnische Effizienzsteigerung .....	199
G Kontaktadressen und Ansprechpartner.....	201
Liste bisher erschienener Bornimer Agrartechnische Berichte .....	203

## Tabellenverzeichnis Anhang

<b>Tabelle A.1:</b> Berechnungsformeln zum Feuchtegehalt, Wassergehalt, Eintrocknungsverhältnis und spezifischen Wasserentzug.....	150
<b>Tabelle A.2:</b> Eintrocknungsverhältnis (E) sowie spezifischer Wasserentzug pro kg Trockengut ( $W_{TG}$ ) und pro kg Frischgut ( $W_{FG}$ ) für unterschiedliche Feuchtegehalte des Frischgutes ( $F_{FG}$ ).....	151
<b>Tabelle A.3:</b> Formeln zur Berechnung der Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft.....	152
<b>Tabelle A.4:</b> Konstanten zur Berechnung der Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft.....	152
<b>Tabelle A.5:</b> Grundlegende Berechnungsformeln zur Trocknung bei reiner Frischluft-erwärmung.....	153
<b>Tabelle A.6:</b> Formeln zur Berechnung der Trocknung im Teilumluft-Betrieb.....	154
<b>Tabelle A.7:</b> Berechnungsformeln zum Lufttransport in Kanalsystemen.....	155
<b>Tabelle A.8:</b> Näherungsformeln zum Druckverlust in Schüttungen.....	156
<b>Tabelle A.9:</b> Berechnungsformeln für Ventilatoren.....	157
<b>Tabelle A.10:</b> Massen- und Energiebilanzen für einen kontinuierlichen Trockner (vereinfacht).....	158
<b>Tabelle A.11:</b> Massen- und Energiebilanzen für Chargentrockner (vereinfacht).....	159
<b>Tabelle A.12:</b> Formeln zur Berechnung trocknungstechnischer Kennzahlen.....	160
<b>Tabelle B.1:</b> Verwendete Pflanzenteile und wertbestimmende Inhaltsstoffe unterschiedlicher Arzneipflanzen.....	161
<b>Tabelle B.2:</b> Qualitätsanforderungen an unterschiedliche Arzneipflanzen.....	162
<b>Tabelle B.3:</b> Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung für ausgewählte Pflanzenarten der Flächentrocknung.....	163
<b>Tabelle B.4:</b> Nutzungsdauern, Erntezeiträume und Anzahl der Ernteschnitte für unterschiedliche Pflanzenarten.....	165
<b>Tabelle B.5:</b> Durchschnittliche Frischgut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau.....	165
<b>Tabelle B.6:</b> Minimale und maximale Frischgut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau.....	166
<b>Tabelle C.1:</b> Schichthöhe, Schüttdichte und spezifische Trockengut-Masse pro $m^2$ Rostfläche für ausgewählte Pflanzenarten.....	167
<b>Tabelle C.2:</b> Ernteflächen, Erntemengen und Trockengut-Erträge pro Hektar bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. im Jahr 2015.....	167
<b>Tabelle C.3:</b> Ermittlung täglicher Erntemengen und Ernteflächen im großflächigen Anbau (gesamte Rostfläche: $200 m^2$ , exemplarisch).....	168
<b>Tabelle D.1:</b> Umrechnung von Energieeinheiten.....	171
<b>Tabelle D.2:</b> Heiz- und Brennwerte unterschiedlicher Brennstoffe.....	171
<b>Tabelle D.3:</b> Primärenergiefaktoren unterschiedlicher Energieträger.....	172
<b>Tabelle D.4:</b> Berechnungsformeln für solare Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung.....	176

<b>Tabelle E.1:</b>	Durchschnittliche Energiepreise und Preisverhältnisse für industrielle Abnehmer in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017). .....	180
<b>Tabelle E.2:</b>	Durchschnittliche Preise und Preisverhältnis für elektrischen Strom und Erdgas bei Abgabe an private Haushalte in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).....	180
<b>Tabelle E.3:</b>	Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungsansätze für KWK-Anlagen auf Motorenbasis nach Schaumann & Schmitz (2010). .....	182
<b>Tabelle E.4:</b>	Amortisationsrechnung für drei Varianten der Energieversorgung bei 3.000 Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung).....	183
<b>Tabelle G.1:</b>	Kontaktadressen zur Förderung von Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen und zur Forschungsförderung. ....	201
<b>Tabelle G.2:</b>	Kontaktadressen von Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen. ....	201
<b>Tabelle G.3:</b>	Kontaktadressen von Verbänden. ....	202

**Abbildungsverzeichnis Anhang**

<b>Abb. B.1:</b>	Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung von Kraut- und Blattdrogen bei chargenweiser (links) und kontinuierlicher Trocknung (rechts) in Anlehnung an Müller & Heindl (2006). .....	164
<b>Abb. C.1:</b>	Bewirtschaftungsschema I: Frischgutbelegung auf den Rosten 1 und 2 an sechs Tagen pro Woche, Umlagerung am zweiten, dritten und vierten Trocknungstag (außer Sonntag) (Ziegler et al., 2013b). .....	170
<b>Abb. C.2:</b>	Bewirtschaftungsschema II: Frischgutbelegung auf den Rosten 1 und 2 an drei Tagen pro Woche, Umlagerung am dritten (außer Sonntag) und am vierten Trocknungstag (Ziegler et al., 2013b). .....	170
<b>Abb. C.3:</b>	Bewirtschaftungsschema III: Frischgutbelegung auf den Rosten 1, 2 und 3 an drei Tagen pro Woche, Umlagerung am dritten (außer Sonntag) und am vierten Trocknungstag (Ziegler et al., 2013b). .....	170
<b>Abb. D.1:</b>	Technische Implementierungen des Wärmepumpenprinzips (Wolf et al., 2014).....	173
<b>Abb. D.2:</b>	Tagessummen der Solarstrahlungsdichte in der Horizontalebene am Standort Ranis im Jahresverlauf (DWD, 2016).....	174
<b>Abb. D.3:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der mittleren Außenlufttemperatur gemittelt über die einzelnen Monate Mai bis Oktober am Standort Ranis (DWD, 2016). .....	174
<b>Abb. D.4:</b>	Temperatur und relative Feuchte der Außenluft für eine Woche im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).....	175
<b>Abb. D.5:</b>	Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene und Wassergehalt der Außenluft für eine Woche im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).....	175
<b>Abb. D.6:</b>	Linearisierte Wirkungsgradkennlinien eines Luftkollektors mit unterströmtem Absorber bei unterschiedlichen Massenströmen. ....	177
<b>Abb. D.7:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene gemittelt über die einzelnen Monate Mai bis Oktober am Standort Ranis (DWD, 2016).....	178
<b>Abb. D.8:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der maximalen, mittleren und minimalen Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).....	178
<b>Abb. D.9:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte in der Kollektorebene in den Monaten Mai bis Oktober am Standort Ranis (Südausrichtung, Anstellwinkel: 45°). .....	179
<b>Abb. D.10:</b>	Durchschnittliche Tagesverläufe der Nutzwärmeleistung eines Luftkollektors in den Monaten Mai bis Oktober am Standort Ranis (Südausrichtung, Anstellwinkel: 45°). .....	179
<b>Abb. E.1:</b>	Durchschnittliche Preise und Preisverhältnis für elektrischen Strom und Erdgas bei Abgabe an private Haushalte in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).....	181
<b>Abb. E.2:</b>	Einsparung von Energiekosten im Teilumluft-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung und Strompreisen.....	181
<b>Abb. E.3:</b>	Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung mit und ohne Fördermittel (Abschätzung). .....	184

<b>Abb. F.1:</b>	Sorptionsisothermen von Estragon ( <i>Artemisia dracunculus</i> L.), berechnet mit der modifizierten Halsey-Gleichung (Arabhosseini et al., 2005). .....	192
<b>Abb. F.2:</b>	Adsorptionsisothermen von Kamille, Pfefferminze und Lorbeer (links) sowie Majoran und Thymian (rechts) bei jeweils 25 °C, berechnet mit Modellparametern nach Soysal & Öztekin (2001).....	193
<b>Abb. F.3:</b>	Adsorptionsisothermen von Melisse-Blättern ( <i>Melissa officinalis</i> L.) mit berechneten Kurven nach unterschiedlichen Modellgleichungen (Argyropoulos et al., 2012). .....	194
<b>Abb. F.4:</b>	Desorptionsisothermen von Pfefferminze und Majoran (Maltry et al., 1975).....	195
<b>Abb. F.5:</b>	Mollier h,Y-Diagramm mit Linien gleicher normierter Luftfeuchte $\Psi$ (Zulufttemperatur 40 °C).....	196
<b>Abb. F.6:</b>	Messungen zum Druckverlust von Kamilleblüten im Verlauf der Satz-trocknung (Ziegler et al., 2013b).....	197
<b>Abb. F.7:</b>	Normierte Luftfeuchte $\Psi$ im Verlauf der Satz-trocknung von Kamilleblüten (Zulufttemperatur 38 °C).....	199
<b>Abb. F.8:</b>	Normierte Luftfeuchte $\Psi$ und Entfeuchtungsleistung pro m <sup>2</sup> Rostfläche über dem mittleren Gutwassergehalt X (Modell).....	199
<b>Abb. F.9:</b>	Temperatur und relative Feuchte der Abluft bei der Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer. ....	200
<b>Abb. F.10:</b>	Entfeuchtungsleistung und gesamte Wassermenge pro m <sup>2</sup> Rostfläche bei der Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer. ....	200

## Verzeichnis der Symbole und Indizes

### Lateinische Symbole

$A$	$m^2$	Fläche, durchströmte Querschnittsfläche
$a_w$	–	Wasseraktivität ( $a_w$ -Wert)
$c$	$J/(kg \cdot K)$	spez. Wärmekapazität
$COP$	–	Leistungszahl von Wärmepumpen ( <i>coefficient of performance</i> )
$E$	–	Eintrocknungsverhältnis
$E_{el}$	$J$	elektrische Energie
$F$	%	Feuchtegehalt des Gutes (bezogen auf das feuchte Gut)
$F'$	–	Wirkungsgradfaktor eines thermischen Solarkollektors
$G$	$J$	Summe der Globalstrahlung (in einem bestimmten Zeitraum)
$\dot{G}$	$W/m^2$	Globalstrahlungsdichte
$h$	$m$	Höhe, Schichthöhe
$h$	$J/kg$	spez. Enthalpie (bezogen auf trockene Luft)
$\Delta h$	$J/kg$	spez. Enthalpiedifferenz der Luft
$\Delta h_{v,0}$	$J/kg$	spez. Verdampfungswärme von Wasser bei 0 °C ( $2.500 \text{ kJ/kg}$ )
$H_i$	$J/kg$	Heizwert (unterer Heizwert, i = inferior)
$H_s$	$J/kg$	Brennwert (oberer Heizwert, s = superior)
$K$	€	Kosten
$l$	$kg/kg$	spez. Luftbedarf (bezogen auf verdunstetes Wasser)
$m$	$kg$	Masse
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$P$	$W$	elektrische Leistung
$p$	$Pa$	Druck, Partialdruck, Gesamtdruck
$q$	$J/kg$	spez. Wärmebedarf (bezogen auf verdunstetes Wasser)
$Q$	$J$	Wärmemenge
$\dot{Q}$	$W$	Wärmestrom, Wärmeleistung
$R$	$J/(kg \cdot K)$	spez. Gaskonstante
$SEB$	$J/kg$	spez. elektrischer Energiebedarf (bezogen auf verdunstetes Wasser)
$SPB$	$J/kg$	spez. Primärenergiebedarf (bezogen auf verdunstetes Wasser)
$STB$	$J/kg$	spez. thermischer Energiebedarf (bezogen auf verdunstetes Wasser)
$T$	$K$	Temperatur
$t$	$s$	Zeit
$ULA$	–	Umluftanteil
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$w$	$m/s$	Geschwindigkeit
$W$	$kg/kg$	spez. Wasserentzug (bezogen auf Frischgut, Trockengut oder Trockensubstanz)
$X$	$kg/kg$	Wassergehalt des Gutes (bezogen auf die Trockensubstanz)



$Y$	$kg/kg$	Wassergehalt der Luft (bezogen auf trockene Luft)
$\Delta Y$	$kg/kg$	Wassergehaltsdifferenz der Luft

### Griechische Symbole

$\Delta$	–	Differenz
$\varepsilon_H$	–	Heizleistungszahl von Wärmepumpen
$\zeta$	–	Widerstandsbeiwert (Zeta-Wert)
$\eta$	–	Wirkungsgrad
$\vartheta$	$^{\circ}C$	Celsius-Temperatur
$\mu$	$N \cdot s/m^2$	dynamische Viskosität
$\nu$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\Pi$	–	Primärenergiefaktor (PE-Faktor)
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\sigma$	–	Stromkennzahl bei Blockheizkraftwerken
$\varphi$	–	relative Feuchte der Luft (r.F.), dezimal oder in %
$\Psi$	–	normierte Luftfeuchte
$\Omega$	$K \cdot m^2/W$	reduzierte Temperaturdifferenz eines thermischen Solarkollektors

### Indizes

<i>AL</i>	Abluft
<i>akt</i>	aktuell, zu einem bestimmten Zeitpunkt
<i>Ap</i>	Aperturfläche eines thermischen Solarkollektors (ohne Rahmen)
<i>atm</i>	atmosphärisch
<i>aus</i>	Austritt
<i>B</i>	Brennstoff
<i>brutto</i>	Bruttofläche eines thermischen Solarkollektors (inkl. Rahmen)
<i>C</i>	Carnot
<i>D</i>	Dampf
<i>dyn</i>	dynamischer Druck
<i>ein</i>	Eintritt
<i>el</i>	elektrisch
<i>FG</i>	Frischgut (feuchtes Gut, Frischware)
<i>FL</i>	Frischlufte (Außenluft)
<i>FU</i>	Frequenzumrichter
<i>G</i>	Gut (Trocknungsgut)
<i>ges</i>	gesamt
<i>H</i>	Heizung
<i>ideal</i>	bei idealer Trocknung, ideale Wärmepumpe
<i>i. N.</i>	in Normbedingung (101.325 Pa, 0 °C)
<i>K</i>	Kältemittelverdichter

<i>Koll</i>	Kollektor (Solarkollektor)
<i>konv</i>	konventionelle Energieträger
<i>L</i>	Luft, trockene Luft
<i>m</i>	Mittelwert
<i>max</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimalwert
<i>nutz</i>	nutzbare Wärmemenge oder Wärmeleistung
<i>ML</i>	Mischluft
<i>p</i>	konstanter Druck (isobar)
<i>PE</i>	Primärenergie
<i>R</i>	Rohrreibung
<i>reg</i>	regenerativen Energiequellen
<i>Rost</i>	Trocknungsrost
<i>S</i>	Schicht, Schüttung
<i>sat</i>	Sättigung
<i>sens</i>	sensible Wärme
<i>stat</i>	statischer Druck
<i>TG</i>	Trockengut (getrocknetes Gut, Trockenware)
<i>th</i>	thermisch
<i>total</i>	Totaldruck (Gesamtdruck)
<i>tr</i>	trocken
<i>TS</i>	Trockensubstanz (Grundsubstanz mit 0 % Feuchtegehalt)
<i>U</i>	Umgebung
<i>UL</i>	Umluft
<i>v</i>	Verdampfung
<i>V</i>	bezogen auf das Volumen
<i>Vent</i>	Ventilator
<i>Verlust</i>	Verlust
<i>W</i>	Wasser
<i>WP</i>	Wärmepumpe
<i>Z</i>	Einzelwiderstand
<i>ZL</i>	Zuluft
<i>zul</i>	zulässig
0	bei 0 °C, zu Beginn
0, 1, 2 ...	besondere Kennzeichnung
<i>i, j ...</i>	besondere Kennzeichnung
"	bezogen auf die Fläche, z.B. Rostfläche

## A Allgemeine Tabellen

**Tabelle A.1:** Berechnungsformeln zum Feuchtegehalt, Wassergehalt, Eintrocknungsverhältnis und spezifischen Wasserentzug.

Größe	Symbol	Einheit	Formel	Gl.-Nr.
Feuchtegehalt Bezug: Frischgut	$F$	%	$F = \frac{m_W}{m_W + m_{TS}} \cdot 100$	( A.1 )
			$F = \frac{X}{1 + X} \cdot 100$	( A.2 )
Wassergehalt Bezug: Trockensubstanz	$X$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TS}}$	$X = \frac{m_W}{m_{TS}}$	( A.3 )
			$X = \frac{F}{100 - F}$	( A.4 )
Eintrocknungsverhältnis	$E$	–	$E = \frac{m_{FG}}{m_{TG}}$	( A.5 )
			$E = \frac{100 - F_{TG}}{100 - F_{FG}}$	( A.6 )
			$E = \frac{X_{FG} + 1}{X_{TG} + 1}$	( A.7 )
Entzogene Wassermenge	$\Delta m_W$	$kg_{H_2O}$	$\Delta m_W = m_{FG} - m_{TG}$	( A.8 )
			$\Delta m_W = m_{TG} \cdot \frac{F_{FG} - F_{TG}}{100 - F_{FG}}$	( A.9 )
			$\Delta m_W = m_{TG} \cdot \frac{X_{FG} - X_{TG}}{1 + X_{TG}}$	( A.10 )
Spez. Wasserentzug pro kg Trockengut	$W_{TG}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}}$	$W_{TG} = E - 1$	( A.11 )
Spez. Wasserentzug pro kg Frischgut	$W_{FG}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{FG}}$	$W_{FG} = \frac{E - 1}{E}$	( A.12 )
Spez. Wasserentzug pro kg Trockensubstanz	$W_{TS}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TS}}$	$W_{TS} = X_{FG} - X_{TG}$	( A.13 )

Die Berechnungsformeln werden im Abschnitt 2.3 "Feuchtegehalte, Trocknungstemperaturen und Ernteerträge" erläutert.

**Tabelle A.2:** Eintrocknungsverhältnis ( $E$ ) sowie spezifischer Wasserentzug pro kg Trockengut ( $W_{TG}$ ) und pro kg Frischgut ( $W_{FG}$ ) für unterschiedliche Feuchtegehalte des Frischgutes ( $F_{FG}$ ).

$F_{FG}$ %	$X_{FG}$ $\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TS}}$	$E$ –	$W_{TG}$ $\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}}$	$W_{FG}$ $\frac{kg_{H_2O}}{kg_{FG}}$
60	1,50	2,25	1,25	0,556
61	1,56	2,31	1,31	0,567
62	1,63	2,37	1,37	0,578
63	1,70	2,43	1,43	0,589
64	1,78	2,50	1,50	0,600
65	1,86	2,57	1,57	0,611
66	1,94	2,65	1,65	0,622
67	2,03	2,73	1,73	0,633
68	2,13	2,81	1,81	0,644
69	2,23	2,90	1,90	0,656
70	2,33	3,00	2,00	0,667
71	2,45	3,10	2,10	0,678
72	2,57	3,21	2,21	0,689
73	2,70	3,33	2,33	0,700
74	2,85	3,46	2,46	0,711
75	3,00	3,60	2,60	0,722
76	3,17	3,75	2,75	0,733
77	3,35	3,91	2,91	0,744
78	3,55	4,09	3,09	0,756
79	3,76	4,29	3,29	0,767
80	4,00	4,50	3,50	0,778
81	4,26	4,74	3,74	0,789
82	4,56	5,00	4,00	0,800
83	4,88	5,29	4,29	0,811
84	5,25	5,63	4,63	0,822
85	5,67	6,00	5,00	0,833
86	6,14	6,43	5,43	0,844
87	6,69	6,92	5,92	0,856
88	7,33	7,50	6,50	0,867
89	8,09	8,18	7,18	0,878
90	9,00	9,00	8,00	0,889

Die Tabelle gilt für einen Feuchtegehalt des Trockengutes  $F_{TG} = 10\%$ .  
 $X_{FG}$  = Wassergehalt des Frischgutes pro kg Trockensubstanz (TS).

**Tabelle A.3:** Formeln zur Berechnung der Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft.

Größe, Formel	Einheit	Gl.-Nr.
Wassergehalt der Luft $Y = \frac{m_W}{m_L}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_L}$	(A.14)
Gesamtdruck der Luft $p = p_L + p_D$	Pa	(A.15)
Partialdampfdruck ungesättigter feuchter Luft $p_D = \frac{p \cdot Y}{R_L/R_D + Y} = \frac{p \cdot Y}{0,622 + Y}$	Pa	(A.16)
Sättigungsdampfdruck nach Antoine (1) $p_{D,sat}(\vartheta) = \exp\left(A - \frac{B}{C + \vartheta/^\circ C}\right)$ mit $A = 23,462$ ; $B = 3978,205$ ; $C = 233,349$	Pa	(A.17)
Sättigungswassergehalt $Y_{sat}(\vartheta) = 0,622 \cdot \frac{p_{D,sat}(\vartheta)}{p - p_{D,sat}(\vartheta)}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_L}$	(A.18)
Relative Feuchte ungesättigter feuchter Luft $\varphi = \frac{p_D}{p_{D,sat}(\vartheta)}$	–	(A.19)
Wassergehalt ungesättigter feuchter Luft $Y = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_L}$	(A.20)
Wahre Dichte ungesättigter feuchter Luft $\rho_L = \frac{p \cdot (1 + Y)}{T \cdot (R_L + Y \cdot R_D)}$	$\frac{kg}{m^3}$	(A.21)
Spez. Enthalpie ungesättigter feuchter Luft $h = c_{pL} \cdot \vartheta + Y \cdot (\Delta h_{v,0} + c_{pD} \cdot \vartheta)$	$\frac{kJ}{kg_L}$	(A.22)

(1) zitiert in Schlünder & Tsotsas (1988) ; Temperaturbereich: 0 – 50 °C.

**Tabelle A.4:** Konstanten zur Berechnung der Zustandsgrößen ungesättigter feuchter Luft.

Größe	Symbol	Wert	Einheit
Gaskonstante der trockenen Luft (1)	$R_L$	0,28712	$kJ/(kg \cdot K)$
Gaskonstante von Wasserdampf (1)	$R_D$	0,4615	$kJ/(kg \cdot K)$
Verhältnis der Gaskonstanten	$R_L / R_D$	0,622	–
Spez. Verdampfungswärme von Wasser bei 0 °C (1)	$\Delta h_{v,0}$	2.500	$kJ/kg$
Spez. Wärmekapazität trockener Luft (1, 2)	$c_{pL}$	1,0067	$kJ/(kg \cdot K)$
Spez. Wärmekapazität von Wasserdampf (1, 2)	$c_{pD}$	1,860	$kJ/(kg \cdot K)$
Spez. Wärmekapazität von flüssigem Wasser (3)	$c_{pW}$	4,182	$kJ/(kg \cdot K)$

(1) VDI-Wärmeatlas (VDI-GVC, 2013); (2) Mittelwert für 0 – 50 °C; (3) nach Baehr & Stephan (2013);

Die aufgeführten Zahlenwerte gelten mit ausreichender Genauigkeit für die genannten Temperaturbereiche. Für genaue Berechnungen, insbesondere bei höheren Temperaturen, ist die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten zu berücksichtigen. Entsprechende Berechnungsgleichungen finden sich z.B. bei Maltry (1975).

