



**LfL**

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

## Trocknung und Konditionierung von Hopfen



**LfL-Information**

## **Impressum**

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan  
Internet: [www.LfL.bayern.de](http://www.LfL.bayern.de)

Redaktion: Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung  
Arbeitsgruppe Hopfenbau, Produktionstechnik  
Kellerstr. 1, 85283 Wolnzach  
E-Mail: [hopfenbau.wolnzach@LfL.bayern.de](mailto:hopfenbau.wolnzach@LfL.bayern.de)  
Telefon: 08442/957-400

Druck: 2. überarbeitete Auflage, August 2020  
WIRmachenDRUCK GmbH, 71522 Backnang

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL Alle Rechte beim Herausgeber



# **Trocknung und Konditionierung von Hopfen**

**Jakob Münsterer**



# Inhaltsverzeichnis

Seite

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau von Trocknungsanlagen.....</b>	<b>11</b>
2.1	Kriterien zur Auswahl von Ventilatoren bzw. Gebläsen.....	13
2.2	Auswahlkriterien geeigneter Ölbrennertechnik.....	16
2.2.1	Heizleistung der Lufterhitzer.....	16
2.2.2	Eigenschaften unterschiedlicher Ölbrennertechniken.....	17
2.2.3	Steuerung und Regelung der Ölbrenner.....	18
2.3	Luft- und Wärmeverteilung.....	18
2.3.1	Hordendarren.....	19
2.3.2	Bandtrockner.....	22
<b>3</b>	<b>Trocknungsvermögen von Luft .....</b>	<b>25</b>
3.1	Konvektionstrocknung.....	25
3.2	Wasserdampfgehalt in der Luft.....	26
3.3	Wasserdampfpartialdruck.....	28
<b>4</b>	<b>Sorptionsverhalten und Gleichgewichtsfeuchte.....</b>	<b>30</b>
4.1	Sorptionsverhalten unterschiedlicher Hopfensorten.....	32
<b>5</b>	<b>Hopfenqualität.....</b>	<b>33</b>
5.1	Qualitätserhaltung.....	33
5.2	Ursachen von Qualitätsminderungen.....	34
5.2.1	Lagerung von Grünhopfen im Vorratsbehälter.....	35
5.2.2	Ungleiche Trocknung und „Nesterbildung“.....	39
5.2.3	Kondensation der Trocknungsluft.....	40
5.2.4	Absolute Feuchte der Trocknungsluft.....	40
5.2.5	Verhältnis der Trocknungsparameter.....	42
<b>6</b>	<b>Einteilung der Trocknung in Trocknungsabschnitte.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Trocknung.....</b>	<b>45</b>
7.1	Der Aufbau der Hopfendolde.....	45
7.2	Erntereife der Hopfensorten.....	47
7.3	Eintrocknungsverhältnis und spezifischer Wasserentzug.....	50
7.4	Witterung.....	51
<b>8</b>	<b>Trocknungsparameter .....</b>	<b>52</b>
8.1	Trocknungstemperatur.....	52
8.2	Schütthöhe –Schüttgewicht.....	55
8.3	Luftgeschwindigkeit.....	57

<b>9</b>	<b>Optimierung der Trocknung .....</b>	<b>58</b>
9.1	Hordendarren .....	58
9.1.1	Technische Hilfsmittel und wichtige Messwerte .....	58
9.1.2	Hinweise zur praktischen Umsetzung bisheriger Erkenntnisse .....	72
9.2	Bandtrockner .....	73
9.2.1	Ausgangssituation .....	73
9.2.2	Technische Hilfsmittel und Grundeinstellung .....	73
9.2.3	Technische Voraussetzungen .....	75
9.2.4	Schütthöhe und Luftgeschwindigkeit .....	77
9.2.5	Umsetzung bisheriger Erkenntnisse .....	78
9.2.6	Regelmäßige Kontrolle auf äußere Qualität .....	79
9.2.7	Vermeidung von Kondensationsluft .....	80
9.2.8	Aktuelle Situation .....	80
9.2.9	Erforderliche technische Verbesserungen .....	81
<b>10</b>	<b>Alternative Energiequellen .....</b>	<b>83</b>
10.1	Vorwärmung der Ansaugluft .....	83
10.2	Positionierung der Heizregister .....	84
10.3	Nutzung der Abwärme von Stromaggregaten .....	85
10.4	Nutzung solarer Gebäudewärme .....	85
10.5	Wärmerückgewinnung aus der Trocknungsabluft .....	86
10.6	Heizöleinsparung .....	87
10.7	Wirtschaftlichkeit .....	87
<b>11</b>	<b>Konditionierung .....</b>	<b>88</b>
11.1	Notwendigkeit einer Nachbehandlung .....	88
11.2	Sorptionsverhalten des Hopfens .....	89
11.3	Feuchteausgleich innerhalb der Dolde .....	89
11.4	Befüllen der Konditionierungskammer .....	90
11.5	Beurteilung der Hopfenfeuchte vor der Belüftung bzw. bei Belüftungsbeginn .....	91
11.6	Optimale Belüftungsluft .....	91
11.7	Mischluftregelung .....	92
11.8	Regelung der Belüftungsluft .....	93
11.9	Einfluss der Messtechnik .....	93
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>94</b>
<b>13</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>95</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schema einer Hopfendarre .....	12
Abb. 2: Schema eines Bandrockners mit zwei Luftheritzern.....	13
Abb. 3: Beispiel für die Ventilator Kennlinien eines Gebläses .....	14
Abb. 4: Vergleich der Ventilator Kennlinien unterschiedlicher Gebläsetypen .....	15
Abb. 5: Erforderliche Heizleistung für eine Trocknungstemperatur von 65°C in Abhängigkeit von Ansaugtemperatur und Luftgeschwindigkeit .....	16
Abb. 6: Veränderung der erforderlichen Heizleistung während eines Erntezeitraums .....	17
Abb. 7: Beispiele unterschiedlicher Luftverteilsysteme: Verteilhauben, Lamellen, Diffusoren und Drehverteiler (von links nach rechts).....	19
Abb. 8: Schuppenblech unterhalb der Auszugshorde.....	20
Abb. 9: Positionierung der Data-Logger in Praxisdarren .....	20
Abb. 10: Trocknungstemperaturen beim Einströmen in die unterschiedlichen Trocknungslagen auf Basis einer gleichmäßigen Wärme- und Luftverteilung .....	21
Abb. 11: Trocknungstemperaturen beim Einströmen in die unterschiedlichen Trocknungslagen auf Basis einer ungleichmäßigen Wärme- und Luftverteilung .....	22
Abb. 12: Strömungssimulation der Trocknungsluft im Bandrockner tschechischer Bauart (Bild: HTCO GmbH, Freiburg, 2016) .....	23
Abb. 13: Darstellung der Strömung der Trocknungsluft im Bandrockner mittels Strömungslinien in der Querebene (Bild: HTCO GmbH, Freiburg, 2016)	24
Abb. 14: Eingebaute Diffusorbleche in den Bandzwischenräumen eines Bandrockners tschechischer Bauart .....	24
Abb. 15: Veränderung der Temperatur und relativen Feuchte der Abluft aus dem Hopfen im oberen Trocknungsband.....	25
Abb. 16: Schema Wärme- und Wassertransport bei der Konvektionstrocknung ...	26
Abb. 17: hx-Diagramm von Mollier für feuchte Luft .....	27
Abb. 18: Zusammenhang von Temperatur, Sättigungsdampfdruck, Sättigungsdampfmenge und relativer Feuchte.....	28
Abb. 19: Zusammenhang von Temperatur, Sättigungsdampfdruck, Wasserdampfpartialdruck und Sättigungsdefizit .....	29
Abb. 20: Zusammenhang Sättigungsdampfdruck, Partialdruck der Luft und Kondensation .....	30
Abb. 21: Sorptionsisothermen von Hopfen .....	31
Abb. 22: Kleintrocknungsversuch mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen .....	31
Abb. 23: Hopfenproben unterschiedlicher Sorten zur Untersuchung des Sorptionsverhaltens .....	32
Abb. 24: Unterschiedliches Sorptionsverhalten der Hopfensorten bei gleichen Lagerbedingungen.....	33
Abb. 25: Schematische Darstellung des Verlaufs der verschiedenen Verderbsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchtigkeit bzw. Wasseraktivität (Heiss, R. u. Eichner, K. 1971).....	34
Abb. 26: Einfluss von Witterung und Lagerzeit auf die Doldenqualität .....	35
Abb. 27: Lagerung von Grünhopfen bis zur Trocknung .....	36
Abb. 28: Vergleich der Doldenmuster der Versuchsvarianten 1 und 3.....	37
Abb. 29: Strömungsverlauf der Trocknungsluft bei Nesterbildung .....	39

Abb. 30: Verlust ätherischer Öle über wasserdampfgesättigter Abluft (rechtes Bild)	40
Abb. 31: Absolute Feuchte in $[g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Trocknungsabluft}}]$ in den ersten 40min Trocknungszeit bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen und Luftgeschwindigkeiten	41
Abb. 32: Versuchstrocknungsanlage im Hopfenforschungszentrum Hüll	42
Abb. 33: Farbveränderungen bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen (Quelle: Dr. Barbara Sturm, Uni Kassel, 2016)	43
Abb. 34: Trocknungsabschnitte des Hopfens (angepasst nach den Prinzipien von Krischer & Kast, 1978)	44
Abb. 35: Vereinfachtes Schema als Beispiel für unterschiedliche Einstellungen in den einzelnen Trocknungsabschnitten	45
Abb. 36: Dolden, Doldenblätter und Spindel unterschiedlicher Hopfensorten	46
Abb. 37: Wassergehaltsabnahme während der Trocknung von Dolde, Spindel und Doldenblättern in einer Kleintrocknungsanlage	47
Abb. 38: Veränderung der Trockensubstanzgehalte ausgewählter Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin (T1–T7) im Jahr 2018	48
Abb. 39: Doldenblätter und Spindeln aus 200 Dolden	48
Abb. 40: Veränderung der Gewichte von Spindeln und Doldenblätter aus 200 Dolden zu verschiedenen Erntezeitpunkten	49
Abb. 41: Zusammenhang Wassergehalt des Grünhopfens zur Erntezeit und spezifischer Wasserentzug pro kg Trockenhopfen	50
Abb. 42: Veränderung der absoluten Feuchte in der Außenluft während eines Erntezeitraums	51
Abb. 43: Gefriertrocknung der Analysenproben im Labor	53
Abb. 44: Expertenteam zur Beurteilung des Aromas und der äußeren Qualität	53
Abb. 45: Gesamtölgehalt der Sorte Mandarina Bavaria bei Konvektionstrocknung mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen und Gefriertrocknung (GT) zu den jeweiligen Erntezeitpunkten 2013	54
Abb. 46: Praxisbeispiele für Wiegevorrichtungen zur Ermittlung des Schüttgewichts von Grünhopfen	56
Abb. 47: Schütthöhen bei gleichem Schüttgewicht in Abhängigkeit von Sorte und Feuchtegehalt des Grünhopfens	56
Abb. 48: Befüllung der Aufschütthorde mit Grünhopfen durch automatische Befüll- Vorrichtungen	57
Abb. 49: Zusammenhang von Dimensionierung, Trocknungsleistung und Hopfenqualität	58
Abb. 50: Wichtige Messwerte in Hopfendarren	59
Abb. 51: Messen der relativen Feuchte und der Temperatur der Darrabluft über der Aufschütthorde	60
Abb. 52: Messverfahren „Draht im Schubler“	62
Abb. 53: Wärmebildkamera, Messfläche über der Aufschütthorde, zugehöriges Wärmebild (Bilder Hofer H., 2019)	65
Abb. 54: Kontrolle auf gleichmäßige Schüttdichte nach dem Befüllen der Aufschütthorde und auf Gleichmäßigkeit während der Trocknung (Bilder: Selmeier G., 2016)	66
Abb. 55: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Temperatur der Trocknungsluft und der Doldenoberfläche des Hopfens in der Auszughorde	67
Abb. 56: Praxisbeispiel für die Dokumentation des Temperaturverlaufes der Trocknungsluft beim Einströmen in die einzelnen Trocknungslagen	68

Abb. 57: Beispiel für die Anzeige und graphische Aufbereitung wichtiger Messwerte in einem Praxisbetrieb (Bild Hofer H., 2019).....	69
Abb. 58: Graphische Darstellung wichtiger Trocknungsparameter: Beispiel für einen gleichmäßigen Trocknungsverlauf .....	70
Abb. 59: Graphische Darstellung wichtiger Trocknungsparameter: Beispiel für einen un-gleichmäßigen Trocknungsverlauf .....	71
Abb. 60: Praxisbeispiel für die Dokumentation wichtiger Messwerte in einem Trocknungsprotokoll.....	72
Abb. 61: Messpunkte und mögliche Grundeinstellungen beim Bandtrockner .....	74
Abb. 62: Kapazitive Feuchtigkeitsmessung mittels einer Messlanze im Bandtrockner.....	75
Abb. 63: Schichtweise Beladung des Auftragbandes mit einem Befüllband .....	75
Abb. 64: Aufwirbelungen und Freiblasen von Löchern gegenüber der Einströmseite der Trocknungsluft.....	76
Abb. 65: Praxisbeispiele für Bandabdichtungen (Anfang und Ende oberes Band sowie Übergang zu zweitem Band).....	76
Abb. 66: Trocknungsleistung der Sorten Perle und Hallertauer Magnum in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei gleichbleibender Schütthöhe .....	77
Abb. 67: Anzeige relevanter Einstellungen und Messwerte bei der Bandtrocknersteuerung.....	78
Abb. 68: Messung der Temperaturen und relativen Luftfeuchten über dem oberen Trocknungsband des Bandtrockners zur automatischen Schütthöhenregelung.....	79
Abb. 69: Bonitur auf äußere Qualität von Hopfenproben aus dem Bandtrockner..	79
Abb. 70: Farbe und Glanz von Trockenhopfen der Sorte Perle während eines Erntetags bei gleichbleibender Einstellung der Trocknungsparameter....	80
Abb. 71: Abluftsystem beim Dreibandtrockner tschechischer Bauart .....	82
Abb. 72: Prinzip der Vorwärmung der Ansaugluft mittels Warmwasser-Heizregisters .....	84
Abb. 73: Positionierung eines Warmwasser-Heizregisters mit Gebläse im Ansaugluftstrom zweier Warmlufterzeuger .....	84
Abb. 74: Beispiel für Nutzung alternativer Energiequellen in einem Hopfenerntezentrum.....	86
Abb. 75: Prinzip eines Kreuzstrom-Wärmetauschers.....	86
Abb. 76: Bestimmung der Heizölersparnis mit der Tabelle zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit.....	87
Abb. 77: Schematische Darstellung der Nachbehandlung von Hopfen in Konditionierungskammern.....	88
Abb. 78: Sorptionsverhalten von Hopfen .....	89
Abb. 79: Feuchteausgleich innerhalb der Dolde nach der Trocknung in Abhängigkeit von der Temperatur .....	90
Abb. 80: Befüllen der Konditionierungskammer mit Hopfen frisch aus der Trocknung.....	91
Abb. 81: Verfahrensschritte bei der Nachbehandlung von Hopfen in Konditionierungsanlagen.....	92
Abb. 82: Kühl- bzw. Feuchte-Pad zum Einstellen der richtigen Belüftungsluft ....	93

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1:	Wassergehalt und Doldenblattanteil der Versuchsvarianten nach NQF ..	37
Tab. 2:	Kleintrocknungsversuche 2015, Analysewerte und Ergebnisse der Bierverkostung.....	38
Tab. 3:	Einfache Methode zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit in [m/s] .....	64

## 1 Einleitung

Die deutschen Hopfenpflanzer erzeugen jährlich Hopfen mit Spitzenqualität. Bei der Trocknung und Konditionierung muss diese Qualität erhalten und gesichert werden. Um die Leistung bei der Hopfentrocknung zu steigern und gleichzeitig den hohen Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, forscht der Arbeitsbereich Hopfen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) gemeinsam mit Praxisbetrieben seit Jahren an der Optimierung der Hopfentrocknung. Inzwischen konnten auf Basis zahlreicher Forschungsergebnisse neben grundlegenden Mess- und Anzeigesystemen auch automatische Steuerungen und Regelungen entwickelt werden, die den Trocknungsprozess optimieren und zur Qualitätserhaltung und Energieeinsparung beitragen. Die graphische Aufbereitung der wichtigsten Trocknungsparameter während der Trocknung von Hopfen in Hordendarren oder Bandtrocknern ist dabei eine unabdingbare Voraussetzung für die Optimierung der Trocknungsabläufe.

Hohe Qualitätsansprüche seitens der Brauereien verlangen von den Hopfenpflanzern einen sehr sensiblen und fachkundigen Umgang mit ihrem Naturprodukt. Dieser Anspruch erfordert vom Betreiber der Trocknungsanlage einerseits ein grundlegendes Verständnis trocknungstechnischer sowie energetischer Zusammenhänge und andererseits genaue Kenntnisse über das Trocknungsverhalten der verschiedenen Hopfensorten. Die aktuelle LfL-Information „Trocknung und Konditionierung von Hopfen“ soll hierbei als Leitfaden dienen.

## 2 Aufbau von Trocknungsanlagen

Die Hopfentrocknung erfolgt in den deutschen Hopfenbaubetrieben vereinzelt mit Bandtrocknern, zumeist aber in sogenannten Hordendarren. In diesen Trocknungsanlagen wird der Grünhopfen mit ca. 62–68°C erhitzter Luft in 3–4 Stunden auf eine gewünschte Zielfeuchte von ca. 9% Wassergehalt getrocknet. Dabei verlieren die Hopfendolden annähernd das Vierfache ihres Gewichts an Wasser. Die Trocknung von Hopfen ist ein äußerst energieintensiver Vorgang. Folglich ist das Ziel der Hopfenbaubetriebe, eine möglichst große Menge an Hopfen pro Zeiteinheit energieeffizient zu trocknen und gleichzeitig den Qualitätserhalt bestmöglich zu gewährleisten. Die Trocknungsleistung von Hordendarren und Bandtrocknern ist grundsätzlich abhängig von der Hopfensorte, Trocknungsfläche, Trocknungstemperatur, Aufschütthöhe, Geschwindigkeit der durchströmenden Trocknungsluft sowie dem Wassergehalt bzw. Reifezustand.

In den Hordendarren durchströmt die Warmluft den zu trocknenden Hopfen in 3–4 übereinander liegenden Lagen. Sobald die Zielfeuchte der untersten Lage erreicht ist, wird der Trockenhopfen mittels einer Auszugshorde, dem sogenannten „Schuber“, entleert und Hopfen von den darüber liegenden Lagen eine Etage tiefer durchgekippt. Die entleerte Aufschütthorde kann anschließend erneut mit frischem Grünhopfen befüllt werden (Abb. 1).

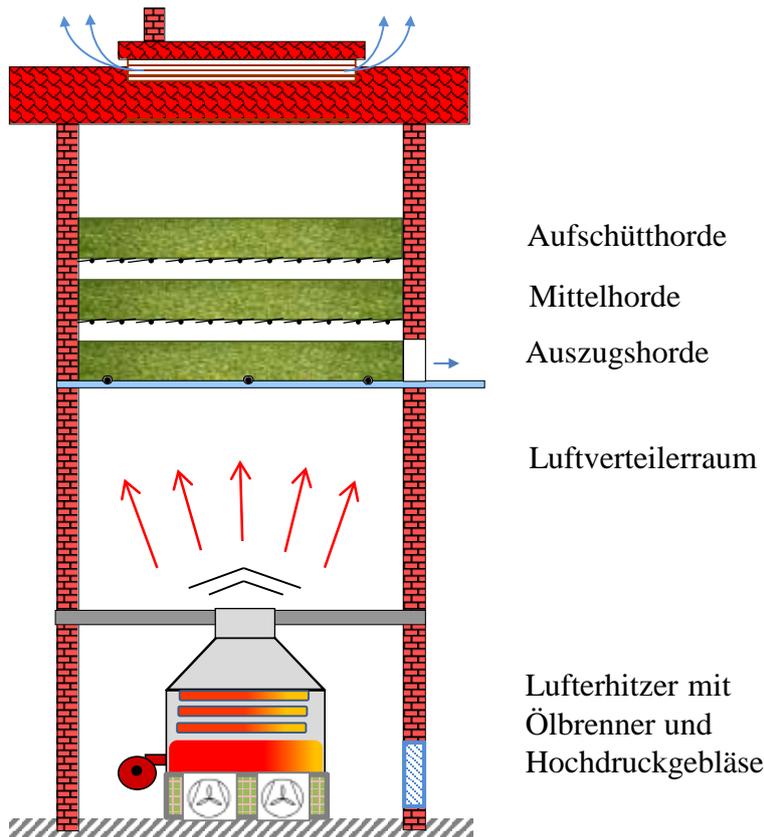


Abb. 1: Schema einer Hopfendarre

Bei den verwendeten Bandtrocknern handelt es sich um Mehrbandtrockner mit drei übereinander angeordneten Bändern, auf denen der Hopfen in jeweils entgegengesetzter Laufrichtung transportiert wird. Am Ende eines jeden Bands fällt der Hopfen jeweils auf das darunterliegende Band. Die Anströmung mit Trocknungsluft erfolgt für jedes Band separat, zumeist durch seitliche Lufteinlässe. Bei den häufig verwendeten tschechischen Bandtrocknern wird die Trocknungsluft für das untere Band zusätzlich von der Auftragsseite her zugeführt. Über zwei voneinander unabhängige Luftkanäle wird das mittlere und obere Band mit Trocknungsluft angeströmt. Somit erfolgt die Trocknung auf den jeweiligen Trocknungsbändern mit unterschiedlichen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten. Da der Frischhopfen auf dem obersten Band grundlegend andere Einstellungen der Trocknungsparameter als der weitestgehend fertig getrocknete Hopfen auf dem untersten Band verlangt, werden folglich in immer mehr Trocknungsbetrieben zwei voneinander unabhängige Warmlufterzeuger bzw. Lufterhitzer eingesetzt. Der eine der beiden Lufterhitzer erzeugt die Trocknungsluft für das obere Band, der andere speist die Trocknungsluft in das mittlere und untere Band ein (Abb. 2).

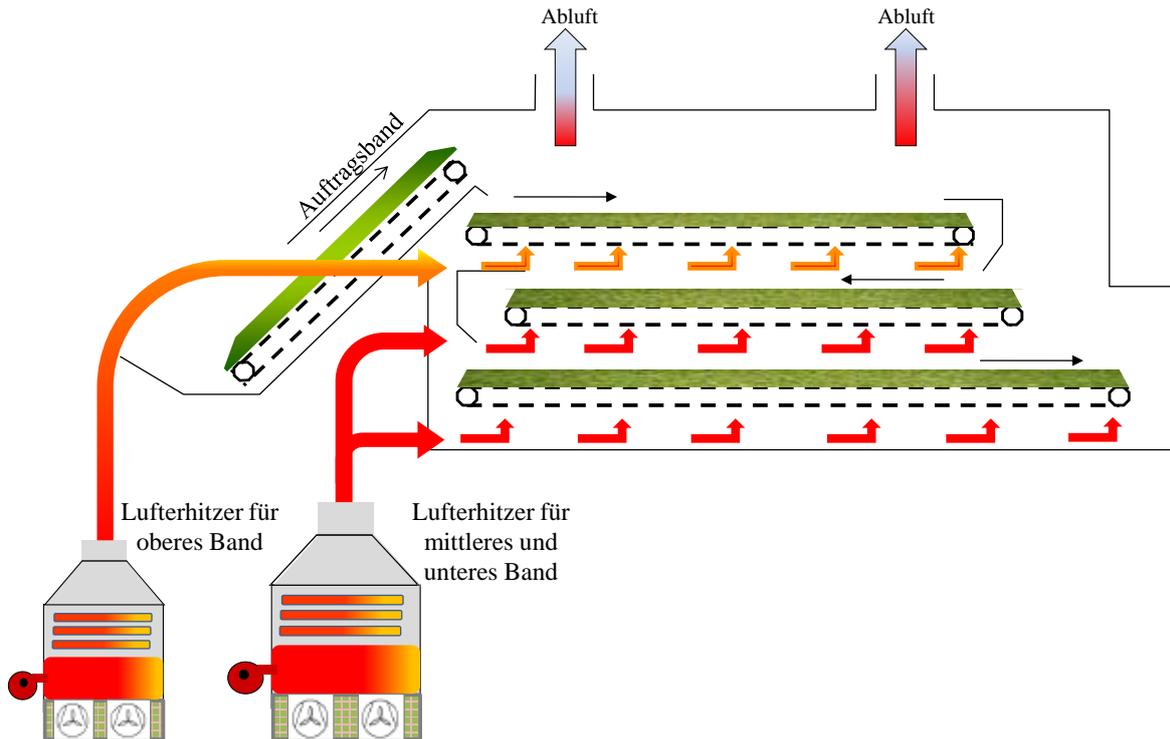


Abb. 2: Schema eines Bandrockners mit zwei Lufterhitzern

## 2.1 Kriterien zur Auswahl von Ventilatoren bzw. Gebläsen

Die Begriffe „Ventilatoren“ und „Gebläse“ werden im folgenden Gliederungspunkt als gleichbedeutend verwendet. Deren geeignete Auswahl durch den Anlagenplaner bzw. Anbieter ist für das erzielbare Leistungspotential einer Trocknungsanlage entscheidend. Die einzelnen Hersteller bieten eine Vielzahl an Ventilatorbauformen für unterschiedlichste Einsatzbereiche an. Nachstehend wird ein grober Überblick gegeben hinsichtlich der bei der Auswahl zu berücksichtigenden Kriterien und Eigenschaften von Gebläsen und Ventilatoren.

Die zentralen Auslegungsgrößen sind sowohl der zu erwartende, externe Strömungswiderstand der Warmluftverteilvorrichtung, der Hordenlage und Hopfenschichten als auch der benötigte Volumenstrom für eine definierte Trocknungsfläche. Aufgrund der erforderlichen Druckstabilität werden bei der Hopfentrocknung ausschließlich Radialgebläse verwendet. Diese saugen die Luft axial an und drücken sie radial aus dem Spiralgehäuse. Die Beschau felung der Laufräder besitzt großen Einfluss auf etwaige Volumenstromschwankungen und auf das Druckverhalten. Radialgebläse mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln weisen Kennlinien auf, welche bei schwankendem externem Luftwiderstand größere Änderung des Luftvolumenstroms veranschaulichen. Ventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln gewährleisten hingegen über einen weiten Bereich von Belastungsschwankungen einen nahezu konstanten Volumenstrom. Im Gegensatz zu früheren Jahren werden aktuell bei Nachrüstungen oder Neuanschaffungen von Hopfentrocknungsanlagen insbesondere Radialgebläse mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln mit Systemdrücken (statischer und dynamischer Druck) von ca. 1.000Pa verbaut.

Nur durch eine ausreichende Luftmenge kann bei einer Trocknungslufttemperatur von beispielsweise 65°C das verdunstete Wasser bei der Hopfentrocknung in Hordendarren rechtzeitig und ausreichend abtransportiert werden. Für eine Luftgeschwindigkeit von 0,5m/s bei freiem Darrquerschnitt, muss das Gebläse bei einer Trocknungsfläche von z.B. 20m<sup>2</sup> einen

Volumenstrom von  $36.000\text{m}^3/\text{h}$  ( $=0,5\text{m/s} \cdot 20\text{m}^2 \cdot 3.600\text{s/h}$ ) und bei einer Trocknungsfläche von  $50\text{m}^2$  folglich  $90.000\text{m}^3/\text{h}$  fördern. Mit steigendem Volumenstrom erhöht sich folglich die erforderliche Leistung an der Ventilatorwelle. In Praxisanlagen konnte in den letzten Jahren durch korrekt dimensionierte Ventilatoren und einer installierten Leistung von ca.  $1.000\text{W}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  das Leistungspotential der Trocknungsanlagen deutlich erhöht werden. „Die installierte Leistung bei gegebenem Volumenstrom und notwendiger externer Pressung hängt vom Wirkungsgrad des Ventilators ab. Man kann durch Wahl eines größeren Gebläses und kleinerer Drehzahl zu einem höheren Wirkungsgrad kommen. Vermutlich wählte man früher aus Kosten- und Platzgründen den kleinstmöglichen Ventilator mit hoher Drehzahl und damit höherem dynamischen Druck“ (Heindl A., 2019). Wird ein Gebläse bei einer angenommenen Trocknungsfläche von  $30\text{m}^2$  durch einen Motor mit einer Leistung von  $15\text{kW}$  angetrieben, ergibt sich daraus eine installierte Leistung von  $500\text{W}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  ( $15.000\text{W} / 30\text{m}^2$ ). Werden zum Transport der Trocknungsluft zwei Gebläse mit je  $15\text{kW}$  Motorleistung verbaut, resultieren hieraus die o.g.  $1.000\text{W}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$ .

Die in Prüfständen ermittelten Leistungsdaten für die jeweiligen Gebläse sind den Herstellerunterlagen zu entnehmen. „Man muss allerdings beachten, dass sich der Wirkungsgrad des Ventilators in Abhängigkeit von gegenüber dem Herstellertest deutlich abweichenden Einbauverhältnissen zumeist verschlechtert. Aus diesem Grund ist auch mit einer Reserve in der Antriebsleistung zu rechnen.“ (Heindl A., 2019).

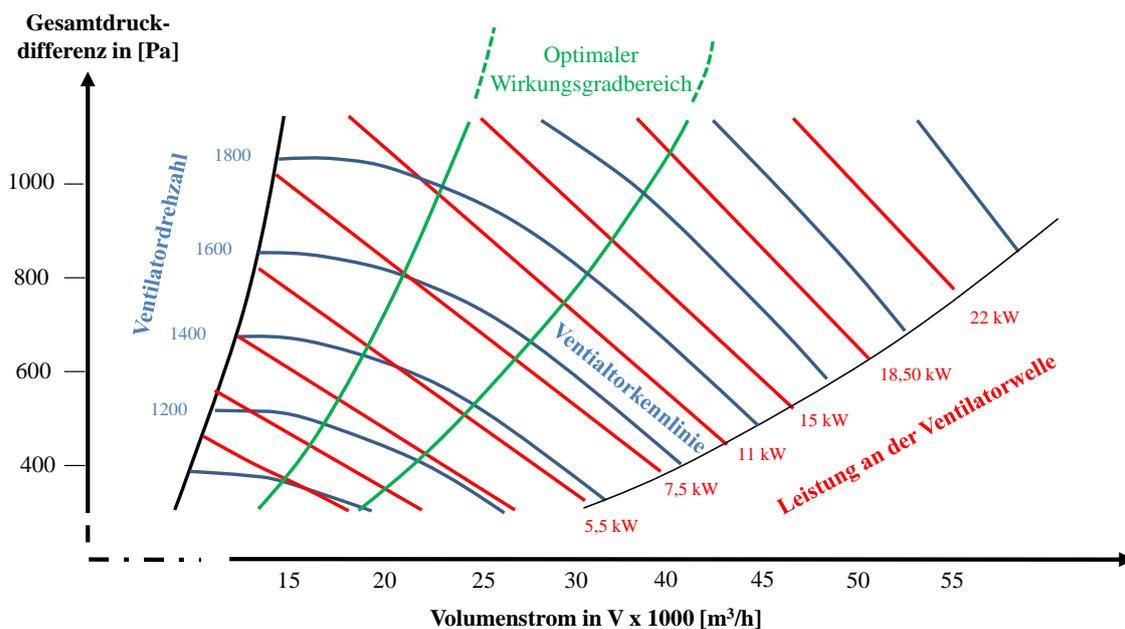


Abb. 3: Beispiel für die Ventilatorcharakteristika eines Gebläses

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Luftvolumen und Gegenstand, Antriebsleistung, Drehzahl, optimalem Wirkungsgradbereich und den Ventilatorcharakteristika. Jede Kennlinie besitzt ausschließlich für eine bestimmte Drehzahl des Laufrads Gültigkeit. Die Ventilatorcharakteristika zeigen, wie sich der Volumenstrom bei gleichbleibender Drehzahl in Abhängigkeit vom Differenzdruck bzw. Strömungswiderstand verändert. Je größer der Strömungswiderstand, desto geringer ist der Luftvolumenstrom. Der Verlauf ist kennzeichnend für die Eigenschaften der verschiedenen Ventilatoren.

In Abbildung 4 sind die Verläufe eines Ventilators mit vorwärtsgekrümmten und eines Ventilators mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln schematisch dargestellt. Der Unterschied zeigt

sich in der Steigung der Kennlinie. Charakteristisch für „vorwärtsgekrümmte Gebläse“ ist der flache und für „rückwärtsgekrümmte Gebläse“ der steile Verlauf der Ventilator-Kennlinie(n). Der Betriebspunkt stellt sich ein, sobald der Druckverlust des Ventilators und der Strömungswiderstand der Trocknungsanlage gleich groß sind. Somit kann anhand der Kennlinien eines pV-Diagramms ermittelt werden, welcher Betriebspunkt sich beim jeweiligen Gebläse in Abhängigkeit von Druck, Volumenstrom und Drehzahl einstellt. Eine Änderung sollte sich lediglich innerhalb des optimalen Wirkungsgradbereichs vollziehen. Je steiler die Kennlinie ist, desto weniger verringert sich der Volumenstrom bei wachsendem Gegendruck. Je flacher die Kennlinie ist, desto exakter muss der Betriebspunkt bei der Planung der Trocknungsanlage vorausbestimmt werden. Erhöht sich der Gegendruck - wie beispielsweise in Abbildung 4 dargestellt - von 600Pa (Betriebspunkt 1) auf 800Pa (Betriebspunkt 2), verringert sich beim Ventilator mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln durch den erhöhten Strömungswiderstand der Volumenstrom. Da der Druckverlust des Ventilators jedoch geringer ist als der Gegendruck, kann der Luftstrom weiterhin das Trocknungsgut durchdringen. Im Gegensatz dazu käme die Trocknung bei einem Gebläse mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln aufgrund der zu hohen Gesamtdruckdifferenz zum Erliegen.

*Praxishinweis:*

Damit der Betreiber einer Trocknungsanlage das erzielbare Leistungspotential seiner Trocknungsanlage beurteilen oder abschätzen kann, sollte er nachfolgende Angaben zu Gebläsen oder Ventilatoren kennen:

- Volumenstrom in [m<sup>3</sup>/h] bzw. erreichbare Luftgeschwindigkeit in [m/s]
- installierte Motorleistung in [W/m<sup>2</sup>]
- Geometrie des Laufrads (vorwärts-/rückwärtsgekrümmt)

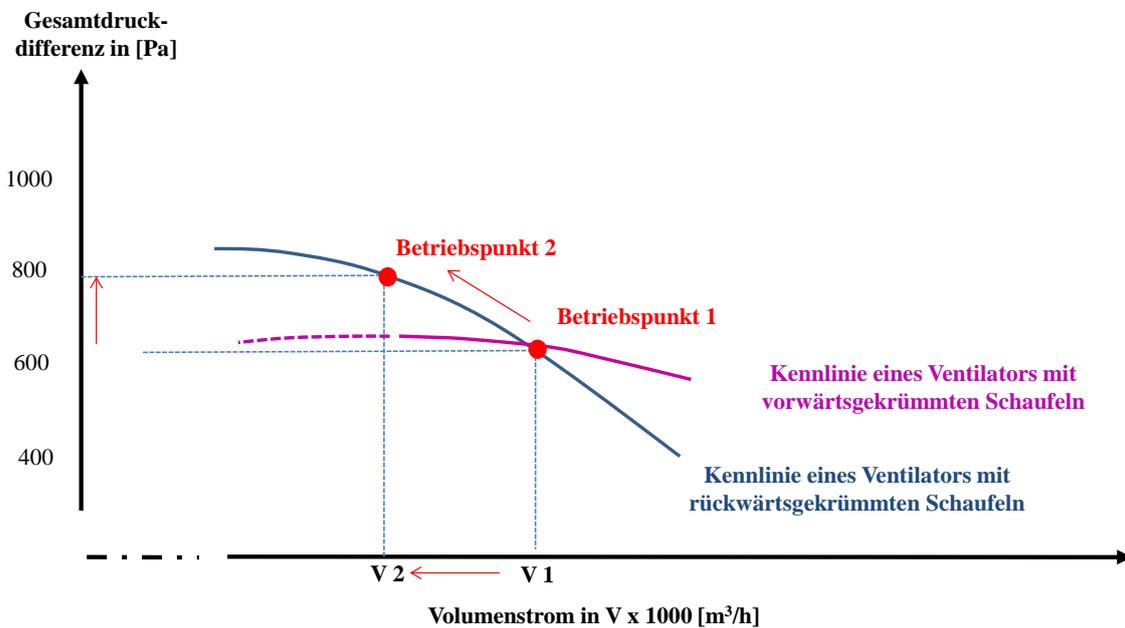


Abb. 4: Vergleich der Ventilator-Kennlinien unterschiedlicher Gebläsetypen

## 2.2 Auswahlkriterien geeigneter Ölbrennertechnik

### 2.2.1 Heizleistung der Lufterhitzer

Gemäß den Erfahrungen in der Praxis erreichen Lufterhitzer bei kühlen Ansaugtemperaturen in den frühen Morgenstunden häufig nicht eine voreingestellte Trocknungstemperatur in Höhe von beispielsweise  $65^{\circ}\text{C}$ . In der Regel ist die Ursache hierfür meist eine zu geringe Nennheizleistung des Lufterhitzers für die zu erwärmende Luftmenge. Berechnen lässt sich die installierte Heizleistung aus der auf dem Typenschild des Warmlufterzeugers angegeben Nennheizleistung in [kW] dividiert durch die Darrfläche in  $[\text{m}^2]$ . Bei Darren älteren Baujahrs ergibt sich eine durchschnittliche Heizleistung von  $24\text{--}25\text{kW}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$ . Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass bei einer Heizleistung von beispielsweise  $25\text{kW}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  und einer Luftgeschwindigkeit über  $0,35\text{m}/\text{s}$  die gewünschte Trocknungstemperatur von  $65^{\circ}\text{C}$  bei Ansaugtemperaturen unter  $10^{\circ}\text{C}$  nicht mehr erreicht werden kann. Ebenso ist in der unten abgebildeten Graphik erkennbar, dass eine bestimmte Trocknungstemperatur im Falle zu geringer Nennheizleistung ausschließlich durch Reduzierung der Luftgeschwindigkeit aufrechterhalten werden kann. Als Folge der reduzierten Luftgeschwindigkeit verringert sich jedoch die erzielbare Trocknungsleistung. Durch zusätzliche alternative Energiequellen könnte das Wärmeangebot erhöht werden.

erforderliche  
Heizleistung  
in  $[\text{kW}/\text{m}^2]$

... bei einer Trocknungstemperatur von  $65^{\circ}\text{C}$

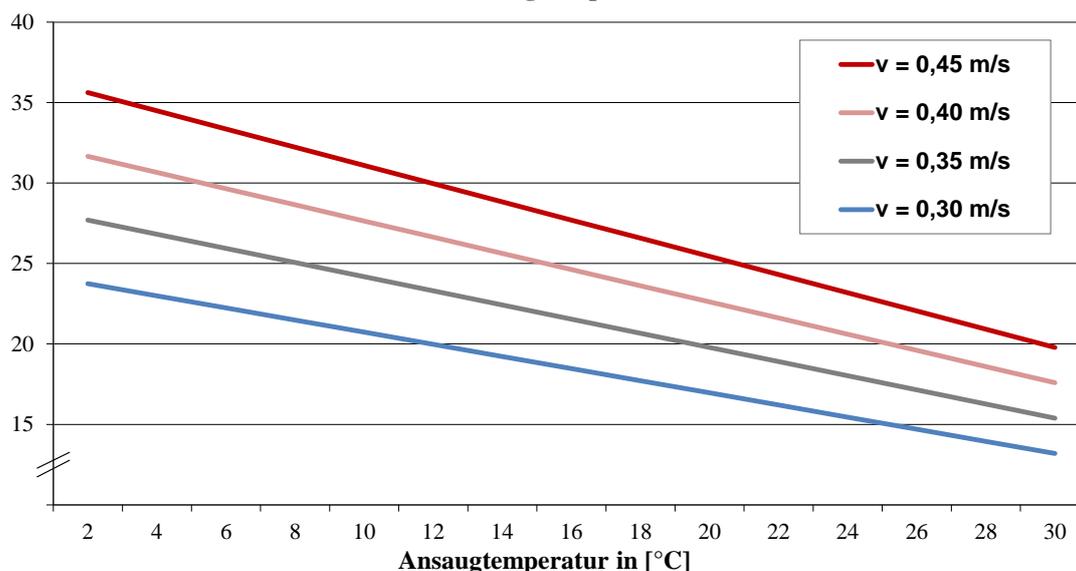


Abb. 5: Erforderliche Heizleistung für eine Trocknungstemperatur von  $65^{\circ}\text{C}$  in Abhängigkeit von Ansaugtemperatur und Luftgeschwindigkeit

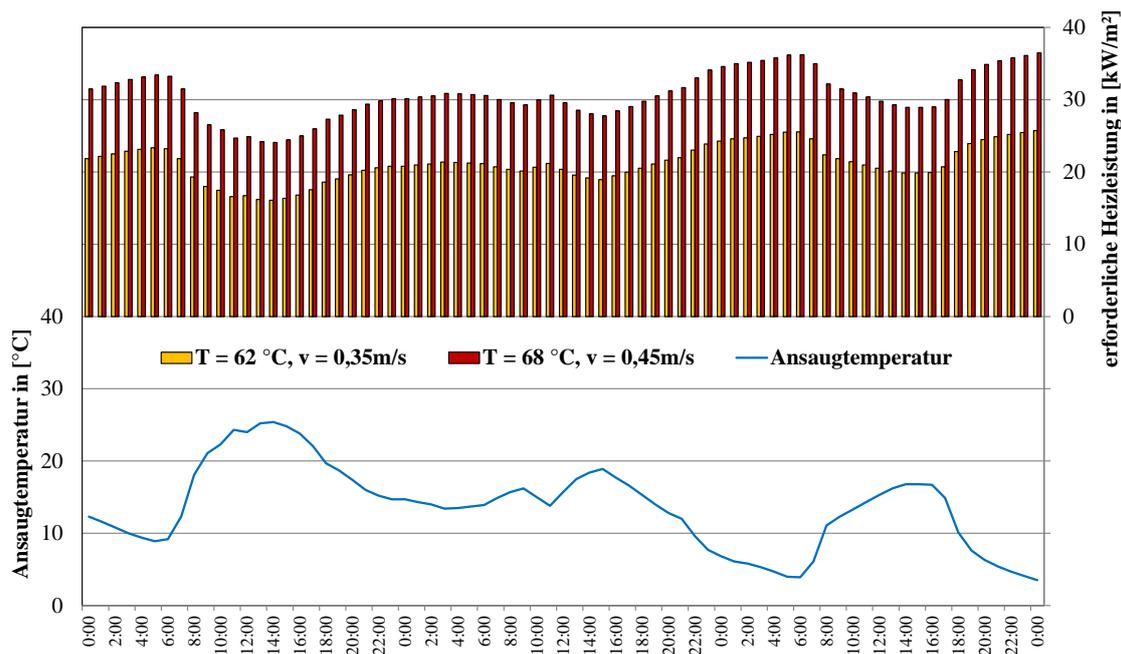


Abb. 6: Veränderung der erforderlichen Heizleistung während eines Erntezeitraums

In Abbildung 6 ist die Variation der erforderlichen Heizleistung je  $\text{m}^2$  Trocknungsfläche bei unterschiedlichen Ansaugtemperaturen während eines Erntezeitraums ersichtlich. Kältere Außentemperaturen erfordern bei der Erwärmung der Trocknungsluft auf  $68^\circ\text{C}$  bei einer Luftgeschwindigkeit von  $0,45\text{m/s}$  eine Heizleistung von ca.  $35\text{kW/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$ . Im Gegensatz dazu liegt die erforderliche Heizleistung bei einer Ansaugtemperatur von  $25^\circ\text{C}$  für die Erwärmung der Trocknungsluft auf  $62^\circ\text{C}$  bei einer Luftgeschwindigkeit von  $0,35\text{m/s}$  lediglich bei  $17\text{kW/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$ . Folglich ist ein auf die Trocknungsanlage optimal abgestimmter Heizleistungsbedarf der Warmlufterzeuger eine wesentliche Grundvoraussetzung für optimale Trocknungsabläufe.

*Praxishinweis:*

Die installierte Heizleistung einer Trocknungsanlage in  $\text{kW/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  sollte dem Betreiber einer Trocknungsanlage bekannt sein.

**2.2.2 Eigenschaften unterschiedlicher Ölbrennertechniken**

Die Entscheidung hinsichtlich der einzusetzenden Brennertechnik hängt von der installierten Nennheizleistung in  $[\text{kW}]$  und Einsatzdauer sowie dem prognostiziertem Energieverbrauch und den Anschaffungskosten ab. Wurden früher überwiegend zweistufige Brenner eingesetzt, so finden heutzutage aufgrund der inzwischen höher installierten Heizleistungen vorwiegend dreistufige oder modulierende Brenner Verwendung. Bei stufigen Brennern erfolgt die Anpassung an den tatsächlichen Leistungsbedarf durch ständiges „Takten“, d.h. durch Ein- und Aus- bzw. Zu- und Wegschalten der jeweiligen Brennerstufe. Beim zweistufigen Brenner dient die erste Stufe als Grundlast, die zweite Stufe als Regellast. Die Grundlast wird meist durch Auswahl einer entsprechenden Öldüse auf 60 bis 70% der Heizleistung eingestellt. Die prozentuale Aufteilung der Heizleistung auf die Grundlast bzw. Regellast ist derart zu wählen, dass der Brenner bei den jeweiligen Einsatzbedingungen möglichst wenig taktet.

Bei modulierenden bzw. stufenlosen Brennern passt sich die Wärmeleistung automatisch an den tatsächlich erforderlichen Wärmebedarf an. Dadurch, dass der Brenner im Teillastbetrieb nicht dauerhaft taktet, strömt das Abgas langsamer durch den Wärmetauscher und hat dadurch entsprechend mehr Zeit, die Wärme abzugeben. Im Vergleich zu stufigen Brennern bieten modulierende bzw. stufenlose Brenner aufgrund der niedrigeren Abgastemperaturen insbesondere im Teillastbetrieb eine höhere Energieeffizienz. Je größer die Flächen der Wärmetauscher in den Lufterhitzern sind, desto geringer fallen die Abgasverluste aus. Da sich im Teillastbetrieb die Abgastemperaturen auch im kondensierenden Bereich des Kessels bewegen, sollte der Warmlufterzeuger mit einem Edelstahlkessel und Kondensat-Abfluss ausgestattet sein (Euringer C., 2019). Ebenso gilt es, auch den Kamin auf die niedrigeren Abgastemperaturen auszulegen. Ist dies nicht der Fall, neigen alte Schornsteinanlagen zur Versottung.

### 2.2.3 Steuerung und Regelung der Ölbrenner

Bei älteren Stufenbrennern erfolgt deren Regelung zumeist über ein Thermostat im Luftverteilterraum. Hierbei sind in der Praxis unterschiedliche Regelungen der Taktung vorzufinden.

Zum einen wird über die Steuerung die Grundlast abgeschaltet, sobald der Heizleistungsbedarf diese unterschreitet. Die Folge ist ein starker Abfall der Trocknungstemperatur. Sobald die vorgegebene Mindesttemperatur der Warmluft unterschritten wird, schaltet der Brenner die Grundlaststufe wieder zu. Dadurch ergeben sich im Falle hoher Ansaugtemperaturen und/oder niedrigen Luftgeschwindigkeiten signifikante Temperaturschwankungen der Trocknungsluft.