**Tabelle A.5:** Grundlegende Berechnungsformeln zur Trocknung bei reiner Frischluft-erwärmung.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Indizes in dieser Tabelle: FL = Frischluft      FG = Frischgut      ein = Eintritt ZL = Zuluft          TG = Trockengut      aus = Austritt AL = Abluft          W = Wasser          sens = sensible Wärme		
Massenstrom der Zuluft $\dot{m}_{ZL} = \rho_{ZL} \cdot \dot{V}_{ZL}$	$\frac{kg_L}{s}$	(A.23)
Wasserbilanz Luft $\dot{m}_W = \dot{m}_{ZL} \cdot (Y_{AL} - Y_{ZL}) = \dot{m}_{FL} \cdot (Y_{AL} - Y_{FL}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta Y$	$\frac{kg_{H_2O}}{s}$	(A.24)
Wasserbilanz Trocknungsgut $\dot{m}_W = \dot{m}_{FG} - \dot{m}_{TG}$	$\frac{kg_{H_2O}}{s}$	(A.25)
Wärmebilanz $\dot{Q} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{FL}) + \dot{m}_{TG} \cdot c_{TG} \cdot (\vartheta_{G,aus} - \vartheta_{G,ein}) - \dot{m}_W \cdot c_W \cdot \vartheta_{G,ein}$	kW	(A.26)
Wärmeleistung bei idealer Trocknung $\dot{Q}_{ideal} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{FL})$ Guterwärmung vernachlässigt	kW	(A.27)
Spez. Wärmebedarf pro kg verdunstetes Wasser (Bošnjaković, 1971) $q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_W} = \frac{h_{ZL} - h_{FL}}{Y_{AL} - Y_{FL}} + q_{sens}$ mit $q_{sens} \geq 0$ $q_{sens}$ berücksichtigt die Erwärmung des Gutes sowie die spez. Wärme des Wassers, das dem Trockner mit dem Frischgut zugeführt wird: $q_{sens} = c_{TG} \cdot \frac{\dot{m}_{TG}}{\dot{m}_W} \cdot (\vartheta_{G,aus} - \vartheta_{G,ein}) - c_W \cdot \vartheta_{G,ein}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.28)
Im Allgemeinen ist der Term $q_{sens} \geq 0$ , oft aber so klein ( $q_{sens} \approx 0$ ), dass er vernachlässigt werden kann: $q_{ideal} = \frac{\dot{Q}_{ideal}}{\dot{m}_W} = \frac{h_{ZL} - h_{FL}}{Y_{AL} - Y_{FL}} = \frac{\Delta h}{\Delta Y}$ für $q_{sens} = 0$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.29)
Zustandsänderung der Trocknungsluft $\frac{h_{AL} - h_{ZL}}{Y_{AL} - Y_{ZL}} = -q_{sens} \approx 0$ Für $q_{sens} = 0$ verläuft die Trocknung bei konstanter spez. Enthalpie.	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.30)
		(A.31)



**Tabelle A.6:** Formeln zur Berechnung der Trocknung im Teilumluft-Betrieb.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Indizes in dieser Tabelle: AL = Abluft      ML = Mischluft      W = Wasser FL = Frischluft      UL = Umluft      ZL = Zuluft		
Massenstrom der Zuluft $\dot{m}_{ZL} = \rho_{ZL} \cdot \dot{V}_{ZL}$	$kg_L/s$	(A.23)
Massenstrom des verdunsteten Wassers $\dot{m}_W = \dot{m}_{ZL} \cdot (Y_{AL} - Y_{ZL}) = \dot{m}_{FL} \cdot (Y_{AL} - Y_{FL}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta Y$	$kg_{H_2O}/s$	(A.24)
Massenbilanzen		
Frischlufte $\dot{m}_{FL} = \dot{m}_W / (Y_{AL} - Y_{FL})$	$kg_L/s$	(A.32)
Mischlufte $\dot{m}_{ML} = \dot{m}_{ZL} = \dot{m}_W / (Y_{AL} - Y_{ZL})$	$kg_L/s$	(A.33)
Ablufte $\dot{m}_{AL} = \dot{m}_{FL}$	$kg_L/s$	(A.34)
Umlufte $\dot{m}_{UL} = \dot{m}_{ZL} - \dot{m}_{AL} = \dot{m}_{ML} - \dot{m}_{FL}$	$kg_L/s$	(A.35)
Spez. Frischluftbedarf pro kg verdunstetes Wasser $l_{FL} = \frac{\dot{m}_{FL}}{\dot{m}_W} = \frac{1}{(Y_{AL} - Y_{FL})}$	$\frac{kg_L}{kg_{H_2O}}$	(A.36)
Spez. Zuluftbedarf pro kg verdunstetes Wasser $l_{ZL} = \frac{\dot{m}_{ZL}}{\dot{m}_W} = \frac{1}{(Y_{AL} - Y_{ML})}$	$\frac{kg_L}{kg_{H_2O}}$	(A.37)
Normierte Luftfeuchte $\psi = \frac{Y_{AL} - Y_{ZL}}{Y_{AL,sat} - Y_{ZL}} = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_{max}}$ $h_{AL} = h_{ZL} = const$ $Y_{AL,sat} = Y(h_{ZL}, \varphi = 100\%)$	–	(A.38)
Umluftanteil $ULA = \frac{\dot{m}_{UL}}{\dot{m}_{ZL}} = \frac{Y_{ML} - Y_{FL}}{Y_{AL} - Y_{FL}} = \frac{h_{ML} - h_{FL}}{h_{AL} - h_{FL}}$	–	(A.39)
Wassergehalt der Mischluft $Y_{ML} = \frac{Y_{FL} \cdot \dot{m}_{FL} + Y_{AL} \cdot \dot{m}_{AL}}{\dot{m}_{ML}}$ "Hebelgesetz"	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_L}$	(A.40)
Spez. Enthalpie der Mischluft $h_{ML} = \frac{h_{FL} \cdot \dot{m}_{FL} + h_{AL} \cdot \dot{m}_{AL}}{\dot{m}_{ML}}$ "Hebelgesetz"	$\frac{kJ}{kg_L}$	(A.41)
Wärmeleistung $\dot{Q} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{ML})$	$kW$	(A.42)
Spez. Wärmebedarf pro kg verdunstetes Wasser $q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_W} = \frac{(h_{ZL} - h_{ML})}{(Y_{AL} - Y_{ZL})} = \frac{(h_{AL} - h_{FL})}{(Y_{AL} - Y_{FL})}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.43)

Für die Berechnung müssen folgende Größen bekannt sein, z.B. aus Messungen:

- Temperatur und Volumenstrom der Zuluft,
- Luftzustände von Frischluft und Abluft.

Alle weiteren Größen lassen sich mit Hilfe der angegebenen Formeln berechnen (vgl. **Abb. 3.2**).

Die relevanten Luftzustände können auch in einem Mollier  $h, Y$ -Diagramm ermittelt werden (vgl. Erläuterungen im Abschnitt 3.1).

**Tabelle A.7:** Berechnungsformeln zum Lufttransport in Kanalsystemen.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Besondere Indizes in dieser Tabelle: 1 = Kanal 1      R = Rohrreibung 2 = Kanal 2      Z = Einzelwiderstand		
Kontinuitätsgleichung $\dot{m} = \rho_1 \cdot w_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot w_2 \cdot A_2 = const$	kg/s	(A.44)
Volumenstrom $\dot{V} = w_1 \cdot A_1 = w_2 \cdot A_2 = const$ für $\rho_1 = \rho_2 = \rho$	m <sup>3</sup> /s	(A.45)
Umgekehrte Proportionalität der Strömungsgeschwindigkeiten $\frac{w_1}{w_2} = \frac{A_2}{A_1}$	–	(A.46)
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in einem Luftkanal $w = \frac{\dot{V}}{A}$	m/s	(A.47)
Druckform der Bernoulli-Gleichung bei reibungsfreier Strömung (1) $p_{stat,1} + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = p_{stat,2} + \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} = const$	Pa	(A.48)
Dynamischer Druck $p_{dyn} = \rho \cdot \frac{w^2}{2}$	Pa	(A.49)
Totaldruck = statischer Druck + dynamischer Druck $p_{total} = p_{stat} + p_{dyn}$	Pa	(A.50)
Druckform der Bernoulli-Gleichung bei reibungsbehafteter Strömung (1) $p_{stat,1} + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = p_{stat,2} + \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} + \Delta p_{Verlust,ges}$	Pa	(A.51)
Gesamter Druckverlust $\Delta p_{Verlust,ges} = p_{total,1} - p_{total,2} = \Delta p_{total}$	Pa	(A.52)
Druckverlust von Einzelwiderständen $\Delta p_Z = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \zeta \cdot p_{dyn}$ $\zeta$ = Widerstandsbeiwert (Zeta-Wert)	Pa	(A.53)
Gesamter Druckverlust = Summe der Strömungswiderstände $\Delta p_{Verlust,ges} = \sum \Delta p_{R,i} + \sum \Delta p_{Z,j} = \Delta p_{total}$	Pa	(A.54)

(1) Änderungen der Lageenergie bzw. der geodätischen Druckhöhe vernachlässigt.

**Tabelle A.8:** Näherungsformeln zum Druckverlust in Schüttungen.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.																																				
<p>Näherungsfunktion für die Druckverluste pro m Schichthöhe bei der Trocknung von Kamilleblüten, Melisse-Ganzpflanzen und Baldrianwurzeln, vgl. Erläuterungen zu <b>Abb. 3.3</b></p> $\Delta p/h_0 = a + b \cdot \exp(-t/c)$ <p>mit</p> <p><math>h_0</math> Schichthöhe zu Beginn der Trocknung (m)</p> <p><math>t</math> Trocknungsdauer (h)</p> <p><math>a, b, c</math> Konstanten (-)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kamille</th> <th>Melisse</th> <th>Baldrian</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>a</math></td> <td>130</td> <td>115</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td><math>b</math></td> <td>1.000</td> <td>565</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td><math>c</math></td> <td>9</td> <td>6</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table> <p>Die Konstanten gelten für eine spezifische Luftmenge von jeweils 640 m<sup>3</sup>/h und m<sup>2</sup> Rostfläche. Dies entspricht einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,178 m/s.</p>		Kamille	Melisse	Baldrian	$a$	130	115	10	$b$	1.000	565	41	$c$	9	6	8	Pa/m	(A.55)																				
	Kamille	Melisse	Baldrian																																			
$a$	130	115	10																																			
$b$	1.000	565	41																																			
$c$	9	6	8																																			
<p>Näherungsformel für die Druckverluste von halm- und blattförmigen Erntegütern nach Matthies (1956)</p> $\Delta p = C_4 \cdot h \cdot \rho_S^m \cdot \mu^{2-n} \cdot \rho_L^{n-1} \cdot w^n$ <p>Umrechnung mm Wassersäule (WS) in Pa</p> $1 \text{ mm WS} = 9,80665 \text{ Pa}$ <p>Parameter zur Berechnung der Anlagenkennlinien in <b>Abb. 3.5</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Wert</th> <th>Einheit</th> <th>Anmerkungen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_4</math></td> <td>0,14</td> <td>–</td> <td>Stoffbeiwert</td> </tr> <tr> <td><math>h</math></td> <td>0,75</td> <td>m</td> <td>Schichthöhe</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_S</math></td> <td>259</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>max. Schüttdichte Kamille</td> </tr> <tr> <td><math>\mu</math></td> <td><math>1,85 \cdot 10^{-6}</math></td> <td>N · s/m<sup>2</sup></td> <td>dynamische Viskosität der Luft</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_L</math></td> <td>1,18</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>Luftdichte bei 20 °C</td> </tr> <tr> <td><math>w</math></td> <td>variabel</td> <td>m/s</td> <td>Luftgeschwindigkeit</td> </tr> <tr> <td><math>m</math></td> <td>2,74</td> <td>–</td> <td>Exponent der Schüttdichte</td> </tr> <tr> <td><math>n</math></td> <td>1,54</td> <td>–</td> <td>Exponent der Luftgeschw.</td> </tr> </tbody> </table> <p>Für die Exponenten <math>m</math> und <math>n</math> liegen keine produkt-spezifischen Werte vor. Die beiden Exponenten gelten für blattreiches Luzerneheu. Der Stoffbeiwert <math>C_4</math> wurde dem max. Druckverlust von Kamilleblüten angepasst.</p> <p>Parameter für Kamilleblüten nach 40 h Trocknungsdauer:  <math>C_4 = 0,39</math> ; <math>h = 0,40 \text{ m}</math> ; <math>\rho_S = 94 \text{ kg/m}^3</math> .</p>	Symbol	Wert	Einheit	Anmerkungen	$C_4$	0,14	–	Stoffbeiwert	$h$	0,75	m	Schichthöhe	$\rho_S$	259	kg/m <sup>3</sup>	max. Schüttdichte Kamille	$\mu$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	N · s/m <sup>2</sup>	dynamische Viskosität der Luft	$\rho_L$	1,18	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte bei 20 °C	$w$	variabel	m/s	Luftgeschwindigkeit	$m$	2,74	–	Exponent der Schüttdichte	$n$	1,54	–	Exponent der Luftgeschw.	mm WS	(A.56)
Symbol	Wert	Einheit	Anmerkungen																																			
$C_4$	0,14	–	Stoffbeiwert																																			
$h$	0,75	m	Schichthöhe																																			
$\rho_S$	259	kg/m <sup>3</sup>	max. Schüttdichte Kamille																																			
$\mu$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	N · s/m <sup>2</sup>	dynamische Viskosität der Luft																																			
$\rho_L$	1,18	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte bei 20 °C																																			
$w$	variabel	m/s	Luftgeschwindigkeit																																			
$m$	2,74	–	Exponent der Schüttdichte																																			
$n$	1,54	–	Exponent der Luftgeschw.																																			

**Tabelle A.9:** Berechnungsformeln für Ventilatoren.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
<p>Proportionalitätsgesetze (Kullen &amp; Albrich, 1988)</p> <p>Ist ein Ventilator in eine Anlage eingebaut, deren Widerstandsparabel durch den Nullpunkt geht, und ist die Dichte <math>\rho</math> der Luft konstant, so gelten bei Änderung der Drehzahl <math>n</math> folgende Proportionalitätsgesetze:</p>		
$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$ <p>Der Volumenstrom ändert sich proportional mit der Drehzahl.</p>	–	(A.57)
$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$ <p>Sämtliche Drücke ändern sich proportional dem Quadrat der Drehzahl.</p>	–	(A.58)
$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$ <p>Der Leistungsbedarf <math>P</math> des Laufrades ändert sich proportional der dritten Potenz der Drehzahl.</p>	–	(A.59)
<p>In der Klimatechnik werden Ventilator Kennlinien üblicherweise für eine Luftdichte <math>\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3</math> angegeben. Liegt eine andere Luftdichte vor, so kann die Drehzahl Kennlinie (<math>n = \text{const}</math>) nach den folgenden Beziehungen umgerechnet werden. Der Volumenstrom bleibt gleich.</p>		
$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ <p>Sämtliche Drücke ändern sich proportional der Dichteänderung.</p>	–	(A.60)
$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ <p>Der Leistungsbedarf <math>P</math> des Laufrades ändert sich proportional der Dichteänderung.</p>	–	(A.61)
<p>Elektrische Ventilatorleistung</p>		
$P_{Vent} = \frac{\Delta p_{total} \cdot \dot{V}_L}{\eta_{Vent} \cdot 1.000}$ <p>Der Wirkungsgrad <math>\eta_{Vent}</math> beinhaltet den Wirkungsgrad des Laufrades sowie den Wirkungsgrad des Antriebs. Der Faktor 1.000 berücksichtigt die Umrechnung von <math>W</math> in <math>kW</math>.</p>	$kW$	(A.62)
<p>Enthalpieerhöhung der feuchten Luft im Ventilator</p>		
$\Delta h_{Vent} = \frac{P_{Vent}}{\dot{m}_L} = \frac{P_{Vent}}{\rho_L \cdot \dot{V}_L}$ <p>Ein Ventilator wirkt thermisch auf die durchströmende feuchte Luft ähnlich wie ein Erhitzer. An die Stelle des Wärmestroms tritt hier die Ventilatorleistung. Die Enthalpieerhöhung <math>\Delta h_{Vent}</math> der feuchten Luft im Ventilator ist im Wesentlichen von der Totaldruckerhöhung <math>\Delta p_{total}</math>, dem Wirkungsgrad <math>\eta_{Vent}</math> und der Einbauart abhängig. Liegt der Motor des Ventilators im Luftstrom, so wird die gesamte zugeführte elektrische Leistung bei der Enthalpieerhöhung wirksam, die eine Größenordnung von <math>2 \text{ kJ/kg}</math> erreichen kann.</p>	$\frac{kJ}{kg_L}$	(A.63)

**Tabelle A.10:** Massen- und Energiebilanzen für einen kontinuierlichen Trockner (vereinfacht).

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Einstufige kontinuierliche Trocknung bei konstanter spez. Enthalpie (1) Besondere Indizes in dieser Tabelle: AL = Abluft; ML = Mischluft vor der Erwärmung; ZL = Zuluft nach der Erwärmung.		
<b>Massenströme</b>		
$\dot{m}_{FG}$ Durchsatz Frischgut	$kg_{FG}/s$	
$\dot{m}_{TG}$ Durchsatz Trockengut	$kg_{TG}/s$	
$\dot{m}_W$ Trocknungs- bzw. Entfeuchtungsleistung	$kg_{H_2O}/s$	
$\dot{m}_{ZL}$ Massenstrom trockener Luft (Zuluft)	$kg_L/s$	
<b>Wärmeleistungen</b>		
$\dot{Q}_{ideal}$ Wärmeleistung bei idealer Trocknung	$kW$	
$\dot{Q}_{sens}$ Wärmeleistung zur Guterwärmung	$kW$	
$\dot{Q}_{Vent}$ durch Ventilatoren zugeführte Wärmeleistung	$kW$	
$\dot{Q}_{Verlust}$ Wärmeverlustleistung	$kW$	
$\dot{Q}_{ges}$ insgesamt benötigte Wärmeleistung	$kW$	
<b>Elektrische Leistungen</b>		
$P_{Vent}$ elektrische Leistung aller Ventilatoren (2)	$kW$	
<b>Wasserbilanz Trocknungsgut</b>		
$\dot{m}_W = \dot{m}_{FG} - \dot{m}_{TG}$	$kg_{H_2O}/s$	(A.25)
<b>Wasserbilanz Luft</b>		
$\dot{m}_W = \dot{m}_{ZL} \cdot (Y_{AL} - Y_{ZL}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta Y$	$kg_{H_2O}/s$	(A.64)
<b>Wärmebilanz Trockner</b>		
$\dot{Q}_{ideal} = \dot{m}_{ZL} \cdot (h_{ZL} - h_{ML}) = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta h$	$kW$	(A.65)
$\dot{Q}_{sens} = \dot{m}_W \cdot q_{sens}$ mit $q_{sens}$ nach Gl. (A.29)	$kW$	(A.66)
$\dot{Q}_{Vent} = P_{Vent} = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta h_{Vent}$ mit $\Delta h_{Vent}$ nach Gl. (A.63)	$kW$	(A.67)
$\dot{Q}_{Verlust} = \dot{m}_{ZL} \cdot \Delta h_{Verlust}$	$kW$	(A.68)
$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{ideal} + \dot{Q}_{sens} - \dot{Q}_{Vent} + \dot{Q}_{Verlust}$	$kW$	(A.69)
<b>Spez. Wärmebedarf pro kg verdunstetes Wasser</b>		
$q_{ideal} = \frac{\dot{Q}_{ideal}}{\dot{m}_W} = \frac{\Delta h}{\Delta Y}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.70)
$q_{ges} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\dot{m}_W} = \frac{\Delta h}{\Delta Y} + q_{sens} - \frac{\Delta h_{Vent}}{\Delta Y} + \frac{\Delta h_{Verlust}}{\Delta Y}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.71)

- (1) Die Gleichungen gelten für den allgemeinen Fall des Betriebs mit Teilumluft. Ohne Teilumluft (Umluftanteil = 0) ist der Index ML (Mischluft) durch FL (Frischluf) zu ersetzen.
- (2) Außer Ventilatoren sind keine weiteren elektrischen Verbraucher berücksichtigt.

**Tabelle A.11:** Massen- und Energiebilanzen für Chargentrockner (vereinfacht).

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Chargenweise Trocknung bei konstanter spez. Enthalpie (1) Sensible Wärme zur Guterwärmung vernachlässigt ( $q_{sens} = 0$ ); besondere Indizes in dieser Tabelle: AL = Abluft; ML = Mischluft vor der Erwärmung; ZL = Zuluft nach der Erwärmung.		
Massen bzw. Mengen		
$m_{FG,t1}$ Masse feuchtes Gut zum Zeitpunkt $t_1$	$kg_{FG}$	
$m_{TG,t2}$ Masse trockenes Gut zum Zeitpunkt $t_2$	$kg_{TG}$	
$\Delta m_W$ Wassermenge im Zeitraum $\Delta t = t_2 - t_1$	$kg_{H2O}$	
$m_{ZL} = \int_{t1}^{t2} \dot{m}_L dt$ im jeweiligen Trocknungszeitraum $\Delta t$ benötigte Menge trockener Luft (Zuluft)	$kg_L$	(A.72)
Wärmemengen, integriert über den jeweiligen Trocknungszeitraum $\Delta t$		
$Q_{ideal} = \int_{t1}^{t2} \dot{Q}_{ideal} dt$ benötigte Wärme bei idealer Trocknung	$kJ$	(A.73)
$Q_{vent} = \int_{t1}^{t2} \dot{Q}_{vent} dt$ durch Ventilatoren zugeführte Wärme	$kJ$	(A.74)
$Q_{Verlust} = \int_{t1}^{t2} \dot{Q}_{Verlust} dt$ Wärmeverluste	$kJ$	(A.75)
$Q_{ges}$ insgesamt benötigte Wärmemenge	$kJ$	
Elektrische Energie, integriert über den jeweiligen Trocknungszeitraum $\Delta t$		
$E_{el,vent} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t1}^{t2} P_{vent} dt$ für Ventilatoren (2)	$kJ$	(A.76)
Wasserbilanz Trocknungsgut		
$\Delta m_W = m_{FG,t1} - m_{TG,t2}$	$kg_{H2O}$	(A.77)
Wasserbilanz Luft		
$\Delta m_W = m_{ZL} \cdot (\bar{Y}_{AL} - \bar{Y}_{ZL}) = m_{ZL} \cdot \bar{\Delta Y}$	$kJ$	(A.78)
Wärmebilanz Trockner		
$Q_{ideal} = m_{ZL} \cdot (\bar{h}_{ZL} - \bar{h}_{ML}) = m_{ZL} \cdot \bar{\Delta h}$	$kJ$	(A.79)
$Q_{vent} = E_{el,vent} = m_{ZL} \cdot \bar{\Delta h}_{vent}$ mit $\Delta h_{vent}$ nach Gl. (A.63)	$kJ$	(A.80)
$Q_{Verlust} = m_{ZL} \cdot \bar{\Delta h}_{Verlust}$	$kJ$	(A.81)
$Q_{ges} = Q_{ideal} - Q_{vent} + Q_{Verlust}$	$kJ$	(A.82)
Spez. Wärmebedarf pro kg verdunstetes Wasser		
$q_{ideal} = \frac{Q_{ideal}}{\Delta m_W} = \frac{\bar{\Delta h}}{\bar{\Delta Y}}$	$\frac{kJ}{kg_{H2O}}$	(A.83)
$q_{ges} = \frac{Q_{ges}}{\Delta m_W} = \frac{\bar{\Delta h}}{\bar{\Delta Y}} - \frac{\bar{\Delta h}_{vent}}{\bar{\Delta Y}} + \frac{\bar{\Delta h}_{Verlust}}{\bar{\Delta Y}}$	$\frac{kJ}{kg_{H2O}}$	(A.84)

(1) Die Gleichungen gelten für den allgemeinen Fall des Betriebs mit Teilumluft. Ohne Teilumluft (Umluftanteil = 0) ist der Index ML (Mischluft) durch FL (Frischluf) zu ersetzen.

(2) Außer Ventilatoren sind keine weiteren elektrischen Verbraucher berücksichtigt.



**Tabelle A.12:** Formeln zur Berechnung trocknungstechnischer Kennzahlen.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
$\dot{Q}_{ges}$ insgesamt für die Trocknung benötigte Wärmeleistung	$kW$	
$\dot{m}_W$ Trocknungs- bzw. Entfeuchtungsleistung	$kg_{H_2O}/s$	
$\dot{Q}_H$ Heizleistung des Wärmeerzeugers	$kW$	
$\eta_{th,H}$ thermischer Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers	–	
$H_i$ (unterer) Heizwert des Brennstoffs	$kJ/kg_B$	
$P$ elektrische Leistung	$kW$	
$\eta_{FU}$ Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern für Ventilatoren	–	
$\Pi_{th}$ Primärenergiefaktor für thermische Energie	–	
$\Pi_{el}$ Primärenergiefaktor für elektrische Energie	–	
Spez. Wärmebedarf der Trocknung (1)		
$q_{ges} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\dot{m}_W} = q_{ideal} + q_{sens} - q_{vent} + q_{verlust}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.85)
Heizleistung des Wärmeerzeugers (2)		
$\dot{Q}_H = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\eta_{th,H}}$	$kW$	(A.86)
Brennstoffleistung des Wärmeerzeugers		
$\dot{m}_B = \frac{\dot{Q}_H}{H_i}$ Heizwerte unterschiedlicher Brennstoffe: <b>Tabelle D.2</b>	$kg_B/s$	(A.87)
Spez. thermischer Energiebedarf (3)		
$STB = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_W} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\eta_{th,H} \cdot \dot{m}_W} = \frac{q_{ges}}{\eta_{th,H}}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.88)
Spez. elektrischer Energiebedarf (4)		
$SEB = \frac{P}{\dot{m}_W} = \frac{P_{vent}}{\eta_{FU} \cdot \dot{m}_W}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.89)
Spez. Primärenergiebedarf (5)		
$SPB = \Pi_{th} \cdot STB + \Pi_{el} \cdot SEB$ Primärenergiefaktoren für unterschiedliche Energieträger: <b>Tabelle D.3</b>	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	(A.90)

- (1) Gl. (A.85) entspricht Gl. (A.71).
- (2) Mit Wärmeleistung ist immer die im Trocknungsprozess benötigte Wärmeleistung gemeint. Im Unterschied dazu bezeichnet die Heizleistung die thermische Leistung des Wärmeerzeugers. Heizleistung und Wärmeleistung unterscheiden sich durch den thermischen Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers (z.B. Heizkessel).
- (3) Im Unterschied zum spez. Wärmebedarf der Trocknung nach Gl. (A.85) berücksichtigt der spez. thermische Energiebedarf  $STB$  nach Gl. (A.88) den thermischen Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung.
- (4) Außer Ventilatoren sind keine weiteren elektrischen Verbraucher berücksichtigt.
- (5) Thermische und elektrische Energie können nur nach Umrechnung in Primärenergie addiert werden.

## B Produktspezifische Tabellen und Abbildungen

**Tabelle B.1:** Verwendete Pflanzenteile und wertbestimmende Inhaltsstoffe unterschiedlicher Arzneipflanzen.

Pflanzenart	Lateinischer Name	Englischer Name	Verwendete Pflanzenteile	Wertbestimmende Inhaltsstoffe
Baldrian	<i>Valeriana officinalis</i> L.	Valerians	Wurzel, Wurzelstock	ätherisches Öl, Valepotriaten
Goldrute	<i>Solidago virgaurea</i> L.	Goldenrods	Blüte, Kraut	ätherisches Öl, Flavonoide, Gerbstoffe, Phenolglykoside (Leicarposid und Virgaureosid), Saponine
Johanniskraut	<i>Hypericum perforatum</i> L.	St. John's wort	Blüte, Kraut	ätherisches Öl, Flavonoide, Gerbstoffe, rötliche Anthocyane, rote Hypericine
Kamille	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Chamomile	Blüte	ätherisches Öl, Flavonoide
Kapuzinerkresse	<i>Tropaeolum majus</i> L.	Nasturtium	Kraut, Blüte	Ascorbinsäure, Carotinoide, Glucotropaeolin, Flavonoide, Senföl
Melisse (1)	<i>Melissa officinalis</i> L.	Lemon balm	Blatt, Kraut	ätherisches Öl, Bitterstoffe, Gerbstoffe, Rosmarinsäure, Schleim
Mutterkraut	<i>Tanacetum parthenium</i> (L.)	Feverfew	Blüte, Kraut	Pathenolid
Pfefferminze (1)	<i>Mentha piperita</i> L.	Peppermint	Blatt, Kraut	ätherisches Öl, Bitterstoffe, Gerbstoffe
Rosenwurz	<i>Rhodiola rosea</i> L.	Rose root	Wurzel	Glykoside
Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Plantain	Blatt	Flavonoide, Gerbstoff, Glykoside, Gummi, Harze, Kalium, Schleim, Senföl, Tannine, Zink

(1) Die Stängel können alternativ als Futtermittel verwendet werden.