Ist die erste Stufe jedoch nicht getaktet und auf Dauerbetrieb eingestellt, sinkt mit steigenden Ansaugtemperaturen der Heizleistungsbedarf. Unterschreitet dieser die Grundlast, wird die Trocknungsluft aufgrund des Dauerbetriebs der ersten Stufe höher als die erforderliche bzw. voreingestellte Temperatur erhitzt. In diesem Fall wird unweigerlich mit zu hohen Trocknungstemperaturen getrocknet.

*Praxishinweis:*

Bei der Hopfentrocknung ist das Einhalten einer vorgegebenen Trocknungstemperatur unabdingbar! Mit den derzeit angebotenen elektronischen Brennerregelungen ist es möglich, auch bei älteren Anlagen die erforderliche Trocknungstemperatur bei nur geringen Temperaturschwankungen zu gewährleisten. Aufgrund geeigneter elektronischer Brennerregelungen sind die einst den modulierenden Brennern vorbehaltenen Vorteile mittlerweile auch mit stufigen Brennern weitestgehend erzielbar.

## 2.3 Luft- und Wärmeverteilung

Zwingende Voraussetzung für einen optimalen Trocknungsablauf in einer Hordendarre oder einem Bandtrockner ist die homogene Verteilung der Trocknungsluft und -wärme über die gesamte Trocknungsfläche. Es ist zu gewährleisten, dass der zu trocknende Hopfen mit gleicher Geschwindigkeit und Temperatur der Trocknungsluft in den jeweiligen Lagen bzw. Bändern angeströmt wird.

### 2.3.1 Hordendarren

In Abbildung 7 sind unterschiedliche Luftverteilsysteme für Hordendarren dargestellt. Dabei gelangt der Warmluftstrom mittels des Gebläsedrucks des Warmlufterzeugers über dessen Wärmetauscher zumeist in einen Vorverteiltrraum. Durch Verteilhauben, Lamellen oder Diffusoren sollte eine homogene Verteilung der Trocknungsluft über die gesamte Trocknungsfläche erfolgen. Da die Temperatur – im Vergleich zur Luftmenge – einen größeren Einfluss auf die Trocknung hat, kann es bei diesen Systemen auch bei optimal eingestellter Luftverteilung zu einer ungleichmäßigen Abtrocknung kommen. Die Ursache liegt in den Temperaturunterschieden der aus dem Vorverteiltrraum ausströmenden Luft begründet, bauartbedingt durch ein Temperaturgefälle des Wärmetauschers zwischen Brenner- und Rauchrohrseite des Warmlufterzeugers. Dieser Effekt ist insbesondere bei stehend eingebauten Warmlufterhitzern zu beobachten. Hier gelangt der Warmluftstrom ohne Umlenkung direkt nach dem Durchströmen des Wärmetauschers über die Luftverteilung zur Trocknungsfläche. Im Falle deutlicher Temperaturunterschiede innerhalb der ausströmenden Luft hat sich in der Praxis der Einbau von Drehverteilern aufgrund der besseren Wärmeverteilung bewährt. Jedoch müssen diese derart konzipiert sein, dass keine negativen Auswirkungen auf die Luftmengenverteilung resultieren. Somit ist insbesondere darauf zu achten, dass die Luftleistung des Warmlufterzeugers, das Kanalsystem sowie das Luftverteilsystem aufeinander abgestimmt sind!



Abb. 7: Beispiele unterschiedlicher Luftverteilsysteme: Verteilhauben, Lamellen, Diffusoren und Drehverteiler (von links nach rechts)

#### 2.3.1.1 Schuppenblech

Schuppenbleche – auch bekannt unter den Bezeichnungen Düsenblech oder Luftverteiblech – unterhalb der Auszugshorde bewirken eine zusätzliche Homogenisierung des Luftstroms bzw. vielmehr eine Gleichverteilung der Luftmenge (Abb. 8). Die Anordnung, Ausrichtung und Größe der Öffnungsquerschnitte sowie deren Geometrie müssen an den Gebläsetyp und die Luftleistung des Warmlufterzeugers angepasst sein (Euringer C., 2019). Trotz des höheren Strömungswiderstands können deutlich höhere Trocknungsleistungen erzielt werden, zumal aufgrund der erzielten Gleichmäßigkeit über einen längeren Zeitraum hinweg mit höheren Luftgeschwindigkeiten getrocknet werden kann. Bei der Auswahl des Gebläses ist der Widerstand der Luftverteilung und der Schuppenbleche zwingend zu beachten. Der Einbau von Schuppenblechen gilt zudem als effektive und sinnvolle Feuerchutzmaßnahme. Etwaiges herunterfallendes Trocknungsgut gelangt somit nicht mehr direkt zum Warmlufterzeuger und bietet die Gefahr möglicher Entzündung, sondern bleibt anstatt dessen auf dem Schuppenblech liegen.

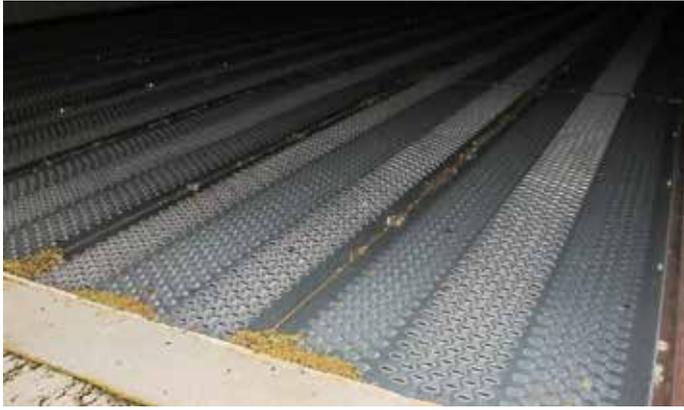


Abb. 8: Schuppenblech unterhalb der Auszugshorde

### 2.3.1.2 Luft- und Wärmeverteilung in Praxisdarren

Die Ursache einer ungleichmäßigen Trocknung kann unter anderem in einer grundsätzlich falsch konzipierten oder fehlerhaft eingestellten Luft- und Wärmeverteilung begründet sein. Mit Hilfe von Data-Loggern (Messeinheit zur Aufzeichnung von Temperatur- und Feuchtigkeitswerten) wurde in mehreren Praxisdarren dokumentiert, wie sich die Temperatur und relative Feuchte der Trocknungsluft beim Durchströmen durch die einzelnen Trocknungslagen verändert. Dazu wurden vier Data-Logger im Luftverteilteraum oberhalb der Luftverteilung positioniert. Weitere Data-Logger wurden in der linken und rechten Darrhälfte jeweils unter bzw. über den einzelnen Lagen angebracht (Abb. 9). Durch die gewählte Anordnung konnte nachgewiesen werden, wie gleichmäßig die Trocknung erfolgte und in welcher Beschaffenheit die Trocknungsluft den Hopfen im Schubler, in der Mittelhorde und in der Aufschütthorde durchströmte.

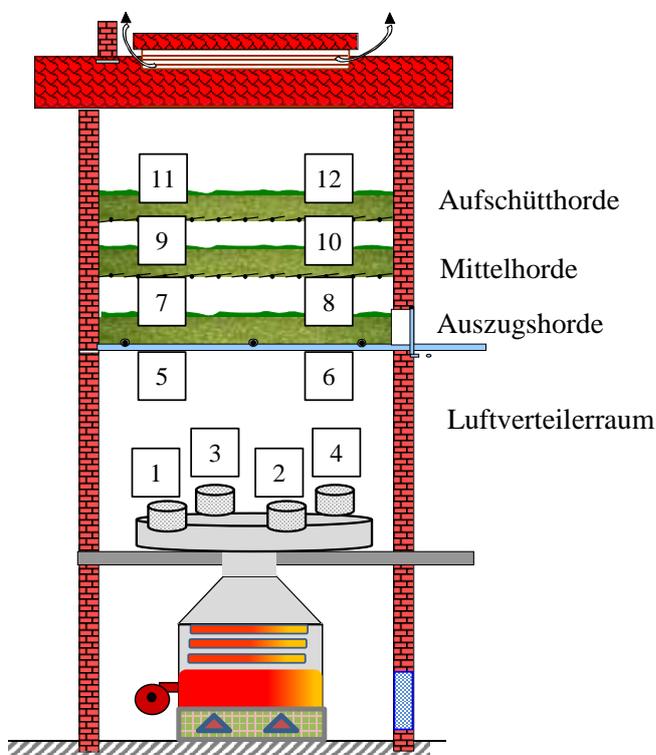


Abb. 9: Positionierung der Data-Logger in Praxisdarren

Bei manchen Hopfendarren wurden im Luftverteilteraum Temperaturunterschiede bei der aus den Wärme- und Luftverteiltern ausströmenden Trocknungsluft von bis zu 10°C nachgewiesen. Hingegen betrug bei einigen Darren die Temperaturdifferenz weniger als 2°C. In den nachfolgenden Abbildungen 10 und 11 sind die durch die Data-Logger ermittelten Trocknungstemperaturen zweier Praxisdarren graphisch dargestellt. Die beiden Darren unterschieden sich in der Gleichmäßigkeit der Wärme- und Luftverteilung. Dabei ist ersichtlich, wie sich innerhalb eines bestimmten Zeitraums die Trocknungstemperaturen vom Befüllen bis zum Entleeren in den jeweiligen Horden der linken und rechten Darrhälfte verändern. In der Darre mit der gleichmäßigen Wärme- und Luftverteilung (Abb. 10) sind kaum Temperaturunterschiede bei der aus dem Lufterhitzer ausströmenden Trocknungsluft erkennbar. Da in diesem Fall der Hopfen innerhalb der jeweiligen Lagen mit annähernd gleicher Trocknungstemperatur angeströmt wurde, erfolgte die Trocknung über die gesamte Darrfläche sehr gleichmäßig. Zugleich wird deutlich, dass die Trocknungstemperatur im Schubler sowie in der Mittel- und Aufschütthorde jeweils nur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs variiert. Bei der Darre mit den bereits im Luftverteilteraum ungleichmäßigen Trocknungstemperaturen (Abb. 11) kam es zu einer ungleichmäßigen Trocknung zwischen der linken und rechten Darrhälfte. Gleichzeitig ist ersichtlich, dass aufgrund der ungleichmäßigen Luft- und Wärmeverteilung der Hopfen in der Mittel- und insbesondere in der Aufschütthorde mit zu hohen Trocknungstemperaturen und in einem zu großen Temperaturbereich getrocknet wurde.

*Praxishinweis:*

Zwingende Voraussetzung für eine gleichmäßige Trocknung ist eine korrekt konzipierte und eingestellte Wärme- und Luftverteilung!

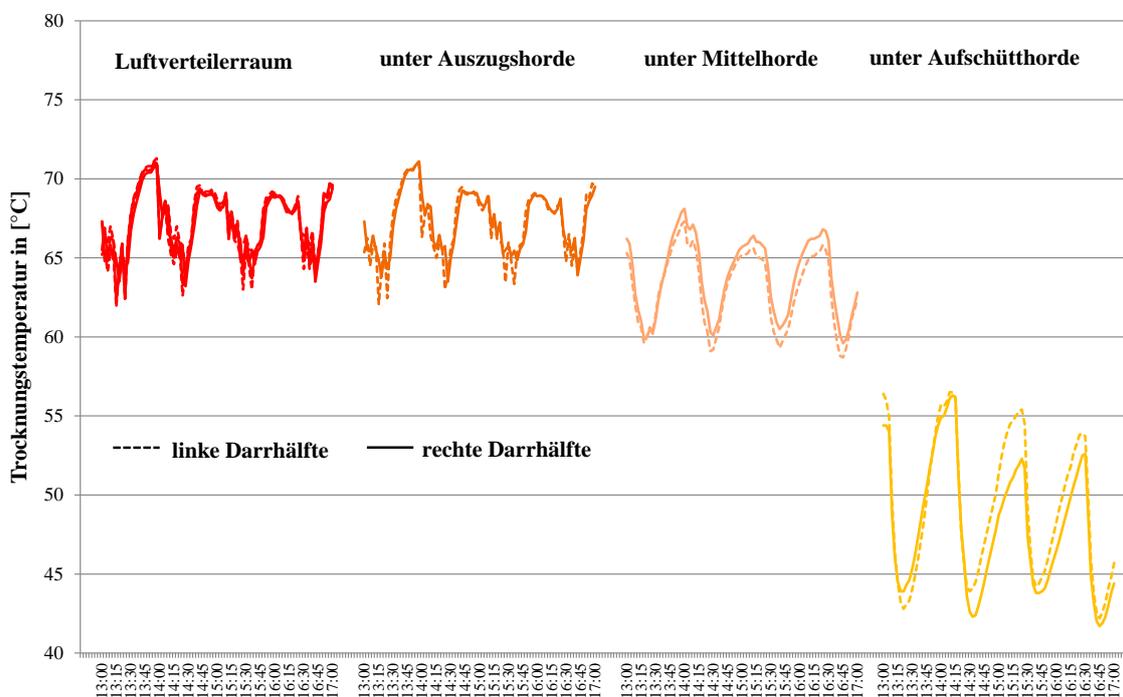


Abb. 10: Trocknungstemperaturen beim Einströmen in die unterschiedlichen Trocknungslagen auf Basis einer gleichmäßigen Wärme- und Luftverteilung

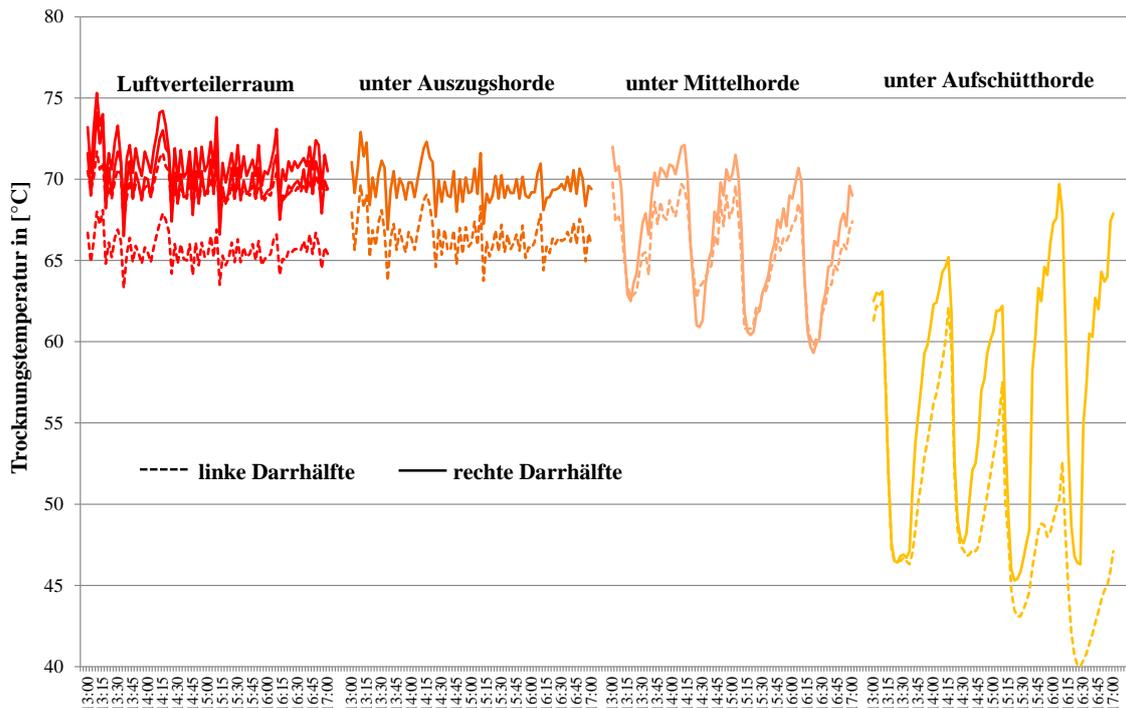


Abb. 11: Trocknungstemperaturen beim Einströmen in die unterschiedlichen Trocknungslagen auf Basis einer ungleichmäßigen Wärme- und Luftverteilung

### 2.3.2 Bandtrockner

Beim Bandtrockner gestalten sich die Konzeption, Weiterentwicklung und Einstellung der Wärme- und Luftverteilung deutlich schwieriger und komplexer als bei Hordendarren. Beim Bandtrockner gelangt die Trocknungsluft über seitliche Einblasöffnungen zwischen die Trocknungsbänder. Jedes Band wird somit direkt mit der Trocknungsluft angeströmt. Folglich nimmt der Trocknungsgrad auf den jeweiligen Bändern in Laufrichtung zu, da der Hopfen mit fortschreitender Bandposition auch bereits länger auf dem Band verweilt. Über eine Bandlänge hinweg betrachtet, verändern sich somit auch die Strömungswiderstände. Zusätzlich sind die Laufrichtungen der Bänder zueinander entgegengesetzt. Aufgrund der Komplexität der Strömungen und deren Wechselwirkungen sind technische Umrüstungen bzw. Veränderungen und die dadurch verursachten Auswirkungen im Vorfeld kaum abschätzbar.

In zahlreichen Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Luftgeschwindigkeit der Trocknungsluft im vorderen Drittel des obersten Bandes den größten Einfluss auf die Trocknungsleistung und Qualitätserhaltung besitzt. Deshalb wird derzeit erforscht, inwiefern bei bestehenden Bandtrocknern durch eine mögliche Optimierung der Luftführungssysteme die Luftgeschwindigkeiten und folglich die durchströmten Luftmassen erhöht werden könnten.

#### 2.3.2.1 Strömungssimulation

Auf Basis einer Strömungssimulation, finanziert von der Erzeugergemeinschaft Hopfen HVG e.G., wurden die komplexen Strömungsvorgänge im Bandtrockner untersucht. Ausgehend von diesen Erkenntnissen galt es, bestehende Luftverteilsysteme zu optimieren bzw. vielmehr neue Konzepte zu erarbeiten. Den Simulationsläufen lag das Modell des in der Praxis weit verbreiteten Bandtrockners tschechischer Bauart mit 54m<sup>2</sup> Grundfläche und drei Bändern zugrunde. Durch die verhältnismäßig weite Verbreitung des Trockners kommen

die gewonnenen Erkenntnisse entsprechend vielen Landwirten bei einer etwaigen Optimierung ihres Bandtrockners im Sinne der Qualitäts- und Leistungssteigerung sowie in Hinsicht auf den Energieverbrauch zugute. Auf Grundlage technischer Zeichnungen und Bauplänen von sich seit Jahren im Einsatz befindlicher Trockner, simulierten die Strömungsphysiker die Strömungsverhältnisse auf Basis eines 3D-Modells. Dazu wurde zunächst das Strömungsverhalten der Trocknungsluft auf allen drei Trocknungsbändern im Bandtrockner erfasst. Da die Strömungen der einzelnen Bänder in Wechselwirkung zueinanderstehen, können sie im Hinblick auf eine sinnvolle und insbesondere interpretierbare Auswertung der Simulationsergebnisse im Rahmen der Simulation lediglich als Ganzes betrachtet werden. Hierbei wurden die Geschwindigkeitsverteilungen in der Längsebene (XY-Ebene) und in der Querebene (YZ-Ebene) sowie die Luftgeschwindigkeiten durch den Hopfen (Z-Achse) für alle drei Trocknungsbänder näher betrachtet (Abb. 12).

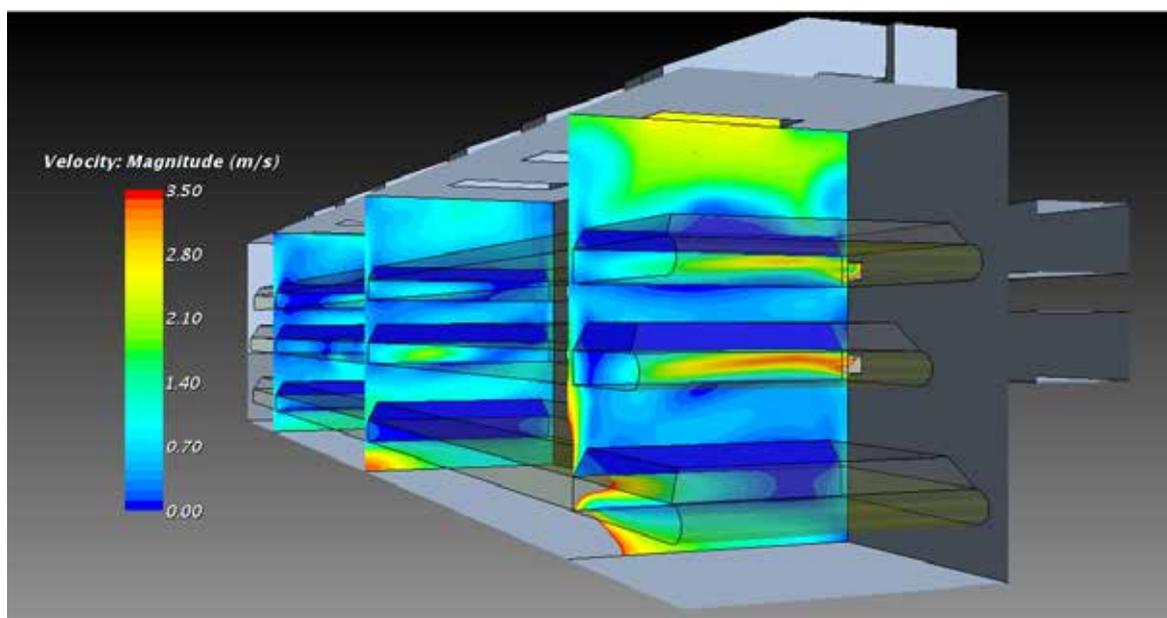


Abb. 12: Strömungssimulation der Trocknungsluft im Bandtrockner tschechischer Bauart (Bild: HTCO GmbH, Freiburg, 2016)

### 2.3.2.2 Ergebnisse der Strömungssimulation

Durch die seitlichen Luftzuführungen kommt es zu hohen lokalen Luftgeschwindigkeiten der einströmenden Trocknungsluft, den sogenannten Jets. Durch den Aufprall der Jets an der gegenüberliegenden Wand entstehen Verwirbelungen der Trocknungsluft. Eine ungleichmäßige Trocknung mit der sogenannten "Nester- und Löcherbildung" ist die Folge. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je höher die lokalen Luftgeschwindigkeiten sind.

Um die Jets abzubremsen und die Trocknungsluft gleichmäßiger zu verteilen, wurde der mögliche Einbau zweier Lochblechreihen in Bandlaufrichtung in die Bandzwischenräume des oberen und mittleren Trocknungsbands konzipiert und im Zuge der weiteren Simulation näher betrachtet. Im nachgerüsteten 3D-Bandtrocknermodell trifft die seitlich einströmende Trocknungsluft (Abb. 13) vollständig auf die sog. Diffusorbleche und wird dadurch abgebremst, verwirbelt und folglich effizienter und gleichmäßiger auf die volle Bandbreite verteilt.

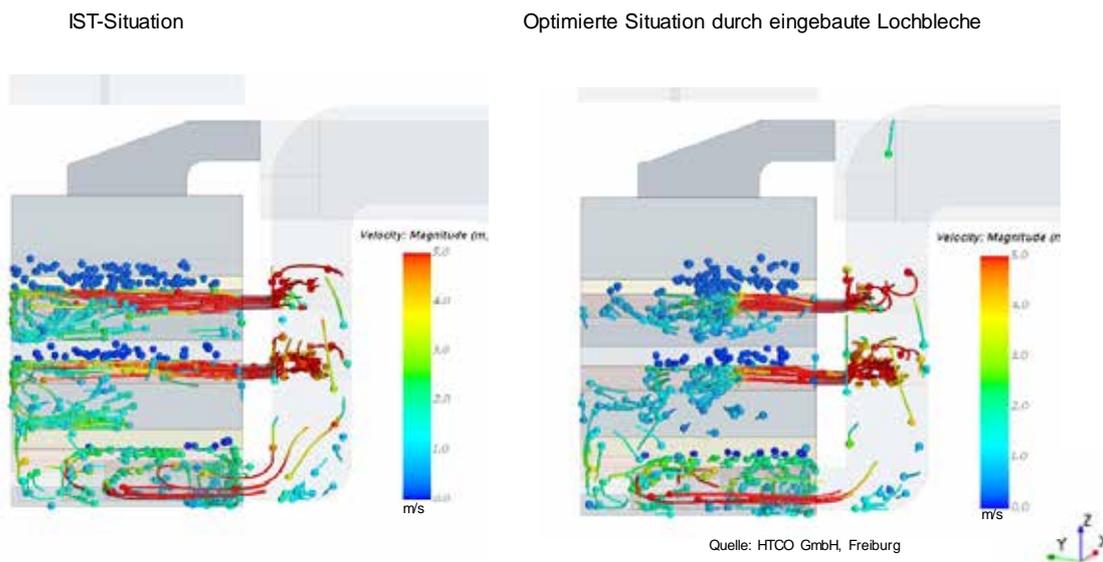


Abb. 13: Darstellung der Strömung der Trocknungsluft im Bandtrockner mittels Strömungslinien in der Querebene (Bild: HTCO GmbH, Freiburg, 2016)

### 2.3.2.3 Umsetzung der Simulationsergebnisse in der Praxis

In einem praxisüblichen Bandtrockner wurden Lochbleche gemäß den Empfehlungen aus der Strömungssimulation eingebaut. In Abbildung 14 sind die seitlichen Lufteinlässe für die Trocknungsluft sehr gut erkennbar. Durch die Lochbleche sollten die von den Einlässen verursachten Jets der Trocknungsluft homogenisiert werden.



Abb. 14: Eingebaute Diffusorbleche in den Bandzwischenräumen eines Bandtrockners tschechischer Bauart

Während der Ernte 2017 konnten die Ergebnisse der Strömungssimulation durch Messungen an der Doldenoberfläche des Hopfens zum einem mit Wärmebildtechnik, zum anderen mit Hilfe von Data-Loggern bestätigt werden. Durch den Einsatz von Data-Loggern kann der Verlauf der Temperatur in [°C] und der relativen Luftfeuchtigkeit in [%] über einen definierbaren Zeitraum exakt erfasst werden. Diese wurden sowohl in der linken als auch rechten Hälfte jeweils 50cm von der Außenwand auf den zu trocknenden Hopfen gelegt. Dadurch konnten sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte unmittelbar über den zu trocknenden Hopfendolden während der Verweildauer im obersten Band aufgezeichnet werden. Abbildung 15 bestätigt, dass die Unterschiede des Abtrocknungsgrads zwischen

linker und rechter Bandhälfte nur noch gering sind und folglich durch den Einbau der Lochbleche eine gleichmäßigere Abtrocknung gewährleistet werden konnte.

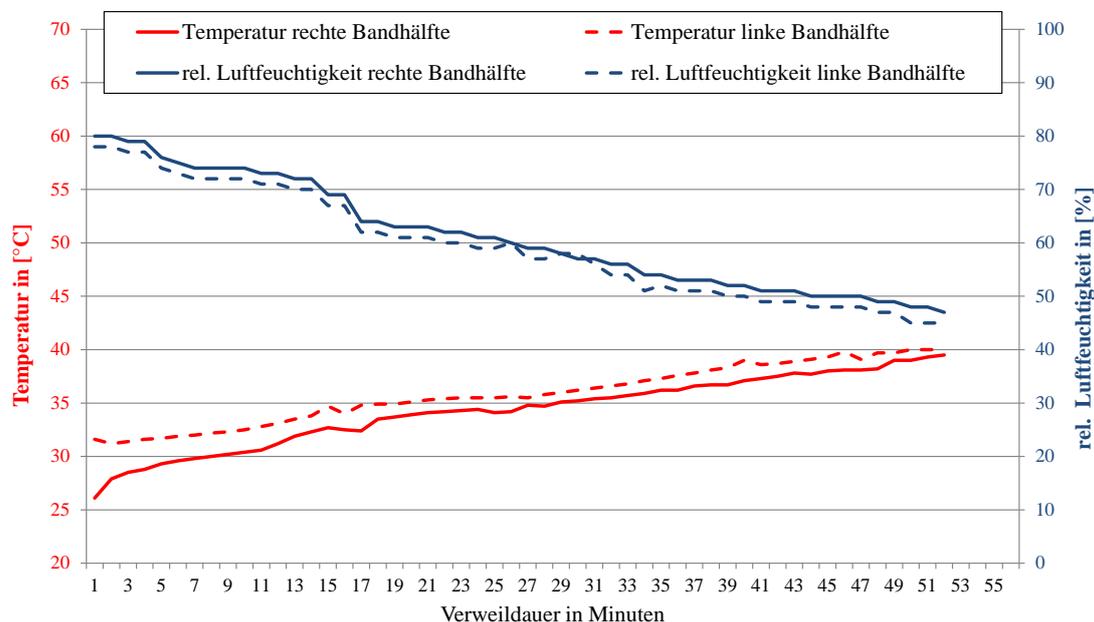


Abb. 15: Veränderung der Temperatur und relativen Feuchte der Abluft aus dem Hopfen im oberen Trocknungsband

#### 2.3.2.4 Entwicklung neuer Luftverteilsysteme

Die Ergebnisse der Strömungssimulation bestätigten, dass es vor allem bei höheren Luftgeschwindigkeiten sehr schnell zur bekannten „Nester- und Löcherbildung“ und einer ungleichmäßigen Abtrocknung über die Breite des Trocknungsbands kommt. Auf Basis dieser Erkenntnisse hinsichtlich der Luftströmung und Temperaturverteilung wurden verschiedene Luftverteilsysteme geprüft bzw. neu konzipiert. Zwei hiervon in Frage kommende Luftverteilsysteme fanden daraufhin eine nähere Betrachtung im Zuge einer weiteren Strömungssimulation. In einer Variante sollte die Luftverteilung über eingebaute Modulkassetten, wie sie häufig in Bandtrocknern für beispielsweise Gewürztrocknung zu finden sind, erfolgen. Dabei wird die seitlich einströmende Luft in Bandlaufrichtung umgelenkt. Eine zweite Variante sah ein Luftverteilsystem in Form spitz zulaufender Lochblechreihen vor. Hierbei wird die Trocknungsluft von seitlichen Einströmöffnungen durch die Lochblechreihen gedrückt. Inwieweit die vorgeschlagenen Luftverteilsysteme tatsächlich eine Verbesserung bzw. Alternative darstellen, wird derzeit in der Praxis erforscht.

## 3 Trocknungsvermögen von Luft

### 3.1 Konvektionstrocknung

Bei der Konvektionstrocknung erfüllt die Trocknungsluft mehrere Funktionen. Zum einen überträgt die erhitzte Luft Energie in Form von Wärme auf den zu trocknenden Hopfen. Zum anderen nimmt sie im gleichen Zug das vom Hopfen abgegebene verdunstete Wasser auf und transportiert es ab. Gemäß Abbildung 16 wandelt sich die Aufgabe der Luft während

des Durchströmens des zu trocknenden Hopfens, vom anfänglichen Wärmeträger immer mehr hin zum Wasserträger.

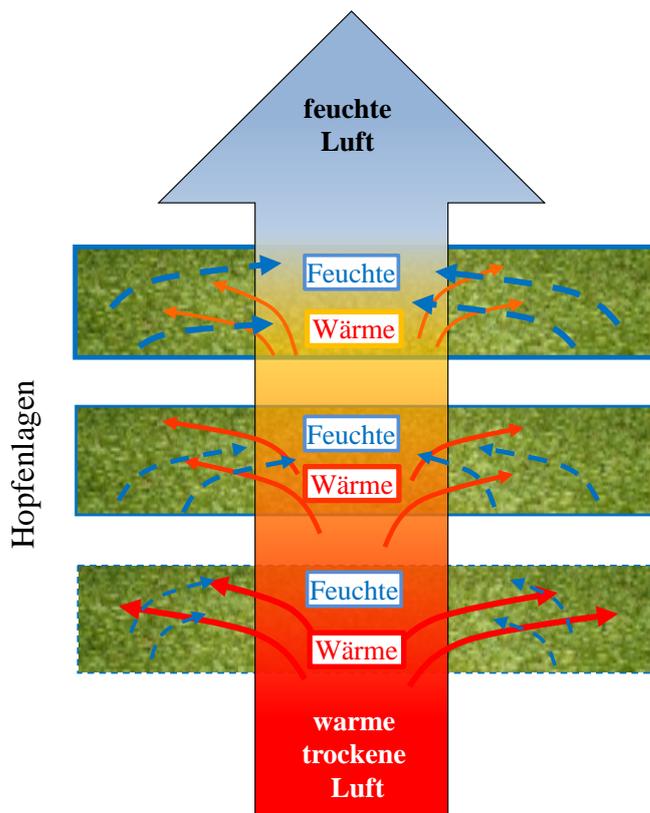


Abb. 16: Schema Wärme- und Wassertransport bei der Konvektionstrocknung

Ferner besitzt die durchströmende Luft einen zusätzlichen, für die Hopfentrocknung wertvollen Effekt: Sie durchdringt die Hopfenschichten und umströmt die einzelnen Dolden. Somit wird der Hopfen durch den Luftstrom in einer Art von „Schwebestand“ gehalten und folglich ein Zusammensinken des zu trocknenden Guts verhindert.

### 3.2 Wasserdampfgehalt in der Luft

Mit Hilfe des hx-Diagramms nach Mollier – auch bekannt unter der Bezeichnung Enthalpie-Wasserbeladungs-Diagramm - lassen sich die Abläufe bei der Hopfentrocknung verständlich erklären. Das Diagramm verdeutlicht die thermodynamischen Vorgänge im Zuge der Trocknung und zeigt demzufolge die Abhängigkeit von Temperatur, Wassergehalt, relativer Luftfeuchtigkeit und Energiegehalt (Enthalpie) der Trocknungsluft (Abb. 17).

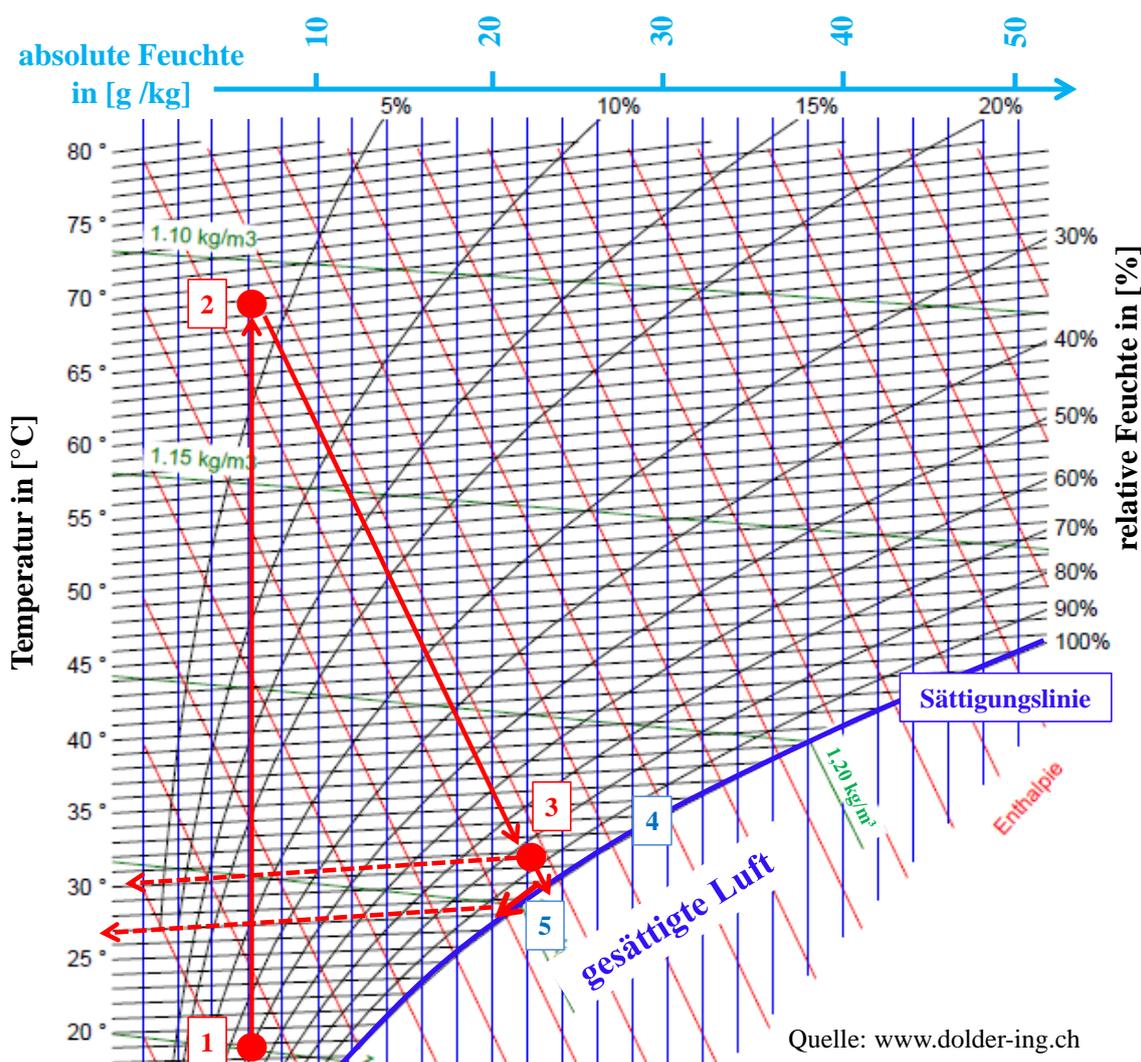


Abb. 17: *hx*-Diagramm von Mollier für feuchte Luft

Die Fähigkeit von Luft zur Aufnahme von Feuchtigkeit bzw. Wasser ist temperaturabhängig. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasser kann Luft in Form von Wasserdampf speichern. Die absolute Feuchte in  $[\text{g}/\text{m}^3]$  bzw.  $[\text{g}/\text{kg}]$  Luft gibt den tatsächlichen Wassergehalt der Luft an. Hingegen gibt der Wert der relativen Feuchte in  $[\%]$  an, zu wieviel Prozent die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist.

Anhand des *hx*-Diagramms ist in Abhängigkeit von der Temperatur die maximal mögliche Wasseraufnahme der Trocknungsluft bestimmbar. Nachfolgendes Beispiel beschreibt die Zustandsänderung der Trocknungsluft bei der Hopfentrocknung (Abb. 17).

Eine Ansaugluft mit einer Temperatur von  $18^\circ\text{C}$  und einer relativen Feuchte von 50% besitzt einen Wassergehalt von ca.  $6,3 \text{g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$  (1).

Die Luft wird daraufhin auf  $68^\circ\text{C}$  erwärmt. Während die absolute Feuchte gleich bleibt, verringert sich die relative Feuchte jedoch von 50% auf unter 5% (2).

Nimmt die Trocknungsluft während des nächsten Schritts Feuchtigkeit bis zu einer relativen Feuchte von 90% auf, kühlt diese dabei bis auf ca.  $30^\circ\text{C}$  ab. Der absolute Wassergehalt steigt auf  $22 \text{g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$  an (3).

Bei einem spezifischen Gewicht der Luft von  $1,2\text{kg/m}^3$  resultiert hieraus eine Wasseraufnahme obig genannter Trocknungsluft in Höhe von  $18,8\text{g/m}^3$ . Da Luft lediglich bis zu einer relativen Feuchte von 100% mit Wasserdampf gesättigt werden kann, bildet die so-genannte Sättigungslinie die Grenzlinie zwischen gesättigter und ungesättigter Luft (4).

Kommt es zur Abkühlung einer vollständig mit Wasserdampf gesättigten Luft bis unterhalb der Sättigungslinie, kondensiert ein Teil des in der Luft gebundenen Wasserdampfs und es wird wieder Wasser frei. Die Temperatur, an der die Luft beginnt, wieder Wasser abzugeben, wird als Taupunkt bezeichnet (5).

### 3.3 Wasserdampfpartialdruck

In Analogie zum Luftdruck, über den Luft einen Druck auf ihre Umgebung ausübt, verhält es sich auch mit dem in Luft gebundenen Wasserdampf. Solange Luft Wasser aufnehmen kann und noch nicht gesättigt ist, spricht man vom sogenannten Wasserdampfpartialdruck der Luft. Der Dampfdruck ändert sich in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte. Ist Luft jedoch vollständig, d.h. zu 100% gesättigt, so besitzt auch der Dampfdruck seinen höchstmöglichen Wert und der Sättigungsdampfdruck der Luft gilt als erreicht (Abb. 18).

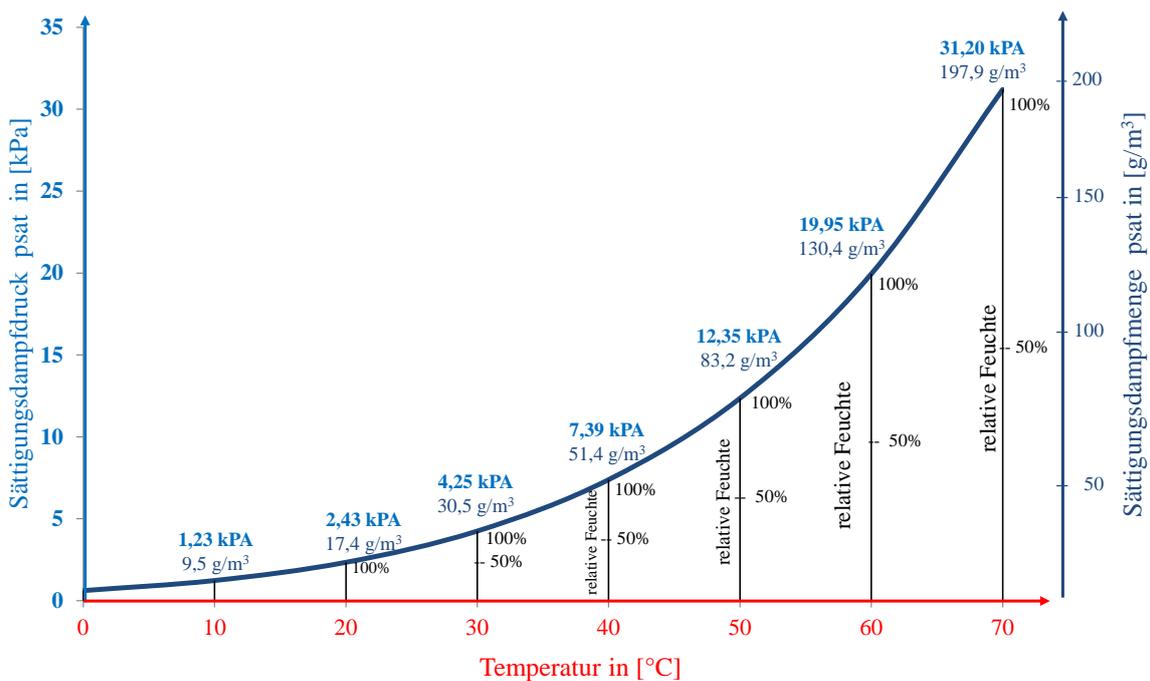


Abb. 18: Zusammenhang von Temperatur, Sättigungsdampfdruck, Sättigungsdampfmenge und relativer Feuchte

Während der Trocknung wird das im Inneren und an der Oberfläche der Hopfendolden verdunstende Wasser in Form von Wasserdampf über die Trocknungsluft abgeführt. Im Zuge dieses Prozesses stellt sich an der Doldenoberfläche ein bestimmter, von der Temperatur der abzuführenden Flüssigkeit abhängiger Dampfpartialdruck ein. Solange der Dampfpartialdruck der Umgebungsluft kleiner ist als der zuvor beschriebene Dampfpartialdruck an der Doldenoberfläche, kommt es infolge der Dampfpartialdruckdifferenz zur Verdunstung. Hierbei wird das Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand überführt und über den Luftstrom abtransportiert.

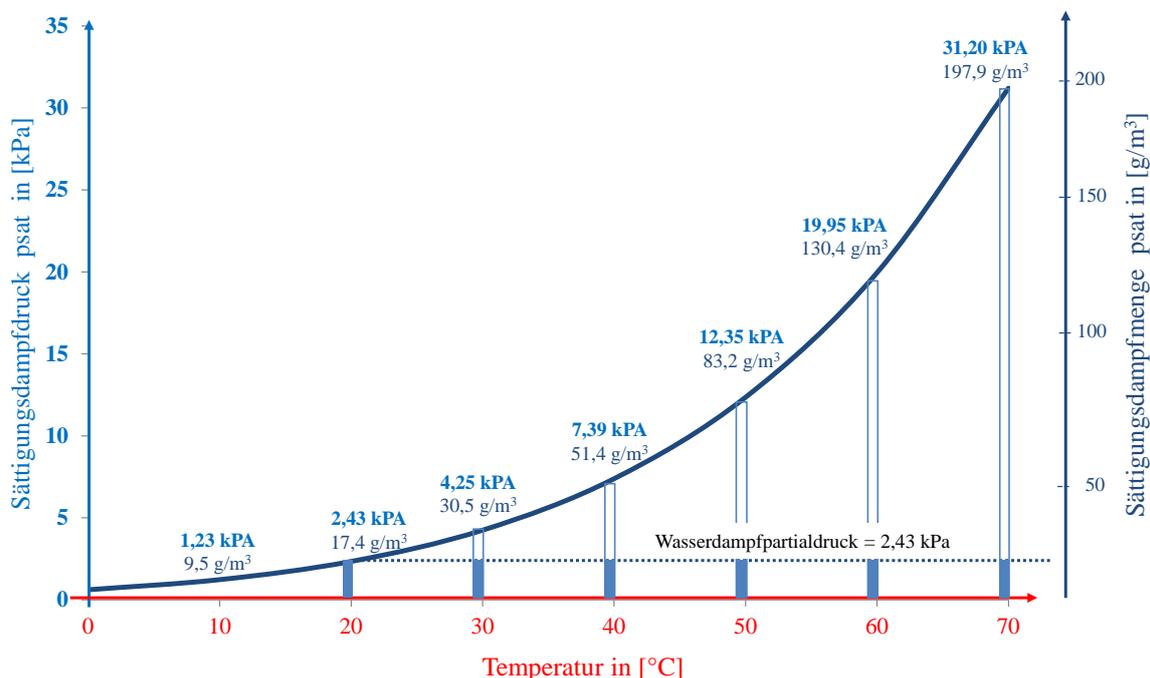


Abb. 19: Zusammenhang von Temperatur, Sättigungsdampfdruck, Wasserdampfpartialdruck und Sättigungsdefizit

Je stärker das im zu trocknenden Hopfen noch verbliebene Wasser an der einzelnen Dolde haftet und in ihrer Spindel gebunden ist bzw. je weiter der Trocknungsprozess vorangeschritten ist, desto größer muss die Dampfdruckdifferenz sein, damit die Trocknung weiterhin gewährleistet ist. Abbildung 19 verdeutlicht diesen Vorgang.

Besitzt beispielsweise die Ansaugluft aufgrund nasser Witterung eine Temperatur von 20°C und eine relative Feuchte von 100%, sind in 1m<sup>3</sup> Luft bereits 17,4g Wasserdampf enthalten. Zur Aufnahme von Wasser, muss Luft erhitzt werden. Allein durch die Erwärmung verändern sich jedoch die absolute Feuchte und der Wasserdampfdruck der Luft nicht. Je stärker die Ansaugluft im beschriebenen Beispiel erhitzt wird, desto größer werden das Sättigungsdefizit und zudem auch die Partialdruckdifferenz zwischen Sättigungsdampfdruck und Wasserdampfdruck. Bei einer Temperatur von 70°C ist die erhitzte Trocknungsluft rein rechnerisch in der Lage, 51,8% mehr an Wasserdampf aufzunehmen als dies bei 60°C der Fall ist. Der Sättigungsdampfdruck erhöht sich hierbei um 56,4%. Dieser Zusammenhang begründet die Tatsache, dass zur Trocknung von Hopfen Temperaturen von über 60°C zwingend erforderlich sind, um auch das gebundene Spindelwasser über die Trocknungsluft ausreichend abzuführen.