"L." ist das standardisierte Autorenkürzel für "Linné" nach dem internationalen Code der Nomenklatur für Algen, Pilze und Pflanzen. Wird eine Art später einer anderen Gattung zugesprochen, so wird der Autor des Basionyms weiterhin in Klammern (L.) aufgeführt (IAPT, 2012).

**Tabelle B.2:** Qualitätsanforderungen an unterschiedliche Arzneipflanzen.

Pflanzenart	Mindestgehalt	Fremde Bestandteile		Feuchtegehalt max.	Ascheanteil max.
		Stängel max.	andere max.		
Baldrian (1)	Ätherisches Öl: 5 ml/kg (ganze Droge) 3 ml/kg (geschn. Droge) 0,17% Sesquiterensäure	5 %	2 % (a)	12 %	12 %
Goldrute (1)	1 % Flavonoide		2 % (a) 5 % (b)	12 %	8 %
Johanniskraut (1)	0,08 % Gesamt-Hypericin	3 % d > 5 mm	2 % (a)	10 %	7 %
Kamille (1)	4 ml/kg blaues äther. Öl 0,25 % Gesamt-Apigenin-7-glucosid		2 % (a)	12 %	13 %
Kapuzinerkresse (2)				10 %	15 %
Melisse (1)	4 % Hydroxy-Zimtsäure-Derivate	10 % d > 1 mm	2 % (a)	10 %	12 %
Mutterkraut (1)	0,2 % Panthenolid	10 % d > 5 mm	2 % (a)	10 %	12 %
Pfefferminze (1)	Ätherisches Öl: 12 ml/kg (ganze Droge) 9 ml/kg (geschn. Droge)	5 % d < 1,5 mm	2 % (a) 8 % (b)	11 %	15 %
Rosenwurz (2)	Rosavine und Salidroside müssen vorhanden sein		2 % (a)	10 %	8 %
Spitzwegerich (1)	1,5 % Gesamt-ortho-Dihydroxyzimt-Säure-Derivate		2 % (a) 5 % (b)	10 %	14 %

(1) Qualitätsanforderungen nach dem Europäischen Arzneibuch (EAB, 2016);

(2) Es gibt Anforderungen an Inhaltsstoffe; unter Verweis auf ihr eigenes Know-how wurde von Arzneimittelherstellern jedoch um Verständnis gebeten, dass keine genaueren Angaben gemacht werden können;

(a) andere Fremdbestandteile;

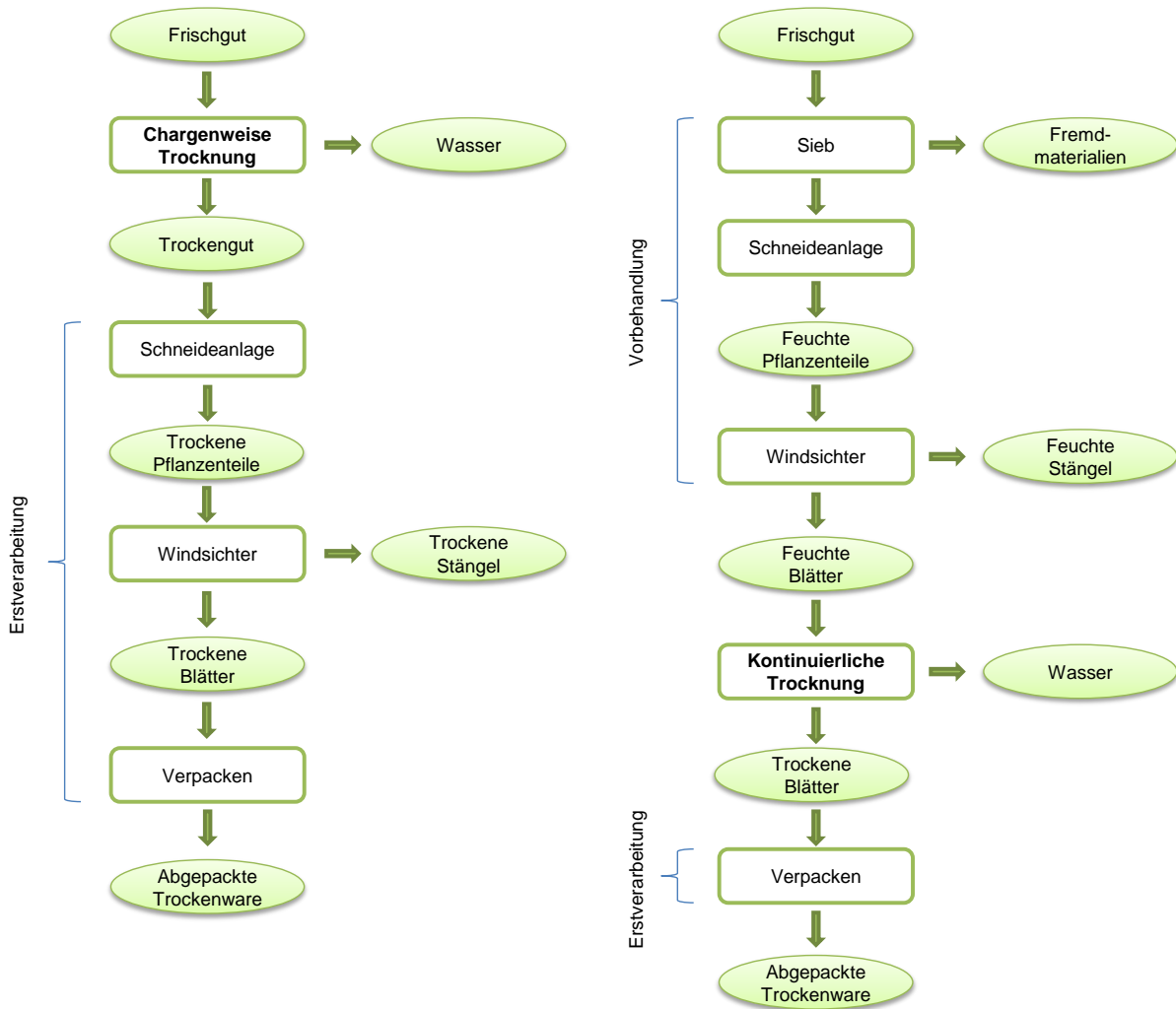
(b) braunefleckte oder andersfarbige Blätter;

d = Stängeldurchmesser.

**Tabelle B.3:** Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung für ausgewählte Pflanzenarten der Flächentrocknung.

<b>Pflanzenart</b>	<b>Vorbehandlung Frischgut</b>	<b>Erstverarbeitung Trockengut</b>
Baldrian	Erd- und Feinkrautabscheidung, Waschen der Wurzeln, Teilen und Zerkleinern der Wurzelstöcke, Endreinigung mit frischem Trinkwasser	keine (nur Verpacken)
Goldrute	keine (Trocknung der Ganzpflanzen)	keine (nur Verpacken)
Johanniskraut	keine (Trocknung des Blühhorizonts)	Schneiden / Zerkleinern, Sieben, evtl. Dreschen / Rebnen
Kamille	Sieben (zur Kraut- und Stängelabtrennung)	Apothekerware: Abschneiden der Stiele von den Blütenköpfen, Handverlesen zur Absonderung der Fremdbestandteile
Kapuzinerkresse	keine (Trocknung der Ganzpflanzen)	keine (nur Verpacken)
Melisse	keine (Trocknung der Ganzpflanzen)	Schneiden, Sieben und Sichten
Mutterkraut	keine (Trocknung des Blühhorizonts)	keine (nur Verpacken)
Pfefferminze	keine (Trocknung der Ganzpflanzen)	Schneiden, Sieben und Sichten
Rosenwurz	Erd- und Feinkrautabscheidung, Waschen der Wurzeln, Teilen und Zerkleinern der Wurzelstöcke, Endreinigung mit frischem Trinkwasser	keine (nur Verpacken)
Spitzwegerich	keine (Trocknung der Ganzpflanzen)	keine (nur Verpacken)

Mit Sichten ist immer Windsichten gemeint.



**Abb. B.1:** Verfahrensschritte der Vorbehandlung und Erstverarbeitung von Kraut- und Blattdrogen bei chargenweiser (links) und kontinuierlicher Trocknung (rechts) in Anlehnung an Müller & Heindl (2006).

**Tabelle B.4:** Nutzungsdauern, Erntezeiträume und Anzahl der Ernteschnitte für unterschiedliche Pflanzenarten.

Pflanzenart	Nutzungsdauer	Erntezeitraum		Anzahl Schnitte
		Beginn	Ende	
Baldrian	einjährig	15.10.	30.11.	1
Goldrute	mehrfährig	15.08.	25.08.	1
Johanniskraut	mehrfährig	24.06.	25.09.	1 – 2
Kamille	einjährig	25.05.	15.08.	2 – 3
Kapuzinerkresse	einjährig	10.08.	15.10.	2 – 3
Melisse	mehrfährig	25.05.	10.09.	2
Mutterkraut	mehrfährig	19.06.	02.07.	2
Pfefferminze	mehrfährig	30.05.	01.11.	2 – 3
Rosenwurz	mehrfährig	15.10.	30.10.	1
Spitzwegerich	mehrfährig	07.05.	02.11.	2 – 3

Quelle: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Tabelle B.5:** Durchschnittliche Frischgut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau.

Pflanzenart	Frischgut-Ertrag pro Ernteschnitt (t/ha)									FG-Ertrag pro Jahr t/(ha-a)
	1. Standjahr			2. Standjahr			3. Standjahr			
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
Baldrian	7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2
Goldrute	13,9	-	-	13,9	-	-	11,1	-	-	12,9
Johanniskraut	4,4	1,5	-	5,9	1,5	-	-	-	-	6,7
Kamille	1,2	0,7	-	-	-	-	-	-	-	1,9
Kapuzinerkresse	8,0	3,4	1,1	-	-	-	-	-	-	12,5
Melisse	12,2	6,1	-	12,2	8,2	-	10,2	6,1	-	18,3
Mutterkraut	1,4	-	-	1,4	-	-	-	-	-	1,4
Pfefferminze	9,7	6,2	-	12,4	9,7	2,7	8,8	3,5	-	17,7
Rosenwurz	-	-	-	-	-	-	6,2	-	-	6,2
Spitzwegerich	15,1	12,1	3,0	18,2	12,1	3,0	9,1	6,1	3,0	27,2

FG = Frischgut; S = Ernteschnitt-Nr.; Goldrute: Blüte und Kraut; Johanniskraut: 2. Schnitt nur bei frühen Sorten; Mutterkraut: Pflückernte (durch Häckselernte der Ganzpflanze sind ca. fünfmal größere Erträge möglich); Rosenwurz: FG-Ertrag nicht repräsentativ. Spitzwegerich: 3. Schnitt nur bei Frühjahrsaussaat; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Tabelle B.6:** Minimale und maximale Frischgut-Erträge pro Hektar, Jahr und Ernteschnitt im großflächigen Anbau.

Pflanzenart	FG-Ertrag pro Ernteschnitt (t/ha)																		FG-Ertrag pro Jahr (t/ha-a)	
	1. Standjahr						2. Standjahr						3. Standjahr						min	max
	S1		S2		S3		S1		S2		S3		S1		S2		S3			
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max		
Baldrian	1,8	10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8	10,8
Goldrute	9,7	18,0	-	-	-	-	10,4	18,0	-	-	-	-	-	4,2	12,5	-	-	-	8,1	16,2
Johanniskraut	1,5	5,9	0	3,0	-	-	1,4	6,9	0	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	9,3
Kamille	0,8	1,4	0,6	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	2,3
Kapuzinerkresse	4,6	10,2	2,3	4,6	0,0	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,8	17,1
Melisse	8,2	16,3	4,1	10,2	-	-	8,2	16,3	6,1	10,2	-	-	-	6,1	14,3	4,1	8,2	-	12,2	25,1
Mutterkraut	1,1	5,3	-	-	-	-	1,1	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	5,3
Pfefferminze	8,0	11,5	4,4	8,0	-	-	10,6	14,1	8,0	11,5	0	5,3	8,8	9,7	2,7	4,4	-	-	14,1	21,5
Rosenwurz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8	9,2	-	-	-	1,8	9,2
Spitzwegerich	9,1	18,2	6,1	15,1	0	6,1	12,1	21,2	6,1	15,1	0	6,1	6,1	12,1	3,0	9,1	0	6,1	14,1	36,3

FG = Frischgut, S = Ernteschnitt-Nr.; Goldrute: Blüte und Kraut; Johanniskraut: 2. Schnitt nur bei frühen Sorten; Mutterkraut: Pflückernte (durch Häckselerte der Ganzpflanze sind ca. fünfmal größere Erträge möglich); Rosenwurz: FG-Ertrag nicht repräsentativ; Spitzwegerich: 3. Schnitt nur bei Frühjahrssaat; Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).



## C Trocknerspezifische Tabellen und Abbildungen

**Tabelle C.1:** Schichthöhe, Schüttdichte und spezifische Trockengut-Masse pro m<sup>2</sup> Rostfläche für ausgewählte Pflanzenarten.

Pflanzenart	Schichthöhe TG		Schüttdichte TG		Spez. Masse TG	
	m		kg <sub>TG</sub> /m <sup>3</sup>		kg <sub>TG</sub> /m <sup>2</sup>	
	min	max	min	max	min	max
Baldrian	0,33	0,47	81	98	26,8	45,6
Goldrute	0,33	0,47	67	76	22,2	35,6
Johanniskraut	0,50	0,65	44	49	22,2	31,8
Kamille	0,33	0,50	87	94	28,8	47,0
Kapuzinerkresse	0,20	0,25	44	53	8,9	13,3
Melisse	0,50	0,60	39	46	19,7	27,5
Mutterkraut	0,35	0,49	67	79	23,3	38,7
Pfefferminze	0,40	0,60	45	49	18,0	29,3
Rosenwurz	0,27	0,50	79	91	21,1	45,6
Spitzwegerich	0,20	0,30	66	74	13,1	22,1

Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Tabelle C.2:** Ernteflächen, Erntemengen und Trockengut-Erträge pro Hektar bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. im Jahr 2015.

Pflanzenart	Ernte- fläche	FG- Masse	TG- Masse	TG-Ertrag 2015		Anmerkungen
				ha	t <sub>FG</sub>	
Baldrian	20	38	10	0,5	26	sehr kleiner Ertrag
Goldrute	3	48	17	5,7	123	überdurchschn. Ertrag
Johanniskraut	40	98	33	0,8	37	sehr kleiner Ertrag
Kamille	455	784	189	0,4	92	unterdurchschn. Ertrag
Kapuzinerkresse	4	33	6	1,4	66	kleiner Ertrag
Melisse	36	904	222	6,2	137	überdurchschn. Ertrag
Mutterkraut	6	10	3	0,5	118	Pflückernte
Pfefferminze	81	1.400	317	3,9	86	1. und 2. Standjahr
Rosenwurz	–	29	8	–	–	Lohntrocknung
Spitzwegerich	20	316	52	2,6	58	kleiner Ertrag
Summe	665	3.659	857			

FG = Frischgut; TG = Trockengut; %-Werte beziehen sich auf durchschnittlich zu erwartende Trockengut-Erträge (vgl. **Tabelle 2.6**); Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

**Tabelle C.3:** Ermittlung täglicher Erntemengen und Ernteflächen im großflächigen Anbau (gesamte Rostfläche: 200 m<sup>2</sup>, exemplarisch).

Pflanzenart	Spez. Belegung FG pro m <sup>2</sup> Rostfläche vgl. Tabelle 2.4 kg / m <sup>2</sup>		ges. FG-Masse für 200 m <sup>2</sup> Rostfläche berechnet t		FG-Ertrag pro Ernteschritt vgl. Tabelle B.6 t / ha		Erntefläche pro Belegung berechnet ha		Anmerkungen
	min	max	min	max	min	max	min	max	
Baldrian	97	164	19,4	32,8	1,8	10,8	10,8	3,0	nur eine Ernte
Goldrute	62	99	12,4	19,8	4,2	18,0	3,0	1,1	3 Standjahre, 2 Schnitte
Johanniskraut	66	94	13,2	18,8	1,4	6,9	9,4	2,7	2 Standjahre, 2 Schnitte
Kamille	120	195	24,0	39,0	0,6	1,4	40,0	27,9	2 Schnitte
Kapuzinerkresse	51	76	10,2	15,2	2,3	10,2	4,4	1,5	3 Schnitte
Melisse	80	112	16,0	22,4	4,1	16,3	3,9	1,4	3 Standjahre, 2 Schnitte
Mutterkraut	82	137	16,4	27,4	1,1	5,3	14,9	5,2	2 Standjahre, 2 Schnitte
Pfefferminze	80	130	16,0	26,0	2,7	14,1	5,9	1,8	3 Standjahre, 2–3 Schnitte
Rosenwurz	77	167	15,4	33,4	1,8	9,2	8,6	3,6	Ernte im 3. Standjahr
Spitzwegerich	79	134	15,8	26,8	3,0	21,2	5,3	1,3	3 Standjahre, 3 Schnitte

FG = Frischgut; Rosenwurz: FG-Erträge nicht repräsentativ;  
Grundlage der Daten: Agrarprodukte Ludwigshof e.G. (2015).

## Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen

In **Abb. C.1**, **Abb. C.2** und **Abb. C.3** sind drei mögliche Schemata zur Bewirtschaftung von mehreren Flächentrocknern bei der Umlagerung und Zusammenlegung von angetrockneten Arzneipflanzen dargestellt (Ziegler et al., 2013b). Die Trocknungshalle besteht aus insgesamt fünf Trocknungsrosten. Die Bewirtschaftungsschemata umfassen jeweils zwei Trocknungswochen bzw. 16 Tage. Die Trocknungstage 1, 2, 3 und 4 sind entsprechend nummeriert, die unterschiedlichen Farben repräsentieren unterschiedliche Chargen und zeigen, wie das Trocknungsgut "durch die Halle wandert".

Im Bewirtschaftungsschema I (**Abb. C.1**) werden die Roste 1 und 2 an sechs Tagen pro Woche (außer Sonntag) mit Frischgut belegt. Nach dem ersten Trocknungstag wird die angetrocknete Ware auf Rost 3 umgelagert und zusammengelegt. Nach zwei Trocknungstagen erfolgt eine zweite Umlagerung auf Rost 4, nach drei Trocknungstagen eine dritte Umlagerung auf Rost 5. Bei einer Trocknungsdauer von insgesamt vier Tagen wird die getrocknete Ware am Morgen des fünften Tages ausgelagert.

Dieses Schema könnte theoretisch Tag für Tag so fortgesetzt werden, am Sonntag wird die Trocknungsanlage jedoch nicht bewirtschaftet. Das Trocknungsgut verbleibt deshalb am Sonntag auf den jeweiligen Rosten und wird ohne Umlagerung weitergetrocknet. Der Montag der zweiten Trocknungswoche beginnt mit der Auslagerung von Rost 4 und der erforderlichen Umlagerung (Rost 3 auf Rost 4, Roste 1 und 2 auf Rost 3). Wird die weitere Bewirtschaftung so wie in der ersten Trocknungswoche fortgeführt, so sind nach 16 Tagen insgesamt 24 Chargen fertiggetrocknet. Die einzelnen Chargen bzw. Rosttage mit Frischgutbelegung sind jeweils durch den Trocknungstag 1 gekennzeichnet.

Die Auslastung der Trocknungsanlage lässt sich überschlägig mit Hilfe der sogenannten "Rosttage" quantifizieren. 16 Tage auf 5 Rosten stehen für insgesamt 80 Rosttage (100%). Im Bewirtschaftungsschema I ergeben sich 62 Rosttage mit Trocknung. Dies entspricht einer Auslastung der Trocknungsroste von 77,5 %. Wird die Trocknungshalle über einen längeren Zeitraum entsprechend betrieben, so ergibt sich aufgrund der kleineren Anzahl von Rosttagen ohne Trocknung eine höhere Auslastung.<sup>66</sup>

Im Bewirtschaftungsschema II (**Abb. C.2**) verbleibt das Frischgut für zwei Trocknungstage auf den Rosten 1 und 2. Dies ist z.B. bei der Trocknung von Ganzpflanzen sinnvoll, da bei der Umlagerung der angetrockneten Ware durch Verdichtung neue Feuchtenester entstehen können. Außerdem muss statt an sechs Tagen pro Woche nur noch an drei Tagen pro Woche geerntet werden (Montag, Mittwoch und Freitag). Bei einer Trocknungsdauer von vier Tagen pro Charge ergibt sich jedoch eine sehr geringe Auslastung der Trocknungsroste von nur 47,5 % statt 77,5 %.

Im Bewirtschaftungsschema III (**Abb. C.3**) erfolgt die Frischgutbelegung auf den Rosten 1, 2 und 3 statt nur auf den Rosten 1 und 2. Außerdem wird die angetrocknete Ware zusätzlich am vierten Trocknungstag auf Rost 5 zusammengelegt. Es ergibt sich eine Auslastung der Trocknungsroste von 72,5 %.

---

<sup>66</sup> Für vier Trocknungswochen bzw. 30 Trocknungstage in Folge ergäbe sich eine Auslastung von 82,7 % (150 Rosttage gesamt, 124 Rosttage mit Trocknung, nicht dargestellt).

**Beispiele zur Bewirtschaftung mehrerer Trocknungsroste**

Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Rosttage	
Rost 1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2			14	87,5%
Rost 2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2			14	87,5%
Rost 3		2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3		14	87,5%
Rost 4			3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	14	87,5%
Rost 5				4	4	4					4	4	4				6	37,5%

Rosttage gesamt 80 100%  
**Rosttage mit Trocknung / Auslastung 62 77,5%**  
 Rosttage mit Frischgutbelegung 24 30,0%

**Abb. C.1:** Bewirtschaftungsschema I: Frischgutbelegung auf den Rosten 1 und 2 an sechs Tagen pro Woche, Umlagerung am zweiten, dritten und vierten Trocknungstag (außer Sonntag) (Ziegler et al., 2013b).

Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Rosttage	
Rost 1	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3			14	87,5%
Rost 2	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3			14	87,5%
Rost 3			3		3			4		3		3			4		6	37,5%
Rost 4				4		4					4		4				4	25,0%
Rost 5																	0	0,0%

Rosttage gesamt 80 100%  
**Rosttage mit Trocknung / Auslastung 38 47,5%**  
 Rosttage mit Frischgutbelegung 12 15,0%

**Abb. C.2:** Bewirtschaftungsschema II: Frischgutbelegung auf den Rosten 1 und 2 an drei Tagen pro Woche, Umlagerung am dritten (außer Sonntag) und am vierten Trocknungstag (Ziegler et al., 2013b).

Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Rosttage	
Rost 1	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3			14	87,5%
Rost 2	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3			14	87,5%
Rost 3	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3			14	87,5%
Rost 4			3		3			4		3		3			4		6	37,5%
Rost 5			3	4	3	4		4		3	4	3	4		4		10	62,5%

Rosttage gesamt 80 100%  
**Rosttage mit Trocknung / Auslastung 58 72,5%**  
 Rosttage mit Frischgutbelegung 18 22,5%

**Abb. C.3:** Bewirtschaftungsschema III: Frischgutbelegung auf den Rosten 1, 2 und 3 an drei Tagen pro Woche, Umlagerung am dritten (außer Sonntag) und am vierten Trocknungstag (Ziegler et al., 2013b).

## D Energetische und anlagentechnische Tabellen und Abbildungen

**Tabelle D.1:** Umrechnung von Energieeinheiten.

Gegebene Einheit oder Größe, Umrechnung, Anmerkungen		
Vorsätze für Maßeinheiten h = Hekto (10 <sup>2</sup> )    k = Kilo (10 <sup>3</sup> )    M = Mega (10 <sup>6</sup> ) G = Giga (10 <sup>9</sup> )    T = Tera (10 <sup>12</sup> )    P = Peta (10 <sup>15</sup> )		
Energie <i>MJ</i> 1 <i>MJ</i> = 1.000 <i>kJ</i> = 0,2778 <i>kWh</i> = 239 <i>kcal</i> <i>kWh</i> 1 <i>kWh</i> = 3,6 <i>MJ</i> = 3.600 <i>kJ</i> = 860 <i>kcal</i> <i>kcal</i> 1 <i>kcal</i> = 4,1868 <i>kJ</i> = 0,001163 <i>kWh</i>		
Leistung <i>kW</i> 1 <i>kW</i> = 1 <i>kJ/s</i> = 1 <i>kWh/h</i>		
Volumenbezogener Heizwert gasförmiger Brennstoffe  $H_V(p, T) = H_{V,i.N.} \cdot \frac{p}{p_{i.N.}} \cdot \frac{T_{i.N.}}{T}$ <p>i.N. = in Normbedingung:  <math>p_{i.N.} = 101.325 \text{ Pa}</math>  <math>T_{i.N.} = 273,15 \text{ K (0 °C)}</math>  <math>T = T_{i.N.} + \vartheta</math></p> Bei kleineren Gesamtdrücken und höheren Temperaturen des Brennstoffs ist der volumenbezogene Heizwert deutlich kleiner (bei 100.000 Pa und 25 °C ca. 90 % im Vergleich zur Normbedingung).	Einheit  <i>MJ/m<sup>3</sup></i>	Gl.-Nr.  ( D.1 )

**Tabelle D.2:** Heiz- und Brennwerte unterschiedlicher Brennstoffe.

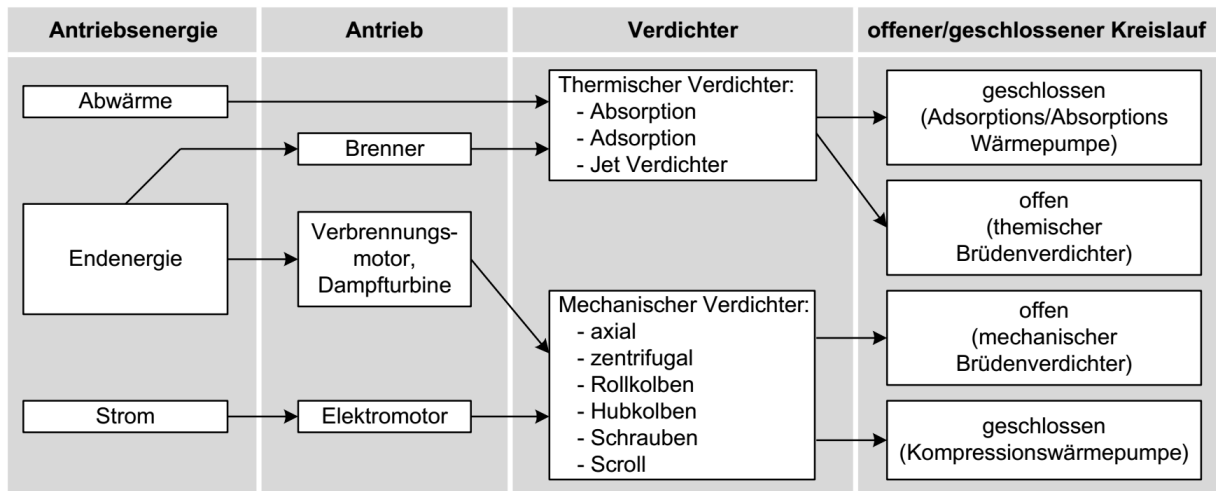
Brennstoff bei 25 °C	Brennwert <i>MJ/kg</i>	Heizwert <i>MJ/kg</i>	Heizwert in <i>kWh</i>	Anmerkungen
<b>Feste Brennstoffe</b>			<i>kWh/kg</i>	
Steinkohle	25,5 – 33,4	25,0 – 32,7	6,9 – 9,1	diverse Typen
Braunkohlebriketts	21,0	19,6	5,4	
Holzpellets, Holzbriketts	17,5 – 20,6	16,5 – 19,4	4,6 – 5,4	
<b>Flüssige Brennstoffe</b>			<i>kWh/l</i>	bei einer Dichte von
Heizöl EL	45,4	42,6	10,0	0,845 <i>kg/l</i>
Heizöl schwer	41,5	39,5	10,9	0,990 <i>kg/l</i>
Biodiesel	40,0	37,0	9,0	0,880 <i>kg/l</i>
<b>Gasförmige Brennstoffe</b>			<i>kWh/m<sup>3</sup></i>	<i>kWh/m<sup>3</sup> i. N.</i> (1)
Erdgas	36 – 50	32 – 45	7,8 – 10,3	8,6 – 11,4 (2)
Biogas	17,1 – 25,5	15,4 – 23,0	5,0 – 6,3	5,5 – 7,0 (3)
Flüssiggas	50,3	46,3		(4)

(1) i.N. = in Normbedingung (101.325 Pa, 0 °C); (2) je nach Sorte; (3) bei einem Methananteil von 55 – 70 %; (4) entspricht einem Heizwert von 12,9 kWh/kg.