Mit zunehmender Wasserdampfmenge der Trocknungsluft reduziert sich das Sättigungsdefizit und die Trocknung verlangsamt sich. Sobald der Sättigungsdampfdruck der Trocknungsluft erreicht ist oder die Partialdrücke der Trocknungsluft und des Dampfs an der Doldeoberfläche gleich groß sind, wird kein Wasser mehr abgeführt und die Trocknung kommt zum Erliegen (Abb. 20). Ist der Partialdruck der Trocknungsluft größer als der Partialdruck der abzuführenden Flüssigkeit, kehrt sich dieser Vorgang sogar um: Hierbei wird das Trockengut dann nicht mehr getrocknet, sondern vielmehr wieder befeuchtet. Dieser Effekt ist im Zuge des Trocknungsprozesses unbedingt zu vermeiden, denn dies gilt als eine der Hauptursachen für Qualitätsschädigungen.

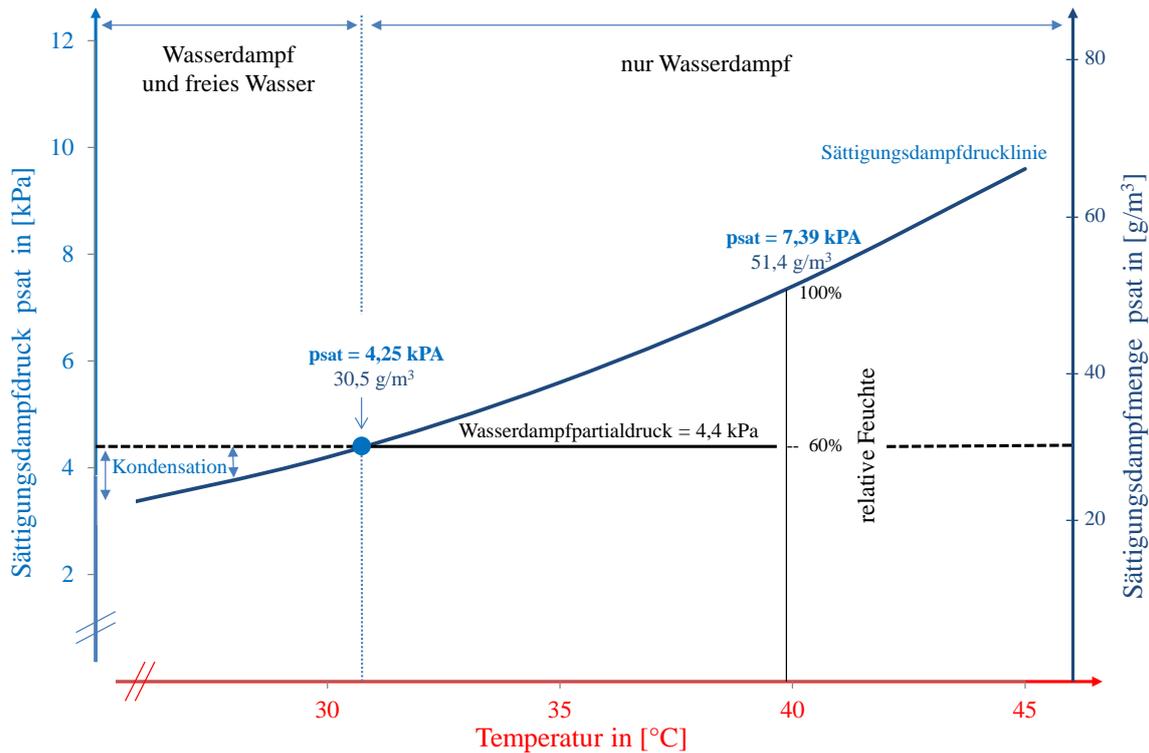


Abb. 20: Zusammenhang Sättigungsdampfdruck, Partialdruck der Luft und Kondensation

## 4 Sorptionsverhalten und Gleichgewichtsfeuchte

Hygroskopische Produkte, zu denen auch Hopfen zählt, besitzen die Fähigkeit, auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft durch entsprechende Wasserdampfabgabe bzw. -aufnahme zu reagieren. Für die Menge der Aufnahme bzw. Abgabe von Wasserdampf hat der Wassergehalt des Hopfens, welcher als der prozentuale Anteil des Wassers an der Gesamtmasse definiert ist, einen entscheidenden Einfluss.

Das sogenannte Sorptionsverhalten beschreibt die Eigenschaft eines hygroskopischen Produkts, Wasserdampf an die Umgebungsluft solange abzugeben bzw. aus ihr aufzunehmen, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Wassergehalt des Hopfens und der Umgebungsluft einstellt. Die Gewährleistung der hierfür erforderlichen Ausgleichs- bzw. Prozessdauer sei vorausgesetzt.

Als Sorptionsisotherme wird die graphische Darstellung des Sorptionsverhaltens bezeichnet. Sie stellt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Hopfens und der relativen Feuchte der Umgebungsluft für eine bestimmte Temperatur dar (Abb. 21). Ist beispielsweise Hopfen dauerhaft einer Luft mit einer Temperatur von 20°C und einer relativen Feuchte von 60% ausgesetzt, stellt sich dessen Gleichgewichtsfeuchte langfristig im Durchschnitt über alle Sorten bei ca. 10,5% ein. Bei gleicher relativer Feuchte ergeben sich bei niedrigeren Temperaturen höhere und bei höheren Temperaturen niedrigere Wassergehalte. Verringert sich die relative Feuchte der Umgebungsluft bei gleichbleibender Temperatur, wird der Hopfen trockener. Steigt hingegen die relative Feuchte über den Wert der Gleichgewichtsfeuchte, nimmt der Wassergehalt zu. Diese Vorgänge sind sowohl bei der Hopfentrocknung als auch bei der -konditionierung von grundlegender Bedeutung und bestimmen weitestgehend den Wassergehalt des homogenisierten Hopfens.

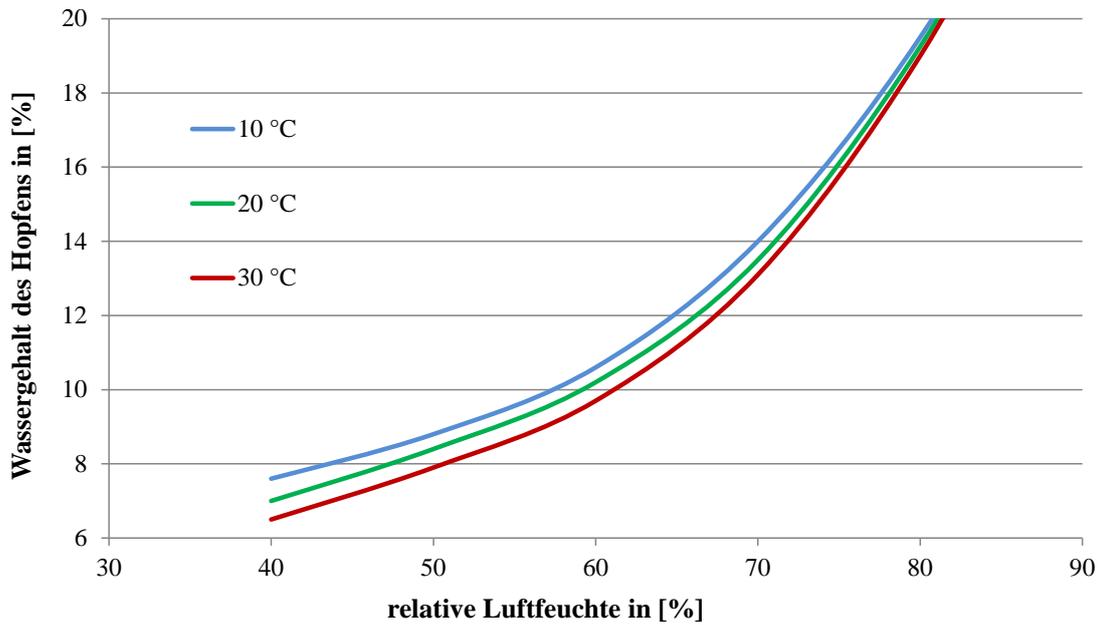


Abb. 21: Sorptionsisothermen von Hopfen

Begriff und Bedeutung der Gleichgewichtsfeuchte bei der Trocknung sollen anhand nachstehend beschriebenen Versuchs näher aufgezeigt werden (Abb. 22).

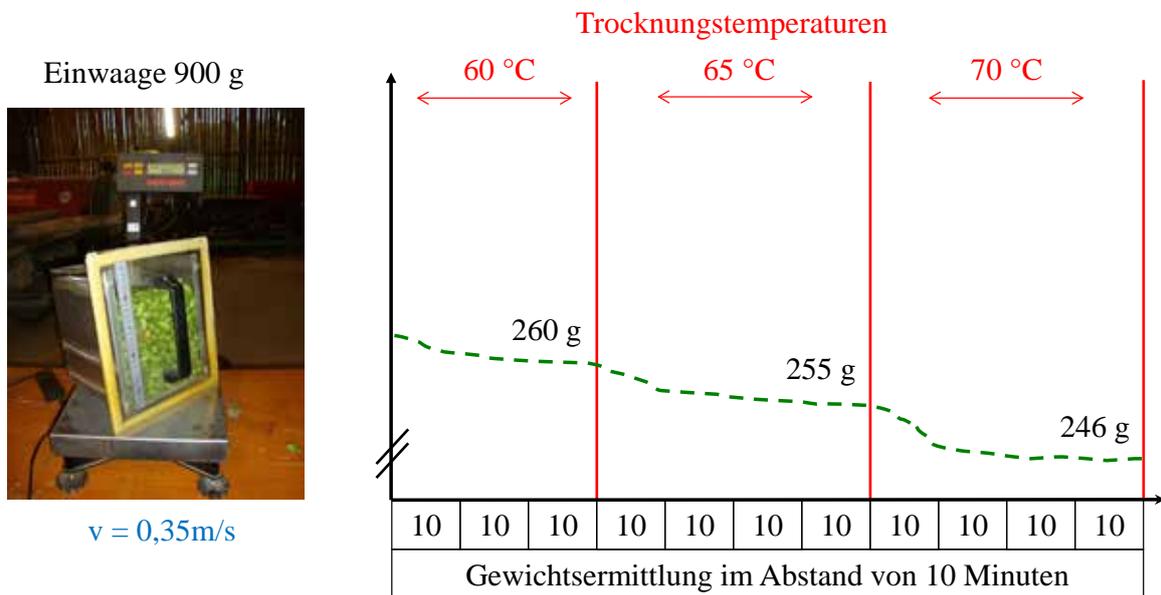


Abb. 22: Klein-trocknungsversuch mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen

In einem Kleintrockner wurden 900g Hopfen mit einer konstanten Luftgeschwindigkeit von 0,35m/s getrocknet. Im regelmäßigen Zeitintervall von 10min erfolgte die Dokumentation der resultierten Gewichtsabnahme. Nach ca. 240 Minuten konnte bei einer Trocknungstemperatur von 60°C keine weitere Gewichtsabnahme und somit auch keine Veränderung des Wassergehalts mehr festgestellt werden. Zwischen der Trocknungsluft mit konstanter Temperatur und gleichbleibender relativer Feuchte und dem Hopfen hatte sich die oben beschriebene Gleichgewichtsfeuchte eingestellt. Die Partialdrücke der Trocknungsluft und des

Wasserdampfes an der Doldenoberfläche hatten sich aneinander angeglichen und waren letztendlich gleich groß. Die Weiterführung der Trocknung, d.h. die Reduzierung des Hopfens auf einen noch niedrigeren Wassergehalt, als dies bislang der Fall war, konnte ausschließlich durch eine weitere Erhöhung der Trocknungstemperatur erfolgen. Je höher die Trocknungstemperatur, desto weiter kann der Hopfen heruntergetrocknet werden bzw. desto niedriger ist der Wert, der sich am Ende einstellenden Gleichgewichtsfeuchte.

*Praxishinweis:*

Sobald ein zu trocknender Hopfen in der Auszugshorde einer Hordendarre oder auf dem untersten Trocknungsband eines Bandtrockners den angestrebten Wassergehalt erreicht hat und somit als fertig getrocknet gilt, ist durch Reduzierung der Trocknungstemperatur die Verweildauer in der Trocknung verlängerbar, ohne dass der Hopfen wesentlich trockener wird.

#### 4.1 Sorptionsverhalten unterschiedlicher Hopfensorten



*Abb. 23: Hopfenproben unterschiedlicher Sorten zur Untersuchung des Sorptionsverhaltens*

Der Aufbau der Dolden unterschiedlicher Hopfensorten entscheidet signifikant über deren Sorptionsverhalten. Deshalb stellt sich beispielsweise bei den Sorten Hallertauer Magnum und Herkules nach der Trocknung bei gleicher Umgebungsluft ein niedrigerer Wassergehalt ein, als bei den Sorten Perle und Hallertauer Tradition. Der beschriebene Effekt konnte mit einem einfachen Versuch belegt werden.

Hierfür wurden unter optimalen Bedingungen geerntete und getrocknete Hopfenproben unterschiedlicher Hopfensorten der Ernte 2019 bei einer konstanten Umgebungsluft von 18°C und einer relativen Feuchte von 67% über vier Monate lang gelagert (Abb. 23). Regelmäßiges Wiegen und Wenden der Hopfenproben während der Lagerzeit gewährleistete, dass alle Hopfendolden in gleichem Maße der Umgebungsluft ausgesetzt waren. Sobald sich das Gewicht nicht mehr veränderte, konnte garantiert werden, dass sich die jeweils sortentypische Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hatte. Wie zu erwarten war, ergaben sich bei den anschließend durchgeführten Wassergehaltsmessungen für die einzelnen Hopfensorten unterschiedliche Wassergehalte (Abb. 24).

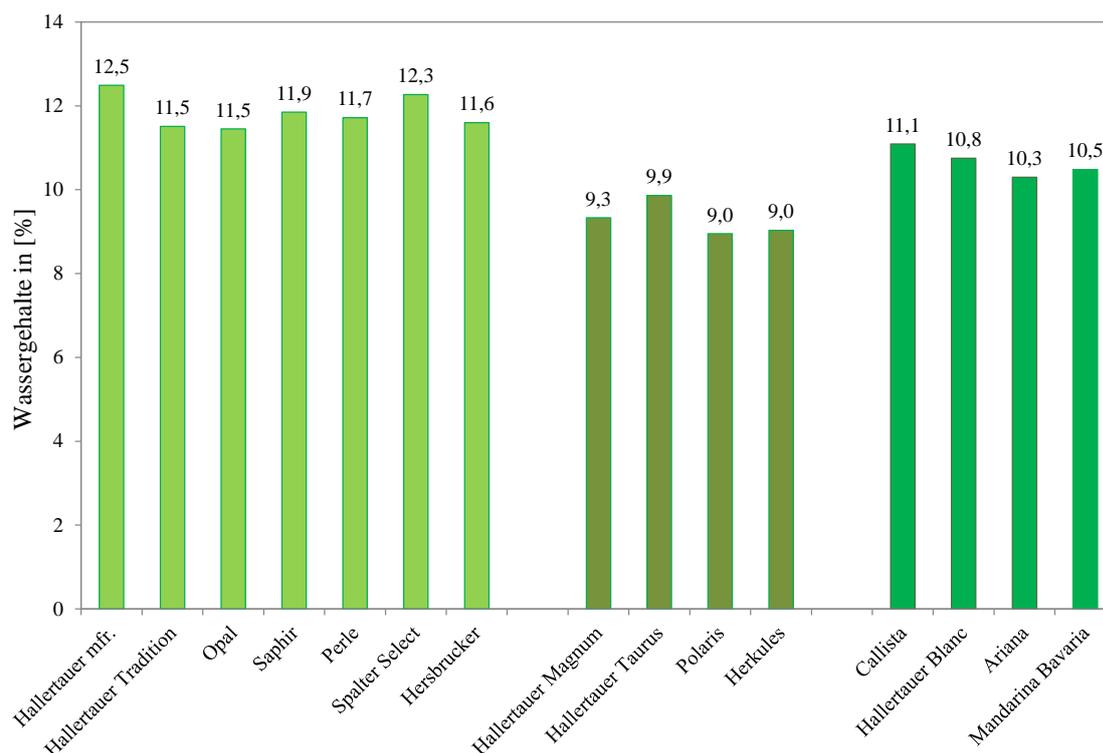


Abb. 24: Unterschiedliches Sorptionsverhalten der Hopfensorten bei gleichen Lagerbedingungen

## 5 Hopfenqualität

Neben dem eigentlichen Haltbarmachen gilt es bei der Trocknung von Hopfen insbesondere darauf zu achten, dessen wertgebende Inhaltsstoffe, wie ätherische Öle, Alphasäuren und Polyphenole bestmöglich zu bewahren. Die ätherischen Öle sind für das Aroma verantwortlich. Sie bestehen aus etwa 300 – 400 Einzelsubstanzen, von denen bislang ca. 143 Verbindungen identifiziert werden konnten. Deshalb sind die Sicherung und Erhaltung der optimalen sortentypischen Aromausprägung das oberste Ziel bei der Trocknung. Insbesondere da Hopfenöle durch Wasserdampfflüchtigkeit und Oxidation verloren gehen, ist eine unnötige Verlängerung der Verweilzeit des zu trocknenden Guts in der Hopfendarre oder im Bandtrockner infolge einer falschen Einstellung der Trocknungsparameter zu vermeiden.

### 5.1 Qualitätserhaltung

Während der Trocknung wird dem Hopfen durch Wärmeenergie das Wasser weitestgehend entzogen. Dadurch kommt es zur Herabsetzung des Wassergehalts und der Wasseraktivität. Die Wasseraktivität – korrekt bezeichnet mit  $a_w$  (activity of water) - ist ein Maß für die Verfügbarkeit von „freiem“ Wasser, welches die Grundlage für mikrobiologische, chemische und enzymatische Prozesse darstellt. Unter Trocknung ist somit vielmehr zu verstehen, durch Wasserentzug etwaige Abbau- und Verderbsreaktionen schnellstmöglich zu beenden.

Der  $a_w$ -Wert liegt zwischen 0 und 1. Während der untere Grenzwert 0 den Zustand absoluter Trockenheit beschreibt, erreicht der  $a_w$ -Wert im Falle kondensierender Feuchte den oberen Grenzwert 1. Der  $a_w$ -Wert errechnet sich aus dem Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks an der Doldenoberfläche und des Sättigungsdampfdrucks von Wasser bei derselben Temperatur (dies entspricht der relativen Feuchte geteilt durch 100). Zumal auch die relative Feuchte über das Dampfdruckverhältnis definiert ist, resultiert beispielsweise bei einer relativen Feuchte von 60% ein  $a_w$ -Wert in Höhe von 0,6.

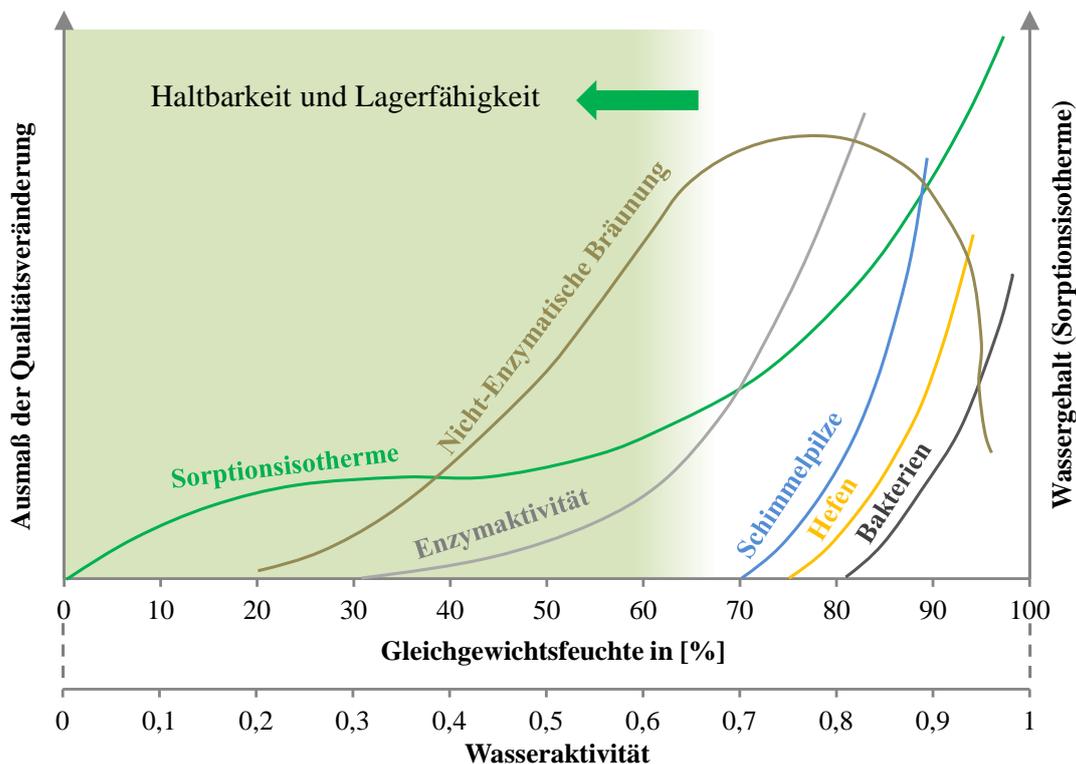


Abb. 25: Schematische Darstellung des Verlaufs der verschiedenen Verderbs-Möglichkeiten in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchtigkeit bzw. Wasseraktivität (Heiss, R. u. Eichner, K. 1971)

Da die Wasseraktivität äußere und innere Qualitätsmerkmale wie Farbe, Stabilität, Struktur, Geschmack und Inhaltsstoffe beeinflusst, bleibt ausschließlich durch schnellstmöglichen Entzugs des freien Wassers an der Doldenoberfläche die Qualität bestmöglich erhalten. Jegliche Arten von Mikroorganismen, wie z.B. Bakterien, Hefen und Schimmelpilze, weisen einen Mindest-Wasseraktivitätswert auf, unter dem kein Wachstum mehr möglich ist (Abb. 25). Gleichzeitig verlangsamen sich unterschiedliche chemische und enzymatische Prozesse mit abnehmender Wasseraktivität. Dies erklärt, weshalb Hopfen nach der Trocknung erst bei einer Gleichgewichtsfeuchte von unter 65% haltbar und lagerfähig wird.

## 5.2 Ursachen von Qualitätsminderungen

Je nach Sorte und Zeitpunkt weist Hopfen bei der Ernte einen Wassergehalt von ca. 75-82% auf. Damit die äußere und innere Hopfenqualität bei der Trocknung möglichst erhalten bleibt, muss das freigesetzte Wasser über die Trocknungsluft stetig von der Doldenoberfläche abtransportiert werden. Gelingt dies nicht, kann es in kürzester Zeit zu Qualitätsminderungen kommen. Optisch sind diese am Ende der Trocknung am fehlenden Glanz und an

der Veränderung der typischen Doldenfarbe – im Extremfall bis hin zu bräunlichen Verfärbungen – erkennbar. In der Praxis spricht man von den sogenannten „angegangenen Dolden“.

Wie stark die Faktoren Witterung und Lagerzeit die Doldenqualität bereits vor der Trocknung beeinflussen, wird an nachfolgender Beschreibung von Grünhopfenproben der Sorte Perle deutlich. Im vorliegenden Fall wurden Hopfendolden vormittags bei Regen geerntet und bis zur Trocknung sechs Stunden in luftdurchlässigen Probesäckchen gelagert. Nachmittags erfolgte bei trockenem Wetter die Ernte weiterer Proben. Abbildung 26 zeigt den Vergleich der Grünhopfenproben vor der gemeinsamen Trocknung. Die verhältnismäßig lange Lagerzeit des feuchten Hopfens verursachte deutlich erkennbare äußerliche Qualitätsverluste. Dies bestätigt das Problem „angegangener“ Dolden bereits vor der eigentlichen Trocknung.