**Tabelle D.3:** Primärenergiefaktoren unterschiedlicher Energieträger.

Energieträger, Symbol			PE-Faktor		
			gesamt (1) $\Pi_{ges}$	nicht erneuerbarer Anteil (2) $\Pi_{konv}$	erneuerbarer Anteil (6) $\Pi_{reg}$
<b>Brennstoffe</b>					
Heizöl, Erdgas, Flüssiggas, Steinkohle			1,1	1,1	0
Braunkohle			1,2	1,2	0
Holz (z.B. lufttrockenes Stückholz, Pellets)			1,2	0,2	1,0
Biogas, Biodiesel			1,5	0,5	1,0
<b>Elektrische Energie</b>					
Allgemeiner Strommix in Deutschland (3)			2,8	1,8	1,0
Verdrängungs-Strommix (4)			2,8	2,8	0
<b>Nah- / Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung</b>					
bei Einsatz fossiler Energieträger (5)			0,7	0,7	0
bei Einsatz erneuerbarer Energieträger			0,7	0	0,7
<b>Nah- / Fernwärme aus Heizwerken</b>					
bei Einsatz fossiler Energieträger			1,3	1,3	0
bei Einsatz erneuerbarer Energieträger			1,3	0,1	1,2
<b>Umweltenergie</b>					
Solarenergie, Erdwärme, Geothermie			1,0	0	1,0
Umgebungswärme, Umgebungskälte			1,0	0	1,0
<b>Elektro-Wärmepumpen (6)</b>	$COP$	$\frac{1}{COP}$	$\Pi_{el,ges}$	$\Pi_{WP}$	$1 - \frac{1}{COP}$
$\Pi_{WP} = \Pi_{el,konv} + \frac{1}{COP}$	4,0	0,250	2,8	2,05	0,750
	4,5	0,222	2,8	2,02	0,778
mit $\Pi_{el,konv} = 1,8$	5,0	0,200	2,8	2,00	0,800
nach Gl. (3.16)	5,5	0,182	2,8	1,98	0,818
	6,0	0,167	2,8	1,97	0,833

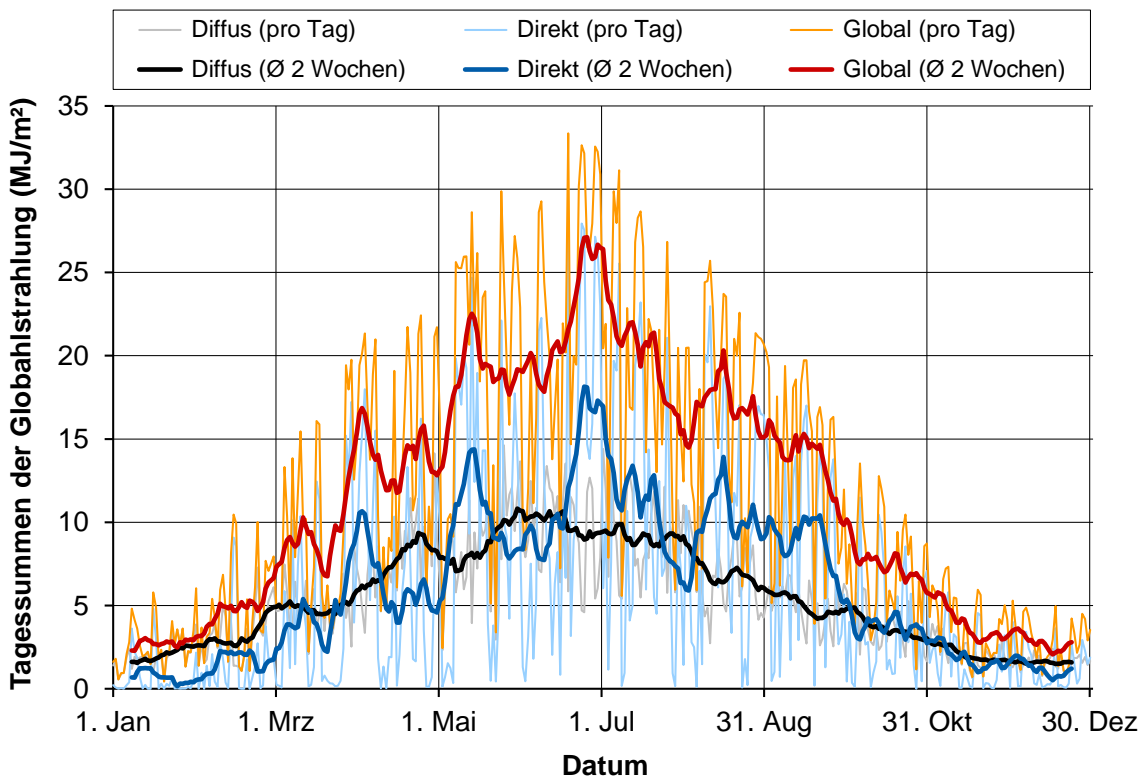
- (1) Primärenergiefaktoren nach der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV, 2013), Bezugsgröße: Heizwert.
- (2) Ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist nur mit dem konventionellen bzw. dem nicht erneuerbaren Anteil verbunden: Je größer das Verhältnis vom gesamtem PE-Faktor zum nicht erneuerbaren Anteil, desto größer die Nachhaltigkeit.
- (3) Aufgrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien wurde der PE-Faktor für elektrischen Strom zum 1.1.2016 auf 1,8 gesenkt (nicht erneuerbarer Anteil).
- (4) In der EnEV bezeichnet der Verdrängungs-Strommix den aus KWK-Anlagen in das öffentliche Netz eingespeisten Strom.
- (5) Die PE-Faktoren gelten für einen KWK-Anteil im Wärmenetz von mindestens 70 %.
- (6) Der PE-Faktor für elektrisch angetriebene Wärmepumpen ist abhängig von der Leistungszahl  $COP$  (coefficient of performance). Die Berechnung wird in Abschnitt 3.3 erläutert.



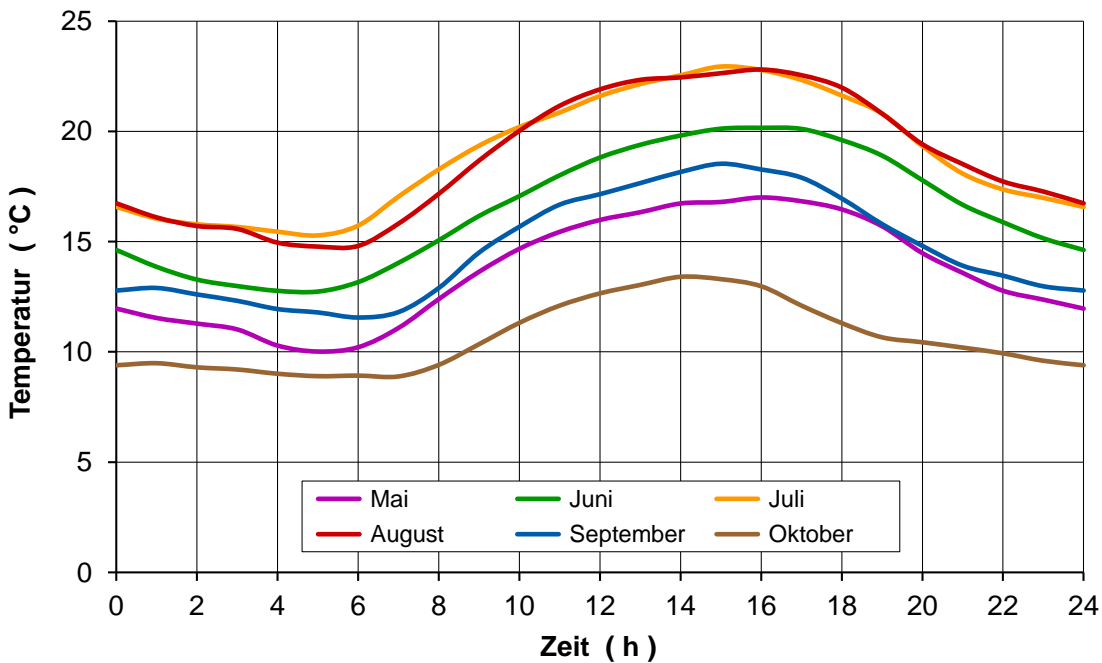
**Abb. D.1:** Technische Implementierungen des Wärmepumpenprinzips (Wolf et al., 2014).



**Jahresgang der Solarstrahlung und Tagesverläufe der mittleren Außentemperatur**



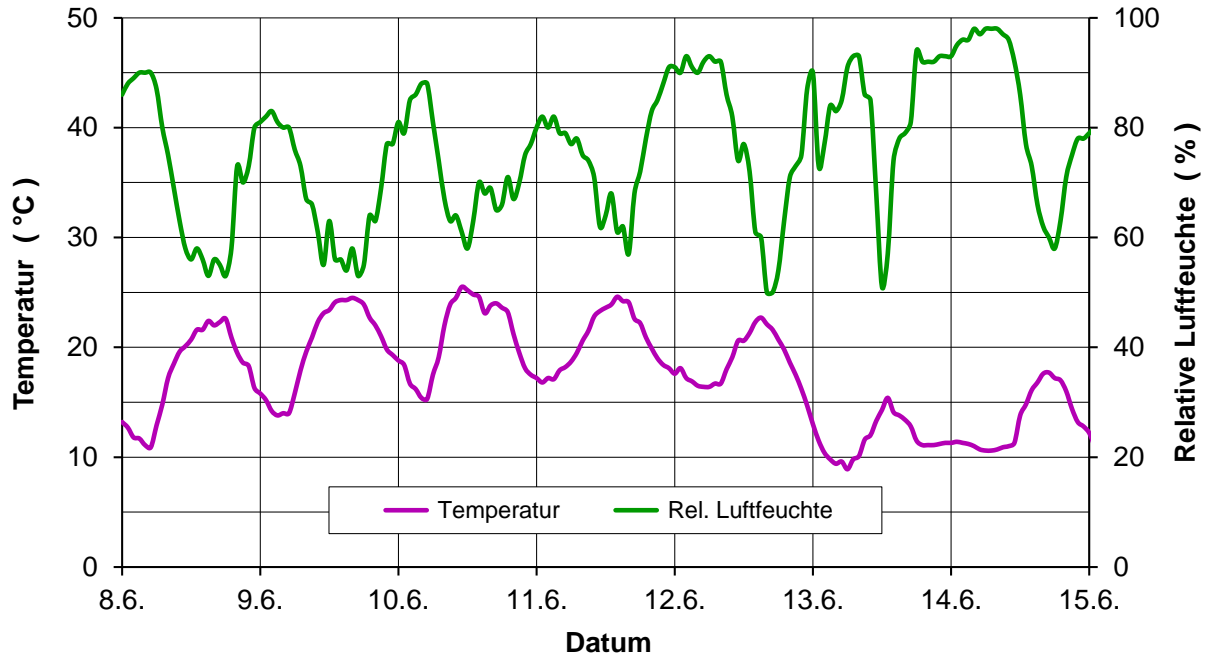
**Abb. D.2:** Tagessummen der Solarstrahlungsdichte in der Horizontalebene am Standort Ranis im Jahresverlauf (DWD, 2016).



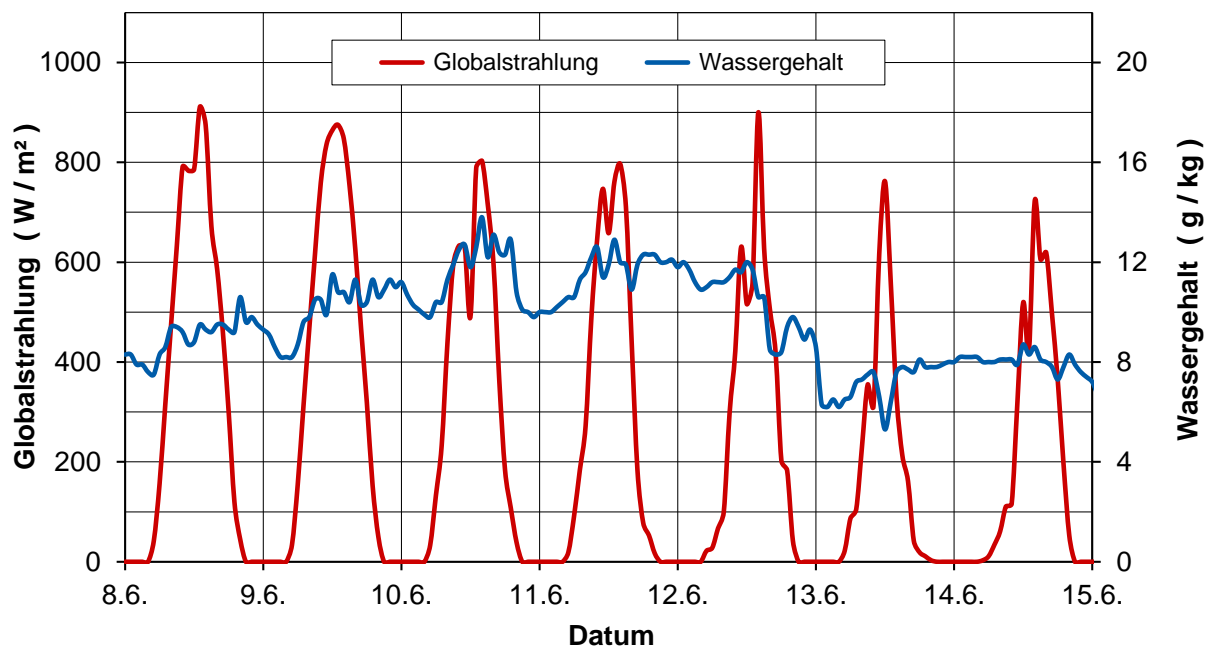
**Abb. D.3:** Durchschnittliche Tagesverläufe der mittleren Außenlufttemperatur gemittelt über die einzelnen Monate Mai bis Oktober am Standort Ranis (DWD, 2016).

### Beispielhafte Klimadaten für eine Woche im Juni am Standort Ranis

Die relative Luftfeuchte schwingt im Tagesgang entgegengesetzt zur Temperatur der Außenluft (**Abb. D.4**). Die Globalstrahlungsdichte und der Wassergehalt der Außenluft ändern sich je nach Wetterlage (**Abb. D.5**).



**Abb. D.4:** Temperatur und relative Feuchte der Außenluft für eine Woche im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).



**Abb. D.5:** Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene und Wassergehalt der Außenluft für eine Woche im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).

**Tabelle D.4:** Berechnungsformeln für solare Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung.

Größe, Formel, Anmerkungen	Einheit	Gl.-Nr.
Die Berechnungsformeln basieren auf dem von Stryi-Hipp et al. (2014) beschriebenen Wirkungsgradmodell für Luftkollektoren mit transparenter Abdeckung. Beispielhafte Werte für die Parameter $\eta_0$ , $a_1$ und $a_2$ wurden dem Zertifikat für den Luftkollektor "JumboSolar" (Typ GLK-M und GLK-F) der Fa. Grammer Solar GmbH entnommen (Grammer-Solar, 2017b). Das Zertifikat (Register-Nr. 011-7S2347 L) ist im Internet über die Datenbank der Zertifizierungsstelle des Deutschen Instituts für Normung verfügbar (DIN-CERTCO, 2017). Mit anderen Parametern können die Gleichungen auch für andere abgedeckte Luftkollektoren verwendet werden.		
Größen und beispielhafte Parameter für Luftkollektoren		
$A_{Ap}$ Aperturfläche eines thermischen Solarkollektors (1)	$m^2$	
$\dot{G}_{Ap}$ Globalstrahlung pro $m^2$ Aperturfläche	$W/m^2$	
$\eta_0 = 0,794$ Optischer Wirkungsgrad des Kollektors (2, 3)	–	
$a_1 = 9,508$ Kollektor-Parameter (2, 4)	$W/(m^2 \cdot K)$	
$a_2 = 0$ Kollektor-Parameter (2, 5)	$W/(m^2 \cdot K^2)$	
$a_3 = 26$ Kollektor-Parameter (6)	$s/kg_L$	
Mittlere Lufttemperatur im Kollektor		
$\vartheta_{L,m} = (\vartheta_{L,ein} + \vartheta_{L,aus})/2$	$^{\circ}C$	( D.2 )
Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung		
$\Delta\vartheta_m = \vartheta_{L,m} - \vartheta_U$	$K$	( D.3 )
Reduzierte Temperaturdifferenz		
$\Omega = \Delta\vartheta_m / \dot{G}_{Ap}$	$K \cdot m^2/W$	( D.4 )
Massenstromabhängiger Kollektorwirkungsgradfaktor (7)		
$F'(\dot{m}_L) = 1 - \exp(-a_3 \cdot \dot{m}_L)$	–	( D.5 )
Thermischer Wirkungsgrad		
$\eta(\Omega, \dot{m}_L) = F'(\dot{m}_L) \cdot (\eta_0 - a_1 \cdot \Omega - a_2 \cdot \Omega^2)$	–	( D.6 )
Nutzwärmeleistung		
$\dot{Q}_{nutz} = \eta(\Omega, \dot{m}_L) \cdot A_{Ap} \cdot \dot{G}_{Ap} = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{L,aus} - \vartheta_{L,ein})$	$W$	( D.7 )
Austrittstemperatur der Luft		
$\vartheta_{L,aus} = \vartheta_{L,ein} + \eta(\Omega, \dot{m}_L) \cdot \frac{A_{Ap} \cdot \dot{G}_{Ap}}{\dot{m}_L \cdot c_{pL}}$	$^{\circ}C$	( D.8 )

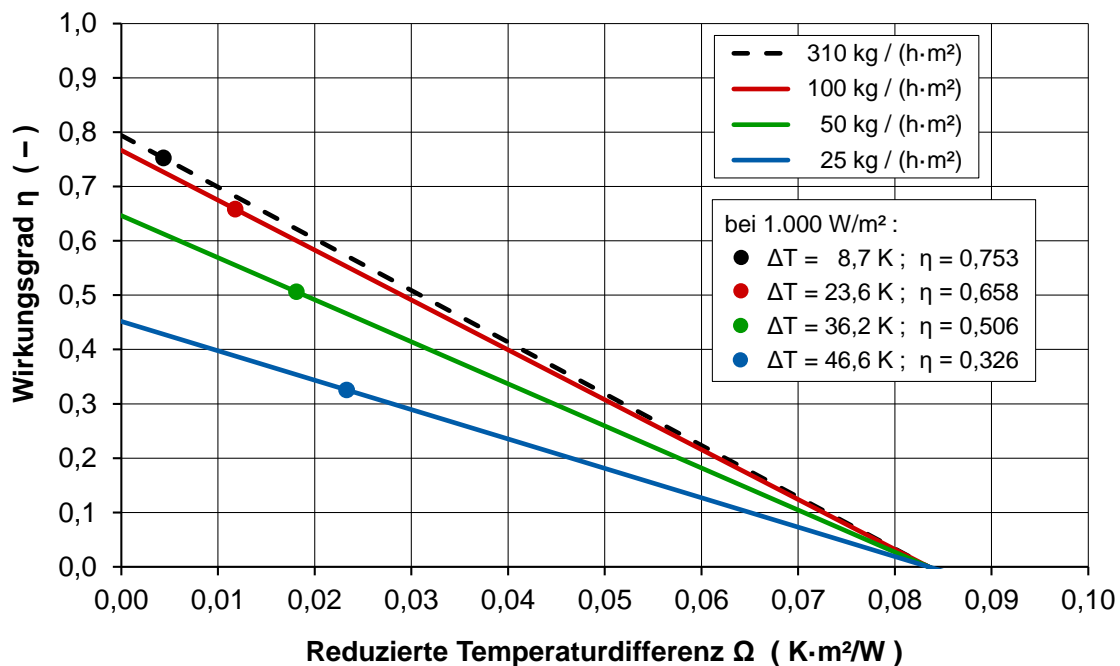
- (1) Die Aperturfläche (ohne Rahmen) ist immer kleiner als die Brutto-Kollektorfläche (inkl. Rahmen);
- (2) DIN CERTO Zertifikat Nr. 011-7S2347 L: Globalstrahlung  $\dot{G} = 1.000 W/m^2$ ; Luftmassenstrom pro  $m^2$  Aperturfläche:  $\dot{m}''_L = 0,086 kg/(s \cdot m^2)$ ; Umgebungstemperatur:  $\vartheta_U = 30 ^{\circ}C$ ;
- (3) Der optische Wirkungsgrad entspricht dem maximalen thermischen Wirkungsgrad, der bei sehr großem Massenstrom erreicht werden kann;
- (4) Wärmedurchgangskoeffizient; (5) temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient;
- (6) Der massenstromabhängige Kollektorwirkungsgradfaktor  $a_3$  wurde geschätzt, da hierzu von der Fa. Grammer Solar GmbH keine Aussage gemacht werden konnte (Grammer-Solar, 2017a);
- (7) Der Kollektorwirkungsgradfaktor  $F'$  hängt vom Wärmedurchgangswiderstand zwischen Absorber und Fluid ab.

## Wirkungsgrade von Luftkollektoren

Die von Luftkollektoren angesaugte Umgebungsluft wird je nach Einstrahlung und Massenstrom auf eine bestimmte Austrittstemperatur erwärmt. Bei kleineren Luftmassenströmen ergeben sich höhere Austrittstemperaturen der Luft und umgekehrt. Je höher die Austrittstemperatur, umso wärmer wird der Kollektor, und umso größer sind die Wärmeverluste. Der thermische Wirkungsgrad und die nutzbare Wärmeleistung sinken deshalb bei kleineren Luftmassenströmen.

Die Wirkungsgrade werden üblicherweise über der sog. reduzierten Temperaturdifferenz  $\Omega$  nach Gl. D.4 dargestellt (**Tabelle D.4**). Da die Temperatur des Absorbers schwierig zu messen ist und sich längs des Weges durch den Kollektor ändert, wird zur Berechnung von  $\Omega$  die mittlere Lufttemperatur im Kollektor verwendet (Gleichungen D.2 und D.3). Bei der Berechnung des thermischen Wirkungsgrads ist der massenstromabhängige Kollektorwirkungsgradfaktor  $F'(\dot{m}_L)$  zu berücksichtigen (Gl. D.5). Er beschreibt u.a. das Verhältnis aus dem tatsächlichen Energiegewinn zu dem Gewinn, der erreichbar wäre, wenn die lokale Lufttemperatur der Absorbentemperatur entspräche.

Sind die beschriebenen Parameter eines bestimmten Luftkollektors bekannt, so lassen sich die Wirkungsgradkennlinien mit Hilfe von Gl. D.6 für unterschiedliche Massenströme berechnen (**Abb. D.6**).<sup>67</sup> Die zu den jeweiligen Betriebspunkten gehörigen Wirkungsgrade sind wiederum die Basis zur Berechnung der Nutzwärmeleistung (Gl. D.7) und der Austrittstemperatur der Luft (Gl. D.8).