**trocken beerntet und  
sofort getrocknet**



**feucht beerntet und  
erst nach ca. 6 Stunden getrocknet**

*Abb. 26: Einfluss von Witterung und Lagerzeit auf die Doldenqualität*

### 5.2.1 Lagerung von Grünhopfen im Vorratsbehälter

Die Kapazitäten von Pflückmaschine und Trocknung sind für einen einheitlichen Beschickungsrhythmus aufeinander abzustimmen. Insofern die Trocknung den Engpass darstellt, muss der Hopfen folglich länger im Vorratsbehälter bzw. Grünhopsensilo zwischengelagert werden, bis er schließlich in die Trocknung gelangt. In Abhängigkeit von Verweildauer und Witterung kann es bereits vor der Trocknung zu erheblichen Qualitätsminderungen kommen.



*Abb. 27: Lagerung von Grünhopfen bis zur Trocknung*

Dieser Zusammenhang konnte bereits während der Ernte 2005 im Rahmen eines weiteren Versuches nachgewiesen werden (Tab. 1).

Dazu erfolgte in einer Praxisdarre die Trocknung mit Temperaturen von 65°C und 70°C bis zum Erreichen eines Zielwassergehalts von ca. 9% (V1, V2). Im Rahmen weiterer Versuchsvarianten wurden Darrfüllungen gezielt mit diesen Trocknungstemperaturen über-trocknet, indem nach Erreichen der Zielfeuchte der bereits fertig getrocknete Hopfen jeweils zwei Stunden länger in der Trocknung verblieb (V4; V5). In einer zusätzlichen Variante (V3) wurde am Vortag geernteter Grünhopfen über Nacht ca. zehn Stunden im Grünhopfensilo gelagert. Am darauffolgenden Tag erfolgte die Trocknung unter optimalen Bedingungen mit einer Trocknungstemperatur von 65°C. Nach der gleichzeitigen Homogenisierung in einer Konditionierungsanlage bei einer Temperatur von 22°C und einer relativen Luftfeuchte von 60% wurden die Hopfen aller Versuchsvarianten jeweils in Rechteckballen gepresst. Abschließend erfolgten deren separate Musterung und Untersuchung anhand der Kriterien der „Neutralen Qualitätsfeststellung“ (NQF). Die resultierenden Versuchsergebnisse zeigt übersichtlich nachstehende Tabelle 1.

Variante	Trocknungs- temperatur	Hopfenzielfeuchte frisch aus Darre	Hopfenfeuchte nach NQF	Doldenblätter nach NQF
V1	65°C	9-10 %	10,1 %	14 %
V2	70°C	9-10 %	11,0 %	12 %
V3	65°C	9-10 %	10,1 %	21 %
V4	65°C	5-6 %	8,8 %	22 %
V5	70°C	5-6 %	8,8 %	24 %

Tab. 1: Wassergehalt und Doldenblattanteil der Versuchsvarianten nach NQF

Aus Abbildung 28 ist der signifikante Verlust an Farbe und Glanz des Versuchshopfens aufgrund zu langer Lagerung im Grünhopfensilo deutlich erkennbar. Die Erwärmung und die damit einhergegangene Kondenswasserbildung an der Doldenoberfläche beeinflussten das äußere Qualitätsbild negativ und schädigten sowohl die Stabilität als auch die Struktur der Dolden. Obwohl der über Nacht gelagerte Hopfen unter optimalen Bedingungen getrocknet wurde, zerblätterte er genauso stark wie der absichtlich übertrocknete Hopfen.



optimale Behandlung  
vor der Trocknung (V1)



zu lange Lagerung im Grünhopfensilo  
vor der Trocknung (V3)

Abb. 28: Vergleich der Doldenmuster der Versuchsvarianten 1 und 3

Schädigungen der äußeren Qualität durch Erwärmung und Kondensation infolge einer zu langen Verweilzeit im Vorratsbehälter sind primär an den „angegangenen Dolden“ zu erkennen. Der Einfluss derartiger Qualitätsverluste auf die wertgebenden Inhaltsstoffe und die Brauqualität wird durch den nachfolgend beschriebenen Kleintrocknungsversuch deutlich.

Vorrangiges Ziel bei der Erzeugung von Flavor-Hopfen ist eine optimale, sortentypische Aromausprägung. Hierauf wirken sich insbesondere die Faktoren Erntezeit und Trocknung aus. Anhand von Kleintrocknungsversuchen mit der Sorte Mandarinina Bavaria konnte dies unter reproduzierbaren Bedingungen belegt werden. Die Trocknungsvarianten unterschieden sich in der Lagerzeit vor der Trocknung, im Erntezeitpunkt sowie in der Trocknungstemperatur. Die verschiedenen Trocknungsproben wurden analytisch auf wertgebende

Inhaltsstoffe untersucht und für Bierverkostungen verbraucht. Bei der anschließenden Bierverkostung bewertete man vor allem die Gesamtintensität und Harmonie der Biere.

Erntetermin	Trocknungstemperatur in [°C]	Alphasäuren in [%]	HSI*	Hopfenöle in [ml/100g]	Gesamtintensität und Harmonie
früh	65	7,3	0,229	1,5	+
optimal	65	8,0	0,223	1,9	+++
spät	65	8,0	0,224	2,0	++
optimal	65 8 h Lagerung bis zur Trocknung	6,5	0,359	1,1	--
optimal	60	8,0	0,224	1,8	++
optimal	70	8,0	0,228	1,65	+
optimal	80 Übertrocknung	5,6	0,569	0,8	---

Sorte: Mandarina Bavaria

\*Hop Storage Index (HSI) = Index für die Alterung des Hopfens

Tab. 2: Kleintrocknungsversuche 2015, Analysewerte und Ergebnisse der Bierverkostung

Tabelle 2 zeigt die unterschiedlichen Trocknungsvarianten, Analyseergebnisse sowie die sensorische Bewertung der gebrauten Biere. Erwartungsgemäß erzielte der zum optimalen Erntezeitpunkt geerntete und mit einer Trocknungstemperatur von 65°C getrocknete Hopfen analytisch wie auch sensorisch bei der Bierverkostung die beste Bewertung. Wie ebenso abzusehen war, schnitt der mit 80°C übertrocknete Hopfen sowohl aus analytischer als auch sensorischer Sicht am schlechtesten ab. Gleiches galt auch für den Hopfen, der bis zur Trocknung vorab acht Stunden lagerte. Aufgrund der langen Lagerzeit erwärmte sich dieser mit der Folge einer deutlichen Minderung seiner äußeren und inneren Qualität. Die Bierverkostung bestätigte den Qualitätsverlust.

#### Praxishinweis:

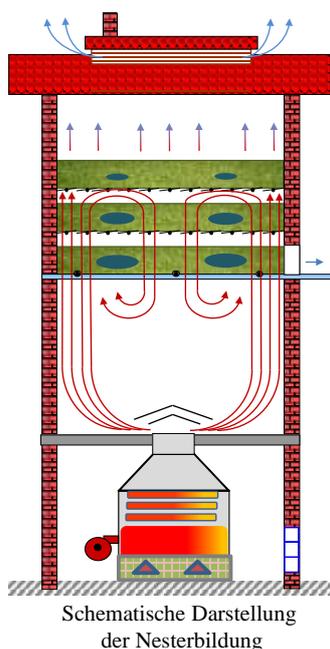
Die Gefahr mikrobieller Verderbs- und Bräunungsreaktionen während der Lagerung von Grünhopfen im Vorratsbehälter erhöht sich mit zunehmender Verweilzeit. Insbesondere wirkt sich dieser Effekt bei feucht warmer Witterung, unreif geerntetem und tau- oder regenfeuchtem Hopfen aus. Die Qualitätsverluste sind umso gravierender, je früher es aufgrund von Dichtlagerung infolge zu hoher Füllhöhen zur Eigenerwärmung kommt.

Bei unvermeidbaren längeren Lagerzeiten kann jedoch eine Belüftung des Hopfens im Vorratsbehälter mit nicht erwärmter Außenluft über seitliche Belüftungsschlitze oder Lüftungsgitter von Vorteil sein. Dadurch wird einer zu schnellen Eigenerwärmung entgegengewirkt. Die Aufschütthorde kann mit Hopfen befüllt werden, der eine weitestgehend einheitliche Doldentemperatur aufweist.

### 5.2.2 Ungleiche Trocknung und „Nesterbildung“

Das größte Problem bei der Hopfentrocknung stellt eine ungleichmäßige Trocknung infolge der sogenannten „Nesterbildung“ dar. Bereits die Art und Gleichmäßigkeit der technischen Befüllung der Aufschütthorde mit Grünhopfen beeinflussen den Trocknungsverlauf. Entstehen hierbei Schüttkegel oder verdichtete Zonen, sind vom ersten Moment der Trocknung an unterschiedliche Luftwiderstände in der Hopfenschicht gegeben. Im Schüttkegel lagert der Hopfen dichter aufgrund des höheren Anteils an losen Doldenblättern und den Auswirkungen der unterschiedlichen Fallhöhen. Infolge der Anhäufung abgerollter ganzer Dolden ist in den Randzonen eine geringere Lagerungsdichte zu beobachten. Im Bereich der Außenwände erfolgt grundsätzlich eine schnellere Trocknung aufgrund der dort resultierenden Strahlungswärme.

- Ø Je höher die **Schütthöhe**, desto unterschiedlicher sind die Luftwiderstände und desto stärker ist die Nesterbildung
- Ø Je höher die **Luftgeschwindigkeit**, desto schwieriger ist die Luftverteilung und umso mehr tritt Nesterbildung auf
- Ø Je höher die **Trocknungstemperatur**, desto eher kommt es bei kondensierender Trocknungsluft zu Nesterbildung



Kontrolle auf Gleichmäßigkeit der Trocknung in der Aufschütthorde mit Wärmebildtechnik

Abb. 29: Strömungsverlauf der Trocknungsluft bei Nesterbildung

Abbildung 29 veranschaulicht beispielhaft den Strömungsverlauf der Trocknungsluft in einer Hopfendarre mit dem Effekt der Nesterbildung. Die Trocknungsluft aus dem Warmluftgebläse wird durch die Luftverteilung abgelenkt, bei zu hoher Luftgeschwindigkeit bzw. zu hoher Schütthöhe aber nicht gleichmäßig verteilt. Im äußeren Bereich der Darre ist die Luftgeschwindigkeit dann sehr hoch, während sie zur Mitte hin immer mehr abnimmt. Im Extremfall kann es dort sogar zu einem Zurückströmen der Trocknungsluft kommen. Die Ungleichmäßigkeit der Trocknung innerhalb der Darre nimmt immer mehr zu.

Im Zuge der ersten Schüttungen am Morgen sind die kaum getrockneten Zonen noch schmal und werden durch das Kippen vermischt. Bedingt durch die Tatsache, dass Luft stets den Weg des geringsten Widerstands wählt, verbreitern sich über den Tag hinweg mit jeder weiteren Schüttung die Nester mit noch feuchtem Hopfen, da dieser einen wesentlich höheren Luftwiderstand besitzt als vergleichsweise halbtrockneter oder weitestgehend fertig getrockneter Hopfen. Um die negativen Auswirkungen der Nesterbildung bei Darren mit ungünstigen Strömungsverhältnissen zumindest abzuschwächen, ist regelmäßiges Aufstechen oder Aufrühren der betroffenen Bereiche in der Aufschütthorde dringend zu empfehlen. Vor dem Kippen ist der feuchte Hopfen aus dem Nesterbereich zu schaufeln und durch schon trockneren Hopfen zu ersetzen. Für eine gleichmäßigere Trocknung und zur

Verhinderung von Nestern kann ein flächiges Aufrühren in der Aufschütthorde unmittelbar nach dem Befüllen durchaus von Vorteil sein.

*Praxishinweis:*

Wärme und hohe Umgebungsfeuchte um den Hopfen sind die Voraussetzungen für mikrobielle Verderbsreaktionen. Je ungleichmäßiger die Trocknung erfolgt, desto ausgeprägter sind die feuchten Bereiche und desto stärker kommt es in diesen Zonen zu signifikanten äußeren und inneren Qualitätsverlusten. Eine ungleichmäßige Trocknung und Nesterbildung ist zudem an einem erhöhten Doldenblattanteil des Hopfens in der untersten Trocknungsebene erkennbar.

### 5.2.3 Kondensation der Trocknungsluft

Damit Qualitätsverluste vermieden werden, muss das aus den Dolden freigesetzte Wasser insbesondere in der obersten Trocknungslage über die Trocknungsluft stetig abtransportiert werden. Ist diese bereits beim Ausströmen aus der Aufschütthorde zu stark mit Wasserdampf gesättigt, verlangsamt sich die Trocknung erheblich. Der Hopfen wird über einen zu langen Zeitraum mit warmer und feuchter Luft angeströmt. Kommt es bereits vor dem Ausreten der Trocknungsluft aus der obersten Lage zur Kondensation, werden die wertgebenden Inhaltsstoffe nicht nur durch mikrobielle, chemische und enzymatische Verderbsreaktionen zerstört, sondern gehen insbesondere auch zahlreiche ätherische Öle durch Oxidation und deren Wasserdampfflüchtigkeit über die gesättigte Trocknungsluft verloren.



Abb. 30: Verlust ätherischer Öle über wasserdampfgesättigter Abluft (rechtes Bild)

### 5.2.4 Absolute Feuchte der Trocknungsluft

Die absolute Feuchte in  $[g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Luft}}]$  gibt an, mit wieviel Wasserdampf Luft beladen ist. Mit steigender Wasserdampfmenge und Temperatur erhöht sich die Wärmemenge der Luft und damit deren Energiegehalt.

In Kleintrocknungsversuchen wurde Grünhopfen mit einer Schütthöhe von 30cm getrocknet. Ziel war es, einen Zusammenhang zu ermitteln, wie sich unterschiedliche Trocknungstemperaturen und Luftgeschwindigkeiten der Trocknungsluft auf die äußere Qualität auswirken. Während der Trocknung wurde neben der Temperatur und relativen Feuchte auch die absolute Feuchte der Abluft in  $[g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Luft}}]$  über der zu trocknenden Hopfenschicht gemessen und graphisch aufgezeichnet (Abb. 31).

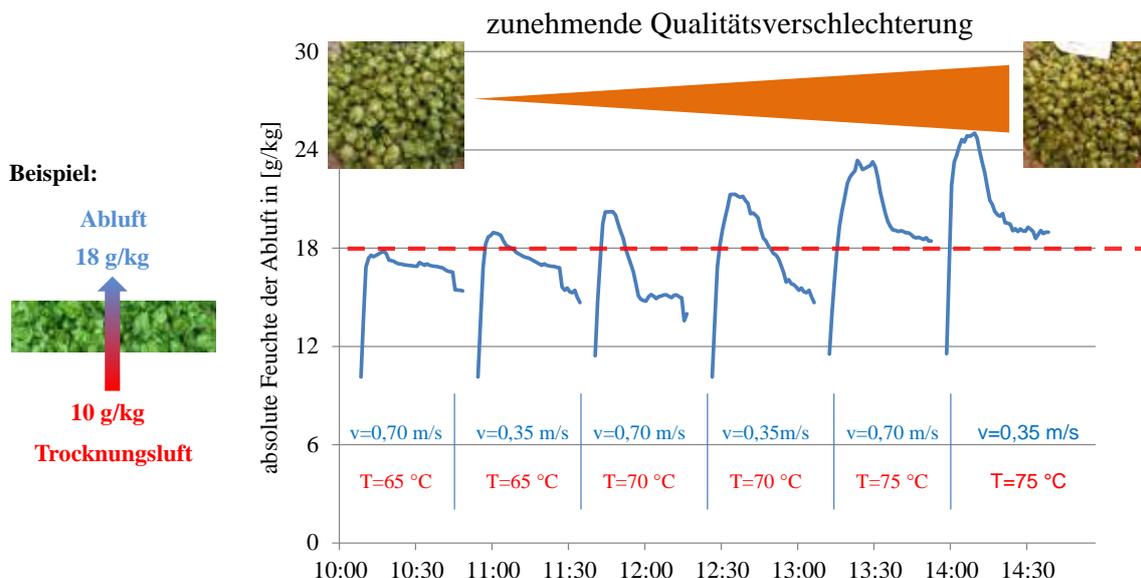


Abb. 31: Absolute Feuchte in  $[g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Trocknungsabluft}}]$  in den ersten 40min Trocknungszeit bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen und Luftgeschwindigkeiten

Die untersuchten Trocknungsvarianten unterschieden sich in den Trocknungstemperaturen und Luftgeschwindigkeiten während der ersten 40min der Trocknungszeit. Anschließend wurden die Versuchsproben unter einheitlichen Bedingungen bei 65°C und einer Luftgeschwindigkeit von 0,35m/s auf ein gleiches Endgewicht bzw. einen gleichen Wassergehalt fertig getrocknet.

Über die absolute Feuchte der Trocknungsabluft in  $[g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Luft}}]$  war das Maß des Wasserentzugs aus den Dolden beurteilbar. Während der ersten 10-15min Trocknungszeit wurde jeweils das meiste Wasser freigesetzt. Bei dem in Abbildung 31 dargestellten Versuch konnten unter den gegebenen Trocknungsbedingungen bereits ab einer absoluten Feuchte von ca.  $18g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Trocknungsabluft}}$  Qualitätseinbußen festgestellt werden. Je höher die Beladung der Abluft mit Wasserdampf war bzw. umso länger diese hohe Beladung zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe andauerte, desto schlechter wurde die äußere Qualität am Ende der Trocknung bonitiert. Im ersten Trocknungsabschnitt brachte eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit in allen Temperaturbereichen eine deutliche Qualitätsverbesserung und Steigerung der Trocknungsleistung. Dieser Trend war bei allen untersuchten Hopfensorten erkennbar.

In den unterschiedlichen Versuchsvarianten konnte aufgezeigt werden, dass der Farbverlust und die „angegangenen Dolden“ überwiegend in den ersten 10-15min der Trocknung verursacht wurden. Die Ursache war eine der Trocknungstemperatur entsprechend zu geringe Luftgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe des Hopfens. Im Kleintrocknungsversuch wurden jeweils zu Beginn der Trocknung qualitativ die besten Ergebnisse bei Trocknungstemperaturen von 62-65°C erzielt, wenn gleichzeitig die Luftgeschwindigkeit soweit erhöht werden konnte, dass die Beladung der Trocknungsluft mit Wasserdampf eine absolute Feuchte von ca.  $18g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Trocknungsabluft}}$  nicht überstieg. Dazu waren Luftgeschwindigkeiten von mehr als 0,5m/s erforderlich.

*Praxishinweis:*

Die Gefahr von Qualitätsminderungen besteht überwiegend im ersten Trocknungsabschnitt, wenn das von den Dolden freigesetzte Wasser infolge falsch eingestellter Trocknungsparameter nicht stetig über die Trocknungsluft abtransportiert wird.

**5.2.5 Verhältnis der Trocknungsparameter**

Farbe und Glanz des Hopfens spielen für die Qualitätswahrnehmung von Händlern und Brauern eine wichtige Rolle. Zugleich ist die Veränderung der Farbe ein erster Hinweis auf beginnende Qualitätsminderungen. Bisher sind während der Trocknung entstandene Qualitätsminderungen – verursacht durch eine falsche Einstellung der Trocknungsparameter – erst nach der Trocknung durch Bonitur bzw. Analysen im Labor feststellbar.

In den letzten Jahren erforschte man während der Ernten gemeinsam mit Frau Dr. Barbara Sturm, Fachgebiet Agrartechnik der Universität Kassel, inwieweit mit Hilfe von Bilderkennungssystemen Qualitätsminderungen, verursacht durch eine falsche Einstellung der Trocknungsparameter, bereits während der Trocknung feststellbar sind.

Zumal die unterschiedlichen Inhaltsstoffe des Hopfens Licht in einem spezifischen Wellenlängenbereich absorbieren, kann mit einer Farbbildkamera das für den Menschen sichtbare Spektrum von 400–780nm und mit einer Hyperspektralkamera auch das Nahinfrarotspektrum von 400–1.010nm erfasst werden.

In der Versuchstrocknungsanlage des Hopfenforschungsinstituts in Hüll sind unter praxisvergleichbaren Bedingungen Trocknungsversuche reproduzierbar durchführbar (Abb. 32). Um den Einfluss der Trocknungsparameter auf die Farbveränderungen des zu trocknenden Hopfens zu untersuchen, wurden obig genannte Kamerasysteme installiert.



Versuchsdarre



Aufschütthorde

*Abb. 32: Versuchstrocknungsanlage im Hopfenforschungszentrum Hüll*

Die daraufhin durchgeführten Versuche sahen die Trocknung von Hopfen der Sorte Mandarina Bavaria bei Temperaturen von 65°C und 70°C bei einer gleichbleibenden Luftgeschwindigkeit von 0,35m/s vor. Die untersuchten Schüttgewichte betragen 12, 20 und 40kg/m<sup>2</sup><sub>Trocknungsfläche</sub>.

Bei einem Schüttgewicht von  $40\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  und einer Trocknungstemperatur von  $65^\circ\text{C}$  erfolgten zusätzliche Versuchsreihen mit trockenem, tau- und regennassem Grünhopfen. Mit der Farbbildkamera waren entstehende Farbveränderungen bereits während der Trocknung bei den unterschiedlichen Trocknungsvarianten identifizierbar.

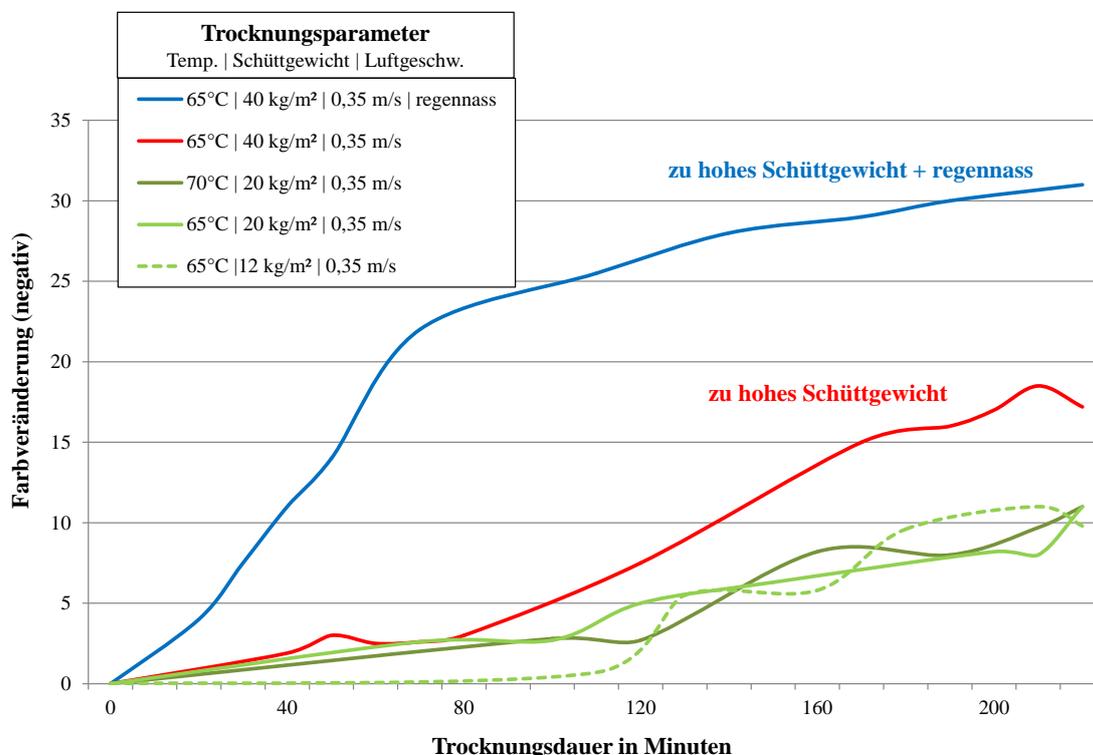


Abb. 33: Farbveränderungen bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen (Quelle: Dr. Barbara Sturm, Uni Kassel, 2016)

In obiger Abbildung 33 sind die Farbveränderungen der unterschiedlichen Versuchsvarianten dargestellt. Die größten Farbunterschiede wurden bei einem Schüttgewicht von  $40\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  dokumentiert. Bei regennass geerntetem Hopfen kam die farbliche Veränderung am deutlichstem zum Tragen. Bei einem niedrigeren Schüttgewicht von  $20\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  konnten selbst bei einer Trocknungstemperatur von  $70^\circ\text{C}$  keine negativen Einflüsse auf die äußere Qualität festgestellt werden.