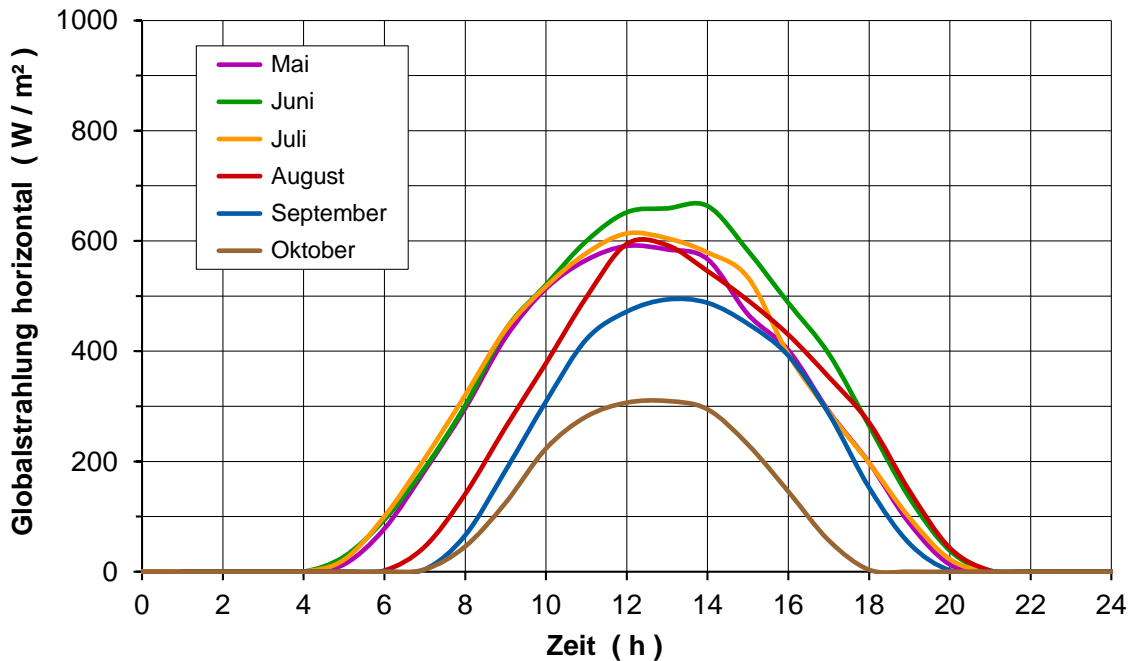


**Abb. D.6:** Linearisierte Wirkungsgradkennlinien eines Luftkollektors mit unterströmtem Absorber bei unterschiedlichen Massenströmen.

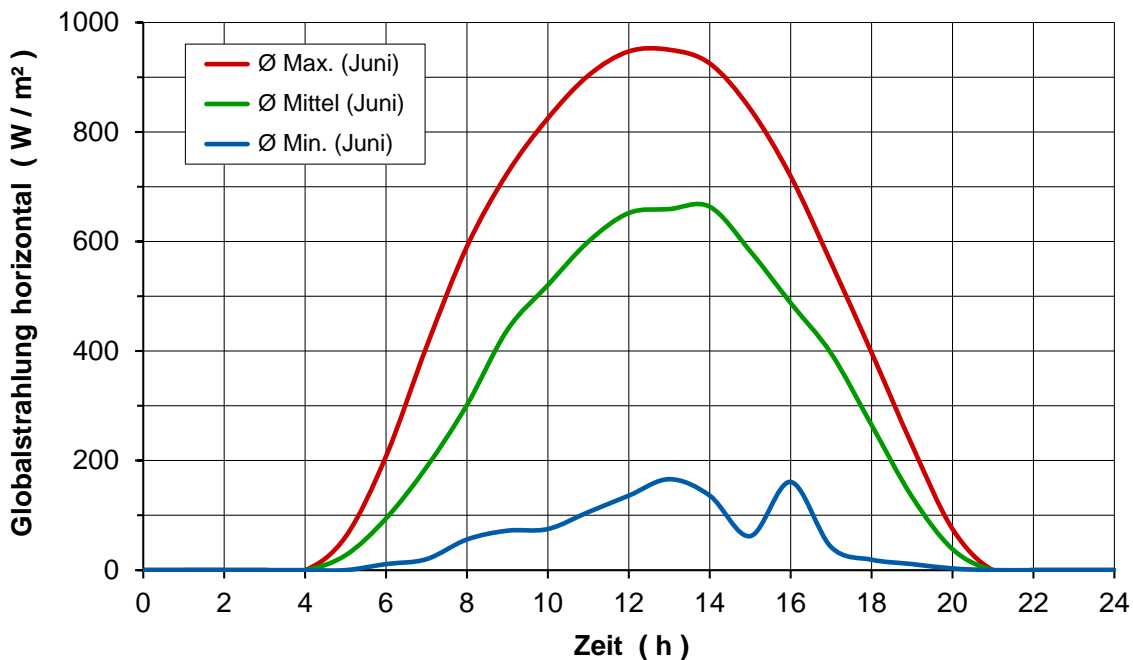
<sup>67</sup> Aufgrund der nichtlinearen Strahlungsverluste weichen reale Wirkungsgradkennlinien geringfügig von einer Geraden ab. Diese Nichtlinearität kann in der Praxis jedoch vernachlässigt werden, insbesondere bei vergleichsweise niedrigen Austrittstemperaturen ( $a_2 = 0$ ).

### Tagesverläufe der Globalstrahlung in der Horizontalebene

Die Maximalwerte der über die einzelnen Monate gemittelten Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte (**Abb. D.7**) liegen zwischen ca.  $660 \text{ W/m}^2$  (Juni),  $600 \text{ W/m}^2$  (Mai, Juli, August),  $490 \text{ W/m}^2$  (September) und  $310 \text{ W/m}^2$  (Oktober). An einzelnen Tagen werden Maximalwerte deutlich über  $900 \text{ W/m}^2$  erreicht (**Abb. D.8**).



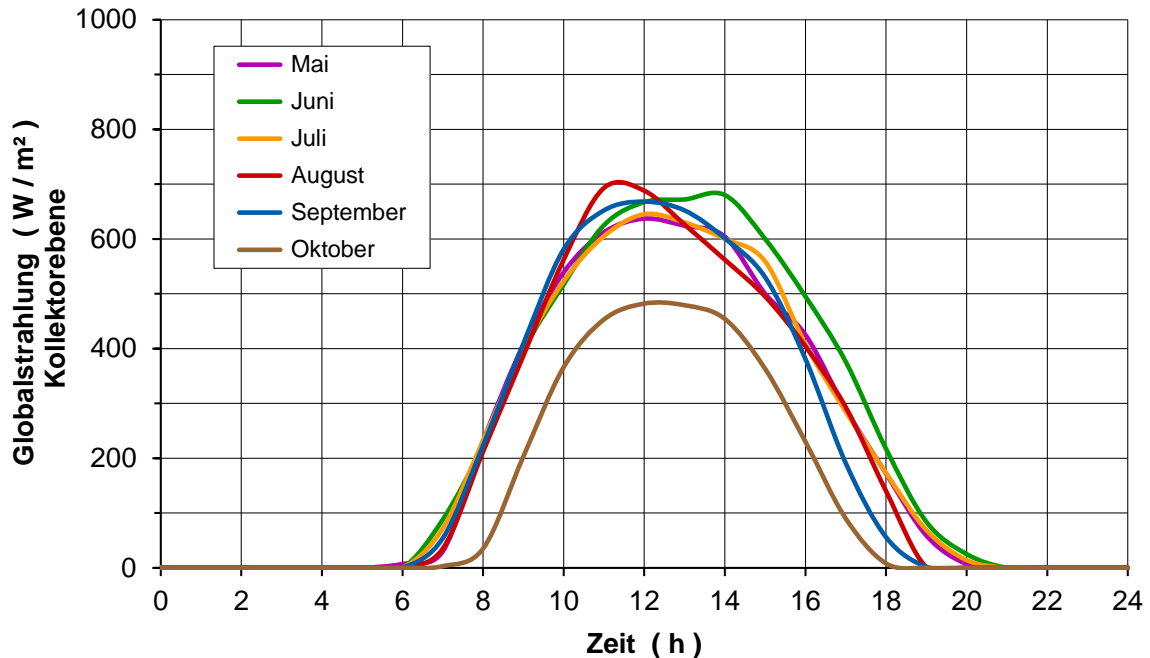
**Abb. D.7:** Durchschnittliche Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene gemittelt über die einzelnen Monate Mai bis Oktober am Standort Ranis (DWD, 2016).



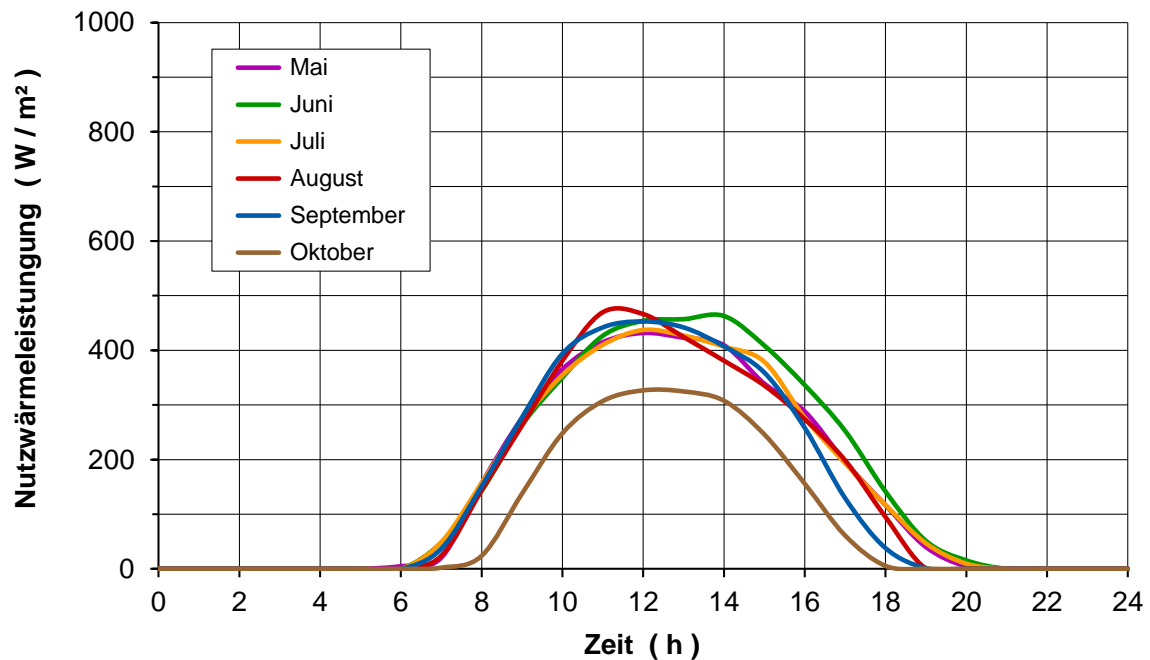
**Abb. D.8:** Durchschnittliche Tagesverläufe der maximalen, mittleren und minimalen Globalstrahlungsdichte in der Horizontalebene im Juni am Standort Ranis (DWD, 2016).

### Globalstrahlung in der Kollektorebene und Nutzwärmeleistung eines Luftkollektors

Die Globalstrahlungsdichte in der Kollektorebene (**Abb. D.9**) liegt in allen dargestellten Monaten über den Werten in der Horizontalebene (**Abb. D.7**). Ursache ist die Neigung des Kollektors um  $45^\circ$ . Die durchschnittliche Nutzwärmeleistung erreicht in den Monaten Mai bis September Maximalwerte zwischen ca. 430 und 470  $W/m^2$  (**Abb. D.10**).



**Abb. D.9:** Durchschnittliche Tagesverläufe der Globalstrahlungsdichte in der Kollektorebene in den Monaten Mai bis Oktober am Standort Ranis (Südausrichtung, Anstellwinkel:  $45^\circ$ ).



**Abb. D.10:** Durchschnittliche Tagesverläufe der Nutzwärmeleistung eines Luftkollektors in den Monaten Mai bis Oktober am Standort Ranis (Südausrichtung, Anstellwinkel:  $45^\circ$ ).

## E Wirtschaftliche Tabellen und Abbildungen

**Tabelle E.1:** Durchschnittliche Energiepreise und Preisverhältnisse für industrielle Abnehmer in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).

Jahr	Elektr. Strom (1)	Erdgas (2)	Heizöl (3)	$\frac{\text{Strom}}{\text{Erdgas}}$	$\frac{\text{Strom}}{\text{Heizöl}}$	$\frac{\text{Heizöl}}{\text{Erdgas}}$
	Cent/kWh	Cent/kWh	Cent/kWh	–	–	–
2008	9,58	3,92	6,57	2,45	1,46	1,68
2009	10,05	3,44	4,38	2,92	2,30	1,27
2010	10,26	3,40	5,49	3,02	1,87	1,61
2011	11,30	3,62	6,93	3,13	1,63	1,92
2012	11,57	3,47	7,53	3,33	1,54	2,17
2013	12,76	3,76	6,79	3,40	1,88	1,81
2014	13,51	3,37	6,44	4,01	2,10	1,91
2015	13,08	3,08	4,88	4,25	2,68	1,59
2016	12,74	2,65	4,09	4,81	3,11	1,55

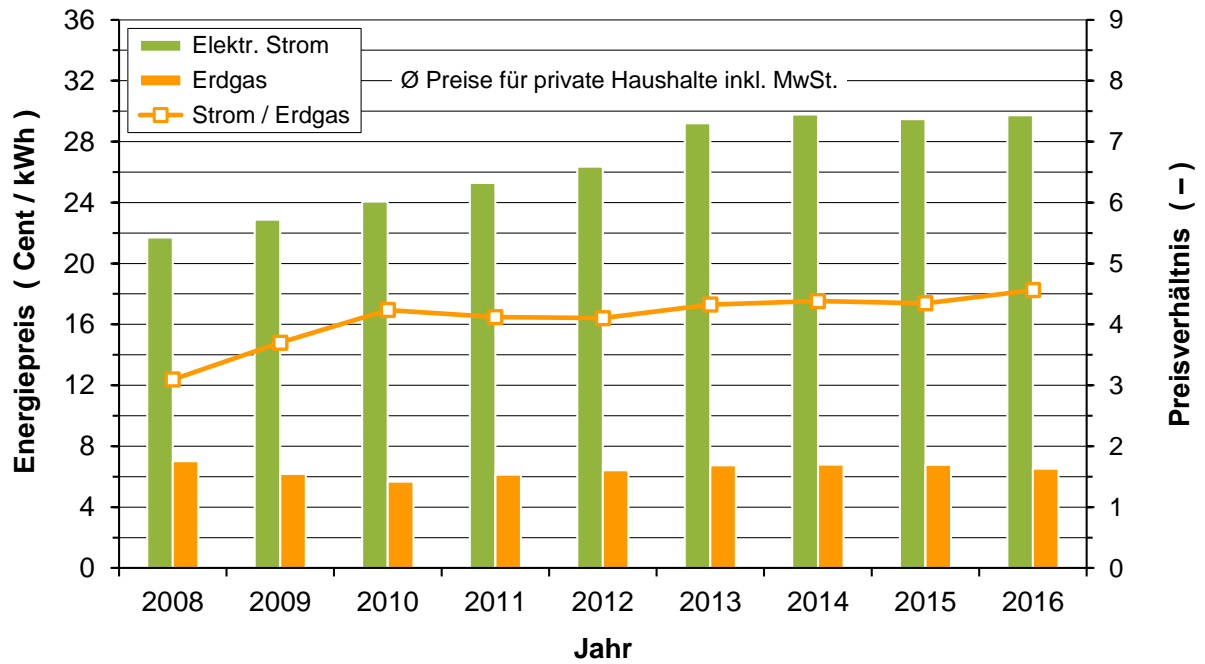
- (1) Elektrischer Strom: Abgabe an industrielle Abnehmer, Jahresverbrauch 2.000 – 20.000 MWh, einschließlich Verbrauchssteuern, ohne Mehrwertsteuer;
- (2) Erdgas: Abgabe an industrielle Abnehmer, Jahresverbrauch 100.000 – 1.000.000 GJ bzw. 27.778 – 277.778 MWh, einschließlich Verbrauchssteuern, ohne Mehrwertsteuer;
- (3) Leichtes Heizöl: Bei Lieferung in Tankkraftwagen an Verbraucher, 40 – 50 Hektoliter pro Auftrag, frei Verbraucher, einschließlich Mineralölsteuer und Erdölbevorratungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer.

**Tabelle E.2:** Durchschnittliche Preise und Preisverhältnis für elektrischen Strom und Erdgas bei Abgabe an private Haushalte in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).

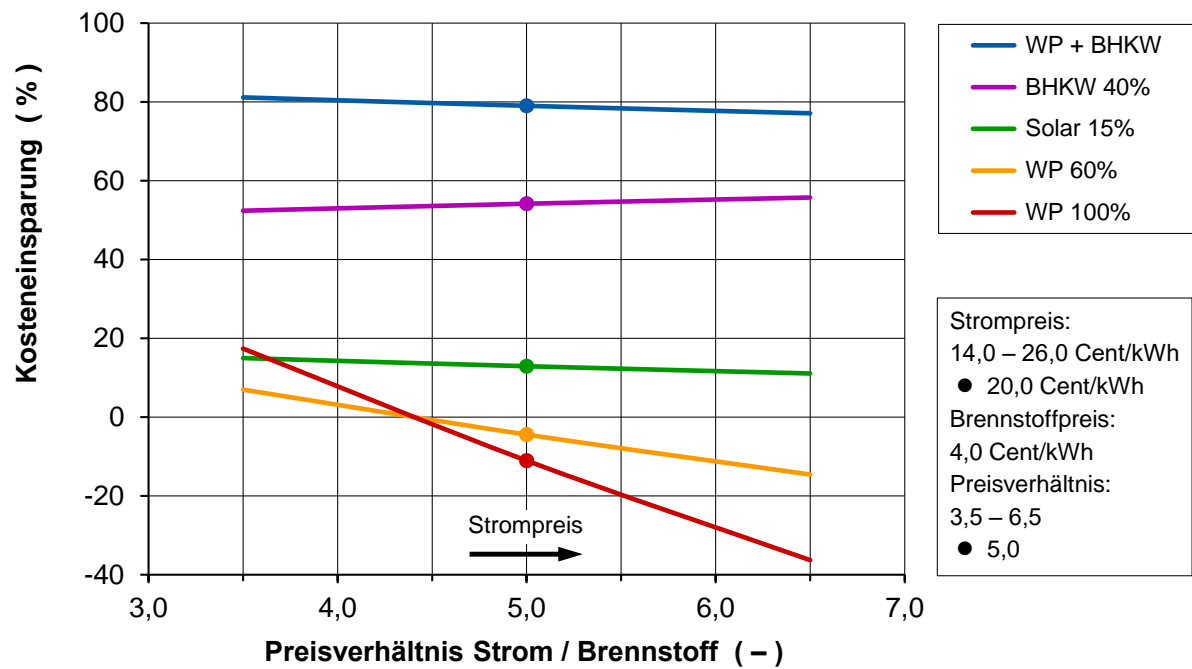
Jahr	Elektr. Strom (1)	davon EEG-Umlage	Erdgas (2)	$\frac{\text{Strom}}{\text{Erdgas}}$
	Cent/kWh	Cent/kWh	Cent/kWh	–
2008	21,72	1,120	7,02	3,10
2009	22,88	1,130	6,19	3,70
2010	24,07	2,047	5,68	4,24
2011	25,30	3,530	6,14	4,12
2012	26,36	3,592	6,43	4,10
2013	29,20	5,277	6,75	4,33
2014	29,78	6,240	6,80	4,38
2015	29,49	6,170	6,79	4,35
2016	29,73	6,354	6,52	4,56

- (1) Elektrischer Strom: Abgabe an private Haushalte, Jahresverbrauch 2.500 – 5.000 kWh, alle Steuern inbegriffen;
- (2) Erdgas: Abgabe an private Haushalte, Jahresverbrauch 20 – 200 GJ bzw. 5.556 – 55.556 kWh, alle Steuern inbegriffen.





**Abb. E.1:** Durchschnittliche Preise und Preisverhältnis für elektrischen Strom und Erdgas bei Abgabe an private Haushalte in Deutschland nach Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).



**Abb. E.2:** Einsparung von Energiekosten im Teilumluf-Betrieb bei unterschiedlichen Varianten der Energieversorgung und Strompreisen.

Eine Variation der Brennstoffpreise für einen Strompreis von 20,0 Cent/kWh zeigt **Abb. 7.2.**

**Tabelle E.3:** Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungsansätze für KWK-Anlagen auf Motorenbasis nach Schaumann & Schmitz (2010).

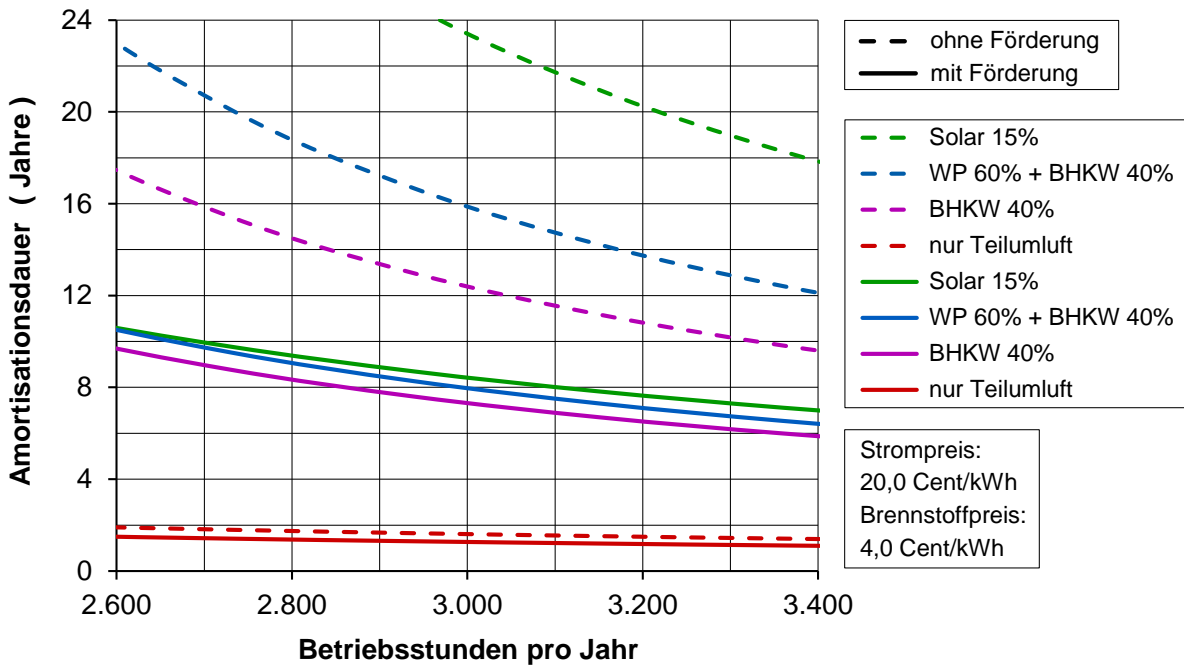
Nr.	Anlagenkomponente	Dimension	Investitionen	
			von	bis
1	Baugrundstück		(1)	(1)
2	Erschließungsmaßnahmen		(1)	(1)
3	Bautechnik / -Konstruktion	€/m <sup>3</sup>	150	600
4	Technische Anlagen			
4.1	KWK-Anlage komplett (Gl. 7.2)	€/kW <sub>el</sub>	<i>Richtpreis</i> ≈ 4.361 · P <sup>-0,33</sup>	
4.2	Betriebsmittelversorgungsanlagen	€/kW <sub>el</sub>	40	190
4.3	Reserve- / Spitzenlastkesselanlagen	€/kW <sub>el</sub>	20	85
4.4	Heizwasser-Kreislauf-Komponenten (2)	€/kW <sub>el</sub>	15	115
5	Gebäudetechnik (3)	€/kW <sub>el</sub>	10	65
6	Stahlbaukonstruktion		(1)	(1)
<b>Wartung und Instandhaltung</b>			<b>Jährliche Kosten (4)</b>	
			<b>von</b>	<b>bis</b>
	Motorenaggregate einschließlich Hilfsanlagen (Gl. 7.3)	Cent/kW <sub>el</sub>	<i>Wartung</i> ≈ 5,88 · P <sup>-0,27</sup>	
	Betriebsmittelversorgungsanlagen	%/a	1,2	1,8
	Reserve- / Spitzenlastkesselanlagen	%/a	1,0	2,5
	Heizwasser-Kreislauf-Komponenten	%/a	1,8	2,2
	Gebäudetechnik (3)	%/a	1,6	2,5
	Schaltanlage (Stromeinspeisung)	%/a	1,8	2,2
	Bautechnik	%/a	1,0	1,5

(1) Diese Kosten können nur einzelfallbezogen ermittelt werden; (2) Wärmezentrale; (3) Heizung, Lüftung, Sanitär; (4) in % der anteiligen Investitionen.

**Tabelle E.4:** Amortisationsrechnung für drei Varianten der Energieversorgung bei 3.000 Betriebsstunden pro Jahr (Abschätzung).

Werte für 100 m <sup>2</sup> Rostfläche		Konv. Teilumluf- tbetrieb	40 % BHKW	60 % WP + 40 % BHKW	15 % Solar
Größe, Einheit, Variante		I	C-I	D-I	E-I
<u>Investitionen</u>					
Hauptkomponenten (1, 2)	€	10.000	110.000	170.000	150.000
Integration, Zuschläge (1)	€	10.000	110.000	170.000	52.000
Gesamte Investitionskosten	€	20.000	220.000	340.000	202.000
bezogen auf Hauptkomponenten		200%	200%	200%	135%
<u>Fördermittel</u>					
Fördersumme (3)	€	4.000	66.000	121.200	91.000
Gesamte Förderquote (3)		20%	30%	36%	45%
Investitionen abzgl. Förderung	€	16.000	154.000	218.800	111.000
<u>Fixkosten</u>					
Ø Abschreibung (4)	€/a	1.600	15.400	21.880	11.100
Kalkulatorische Zinsen (5)	€/a	800	7.700	10.940	5.550
Summe Fixkosten	€/a	2.400	23.100	32.820	16.650
<u>Variable Kosten</u>					
Wartungskosten (1)	€/a	1.000	10.000	11.500	1.500
<u>Rentabilität und Amortisation</u>					
Kapitaleinsatz (6)	€	16.000	154.000	218.800	111.000
Ø Fixkosten + variable Kosten	€/a	3.400	33.100	44.320	18.150
Ø Einsparung Energiekosten (7)	€/a	14.425	38.747	49.907	20.225
Ø Gewinn	€/a	11.025	5.648	5.588	2.076
Ø Rückfluss	€/a	12.625	21.048	27.468	13.176
Rentabilität	%	147,8	17,3	15,1	13,7
Amortisationsdauer	Jahre	1,3	7,3	8,0	8,4

(1) Quellen: Schaumann & Schmitz (2010), Wolf et al. (2014), Grammer-Solar (2017a);  
 (2) Teilumluf: pauschale Abschätzung; (3) Teilumluf, BHKW und Wärmepumpe: BLE-Förderung;  
 Wärmepumpe: zusätzlich KfW-Förderung; Solaranlage: BAFA-Förderung; (4) Nutzungsdauer:  
 10 Jahre; (5) Zinssatz: 5 %; (6) Investitionen abzgl. Förderung; (7) Strompreis: 20,0 Cent/kWh ;  
 Erdgaspreis: 4,0 Cent/kWh.