#### Praxishinweis:

Bilderkennungssysteme könnten zur Identifizierung und Gewährleistung optimaler Trocknungsbedingungen zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen.

## 6 Einteilung der Trocknung in Trocknungsabschnitte

Bei einem kapillarporösen hygroskopischen Produkt wie Hopfen lässt sich der Trocknungsverlauf in drei definierbare Trocknungsabschnitte gliedern (Abb. 34).

Im ersten Trocknungsabschnitt erfolgt der Wasserentzug überwiegend durch Verdunstung an der Doldenoberfläche. Für eine hohe Trocknungsleistung und Erhaltung der äußeren Qualität ist hierbei eine ausreichende Luftgeschwindigkeit zu gewährleisten. Im zweiten Trocknungsabschnitt kommt es zu einem Temperaturanstieg innerhalb der Dolde. Die Verdunstung verlagert sich in das Innere. Während diesem Trocknungsabschnitt kann durch höhere Trocknungstemperaturen die Trocknungsgeschwindigkeit erheblich gesteigert

werden. Denn solange noch nicht ausreichend Wasser durch die Trocknungsluft aus der Dolde entzogen wurde, ist die Doldenoberflächentemperatur durch die Kühlwirkung der Verdunstung niedriger als die Trocknungstemperatur. Im dritten Trocknungsabschnitt wird das physikalisch-chemisch gebundene Wasser entzogen. Hier erfolgt die Verdunstung solange, bis sich die Gleichgewichtsfeuchte einstellt. Durch zu hohe Temperaturen kann in diesem Zustand der Hopfen sehr schnell übertrocknet werden und es besteht die Gefahr von Qualitätsminderung. Der Grund hierfür liegt in der verminderten Kühlwirkung, zumal nur noch wenig Wasser aus dem Inneren der Dolde verdunstet. Aus diesem Grund sollte im dritten Trocknungsabschnitt die Trocknungstemperatur wieder reduziert werden.

#### 1. Trocknungsabschnitt

- Verdunstung nur an der Oberfläche
- Innerhalb der Dolde keine Temperaturunterschiede
- konstante Trocknungsgeschwindigkeit
- **Luftgeschwindigkeit** bestimmt Trocknungsgeschwindigkeit



#### 2. Trocknungsabschnitt

- Wassergehalt an der Oberfläche sinkt schneller als im Inneren
- Trocknungsgeschwindigkeit kann nicht aufrecht erhalten werden
- Ort der Verdunstung wandert ins Innere
- Wärme muss ins Innere geleitet werden
- das im Inneren verdunstete Wasser muss dampfförmig an die Oberfläche diffundieren
- Temperaturanstieg in / auf der Dolde



#### 3. Trocknungsabschnitt

- Physikalisch-chemisch gebundenes Wasser wird abgeführt
- Weitere Verdampfung bis **Gleichgewichtsfeuchte** erreicht ist



Abb. 34: Trocknungsabschnitte des Hopfens (angepasst nach den Prinzipien von Krischer & Kast, 1978)

#### Praxishinweis:

Mit neuen Steuer- und Regelsystemen von Trocknungsanlagen ist es bereits möglich, für obig genannte Trocknungsabschnitte die jeweilige Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Luft- bzw. Gebläseleistung vorzugeben.

In Abbildung 35 ist exemplarisch die Variation der Trocknungsparameter in Abhängigkeit der Trocknungsphasen aufgezeigt. Mittlerweile sind in der Praxis Darrregelungen im Einsatz, die von Beginn bis Ende eines Trocknungszyklus die Trocknungstemperatur und Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und relativen Feuchte der Darrabluft und dem maximalen Wasserentzug automatisch regeln. Hierbei erhält der Bediener der Trocknung sogar den Hinweis, ob zum Erreichen der maximalen Trocknungsleistung beim nächsten Befüllvorgang die Schütthöhe zu erhöhen oder zu verringern ist.

	1. Trocknungsabschnitt	2. Trocknungsabschnitt		3. Trocknungsabschnitt
				
<b>Gebläse-Leistung</b>	<b>95 %</b>	<b>90 %</b>	<b>75 %</b>	<b>60 %</b>
<b>Temperatur</b>	<b>62 °C</b>	<b>68 °C</b>	<b>68 °C</b>	<b>63 °C</b>
<b>Trocknungs-dauer in Minuten</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>10</b>

Abb. 35: Vereinfachtes Schema als Beispiel für unterschiedliche Einstellungen in den einzelnen Trocknungsabschnitten

## 7 Einflussfaktoren auf die Trocknung

Hopfen wird im grünen Zustand mit einem Wassergehalt von ca. 74-80% geerntet. Eine sofortige Trocknung auf 8-9% Wassergehalt ist zur Erlangung der Lagerfähigkeit und Erhaltung der Qualität erforderlich.

Die Hopfentrocknung erfolgt in den Hopfenbaubetrieben vorwiegend mit konventionellen Hordendarren, zunehmend aber auch mit Bandtrocknern. Der Hopfen wird hierbei in drei bis vier übereinanderliegenden Trocknungsebenen mit einer Trocknungsluft von ca. 62–68°C durchströmt. Die Trocknungszeit beträgt je nach Sorte und eingestellter Trocknungstemperatur ca. drei bis vier Stunden.

Ziel ist es, möglichst viel Hopfen je Zeiteinheit bei bestmöglicher Wahrung der Qualität zu trocknen. Die erzielbare Trocknungsleistung ist von folgenden Parametern abhängig:

- Hopfensorte
- Reifezustand des Hopfens
- Witterung
- Trocknungsfläche
- Trocknungstemperatur
- Geschwindigkeit der durchströmenden Trocknungsluft
- Schütthöhe- und dichte

### 7.1 Der Aufbau der Hopfendolde

Der Aufbau einer Hopfendolde ist aus trocknungstechnischer Sicht betrachtet, als ungünstig zu bewerten. Die Doldenblätter, die sich in Vor- und Deckblätter gliedern und an der Spindel anhaften, haben im Vergleich zu ihrer Masse eine verhältnismäßig große Oberfläche. Mit ihrem hohen Wassergehalt weist die Spindel im Kern der Dolde hingegen eine äußerst kleine Oberfläche auf und ist aufgrund der anliegenden Doldenblätter von der Trocknungsluft weitestgehend abgeschirmt.



Abb. 36: Dolden, Doldenblätter und Spindel unterschiedlicher Hopfensorten

Die einzelnen Hopfensorten unterscheiden sich wesentlich in ihrer Doldenform und Doldengröße, Spindelbeschaffenheit, in der Anordnung der Doldenblätter sowie der unterschiedlichen Ausprägung und Dichte der Kapillaren in den Vor- und Deckblättern (Abb. 36). Diese Faktoren erschweren die Trocknung zusätzlich aufgrund des hieraus resultierenden unterschiedlichen Trocknungsverhaltens.

Besitzt die Dolde beispielsweise am Ende einer Trocknung bei 65°C einen durchschnittlichen Wassergehalt von 8–9%, beträgt der Wassergehalt der Doldenblätter lediglich 4–7%, der der Spindel hingegen noch 20–35% (Abb. 37). Der signifikante Anteil an Spindelwasser wird erst unmittelbar nach der Trocknung und im Zuge der anschließenden Lagerung auf dem Hopfenboden bzw. bei der Belüftung in der Konditionierungskammer an die Doldenblätter abgegeben. Der Prozess des Feuchteausgleichs zwischen Spindel und Doldenblätter ist erst dann vollständig abgeschlossen, wenn die Dolde ganzheitlich eine homogene Restwasserverteilung aufweist.

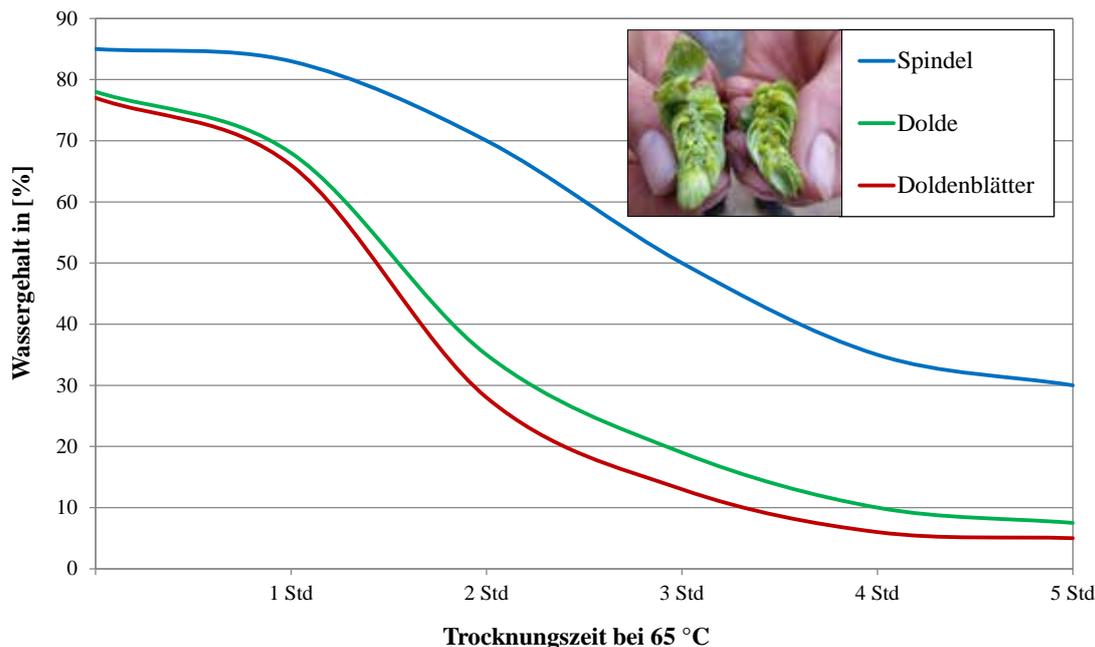


Abb. 37: Wassergehaltsabnahme während der Trocknung von Dolde, Spindel und Doldenblättern in einer Kleintrocknungsanlage

## 7.2 Erntereife der Hopfensorten

Grundsätzlich entscheidet bei allen Hopfensorten der konkrete Erntezeitpunkt über die innere und äußere Qualität. Aus diesem Grund führt das Hopfenforschungszentrum Hüll zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts umfangreiche Erntezeitversuche und Analysen durch. Dazu werden jedes Jahr im Rahmen der sogenannten Biogeneseversuche die wichtigsten Hopfensorten wöchentlich von Mitte August bis Ende September an bis zu 7 Ernteterminen (T1-T7) beerntet und auf Trockensubstanz- und Alphasäuren-Gehalt untersucht. Die Versuche bestätigen, dass bei den meisten in Deutschland angebauten Hopfensorten der maximal erzielbare Alphasäuren-Gehalt früher als das Ertragsoptimum erreicht wird. Demzufolge ist ein Beginn der Ernte erst nach Erreichen des Alphasäuren-Maximums sinnvoll. Denn je höher der Trockensubstanzgehalt, desto weniger Wasser ist durch die Trocknung abzuführen. Die meisten Aromasorten erreichen die Erntereife bei einem durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von ca. 22%, d.h. 78% Wassergehalt bezogen auf die Gesamtmasse. Der Trockensubstanzgehalt von Hochalphasorten hingegen liegt bei ca. 24%, d.h. 76% Wassergehalt bezogen auf die Gesamtmasse. Dabei weist die Aromasorte Hersbrucker Spät grundsätzlich den niedrigsten und die Hochalphasorte Hallertauer Magnum in aller Regel den höchsten Trockensubstanzgehalt zum optimalen Erntezeitpunkt auf (Abb. 38).

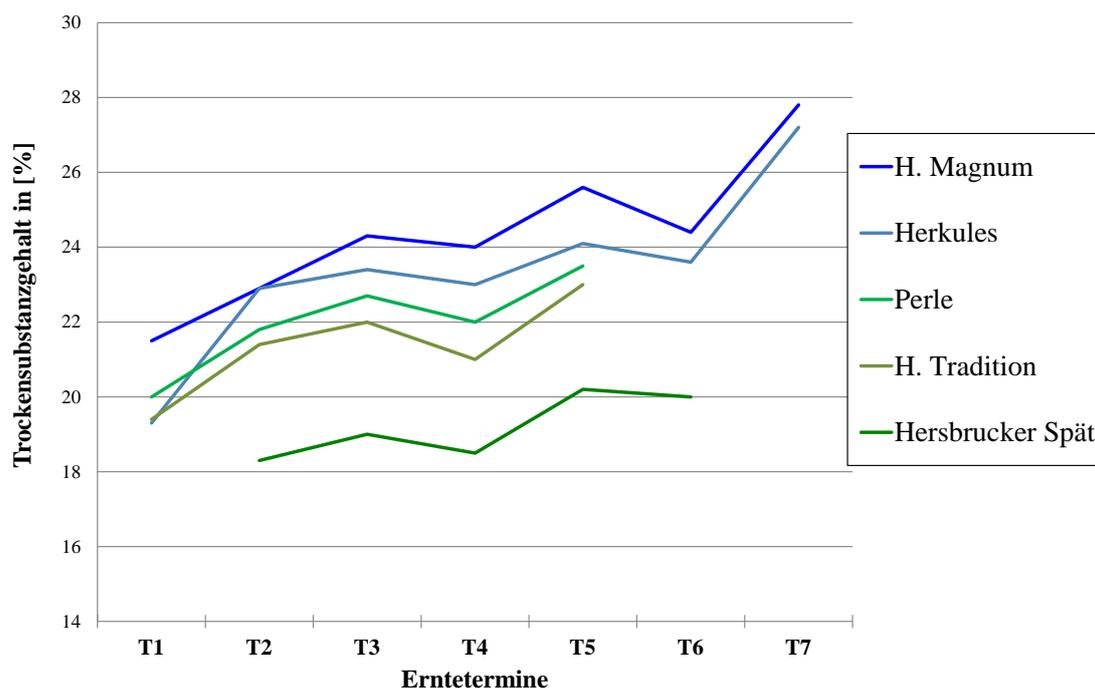


Abb. 38: Veränderung der Trockensubstanzgehalte ausgewählter Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin (T1–T7) im Jahr 2018

Mit fortschreitender Reife lässt sich Hopfen zum einen aufgrund des abnehmenden Wassergehalts, zum anderen wegen der veränderten Doldenbeschaffenheit leichter trocknen.



Abb. 39: Doldenblätter und Spindeln aus 200 Dolden

Für Forschungszwecke wurden von verschiedenen Sorten in mehreren Erntejahren jeweils 200 Dolden aus Hopfenmustern unterschiedlicher Erntezeitpunkte entnommen und das jeweilige Gewicht der Dolden, Doldenblätter und Spindeln ermittelt. Dafür wurden die Dolden von Hand in Doldenblätter und Spindeln aufgeteilt (Abb. 39).

Die Dolden nehmen bis zum Erreichen des Ertragsoptimums an Größe und Gewicht zu. Mit zunehmender Reife nehmen die Doldenblätter dabei deutlich stärker an Gewicht zu als die Spindeln (Abb. 40).

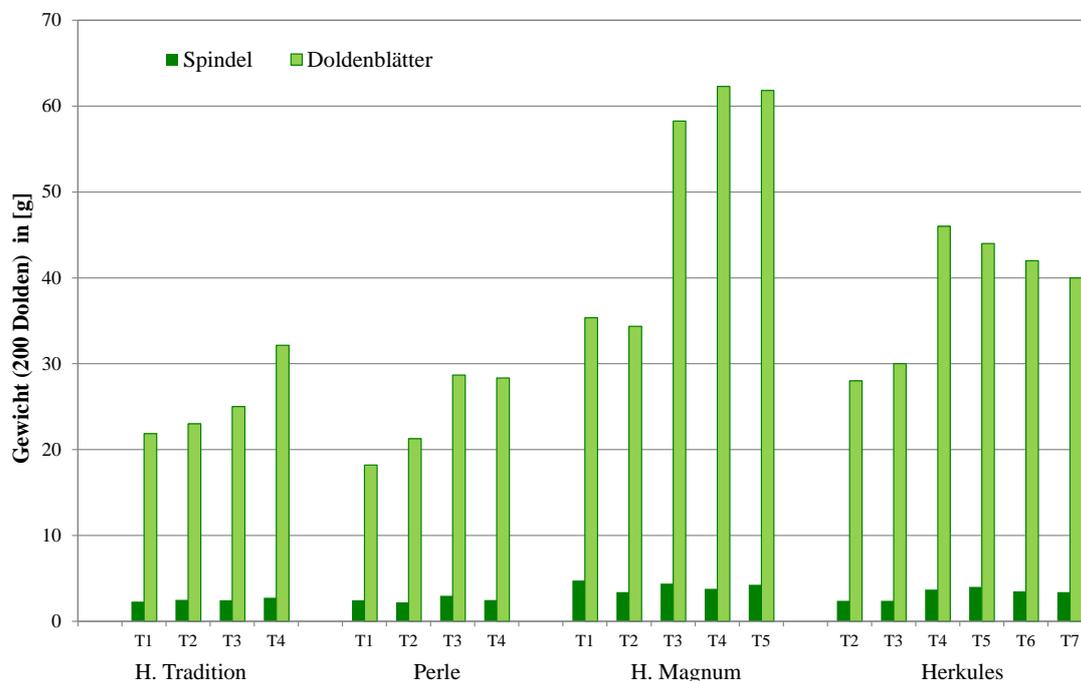


Abb. 40: Veränderung der Gewichte von Spindeln und Doldenblätter aus 200 Dolden zu verschiedenen Erntezeitpunkten

Der prozentuale Spindelanteil verringert sich gegenüber dem Gesamtdoldengewicht bei allen Sorten mit zunehmender Reife. Während der Trocknung wird das im Inneren und an der Oberfläche der Dolde verdunstete Wasser in Form von Wasserdampf über die Trocknungsluft abgeführt. Aufgrund der stabileren Struktur und der größeren Oberfläche der reifen Dolden ergibt sich eine deutlich größere Kontaktfläche für die Trocknungsluft. Zudem weisen reife Dolden ein vollständig entwickeltes Kapillarsystem mit größeren Kapillardurchmessern auf. Dieses gewährleistet bei einheitlichen Trocknungsbedingungen bzw. gleicher Wasserdampfpartialdruckdifferenz eine verstärkte Feuchteableitung von der Spindel zu den Doldenblättern. Bei größeren Kapillardurchmessern verlangsamt sich die Trocknungsgeschwindigkeit erst bei niedrigerem Gesamtfeuchtegehalt, was die Trocknungszeit deutlich verkürzt. Aus diesem Zusammenhang erklärt sich das günstigere Trocknungsverhalten reifen Hopfens. Demzufolge realisiert sich die bestmögliche Trocknung und Konditionierung von Hopfen erst ab dem sortenspezifischen optimalen Reifezeitpunkt.

Der prozentuale Gewichtsanteil der Spindel am Gesamtgewicht einer Dolde zum optimalen Reifezeitpunkt differiert je nach Sorte deutlich. Bei den Aromasorten beträgt der Spindelanteil durchschnittlich 9-10,5%, bei den Hochalphasorten hingegen lediglich 7,5-9,5%. Die Sorte Hallertauer Magnum weist grundsätzlich den geringsten prozentualen Spindelanteil auf.

### 7.3 Eintrocknungsverhältnis und spezifischer Wasserentzug

Das Eintrocknungsverhältnis (ETV) gibt an, wieviel Kilogramm Grünhopfen (GH) definierten Wassergehalts getrocknet werden müssen, um hieraus ein Kilogramm Trockenhopfen (TH) mit einem bestimmten Wassergehalt zu erhalten:

$$\text{ETV} = ((100\% - \text{Wassergehalt TH in [\%]}) / (100\% - \text{Wassergehalt GH in [\%]}))$$

Wird beispielsweise Grünhopfen mit einem Wassergehalt von 80% auf einen Wassergehalt von 9% herabgetrocknet, ergibt sich ein Eintrocknungsverhältnis von 4,55. Weist der zu trocknende Hopfen lediglich noch einen Wassergehalt von 75% auf, beträgt das Eintrocknungsverhältnis hingegen 3,64.

Anhand des Eintrocknungsverhältnisses ist der spezifische Wasserentzug je Kilogramm Trockenhopfen (WTH) wie folgt berechenbar:

$$\text{WTH} = \text{ETV} - 1$$

Bei einem ETV von 4,55 errechnet sich ein spezifischer Wasserentzug je Kilogramm Trockenhopfen von 3,55. Hingegen resultiert aus einem ETV von 3,64 lediglich noch ein spezifischer Wasserentzug je Kilogramm Trockenhopfen in Höhe von 2,64.

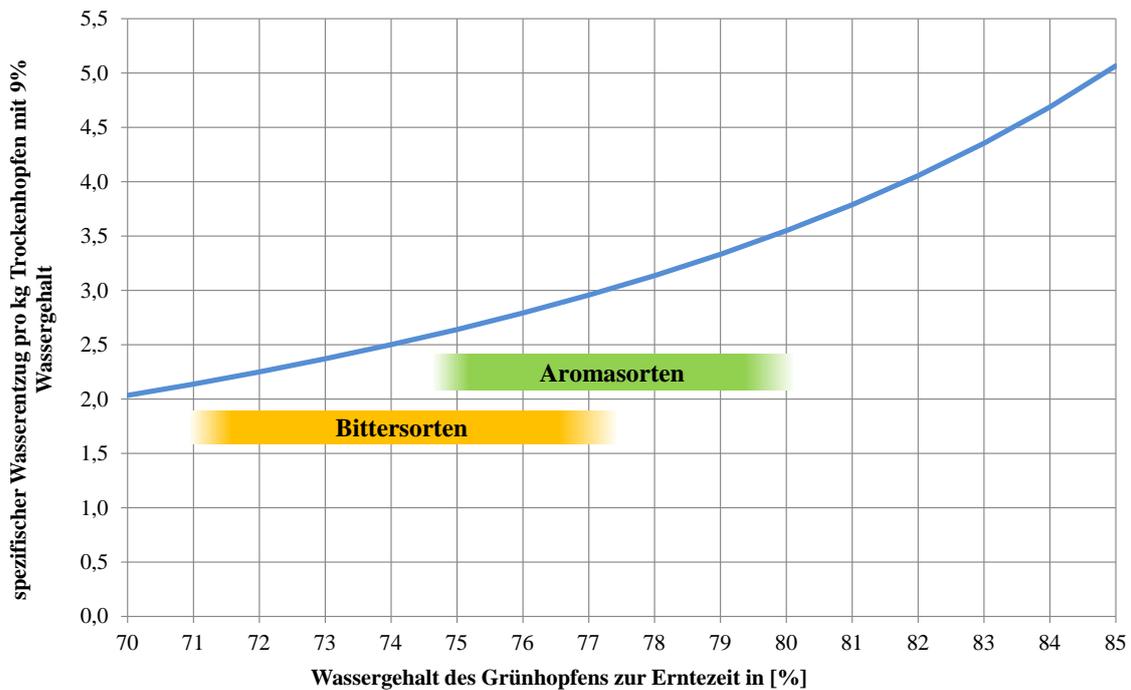


Abb. 41: Zusammenhang Wassergehalt des Grünhopfens zur Erntezeit und spezifischer Wasserentzug pro kg Trockenhopfen

#### Praxishinweis:

Für einen Ertrag von z.B. 2000kg/ha Trockenhopfen mit 9% Wassergehalt sind bei der Trocknung von Grünhopfen mit einem Wassergehalt von 80% 7100 kg Wasser zu entziehen. Besitzt der zu trocknende Hopfen lediglich noch einen Wassergehalt von 75%, müssen demzufolge nur 5.280kg Wasser herausgetrocknet werden. Der 5% höhere Feuchtegehalt des Grünhopfens erfordert einen ca. 35% höheren Wasserentzug. Dies erklärt, weshalb bei reifen Hochalphasorten im Vergleich zu Aromasorten höhere Trocknungsleistungen bei gleichzeitig niedrigerem Energiebedarf möglich sind (Abb. 41).