**Abb. E.3:** Amortisationsdauer für drei Varianten der Energieversorgung mit und ohne Fördermittel (Abschätzung).

## F Inhaltliche Ergänzungen

### F.2 Ergänzungen zu Kapitel 2: Produktspezifische Aspekte

#### zu 2.2 Vorbehandlung und Erstverarbeitung

In Ergänzung zu Abschnitt 2.2 werden nachfolgend Verfahrensschritte zur Vorbehandlung zwischen Ernte und Trocknung und zur Erstverarbeitung nach der Trocknung detailliert für beispielhafte Kulturen beschrieben. Dabei wird auf die Flächentrocknung Bezug genommen. Die beschriebenen Beispielpflanzen umfassen Kamille und Johanniskraut als Blütendrogen, Pfefferminze und Spitzwegerich als Kraut- bzw. Blattdrogen sowie Baldrian als Wurzel Droge. Bei Wurzel drogen entfällt, wie bereits dargelegt, die Erstverarbeitung nach dem Trocknungsprozess.

#### Vorbehandlung von Kamille

Die maschinelle Kamillenernte erfolgt mit speziell hierfür entwickelten Kamillepflückmaschinen. Die geernteten Pflanzenteile sind die Blütenköpfe, deren Form, Farbe und Reinheit bis zum Beginn des Trocknungsprozesses in möglichst hoher Qualität erhalten werden müssen.

Nach dem Pflückvorgang gelangen die Blütenköpfe mit Stielanteil und anderen Beimengungen (z.B. Unkraut) in den Vorratsbunker der Erntemaschine. Dieser muss so gebaut sein, dass die Blütenköpfe locker liegen können und sich nicht verdichten. Über ein mit Stollen versehenes Transportaustrageband der Erntemaschine werden die Blütenköpfe möglichst schonend auf Transportanhänger mit luftdurchlässigen Seitenwänden übergeben (Eigenerwärmung). Übergabeverluste sind zu vermeiden bzw. so weit wie möglich auszuschließen.

Die Kamillenernte erfolgt ausschließlich in Schönwetterphasen. Der Umschlag der Blütenköpfe auf die Transportanhänger sollte nicht länger als eine Stunde dauern. Um die Transportdauer so kurz wie möglich zu halten, sollte der Transport der Kamilleblüten nach Möglichkeit im Wechselzugprinzip mit schnell fahrenden Traktoren organisiert werden. Unmittelbar nach dem Erreichen des Trocknungsstandorts müssen die Blütenköpfe für die technische Trocknung aufbereitet werden.

Mittels einer Sieb- und Sichtungsanlage, der ein Annahmedosierer vorgeschaltet ist, werden die Blütenköpfe von teilweise noch vorhandenen Stielen, Krautbesatz und anderen Fremdbestandteilen getrennt. Im Ergebnis entstehen zwei Fraktionen Trocknungsware: Kamilleblüten und Kamilleblütenkraut. In diesem Sieb- und Sichtungsprozess erfahren die Blütenköpfe eine Art natürlicher Belüftung, was sich als positiv auf den nachfolgenden technischen Trocknungsprozess auswirkt. Die beiden Fraktionen (Kamilleblüten und Kamilleblütenkraut) werden separat voneinander über Austragebänder auf die jeweilige Transporteinheit übergeben.

Die sortierte Ware sollte schnellstmöglich auf die Trocknungsroste aufgegeben werden. Die Möglichkeit befahrbarer Trocknungsroste bringt arbeitswirtschaftlich große Vorteile, da die Blütenköpfe unmittelbar auf den Trocknungsrosten abgekippt werden können. Die Blütenköpfe sind locker und gleichmäßig auf dem jeweiligen Trocknungsrost zu verteilen, beispielsweise mittels Portalkran und manuellem Ausgleichen. Die Schichthöhe sollte ca. 50 – 75 cm betragen. Die Kaltbelüftung sollte bereits mit Beginn der Rostbelegung erfolgen, um möglichst

alle Blütenköpfe der Schüttung für den nachfolgenden Trocknungsprozess auf eine einheitliche Ausgangstemperatur zu bringen.

### **Vorbehandlung von Johanniskraut**

Johanniskraut hat während seines Blühzeitraums die Eigenschaft, dass sich die wertbestimmenden Inhaltsstoffe in ihrer Zusammensetzung und Menge verändern. So ist zum Beispiel der Wirkstoff Hypericin zu Beginn der Vollblüte am höchsten, wohingegen der Wirkstoff Hyperphorin am Ende des Blühzeitraums bzw. zu Beginn der Samenkapselbildung am höchsten ist. Je nachdem, welcher Inhaltsstoff vom Abnehmer nachgefragt wird, wird der Ernteschnitt zum entsprechenden Blühzeitpunkt durchgeführt. Je nach Sorte und Pflanzenentwicklung beträgt der zu schneidende Blühhorizont ca. 20 – 30 cm.

Der Ernteschnitt von Johanniskraut erfolgt im Parallelverfahren mit Langgutlader und Transportfahrzeug. Zur Vermeidung von Ernteverlusten ist eine umsichtige, abgestimmte Fahrweise unabdingbar. Das geerntete Frischgut wird ohne Umladen sofort zur technischen Trocknung transportiert. Die im Blühhorizont geschnittene Ware liegt aufgrund ihrer Eigenschaften (Stängel- und Stielanteile, Blattanteile, Blütenbestandteile) sehr locker auf der Transporteinheit. Eine 100 %ige Ausnutzung des Transportvolumens sollte nicht erfolgen, da hierbei die Gefahr von Transportverlusten bestünde. Eine Abdeckung des Transportgutes mit Netzen bzw. die nicht volle Ausnutzung des Transportvolumens sind betriebliche Wirtschaftsentscheidungen.

Bei der Flächentrocknung ist eine Zwischenlagerung des geernteten Johanniskrauts nicht erforderlich, da in einer gut abgestimmten Arbeitsorganisation die zu trocknende Ware direkt vom Feld in die Trocknung gelangt und umgehend auf die Trocknungsroste aufgegeben wird. Sollte aus betriebsindividuellen Gründen eine Zwischenlagerung von frisch geschnittenem Johanniskraut erforderlich sein, so muss die Zwischenlagerung auf einer Kaltbelüftungsfläche erfolgen. In diesem Zusammenhang sei auf die Auswirkungen pflanzenphysiologischer Prozesse verwiesen (**Tabelle 2.1**).

Die Aufgabe des geernteten Johanniskrauts auf die Trocknungsroste sollte so erfolgen, dass eine gleichmäßige, lockere Schichthöhe von ca. 100 – 130 cm erreicht wird. Hierzu eignet sich wiederum ein Portalkran, wobei manuelles Ausgleichen erforderlich ist. Da das zu trocknende Johanniskraut durch seinen Blühhorizontschnitt relativ sperrig ist, ist beim Belegen der Trocknungsroste eine Kaltbelüftung nicht erforderlich. Dies geschieht erst nach Abschluss der Rostbelegung, um eine einheitliche Ausgangstemperatur für eine gute Produktqualität zu sichern.

### **Vorbehandlung von Pfefferminze**

Die technische Trocknung von Pfefferminze in Flächentrocknungsanlagen erfolgt als Ganzpflanze. Durch das Verbleiben der Blätter an den Stielen wird sichergestellt, dass die Öldrüsen der ätherischen Öle nicht beschädigt werden. Es können auch keine Keime in das frische Erntegut eindringen. Nachteilig sind die mit zu trocknenden Stängel.

Der Ernteschnitt von Pfefferminze erfolgt ebenfalls im Parallelverfahren mit Langgutlader und Transportfahrzeug. Durch dieses Ernteverfahren wird gewährleistet, dass die Pfefferminzblätter keine oder nur geringfügige Beschädigungen erleiden. Zur Sicherung einer hohen

Produktqualität hat eine schonende Behandlung der Pfefferminz-Ganzpflanzen auch in allen weiteren Verfahrensschritten Priorität. Das geerntete Frischgut ist unbedingt möglichst locker auf die Transportanhänger zu übergeben, um eine Verdichtung und Verletzungen der Blätter (z.B. durch Quetschung) zu vermeiden. Auch die Transportanhänger für Ganzpflanzen sollten über luftdurchlässige Seitenwände verfügen, um einer Eigenerwärmung des Frischgutes entgegenzuwirken. Bei Pfefferminze sollte eine Zwischenlagerung vermieden werden. Die möglichst gleichmäßige Belegung der Trocknungsroste kann ebenfalls mittels Portalkran und Ausgleichen per Hand erfolgen.

Hinsichtlich der Schichthöhe des zu trocknenden Gutes ist zwischen junger, blattreicher Ernteware und Ware im Beginn des Blühstadiums zu unterscheiden. Im ersten Fall sollte die Schichthöhe ca. 60 – 80 cm betragen, um Verdichtungen zu vermeiden. Im zweiten Fall kann die Schichthöhe ca. 100 – 120 cm betragen. Kaltbelüftung vor dem eigentlichen Trocknungsstart ist zu empfehlen, um eine einheitliche Ausgangstemperatur der zu trocknenden Pfefferminze sicherzustellen.

### **Vorbehandlung von Spitzwegerich**

Spitzwegerich neigt in der Nacherntezeit zur schnellen Eigenerwärmung und Fermentation. Um eine hohe Produktqualität in allen Verfahrensabschnitten sicherzustellen, werden bei Spitzwegerich die Blätter als Ganzes geerntet. Auch der Ernteschnitt von Spitzwegerich erfolgt im Parallelverfahren mittels Langgutlader und Transportfahrzeug. Das geerntete Frischgut muss locker auf die Transportanhänger mit luftdurchlässigen Seitenwänden übergeben werden (Eigenerwärmung).

Übergabeverluste, Verdichtungen und Transportverluste sind zu vermeiden. Das frische Erntegut sollte wiederum auf dem schnellsten Weg zur technischen Trocknung transportiert werden. Eine Zwischenlagerung von geschnittenem Spitzwegerich sollte vermieden werden, auch wenn Kaltbelüftungsflächen zur Verfügung stehen.

Die Spitzwegerichblätter sind in aufgelockerter Form auf die Trocknungsroste aufzubringen. Die Belegung kann wiederum mittels Portalkran und Ausgleichen per Hand erfolgen. Eine gleichmäßige Schichthöhe von ca. 50 – 75 cm ist empfehlenswert. Kaltbelüftung der Trocknungsroste sollte bereits während der Belegung erfolgen, um eine unerwünschte Eigenerwärmung und Fermentation des zu trocknenden Gutes zu verhindern. Gleichzeitig wird dadurch eine einheitliche Ausgangstemperatur für den Trocknungsprozess erreicht.

### **Vorbehandlung von Baldrian**

Wurzeldrogen werden im Allgemeinen im Herbst bis in den Spätherbst hinein geerntet. Die Erntetemperaturen liegen somit bedeutend niedriger bis hin zu eintretenden Nachtfrösten. Die einzelnen Verfahrensabschnitte bei Wurzeldrogen gestalten sich insbesondere durch die Gefahr des Eintretens von Schlechtwetterperioden schwierig. Wurzeldrogen müssen daher in der Regel bei Schönwetterbedingungen auf Vorrat gerodet werden, um die nachfolgenden Verarbeitungsprozesse kontinuierlich steuern zu können.

Baldrianwurzeln, in der landwirtschaftlichen Praxis auch als Wurzelballen bezeichnet, werden nach der Rodung umgehend mit vom Feld abtransportiert. Hierbei kommt landwirtschaftliche Transporttechnik zum Einsatz (Traktor mit Anhänger). Die gerodeten Baldrianwurzeln haben



weitverzweigte Sekundärwurzeln mit einem hohen Besatz an Erde, teilweise auch Steinen, und einem Fremdkrautbesatz in ballenähnlicher Form.

Die weitere Verarbeitung des Baldrians macht eine Zwischenlagerung dringend erforderlich, da die Aufbereitung des Baldrians in der Baldrianwäsche kontinuierlich erfolgen muss. Bei Außentemperaturen von ca. 0 – 10 °C kann der Baldrian ohne Belüftung ca. 3 – 4 Tage ohne Qualitätsverluste zwischengelagert werden. Ist betriebsbedingt eine längere Zwischenlagerung notwendig, wird eine periodische Belüftung des Baldrians erforderlich. Die Zwischenlagerung sollte zwingend am Standort der Wurzelwäsche erfolgen.

Die Aufbereitung des Baldrians vor der Trocknung ist ein sehr komplexes Verfahren. Ziel sind gereinigte, sauber gewaschene und teilweise zerkleinerte Baldrianwurzeln ohne jeglichen Fremdbesatz. Hierzu sind mehrere technologische Verfahrensschritte notwendig, die nachfolgend erläutert werden.

Zur Beschickung der Baldrianwäsche wird zu Beginn ein Annahmedosierer mit Baldrian vom Zwischenlager mittels Ladetechnik (z.B. Teleskoplader) befüllt. Der Annahmedosierer ermöglicht die Übergabe der Baldrianrohware in einem gleichmäßigen Gutstrom für die weiteren technologischen Schrittfolgen. Über ein Transportband wird der Baldrian zum Erd- und Feinkrautabscheider geführt. Hier erfolgt durch Rüttel- und Siebeinrichtungen die Absonderung von Erde, Steinen und möglichem Fremdkrautbesatz. Die Fremdbestandteile werden über Austragebänder abtransportiert und zwischengelagert. Nach dem Erd- und Feinkrautabscheider führt ein Transportband die vorgereinigten Baldrianwurzeln ein in eine rotierende Waschtrommel zum Einweichen der Baldrianwurzeln als Vorstufe für die nachfolgende Baldrianwäsche. Nach dem Einweichprozess werden die Wurzeln der Trommelwäsche mit gelochter Trommel und Hochdruckdüsen zugeführt. Durch Hochdruckdüsen werden ein hoher Anteil Feinerde und Steine von den Wurzeln abgewaschen bzw. abgelöst. In der sich anschließenden Gebläsewaschmaschine erfolgt die Steinabscheidung mittels Luft und Wasser (Whirlpool-Prinzip). Ein Steinaustrageband fördert die abgesonderten Steine auf einen Transportanhänger.

Das Baldrianaustrageband fördert den gewaschenen Baldrian zur Schneidemaschine. In der Schneidemaschine wird der Baldrian grob zerkleinert, um insbesondere den Wurzelballenkern zu zerteilen. In diesem Wurzelballenkern befindet sich der Wurzelstock aus der Jungpflanzenanzucht, welcher durch die weitere Wurzelbildung beim Baldrianwachstum umschlossen wurde.

In der sich anschließenden weiteren Gebläsewaschmaschine erfolgt die restliche Absonderung allen Fremdbesatzes von den Baldrianwurzeln. Über das Austrageband aus der Gebläsewaschmaschine wird der Baldrian in der Endreinigung mit Trinkwasser mittels Hochdruckdüsen gereinigt. Über ein weiteres Transportband erfolgt die Übergabe der gereinigten und zerkleinerten Baldrianwurzeln auf ein Transportfahrzeug zum schnellstmöglichen Transport in die Trocknung.

Da beim Waschprozess wichtige Inhaltsstoffe des Baldrians schnell verloren gehen können, ist eine kurze Verweildauer des Baldrians in den einzelnen Waschstufen von großer Bedeutung. Die Baldrianwäsche erfordert einen hohen Wasserbedarf, was nur mittels Klärung in Absetzbecken und Wiederverwendung des geklärten Wassers zu bewältigen ist. Im letzten

Waschvorgang ist jedoch aus hygienischen Gründen frisches Trinkwasser einzusetzen. Gewaschener und zerkleinerter Baldrian darf nicht erneut zwischengelagert, sondern muss sofort der technischen Trocknung zugeführt werden.

Die Belegung kann ebenfalls mittels Portalkran und manuellem Ausgleichen erfolgen. Die Schichthöhe von Baldrian sollte ca. 50 – 70 cm betragen. Kaltbelüftung sollte bereits während der Belegung erfolgen, um Feuchtigkeit von der Oberfläche der Wurzeln abzuführen und eine einheitliche Ausgangstemperatur der zu trocknenden Ware zu erreichen.

### **Erstverarbeitung von Kamille**

Ziel der Erstverarbeitung von Kamillenblüten nach dem Trocknungsprozess ist die Herstellung einer hochwertigen Apothekerware in 100 %iger Reinheit. Bereits mit der Ernte und Trocknung der Kamille werden die Partien für die Erstverarbeitung bestimmt. Daraus resultiert, dass die Erstverarbeitung der Kamillenblüten nur für einen Teil der Ware erfolgt.

Mit Abschluss des Trocknungsprozesses, d.h. mit der Rostberäumung, entscheidet der Anbauer, welcher Trocknungsrost der Erstverarbeitung zugeführt wird. Diese Partien gelangen kurzfristig in ein Zwischenlager mit chargenweiser Trennung. Entscheidende Kriterien für die Auswahl sind die mit der abnehmenden Hand vertraglich geregelten Sorten sowie eine im getrockneten Zustand gut erhaltene Kamillenblüte. Es gilt, die Gefahr des Zerfalls der Blüten in den nachfolgenden Bearbeitungsschritten auszuschließen. Eine schonende Bearbeitung in allen Schritten ist somit Voraussetzung.

Die Zwischenlagerzeit der Kamillenblüten beträgt organisationsbedingt ca. 5 bis 30 Tage. Vom Zwischenlager wird die Ware über eine Annahemwanne mit Dosiereinrichtung mittels Transportbändern der Bearbeitungsmaschine zugeführt. Hier durchlaufen die Kamillenblüten gegenläufige Scherwalzen, wodurch die restlichen Stiele, welche nach der Trocknung noch an den Blütenköpfen sitzen, abgetrennt bzw. abgeschert werden. Die dabei abgetrennten Krautbestandteile werden über eine Förderschnecke aussortiert.

Nach dem Passieren der Scherwalzen fallen die Kamillenblüten lose auf die sich anschließenden Sortierbänder, wo eventuell noch vereinzelt vorhandene Fremdbestandteile manuell aussortiert werden. Gleichzeitig erfolgt eine visuelle Endkontrolle der Kamillenblütenköpfe auf 100 %ige Reinheit. Nach diesem letzten Sortiergang mit Endkontrolle wird die Ware vom Sortierband in die dafür vorgesehenen Verpackungseinheiten übergeben, die mit einer automatischen Wägung gekoppelt sind.

### **Erstverarbeitung von Pfefferminze**

Die Erstverarbeitung von getrockneten Pfefferminze-Ganzpflanzen hat zum Ziel, hochwertige, handelsfähige Blattware in unterschiedlichen Fraktionen herzustellen. Von der abnehmenden Hand werden möglichst große Blatteile ohne Stielanteil nachgefragt.

Durch die Ganzpflanzentrocknung sind die Öldrüsen in den Pfefferminzblättern weitgehend unbeschädigt. Der Verlust an ätherischen Ölen während des Trocknungsprozesses und während der Lagerung wird somit minimiert. In der landwirtschaftlichen Praxis hat es sich bewährt, die Ganzpflanzen nach der Trocknung zunächst einzulagern und erst nach Abschluss der Feldarbeiten im Herbst aufzubereiten. Dies bringt enorme arbeitswirtschaftliche Vorteile.

Die Erstverarbeitung von Pfefferminze umfasst die Verfahrensschritte Schneiden, Sieben und Sichten und die anschließende Verpackung der Trockenware. In der Praxis haben sich die Schneidemaschine von Winnicker & Lieber sowie die weiterentwickelten und angepassten Sortiersysteme aus der Getreide- und Saatgutaufbereitung von Petkus Wutha zum Sieben und Sichten bewährt.

Getrocknete Pfefferminze, welche in loser Form zur Erstverarbeitung gelangt ist, hat zu Beginn der Aufbereitung einen hohen Trockensubstanzgehalt. Um ein gutes Schnittbild mit geringen Verlusten beim Schneidevorgang zu erzielen, ist eine moderate Befeuchtung sinnvoll. Eine technologische Befeuchtung oder Bedampfung würde die Produktionskosten jedoch erheblich erhöhen. Deshalb wird natürliche Befeuchtung mittels Außenluft empfohlen. Der Praktiker muss diesen Prozess mit sehr viel Feingefühl steuern.

In der Regel erfolgt die Aufgabe der Pfefferminze für den Schneidevorgang auf den Aufgabetisch mittels Hubtechnik (Ladekran). Anschließend wird die Pfefferminze in Handarbeit einem Dosier- und Presskanal zugeführt. Eventuell hier sichtbare Fremdbestandteile, unter anderem auch Steine, müssen auf der Annahmehöhle manuell aussortiert werden, da die Schneidemaschine über keine Steintrennung verfügt. Die Verdichtung ist Voraussetzung für ein gutes Schnittbild mit geringem Energieeinsatz.

Der Schneideprozess wird im Quadratschnitt durchgeführt, woraus eine hochwertige Blattware resultiert. Die dabei eingesetzten Messer sind ein Quermesser in Kanalbreite sowie eine Ritzmesserleiste, die mit einer unterschiedlichen Anzahl von Ritzmessern bestückt werden kann. Der einzustellende Vorschub und die Anzahl der Ritzmesser bestimmen die Größe des Quadratschnitts. Der beim Schneideprozess entstehende Staub wird über eine Absaugvorrichtung abgesaugt.

Der Transport der geschnittenen Ware nach der Schneidemaschine erfolgt über ein Transportband zum Fördersystem Becherelevator. Über diese Becherelevatoren wird das Schnittgut vertikal in die Höhe transportiert, um es an die Sieb- und Sichteinrichtung zu übergeben. Drei Stück Siebwindsichter sind im Prozess erforderlich. Der Siebsichter 1 hat die Aufgabe, das Schnittgut in eine kleingeschnittene und eine großgeschnittene Fraktion zu sieben. Die beiden entstandenen Schnittwarefraktionen werden getrennt an die Windsichter 2 und 3 übergeben, jeweils für die Fraktion grobes Blatt und feines Blatt. Beide Windsichter erfüllen für die jeweils durchlaufende Fraktion die gleiche Aufgabe: Trennung der Blätter von den Stielen und Stängeln.

Die daraus entstandene reine Blattware wird nach dem Sichter über ein Transportband getrennt und der Verpressung mit gleichzeitiger Verpackung zugeführt. Die zum Einsatz kommende Sollerpresse mit zwei Presseinheiten garantiert ein schonendes Verdichten der Pfefferminzblattware und ermöglicht somit eine bessere Lager- und Transportlogistik mit einhergehender Transportkosteneinsparung.

Die aus den Windsichtern abgeseibten Stängel und Stiele werden über eine Förderschnecke einer sich anschließenden Hammermühle zugeführt. Hier erfolgt das Mahlen der aussortierten Stängel- und Stielanteile zu einer verkaufsfähigen Ware als Synergieprodukt in andere Verwertungsrichtungen.

Die Schneidemaschine und alle Siebsichter sind mit Absaugvorrichtungen versehen. Über Zyklone erfolgt die Beruhigung des Absaugstromes. Der hier anfallende Staub wird der Kompostierung zugeführt.

Die Gesamtverluste in der Erstverarbeitung liegen bei ca. 5 % der eingelagerten Ware, wobei die Rohasche hier mit inbegriffen ist. Das Verhältnis Blattware zu Stielanteil hängt entscheidend vom Schnittzeitpunkt der geernteten Pfefferminze ab. In der Blattausbeute von feiner und grober Fraktion entstehen ca. 35 % grobes Blatt und ca. 65 % feines Blatt. Ein optimaler Schnittzeitpunkt der Pfefferminze mit hohem Blattanteil ist von größter Bedeutung für die Erzeugung hochwertiger Blattware.

### F.3 Ergänzungen zu Kapitel 3: Trocknungstechnische Grundlagen

#### Sorptionsisothermen

Die bei der Trocknung dem Gut zu entziehende Feuchtigkeit ist durch Bindungskräfte unterschiedlicher Art an die Trockensubstanz gebunden (z.B. durch Oberflächenkräfte, Kapillarkräfte). Unterhalb eines bestimmten Gutwassergehalts bewirken alle Bindungskräfte eine Absenkung des Dampfdrucks in der das Gut unmittelbar umgebenden Luft. In diesem **hygroskopischen Bereich** besteht ein funktioneller Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der Gutfeuchte bei Gleichgewicht. Bei vielen Produkten stellt sich dieses Gleichgewicht jedoch erst nach sehr langer Zeit ein. Den Sammelbegriff aller Bindungsarten nennt man **Sorption**.

In der Praxis ist es schwierig, die verschiedenen Bindungsarten zu unterscheiden. Deshalb wurde als Hilfsgröße die sogenannte **Wasseraktivität** eingeführt. Die Wasseraktivität ( $a_W$ -Wert) ist ein Maß für frei verfügbares Wasser in einem Material. Sie ist definiert als Quotient aus dem Partialdampfdruck der Luft über einem Material  $p_D$  und dem Sättigungsdampfdruck des reinen Wassers  $p_{W,sat}$  bei einer bestimmten Temperatur:  $a_W = p_D/p_{W,sat}$ . Der  $a_W$ -Wert ist ein wichtiges Maß bezüglich der Haltbarkeit von Lebensmitteln, da Mikroorganismen, die potentiell schädlich sein könnten (Verderbniserreger), für Stoffwechselaktivitäten freies Wasser benötigen (Sturm, 2010). Formal entspricht die Definition der Wasseraktivität der relativen Luftfeuchte, die ebenfalls als Dampfdruckverhältnis definiert ist (Gl. A.19).

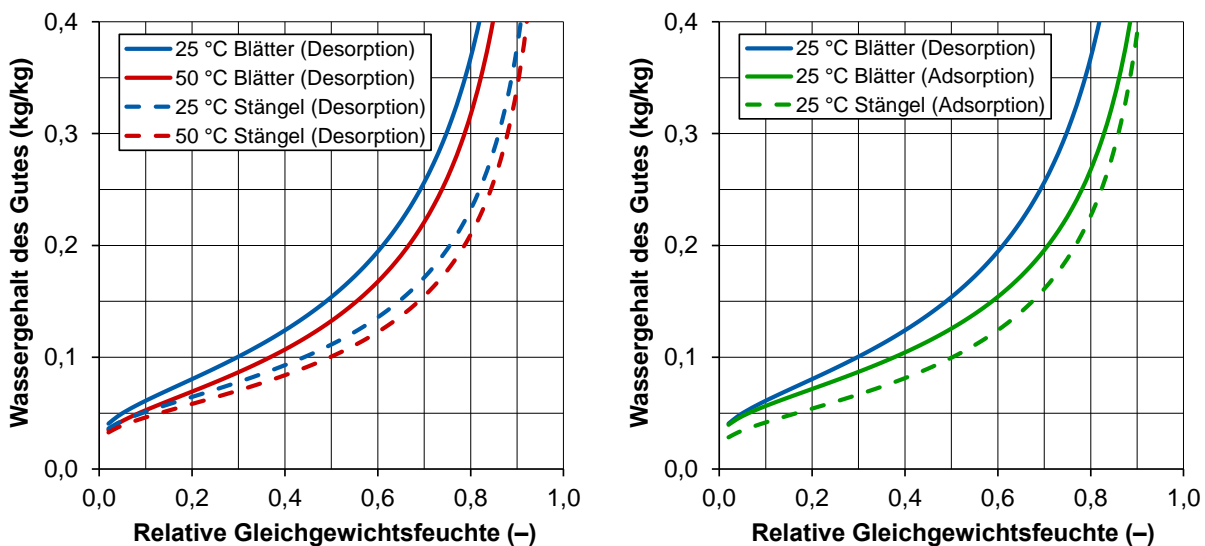
Die hygroskopischen Eigenschaften von Trocknungsgütern werden durch experimentell zu ermittelnde **Sorptionsisothermen** beschrieben. Dabei wird üblicherweise der Wassergehalt des Gutes über der relativen Luftfeuchte oder über dem  $a_W$ -Wert aufgetragen.<sup>68</sup> Die Werte an der y-Achse beschreiben die Gutwassergehalte, welche sich unter dem Einfluss der relativen Luftfeuchte nach theoretisch unendlich langer Ausgleichsdauer einstellen. Ist umgekehrt der Gutwassergehalt gegeben, so lässt sich an der x-Achse die relative Luftfeuchte ablesen, bei welcher sich Gut und Luft im Gleichgewicht befinden (relative Gleichgewichtsfeuchte). Der Verlauf ist bei landwirtschaftlichen Produkten meist S-förmig. Jede Sorptionsisotherme gilt für eine bestimmte Temperatur.

---

<sup>68</sup> Als y-Achse kann auch der Feuchtegehalt des Gutes verwendet werden.

Zur Erläuterung sind in **Abb. F.2** beispielhaft Sorptionsisothermen von Estragon dargestellt.<sup>69</sup> Aus der Darstellung lassen sich folgende Gesetzmäßigkeiten ableiten, die auch für andere Arznei- und Gewürzpflanzen gültig sind:

- Sorptionsisothermen höherer Temperatur verlaufen immer unterhalb der Sorptionsisothermen niedrigerer Temperatur. Bei höheren Trocknungstemperaturen sind bei gleicher relativer Luftfeuchte folglich niedrigere Gutwassergehalte erreichbar (**Abb. F.2**, links).
- Sorptionsisothermen von Stängeln liegen immer unter den Sorptionsisothermen von Blättern. Im Vergleich zu den Stängeln erreichen die Blätter erst bei niedrigeren relativen Feuchten der Trocknungsluft lagerungsfähige Gutwassergehalte. Bei der Trocknung von Ganzpflanzen sind folglich die Sorptionsisothermen der Blätter relevant.<sup>70</sup>
- Bei der experimentellen Ermittlung von Sorptionsisothermen ist stets ein mehr oder weniger ausgeprägter Unterschied zwischen den Verläufen bei Trocknung (Desorption) und bei Befeuchtung (Adsorption) zu beobachten.<sup>71</sup> Die Desorptionsisothermen liegen immer über den Adsorptionsisothermen (**Abb. F.2**, rechts).



**Abb. F.1:** Sorptionsisothermen von Estragon (*Artemisia dracuncululus* L.), berechnet mit der modifizierten Halsey-Gleichung (Arabhosseini et al., 2005).

Sorptionsisothermen haben sowohl für die Trocknung als auch für die Lagerung große Bedeutung. Bei der Trocknung lässt sich ablesen, ob Luft mit einer bestimmten relativen Feuchte imstande ist, Gut mit einem bestimmten Wassergehalt zu trocknen oder nicht. Ist die

<sup>69</sup> Die dargestellten Kurven wurden mit der sogenannten modifizierten Halsey-Gleichung berechnet. Sie basieren auf den gleichen Messdaten, die den Sorptionsisothermen auf Seite 242 im Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenanbaus, Band 2, zugrunde gelegt wurden. Für einige weitere Gutarten sind Sorptionsisothermen bekannt, sie fehlen jedoch noch für eine ganze Reihe gebräuchlicher Arzneipflanzenarten (Heindl & Müller, 2010).

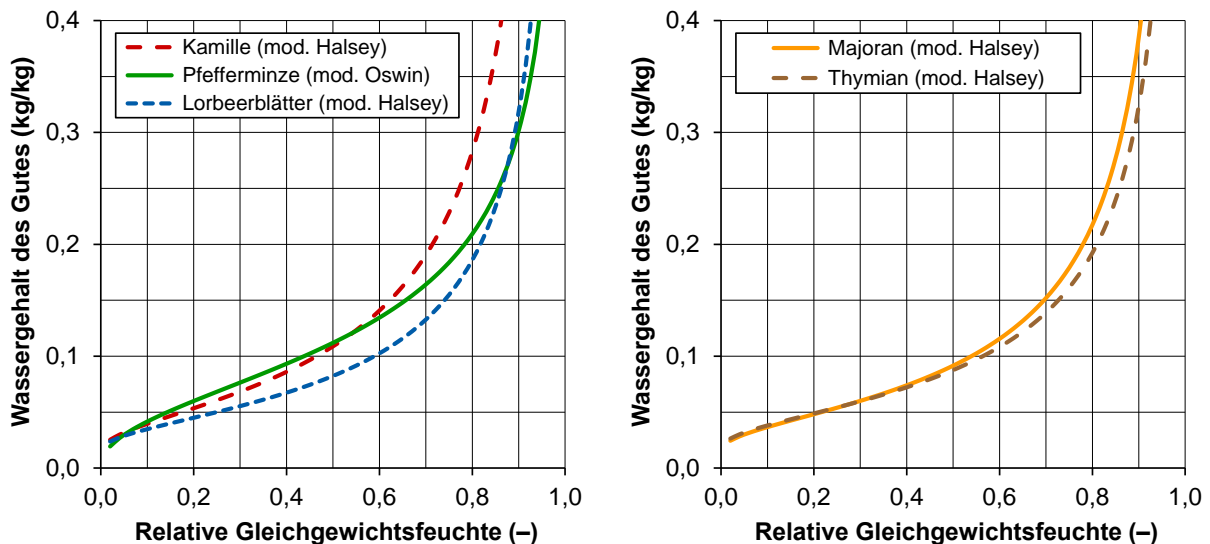
<sup>70</sup> Ein Gutwassergehalt von  $X = 0,1 \text{ kg}_{H_2O} / \text{kg}_{TS}$  entspricht einem Feuchtegehalt von  $F = 9,1\%$ .

<sup>71</sup> Diese Hysterese kann nach Lykow (1955) verschiedene Ursachen haben. Eine Modellvorstellung geht davon aus, dass sich der Wasseraufnahmemechanismus des Gutes ähnlich wie eine Kapillare wechselnden Durchmessers verhält, sodass zwischen einem oberen und einem unteren Grenzwert verschiedene "Gleichgewichtswassergehalte" möglich sind (Maltry, 1975).

relative Feuchte der Trocknungsluft kleiner als die entsprechende relative Gleichgewichtsfeuchte, so wird dem Gut Wasser entzogen und umgekehrt. Hierfür sind die **Desorptionsisothermen** maßgebend. Getrocknete Arznei- und Gewürzpflanzen, die ohne Verpackung oder in luftdurchlässigen Verpackungen gelagert werden, stehen im Austausch mit der Umgebung. Ist die relative Feuchte der Umgebungsluft größer als die entsprechende relative Gleichgewichtsfeuchte, so nehmen die Produkte Wasser auf. Welcher Gutwassergehalt sich nach erfolgtem Ausgleich einstellt, ist den **Adsorptionsisothermen** zu entnehmen.

Soll beispielsweise der Wassergehalt von Estragon-Blättern unterhalb  $X = 0,1 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{TS}$  gehalten werden (Feuchtegehalt  $F < 9,1\%$ ), so darf die relative Luftfeuchte im Lager nach **Abb. F.2** (rechts) einen Wert von ca. 0,37 bzw. 37 % nicht überschreiten.

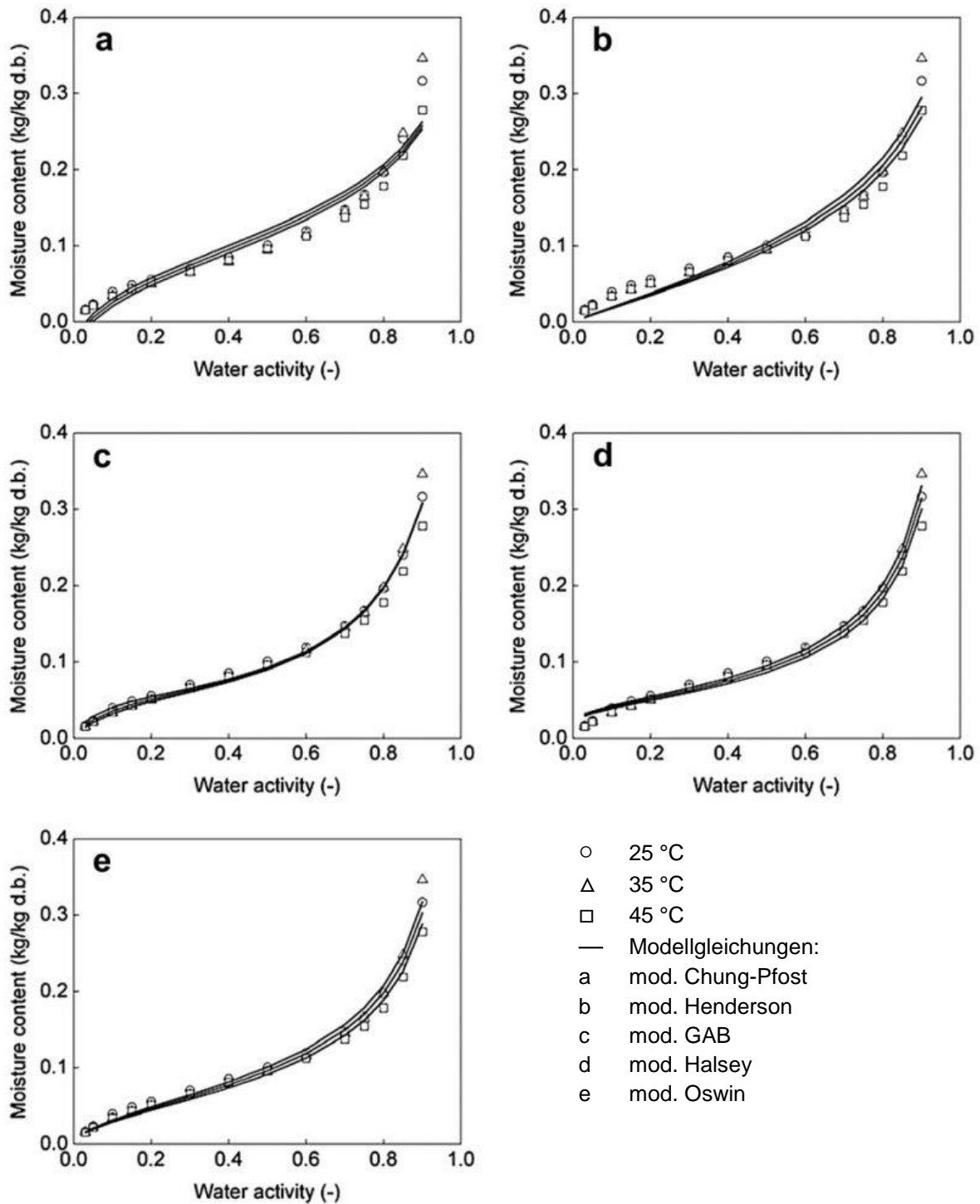
Zur mathematischen Beschreibung von Sorptionsisothermen wurden verschiedene empirische Näherungsformeln vorgeschlagen und nach den jeweiligen Forschern benannt z.B. Henderson, Chung-Pfost, GAB (Guggenheim, Anderson, de Boer), Halsey, Oswin. Einige dieser Näherungsformeln wurden im Laufe der Jahre von anderen Forschern durch Einführung zusätzlicher Parameter modifiziert (sogenannte modifizierte Modellgleichungen). In einem Vergleich kamen Soysal & Öztzekin (2001) zu dem Schluss, dass die modifizierte Halsey-Gleichung und die modifizierte Oswin-Gleichung am besten für Arznei- und Gewürzpflanzen geeignet sind. Die Parameter der Näherungsformeln sind den jeweiligen Gutarten bzw. den zugrunde liegenden Messdaten anzupassen. **Abb. F.2** zeigt Adsorptionsisothermen von Kamille, Pfefferminze, Lorbeerblättern, Majoran und Thymian, die mit Modellparametern nach Soysal & Öztzekin (2001) berechnet wurden.<sup>72</sup>



**Abb. F.2:** Adsorptionsisothermen von Kamille, Pfefferminze und Lorbeer (links) sowie Majoran und Thymian (rechts) bei jeweils 25 °C, berechnet mit Modellparametern nach Soysal & Öztzekin (2001).

<sup>72</sup> Leider fehlt bei Pfefferminze die Angabe, ob es sich um Blätter oder Stängel handelt.





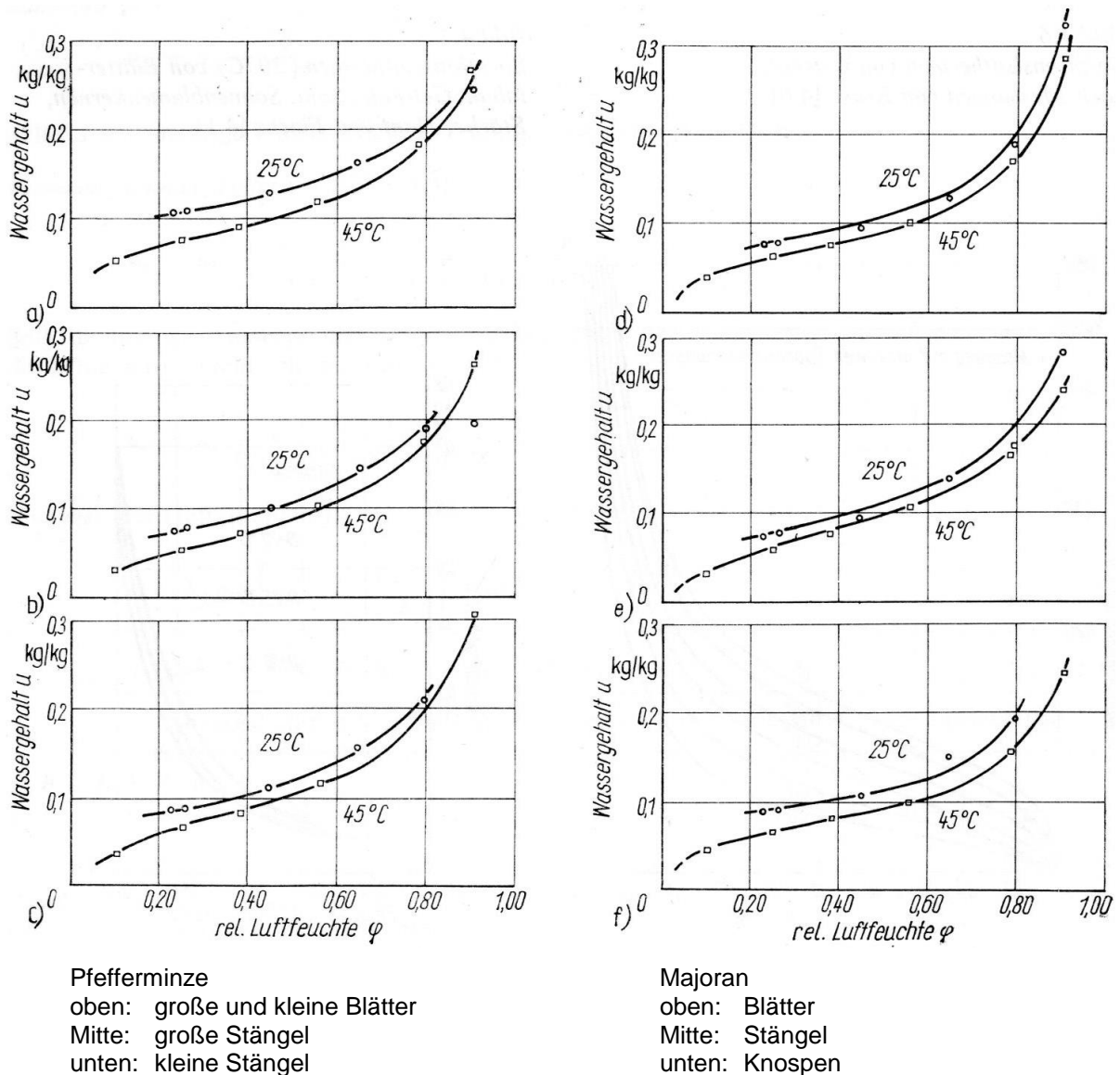
**Abb. F.3:** Adsorptionsisothermen von Melisse-Blättern (*Melissa officinalis* L.) mit berechneten Kurven nach unterschiedlichen Modellgleichungen (Argyropoulos et al., 2012).

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Modellgleichungen sind in **Abb. F.3** Adsorptionsisothermen von Blättern der Zitronenmelisse dargestellt (Argyropoulos et al., 2012).<sup>73</sup>

<sup>73</sup> In der englischsprachigen Literatur werden der Wassergehalt des Gutes als *moisture content d.b.* (*dry basis*), der Feuchtegehalt des Gutes als *moisture content w.b.* (*wet basis*) und der  $a_w$ -Wert als *water activity* bezeichnet.



Auch hierbei handelt es sich um Adsorptionsisothermen, die für die Lagerung, nicht jedoch für die Trocknung relevant sind. Desorptionsisothermen von Pfefferminze (Blätter, Stängel) und Majoran (Blätter, Stängel, Knospen) zeigt **Abb. F.4**.



**Abb. F.4:** Desorptionsisothermen von Pfefferminze und Majoran (Maltry et al., 1975).

Für die experimentelle Bestimmung der Sorptionseigenschaften von Trocknungsgütern stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, z.B. Langzeitlagerung mehrerer Proben über hygroskopischen Adsorbentien oder Salzlösungen, Durchströmung der Proben mit klimatisierter Luft, dynamische Dampfsorption. Viele der in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen gewonnenen Messwerte weisen jedoch mehr oder weniger große Unsicherheiten auf. Dies gilt insbesondere für landwirtschaftliche Produkte, bei denen sich bereits für verschiedene Sorten ein und derselben Gutart eine starke Streuung der Messwerte ergibt.

zu 3.1 Mollier  $h, Y$ -Diagramm für feuchte Luft

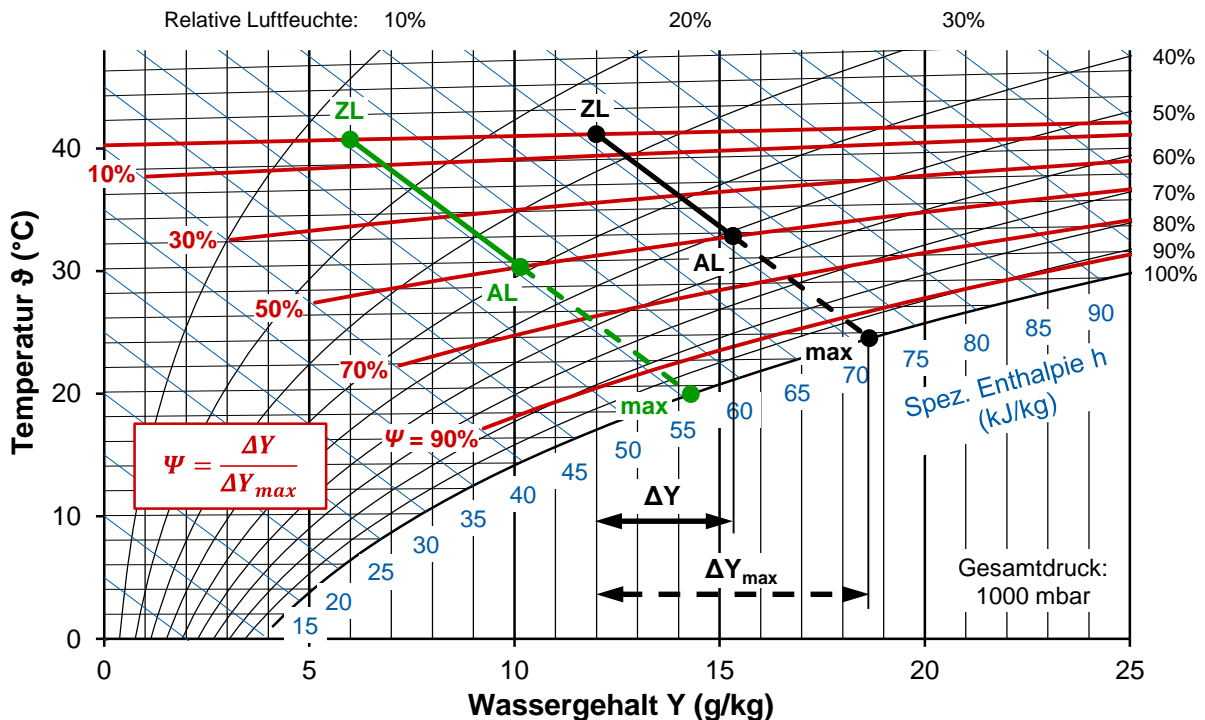
Normierte Luftfeuchte  $\Psi$

Die Normierte Luftfeuchte  $\Psi$  ist eine sehr nützliche dimensionslose Größe für Trocknungsprozesse, die die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft charakterisiert. Sie beschreibt das Verhältnis der Wassergehaltsdifferenz zwischen Abluft (AL) und Zuluft (ZL) zur maximal möglichen Wassergehaltsdifferenz bei Sättigung der Abluft:  $\Psi = \Delta Y / \Delta Y_{max}$ .<sup>74</sup> Bei idealer Trocknung resultiert  $\Delta Y_{max}$  im Mollier  $h, Y$ -Diagramm aus dem Schnittpunkt der jeweiligen Geraden  $h = const$  mit der Sättigungskurve (relative Luftfeuchte  $\varphi = 100\%$ ):

$$\Psi = \frac{Y_{AL} - Y_{ZL}}{Y_{AL,sat} - Y_{ZL}} = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_{max}} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} h_{AL} &= h_{ZL} = const \\ Y_{AL,sat} &= Y(h_{ZL}, \varphi = 100\%) \end{aligned} \quad (A.38)$$

Eine relative Feuchte der Abluft von  $\varphi_{AL} = 100\%$  entspricht folglich einer normierten Luftfeuchte von  $\Psi = 100\%$ .

Die normierte Luftfeuchte kann zu jedem Zeitpunkt der Trocknung aus gemessenen Luftzuständen berechnet werden. Sie gilt definitionsgemäß für eine bestimmte Temperatur der Zuluft. In **Abb. F.5** sind Linien gleicher normierter Luftfeuchte ( $\Psi = const$ ) für eine Trocknungstemperatur von  $40\text{ °C}$  im Mollier  $h, Y$ -Diagramm dargestellt. Sie verlaufen flacher als die Parameterlinien gleicher relativer Luftfeuchte ( $\varphi = const$ ), aber steiler als die Isothermen ( $\vartheta = const$ ).



**Abb. F.5:** Mollier  $h, Y$ -Diagramm mit Linien gleicher normierter Luftfeuchte  $\Psi$  (Zulufttemperatur  $40\text{ °C}$ ).

<sup>74</sup> Die normierte Luftfeuchte (Miltzer, 1996b) wird in der englischsprachigen Literatur als "Drying Efficiency" (DE) bezeichnet.

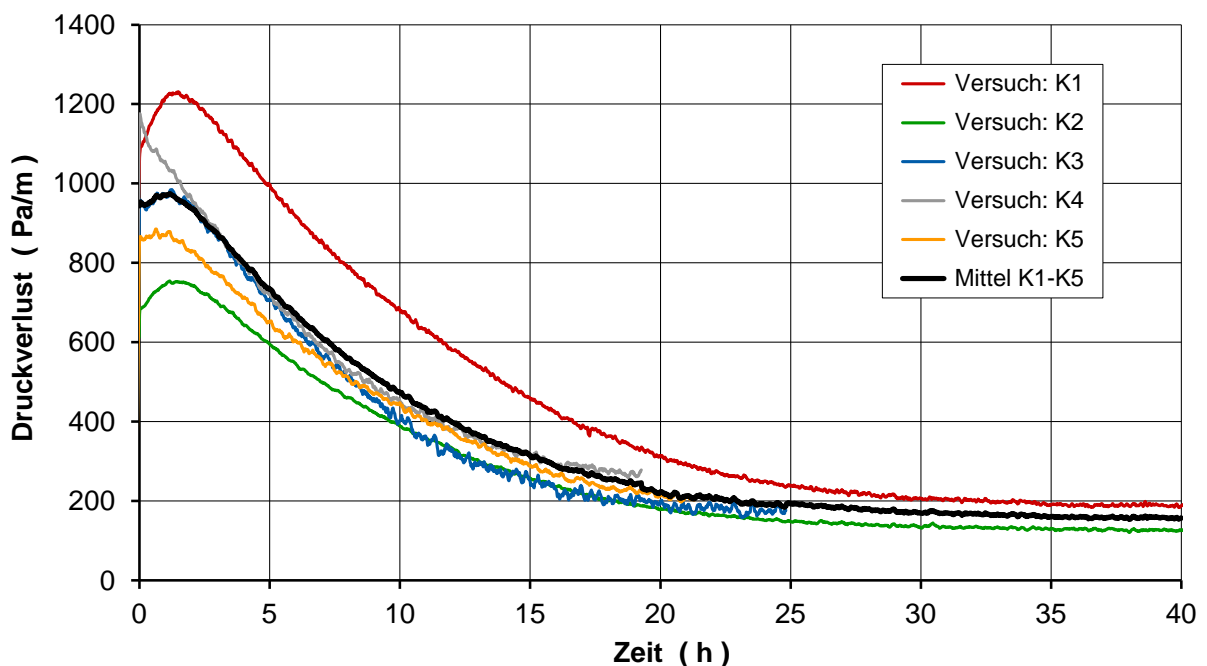
Das Konzept der konstanten normierten Luftfeuchte wurde bereits im frühen 20. Jahrhundert in mehreren Untersuchungen angewendet (Carrier, 1921; Fisher, 1935). Bei bekannter normierter Luftfeuchte kann die Luftseite für den gesamten Trocknungsverlauf mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden, um Auslegungsrechnungen und Leistungsanalysen durchzuführen. Die Methodik ist nicht auf eine spezielle Trocknerbauart begrenzt. Sie eignet sich insbesondere auch zur Analyse von chargenweisen Trocknungsprozessen mit Teilumluft (Ziegler et al., 2016b).

Wie anhand von **Abb. 3.2** erläutert, wird bei der Trocknung mit Teilumluft ein Teil der Abluft zurückgeführt und mit der Zuluft gemischt. Dadurch erhöht sich zunächst der Wassergehalt der Zuluft und damit auch der Wassergehalt der Abluft. Die sich in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis einstellenden Luftzustände können iterativ berechnet werden, sofern sich die Zulufttemperatur nicht ändert. Hierfür wird angenommen, dass die normierte Luftfeuchte  $\Psi$  bei einer Änderung des Wassergehalts der Zuluft konstant bleibt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass der neue Zustand der Abluft eine höhere relative Luftfeuchte und gleichzeitig eine höhere Temperatur aufweist.

### zu 3.2 Lufttransport und Ventilatoren

#### Messungen zum Druckverlust von Arzneipflanzen bei der Satzrocknung

In **Abb. F.6** sind die Druckverluste von Kamilleblüten im Verlauf einzelner Trocknungsversuche dargestellt (Ziegler et al., 2013b). Der Versuchstrockner hat eine Rostfläche von  $2,5 \text{ m}^2$ . Der Luftvolumenstrom wurde auf  $1.600 \text{ m}^3/\text{h}$  eingestellt. Dies entspricht einer spezifischen Luftmenge von  $640 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\text{m}^2$  Rostfläche. Die Zulufttemperatur wurde auf  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  geregelt. Die gemessenen statischen Druckverluste  $\Delta p_{stat}$  sind auf die Anfangsschichthöhe zu Beginn der Trocknung  $h_0$  bezogen.



**Abb. F.6:** Messungen zum Druckverlust von Kamilleblüten im Verlauf der Satzrocknung (Ziegler et al., 2013b).

Aufgrund unterschiedlicher Frischgutmassen zu Beginn der Trocknung (250 – 313 kg) lag die Anfangsschichthöhe der Kamilleblüten zwischen ca. 0,37 m und 0,52 m. Durch das Schrumpfen der einzelnen Blüten verringerte sich die Schichthöhe in den ersten 20 Stunden der Trocknung auf 49 – 67 % vom jeweiligen Anfangswert. Im gleichen Zeitraum verringerte sich die Schüttdichte (241 – 280 kg/m<sup>3</sup>) auf 54 – 72 % vom jeweiligen Anfangswert.

Die Maximalwerte des Druckverlustes bezogen auf die Anfangsschichthöhe  $\Delta p/h_0$  lagen zu Beginn der Trocknung zwischen 671 und 1.180 Pa/m und stiegen dann zunächst leicht an. Diese unterschiedlichen Anfangswerte des Druckverlustes zeigen die große Schwankungsbreite, die bereits innerhalb einer Gutart auftritt. Dabei sind Schüttungen aus Kamilleblüten im Vergleich zu Schüttungen z.B. aus Melisse-Ganzpflanzen oder Baldrianwurzeln noch als relativ homogen zu bezeichnen.

Der relative Druckverlust bezogen auf den Maximalwert der jeweiligen Messung fiel in den ersten 20 Stunden der Trocknung auf Werte zwischen 20 % und 25 %. Auch danach fiel der Druckverlust weiter, allerdings nicht mehr so stark.

Die Ergebnisse der Messungen zum Druckverlust von Kamilleblüten, Melisse-Ganzpflanzen und Baldrianwurzeln lassen sich wie folgt zusammenfassen:

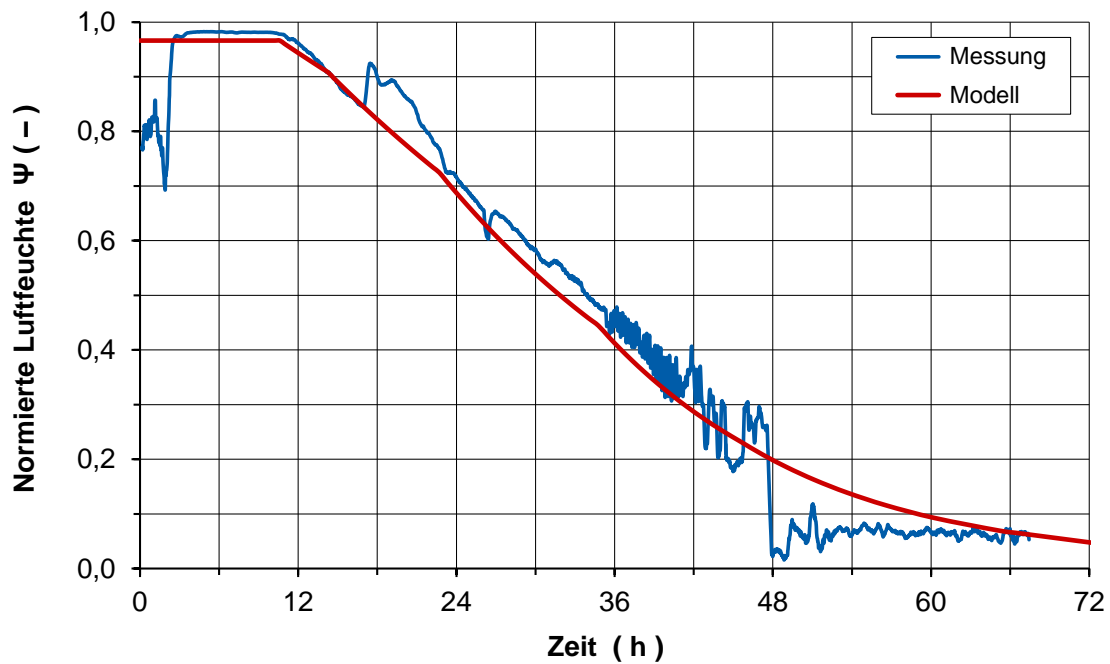
- Die Druckverluste der drei Gutarten unterscheiden sich erheblich. Die Maximalwerte lagen zu Beginn der Trocknung zwischen 1.180 Pa/m für Kamille, 515 Pa/m für Melisse und 60 Pa/m für Baldrian.<sup>75</sup>
- Innerhalb einer Gutart treten große Unterschiede auf.
- In den ersten 20 Stunden der Trocknung verringerte sich der Druckverlust auf ca. 10 - 30 % vom jeweils gemessenen Maximalwert.
- Im weiteren Trocknungsverlauf reduzierte sich der Druckverlust nur noch vergleichsweise geringfügig.

---

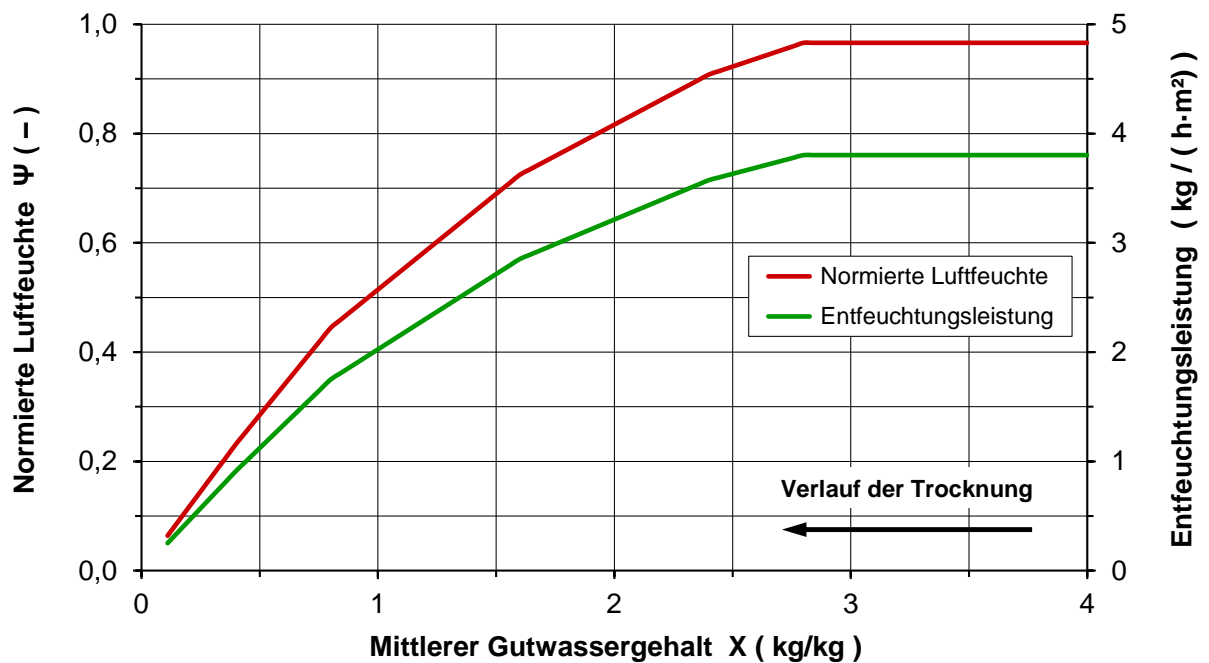
<sup>75</sup> Maximalwerte bezogen auf die jeweilige Anfangsschichthöhe.

## F.4 Ergänzungen zu Kapitel 4: Lufttechnische Effizienzsteigerung

### Normierte Luftfeuchte $\Psi$ im Verlauf der Trocknung

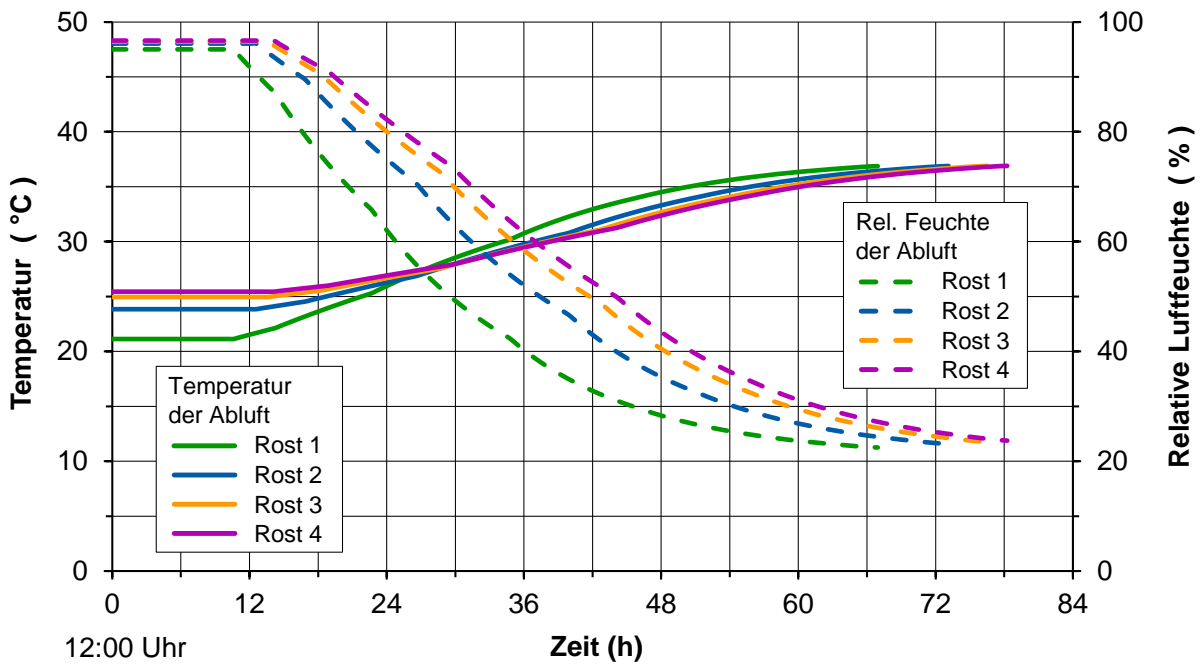


**Abb. F.7:** Normierte Luftfeuchte  $\Psi$  im Verlauf der Satztrocknung von Kamilleblüten (Zulufttemperatur 38 °C).

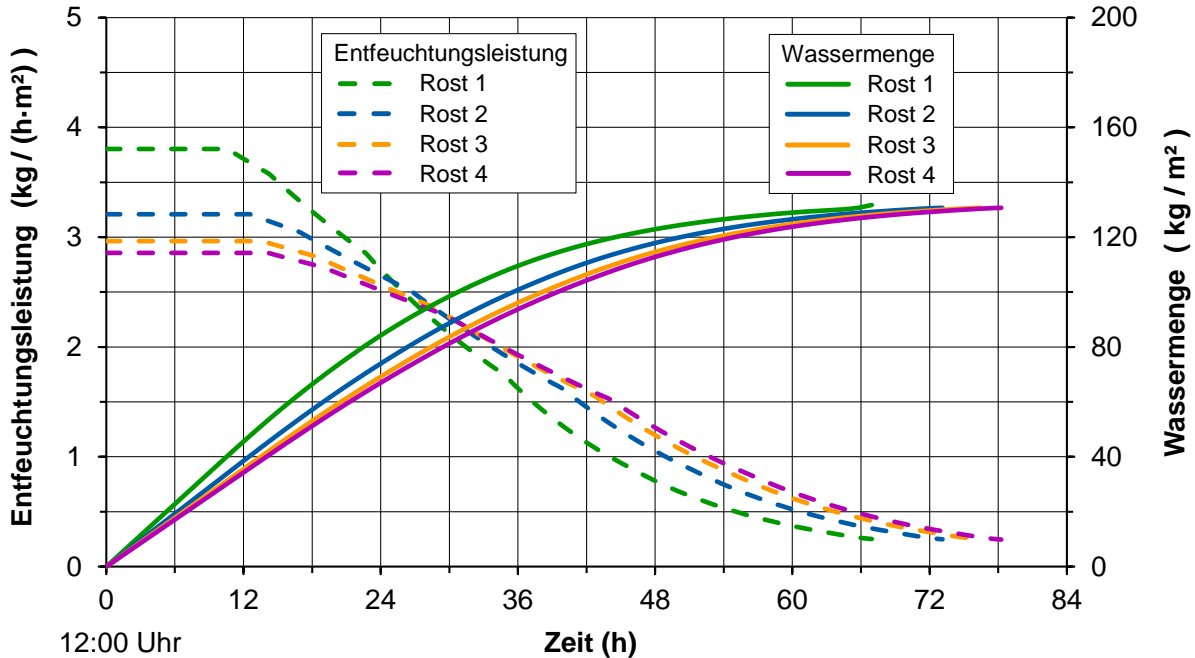


**Abb. F.8:** Normierte Luftfeuchte  $\Psi$  und Entfeuchtungsleistung pro  $m^2$  Rostfläche über dem mittleren Gutwassergehalt  $X$  (Modell).

**Nutzung von Abluft in mehreren Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer**



**Abb. F.9:** Temperatur und relative Feuchte der Abluft bei der Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer.



**Abb. F.10:** Entfeuchtungsleistung und gesamte Wassermenge pro m² Rostfläche bei der Nutzung von 60 % Abluft in nachgeschalteten Trocknern während der gesamten Trocknungsdauer.

## G Kontaktadressen und Ansprechpartner

**Tabelle G.1:** Kontaktadressen zur Förderung von Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen und zur Forschungsförderung.

Institution, Adresse, Internet	Ansprechpartner, e-Mail
Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) Deichmanns Aue 29, 53179 Bonn <a href="http://www.ble.de/energieeffizienz">www.ble.de/energieeffizienz</a>	Astrid Wachenfeld nape@ble.de
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) OT Gülzow, Hofplatz 1, 18276 Gülzow-Prüzen <a href="http://www.fnr.de">www.fnr.de</a>	Wenke Stelter w.stelter@fnr.de

**Tabelle G.2:** Kontaktadressen von Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen.

Universität, Hochschule, Forschungseinrichtung Adresse, Internet	Ansprechpartner, e-Mail
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), AG Heil- und Gewürzpflanzen (IPZ 3d) Vöttinger Str. 38, 85354 Freising <a href="http://www.lfl.bayern.de/ipz/heilpflanzen">www.lfl.bayern.de/ipz/heilpflanzen</a>	Dr. Heidi Heuberger heidi.heuberger@lfl.bayern.de
Justus-Liebig-Universität Giessen, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I, Professur für Pflanzenbau Schubertstraße 81, 35392 Gießen <a href="http://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/plantbreeding/pbau">www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/plantbreeding/pbau</a>	Prof. Dr. habil. Bernd Honermeier bernd.honermeier@ agrar.uni-giessen.de
Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam <a href="http://www.atb-potsdam.de/drying">www.atb-potsdam.de/drying</a>	Dr.-Ing. Thomas Ziegler tziegler@atb-potsdam.de
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät Klein-Altendorf 2, 53359 Rheinbach <a href="http://www.nawaro.uni-bonn.de">www.nawaro.uni-bonn.de</a>	Prof. Dr. Ralf Pude r.pude@uni-bonn.de
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 07743 Jena, Naumburger Str. 98 <a href="http://www.thueringen.de/th9/tll/index.aspx">www.thueringen.de/th9/tll/index.aspx</a>	Torsten Graf torsten.graf@tll.thueringen.de
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Fg. Agrartechnik in den Tropen und Subtropen (440e) Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart <a href="http://www.uni-hohenheim.de">www.uni-hohenheim.de</a>	Prof. Dr. Joachim Müller joachim.mueller@ uni-hohenheim.de
Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik Nordbahnhofstr. 1a, 37213 Witzenhausen <a href="http://www.uni-kassel.de">www.uni-kassel.de</a>	Dr. Barbara Sturm barbara.sturm@uni-kassel.de



**Tabelle G.3:** Kontaktadressen von Verbänden.

<b>Verband, Adresse, Internet</b>	<b>Ansprechpartner, e-Mail</b>
agrimed Hessen – Hessische Erzeugerorganisation für Medizinal- und Gewürzpflanzen (w.V.) Geschäftsstelle: Außerhalb Wallerstädten 14, 64521 Groß-Gerau / Wallerstädten <a href="http://www.agrimed.de">www.agrimed.de</a>	Dr. Christian Matthes info@agrimed.de
Bundesverband der Arzneimittel-Hersteller e.V. (BAH) Geschäftsstelle Bonn: Ubierstraße 71-73, 53173 Bonn <a href="http://www.bah-bonn.de">www.bah-bonn.de</a>	Dr. Elmar Kroth kroth@bah-bonn.de
Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI) Friedrichstraße 148, 10117 Berlin <a href="http://www.bpi.de">www.bpi.de</a>	Dr. Nicole Armbrüster narmbruester@bpi.de
Forschungsvereinigung der Arzneimittel-Hersteller e.V. (FAH) Bürgerstraße 12, 53173 Bonn <a href="http://www.fah-bonn.de">www.fah-bonn.de</a>	Dr. Barbara Steinhoff steinhoff@fah-bonn.de
Netzwerk Kräuter, Verein zur Förderung des Heil-, Gewürz- und Kosmetikpflanzenabaus in Baden-Württemberg Schlehenweg 14, 73557 Mutlangen <a href="http://www.netzwerk-kraeuter.de">www.netzwerk-kraeuter.de</a>	Klaus-Dieter Winter info@netzwerk-kraeuter.de
Ökoplant e.V. Förderverein ökologischer Heil- und Gewürzpflanzenanbau Geschäftsstelle Campus Klein-Altendorf: Klein-Altendorf 2, 53359 Rheinbach-Wormersdorf <a href="http://www.oekoplant-ev.de">www.oekoplant-ev.de</a>	Hanna Blum hanna.blum@oekoplant-ev.de
Thüringer Interessenverband für Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen e.V. Ludwigshof 14, 07389 Ranis <a href="http://www.curativeplants.com">www.curativeplants.com</a>	Daniel Schmutzler spranger@curativeplants.com
Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V. Prof.-Oberdorf-Siedlung 16, 06406 Bernburg <a href="http://www.saluplanta.de">www.saluplanta.de</a>	Bernd Hoppe saluplanta@t-online.de
Verein zur Förderung des Heil- und Gewürzpflanzenanbaus in Bayern e.V. Max-Joseph-Straße 9, 80333 München <a href="http://www.kraeuteranbau.de">www.kraeuteranbau.de</a>	Richard Bachl obst-gartenbau@ bayerischerbauernverband.de

**Liste bisher erschienener Bornimer Agrartechnische Berichte**

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg – Stand, Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998
Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999

Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 <sup>th</sup> International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft – Potenzial, Nutzung, Grünes Gas™, Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft – Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005
Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Washwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte – Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern – Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005

Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds – COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 <sup>th</sup> IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post-Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26 <sup>th</sup> - 29 <sup>th</sup> March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006
Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007
Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind – Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich	2009
Heft 66	16. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau	2009
Heft 67	Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems	2009
Heft 68	Wieviel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss-Symposium des "Biogas-Crops-Network" (BCN) 7. Mai 2009, Potsdam	2009

Heft 69	Image Analysis for Agricultural Products and Processes 27. – 28. Aug. 2009, Potsdam	2009
Heft 70	5 <sup>th</sup> International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management 31. Aug. – 02. Sept. 2009, Potsdam	2009
Heft 71	Einsatz von Biogas in PEM-Brennstoffzellen	2009
Heft 72	Teilflächenspezifische Grunddüngung	2009
Heft 73	16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 04. Mai 2010, Braunschweig	2010
Heft 74	Erschließung von Nachhaltigkeitspotenzialen durch Nutzung innovativer Sensortechnologien – <i>Prozesskette Getreide</i> –	2010
Heft 75	Erschließung von Nachhaltigkeitspotenzialen durch Nutzung innovativer Sensortechnologien – <i>Prozesskette pflanzliche Frischeprodukte</i> –	2010
Heft 76	International Workshop The future of the quarter individual milking 14. – 15. September 2010, Potsdam	2010
Heft 77	A flow cytometric approach to monitor the effects of gentle preservation techniques in the postharvest chain	2011
Heft 78	17. und 18. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 05. Mai 2011, Stuttgart und 09. Mai 2012, Osnabrück	2012
Heft 79	2. Öffentliches Symposium des "BCN" Biogas POTENZIALE Erkennen, Erforschen, Erwirtschaften	2012
Heft 80	Mechanisms of bacillus spore germination and inactivation during high pressure processing	2013
Heft 81	19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft 06. – 07. Mai 2013, Berlin	2013
Heft 82	3 <sup>rd</sup> Global Workshop on Proximal Soil Sensing	2013
Heft 83	19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau 11. – 12. März 2014, Dresden	2014
Heft 84	Prozessmikrobiologie in landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Schlussbericht zum Forschungsverbund BIOGAS-BIOCOENOSIS	2014
Heft 85	Sensoren.Modelle.Erntetechnik Kolloquium zur Verabschiedung von Dr. Ehlert 27. Mai 2014, Potsdam-Bornim	2014
Heft 86	Phosphor für die Landwirtschaft – Strategien für eine endliche Ressource 11. Juni 2014, Potsdam-Bornim	2014
Heft 87	Biofilme in Biogasanlagen – Struktur, Einfluss auf die Biogausausbeute und Optimierung technischer Systeme zur Rückhaltung der mikrobiellen Biomasse (BIOGAS-BIOFILM)	2015

Heft 88	20. und 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft 26. Mai 2014, Osnabrück und 06. und 07. Mai 2015, Braunschweig	2015
Heft 89	International Biochar Symposium: Biochar Contribution to Sustainable Agriculture 28 <sup>th</sup> – 29 <sup>th</sup> May 2015, Potsdam	2015
Heft 90	ISHS Symposium 2016 "Sensing Plant Water Status" Methods and Applications in Horticultural Science 05 <sup>th</sup> – 07 <sup>th</sup> October 2016, Potsdam	2016
Heft 91	10 <sup>th</sup> International FRUTIC Symposium Quality and Safety of Fresh Horticultural Commodities February 07, 2017	2017
Heft 92	Etablierung eines <i>core</i> -Mikrobioms für Biogasanlagen Genom-Sequenzierung von Isolaten aus Biogasanlagen und Mapping von Metagenom-Datensätzen (BIOGAS-CORE)	2017
Heft 93	22. Workshop Computer-Bildanalyse und Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft 23. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 21. April 2016, Wernigerode und 27. April 2017, Potsdam-Marquardt	2017
Heft 94	Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen Schlussbericht zum BMEL/FNR-Demonstrationsprojekt Arzneipflanzen (KAMEL), Juli 2017	2017

Interessenten wenden sich bitte an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB)  
*Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB)*  
Max-Eyth-Allee 100  
D-14469 Potsdam

Telefon: 0331 5699 820  
Fax: 0331 5699 849  
e-Mail: [atb@atb-potsdam.de](mailto:atb@atb-potsdam.de)

Die Schutzgebühr für eine Druckfassung beträgt 20,00 Euro (CD-ROM: 10,00 Euro).