## 7.4 Witterung

Je niedriger die absolute Feuchte der Ansaugluft, desto größer ist das resultierende Sättigungsdefizit und desto mehr Wasser kann die Trocknungsluft folglich aufnehmen. Bei schwül warmer Witterung beinhaltet die Ansaugluft größere Mengen an Wasserdampf als bei vergleichsweise kühler und feuchter Witterung. Dies erklärt, weshalb Hopfen in aller Regel am Vormittag besser getrocknet werden kann, als dies in den frühen Nachmittagsstunden der Fall ist. Abbildung 42 verdeutlicht die Änderung der absoluten Feuchte der Außenluft und somit auch die Trocknungsbedingungen während eines Erntetags bzw. Erntezeitraums. Bei regennassen Erntebedingungen kann sich zudem der Trockensubstanzgehalt aufgrund der nassen Dolden kurzfristig um bis zu 3% verringern bzw. der Wassergehalt entsprechend um bis zu 3% erhöhen.

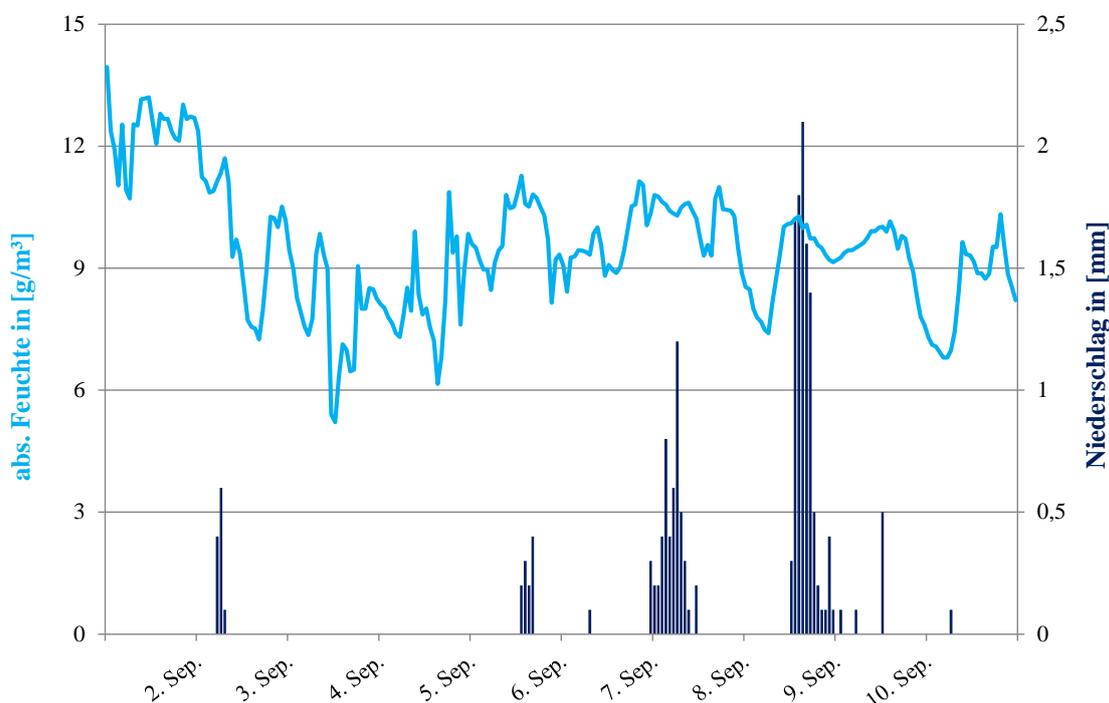


Abb. 42: Veränderung der absoluten Feuchte in der Außenluft während eines Erntezeitraums

### Praxishinweis:

Mit der Veränderung der Witterungsverhältnisse im Laufe eines Tages variieren auch die Trocknungsbedingungen. Vor allem weil die Temperatur und der Trockensubstanzgehalt der Dolden sowie der Wasserdampfgehalt der Ansaugluft Einfluss auf den Trocknungsverlauf besitzen, bleibt dieser nur dann optimal aufrechterhalten, wenn das Verhältnis der Trocknungsparameter gemäß der jeweils vorherrschenden Bedingungen durch eine geeignete Mess-, Steuer- und Regelungstechnik nachjustiert wird.

## 8 Trocknungsparameter

Eine optimale Trocknung von Hopfen ist nur dann möglich, wenn zu jedem Zeitpunkt das korrekte Verhältnis der Trocknungsparameter Schütthöhe, Trocknungstemperatur und Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Sorte und installierten Gebläseleistung einstellbar ist. Hieraus ist ersichtlich, dass das Ergebnis der Trocknung keinesfalls auf nur einem einzelnen Trocknungsparameter, wie beispielsweise der Trocknungstemperatur, beruht. Anhand diverser in der Praxis durchgeführter Versuche und Messungen wird nachfolgend der unterschiedliche Einfluss der Trocknungsparameter auf die Trocknung verdeutlicht.

### 8.1 Trocknungstemperatur

Um den Wasserabtransport aus der Spindel über die Doldenblätter zu gewährleisten, ist eine gewisse Trocknungszeit erforderlich. Zu lange Trocknungszeiten und zu hohe Trocknungstemperaturen führen zu einer Übertrocknung der Doldenblätter. Hierbei wird zunächst das Kapillarsystem geschädigt oder zerstört, schlussendlich fallen die Doldenblätter von der Spindel ab. Folglich besteht keine Möglichkeit mehr, das Wasser der Spindel über die Doldenblätter ausreichend abzuführen. Mit steigenden Trocknungstemperaturen erhöht sich zudem der Feuchteunterschied zwischen Spindel und Doldenblätter exponentiell. Übertrockneter Hopfen ist nur noch sehr schwierig bis teilweise gar nicht konditionierbar.

Im Rahmen einer Studienarbeit wurde die etwaige Auswirkung unterschiedlicher Trocknungstemperaturen auf die Aromaausprägung und Inhaltsstoffe untersucht. Mittels Kleintrocknern erfolgte hierzu die Trocknung von Hopfen der Sorte Mandarina Bavaria zu acht verschiedenen Erntezeitpunkten mit Trocknungstemperaturen von 60°C, 65°C und 70°C. Aus einer Trocknungsfläche von 30cm x 30cm und einer jeweiligen Einwaage von 2,5kg Grünhopfen resultierte eine durchschnittliche Schütthöhe von 22cm. Aufgrund der gemessenen Luftgeschwindigkeiten von stets über 0,4m/s war in allen Trocknungsvarianten garantiert, dass das freigesetzte Wasser zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe des Hopfens zu Beginn der Trocknung über die Trocknungsluft ausreichend abgeführt werden konnte. Der angestrebte Wassergehalt von ca. 9% am Ende der Trocknung wurde durch Wiegen ermittelt, indem zuvor das Endgewicht über den Trockensubstanzgehalt berechnet wurde. Dadurch war der Fall einer möglichen Übertrocknung ausgeschlossen. Die Trocknungsdauer betrug bei einer Trocknungstemperatur von 70°C zwischen 180min und 200min. Bei 65°C waren 20-30min und bei 60°C 60-80min zusätzliche Trocknungszeit zum Erreichen des gleichen Endgewichts erforderlich. Bis zur vollständigen Homogenisierung lagerte der fertig getrocknete Hopfen in Papiersäcken.

In einer zusätzlichen Versuchsvariante wurde die Technik der Gefriertrocknung näher betrachtet (Abb. 43). Grundsätzlich ist dieses Trocknungsverfahren als am schonendsten zu bewerten. Die Versuche dienten der Beurteilung hinsichtlich möglicher Auswirkungen unterschiedlicher Trocknungstemperaturen auf das Aroma und die Inhaltsstoffe.



*Abb. 43: Gefriertrocknung der Analysenproben im Labor*

Ergänzend zur Standardanalytik wurden im Hopfenlabor in Hüll von jeweils einer repräsentativen Mischprobe der unterschiedlichen Trocknungsvarianten und Erntezeitpunkte auch der Gesamtölgehalt und einzelne Ölkomponten bestimmt. Gleichzeitig ging die Beurteilung der Hopfenqualität nach dem Bonitierungsschema des internationalen Hopfenbaubüros einher (Abb. 44).



*Abb. 44: Expertenteam zur Beurteilung des Aromas und der äußeren Qualität*

Die analytischen Ergebnisse zeigten, dass die Trocknungstemperatur weder Einfluss auf den Gesamtölgehalt noch auf die Einzelölkomponten wie Myrcen, Linalool,  $\beta$ -Caryophyllen, Humulen und Geraniol nahm. Ergänzend bestätigt dies indirekt auch die Gefriertrocknung,

da auch hier – wie bei der Konvektionstrocknung – keine höheren Ölgehalte festgestellt wurden (Abb 45).

Lediglich durch den Erntezeitpunkt war ein entscheidender Einfluss auf die qualitative und quantitative Aromausprägung nachweisbar (Brauwelt, Nr. 33, 2015, S.958–960).

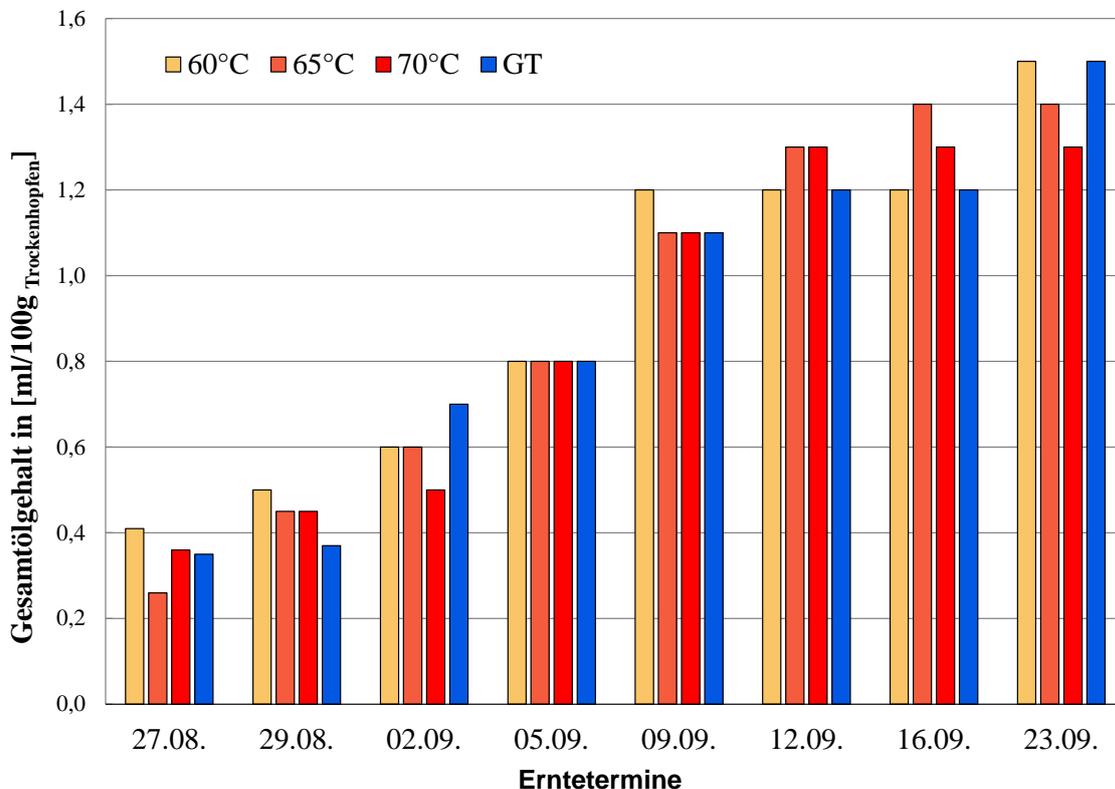


Abb. 45: Gesamtölgehalt der Sorte Mandarina Bavaria bei Konvektionstrocknung mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen und Gefriertrocknung (GT) zu den jeweiligen Erntezeitpunkten 2013

#### Praxishinweis:

Gemäß den Ergebnissen aus früheren Versuchen bestätigen auch obig beschriebene Testreihen, dass die Ursache für eine Minderung der Hopfenqualität im Verlauf der Trocknung zumeist nicht in der Höhe der Trocknungstemperatur, sondern vielmehr in einer zu niedrigen Luftgeschwindigkeit liegt. Wird bereits zu Beginn der Trocknung das freigesetzte Wasser infolge zu geringer Luftgeschwindigkeit nicht ausreichend von der Doldenoberfläche abgeführt, kommt es neben der bekannten Veränderung der typischen Doldenfarbe auch zum Zusammensacken der Hopfenschicht. Die unterschiedliche Lagerungsdichte über der Trocknungsfläche bedingt eine ungleichmäßige Trocknung. Mit zunehmender Trocknungstemperatur nimmt dieser Effekt zu und lässt die Trocknung zusehends ungleichmäßiger werden. Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit partieller Übertrocknung und somit einer Minderung der äußeren und inneren Hopfenqualität.

In allen bislang durchgeführten Trocknungsversuchen waren bei Einhaltung der richtigen Schütthöhe, Luftgeschwindigkeit und Trocknungszeit bei Trocknungstemperaturen von 62–68°C keine negativen Einflüsse auf die Hopfenqualität nachweisbar.

## 8.2 Schütthöhe –Schüttgewicht

Die Schütthöhe hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Trocknungsbedingungen. Durch Erwärmung und Welken des Grünhopfens verliert der Hopfen in der Aufschütthorde an Volumen und verdichtet sich. Bei zu hoher Schüttung erhöht sich demzufolge der Grad der Verdichtung. Dadurch sinkt rasch der Luftdurchsatz und die Trocknungsleistung nimmt ab bzw. die Verweildauer des Hopfens in der obersten Lage verlängert sich deutlich. Nach einer bestimmten Trocknungszeit bildet das Gefüge der Hopfendolden im Aufschüttbereich eine feste unveränderliche Struktur aus. Sowohl die Form der einzelnen Dolden als auch ihre Lage zueinander bleiben in der obersten Hopfenschicht von nun an unverändert. Es entstehen Luftkanäle, die sich über die noch verbleibende Trocknungszeit hinweg in ihrer Form und Lage nicht mehr verändern. Hieraus resultiert die Bildung von Kleinzonen mit mehr oder minder gutem Luftdurchsatz. Ein niedrigeres Aufschütten erfordert zwar ein Kippen in kürzeren Zeitabständen, hat aber eine gleichmäßigere Trocknung bei insgesamt kürzerer Trocknungsdauer zur Folge, da beim Kippen oder Fallen in die darunterliegende Trocknungsebene verdichtete Hopfenschichten früher aufgelockert werden. Der Luftwiderstand verringert sich, wodurch der Luftdurchsatz und die Trocknungsleistung ansteigen.

In der Praxis sind optimale Trocknungsleistungen erzielbar, wenn die Luftgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe des Grünhopfens mindestens 0,4m/s erreicht und gleichzeitig die Trocknungsluft über der Aufschütthorde nicht kondensiert. Folglich ist in Trocknungsanlagen mit begrenzter Luftleistung die Schütthöhe soweit zu reduzieren, bis wenigstens die erforderliche Mindestluftgeschwindigkeit erreicht und zugleich garantiert ist, dass die Trocknungsluft den Strömungswiderstand der Hopfenschichten überwindet und die Trocknungsfläche noch gleichmäßig durchdringt.

Weil die Wassergehalte des Grünhopfens in Abhängigkeit von Sorte, Witterung und Erntezeitpunkt sehr stark schwanken, resultieren bei gleicher Schütthöhe unterschiedliche Strömungswiderstände in den Hopfenschichten. Gleichbleibende Strömungswiderstände ergeben sich, wenn Hopfendarren nicht nach Schütthöhe, sondern nach Schüttgewicht befüllt werden. Nachstehend beschriebener Praxisversuch belegt und verdeutlicht diesen Sachverhalt.

Die Aufschütthorde einer Trocknungsanlage mit einer Darrfläche von 16m<sup>2</sup> wird betriebsüblich mit Kästen befüllt, die den Grünhopfen aus der Pflückmaschine aufnehmen. Der Inhalt einer Kastenfüllung entspricht der Füllmenge der Aufschütthorde. Die Befüllung der Darre erfolgte bis dato mit einer gleichbleibenden Schütthöhe von ca. 30cm. Zur Feststellung des Schüttgewichts wurden in den Ecken des Kastenfahrgestells Wiegestäbe angebracht. Per Digitalanzeige war das jeweils aktuelle Gewicht während der Befüllung ablesbar (Abb. 46). Nach Ermittlung und Berücksichtigung eines für die Praxisdarre optimalen Schüttgewichts konnte ab sofort nach jedem Entleeren der Auszugshorde die Aufschütthorde nahtlos auch wieder mit Grünhopfen befüllt werden. Der erforderliche Rhythmus im Trocknungsablauf war demzufolge gefunden. Darreseitig waren eine Gebläseleistung von 600W/m<sup>2</sup><sub>Trocknungsfläche</sub> und eine Trocknungstemperatur von 65°C vorgegeben.



Abb. 46: Praxisbeispiele für Wiegevorrichtungen zur Ermittlung des Schüttgewichts von Grünhopfen

Durch die Einstellung des einheitlichen Befüll- und Entleer-Rhythmus konnte die Trocknungsleistung im Praxisbetrieb erheblich gesteigert werden. Der höchste Durchsatz wurde sortenunabhängig bei einem Gewicht von 425kg Grünhopfen in der Aufschütthorde erreicht. Dies entspricht einem Schüttgewicht von  $26,56\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$ . Durch das Einhalten des optimalen Schüttgewichts wurde mit niedrigeren Schütthöhen ein Trocknungsrythmus erreicht, der ein beinahe stündliches Entleeren des Schubers sowie Befüllen der Aufschütthorde erlaubte. Durch den von nun an kontinuierlichen Trocknungsprozess war stets ein maximaler Wasserentzug gewährleistet. Bei der gegebenen Dimensionierung der Darre konnte folglich die Trocknungsleistung von durchschnittlich  $5,4\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  auf  $6,9\text{kg/m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}$  je Stunde Trocknungszeit erhöht werden. Dies entspricht einer Leistungssteigerung von 27%.

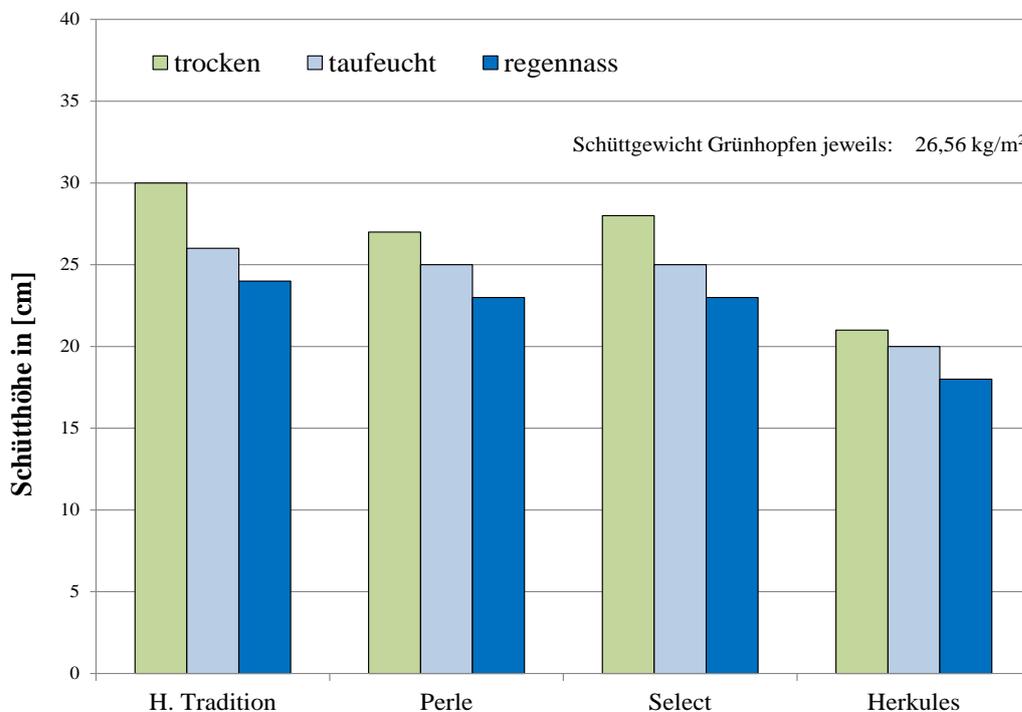


Abb. 47: Schütthöhen bei gleichem Schüttgewicht in Abhängigkeit von Sorte und Feuchtegehalt des Grünhopfens

*Praxishinweis:*

Die Ermittlung des Schüttgewichts ermöglicht es, für jede Gebläseleistung die maximal erreichbare Trocknungsleistung auszuschöpfen. Insbesondere bei Darren mit begrenzter Luftleistung ist deren Trocknungsleistung auf diese Weise erheblich steigerbar. Da stets alle Horden mit gleichem Schüttgewicht befüllt werden, stellt sich sehr schnell ein einheitlicher Befüll- und Entleer-Rhythmus ein.

Das Befüllen nach Schüttgewicht bietet sich vor allem bei Hordendarren an, bei denen der Grünhopfen ohne automatische Füllgeräte in die Aufschütthorde gelangt. Der Zusammenhang von Schüttgewicht und Schütthöhe besitzt für die Praxis besondere Relevanz (Abb. 47). In Abhängigkeit von Sorte und Witterung resultieren bei gleichem Schüttgewicht signifikante Unterschiede in der Schütthöhe. Bei regennasser Witterung kann nur durch eine Verringerung der Schütthöhe eine optimale Trocknungsleistung aufrecht und die äußere Qualität am besten erhalten werden. Automatische Befüllvorrichtungen sollten deshalb zur Anpassung der Schütthöhe zwingend mit einer Höhenverstellung ausgestattet sein (Abb. 48).



Abb. 48: Befüllung der Aufschütthorde mit Grünhopfen durch automatische Befüll-Vorrichtungen

### 8.3 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit besitzt den größten Einfluss auf die Hopfenqualität und Trocknungsleistung. Eine Reduzierung der Schütthöhe infolge erforderlicher höherer Luftgeschwindigkeiten ist durch eine ausreichend dimensionierte Gebläseleistung vermeidbar. Zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe wird die Trocknungsleistung bei Hordendarren und Bandtrocknern mittels höherer Luftgeschwindigkeiten deutlich verbessert und die Qualität optimal erhalten. Zusätzlich erhöht sich der trocknungstechnische Wirkungsgrad, zumal das freigesetzte Wasser ohne Kondensation vollständig abgeführt wird.

*Praxishinweis:*

Da ein enger Zusammenhang zwischen der Luft- und Trocknungsleistung sowie der erzielbaren Qualität besteht, werden derzeit zahlreiche Trocknungsanlagen mit höheren Luft- und Heizleistungen nachgerüstet bzw. ausgestattet (Abb. 49).

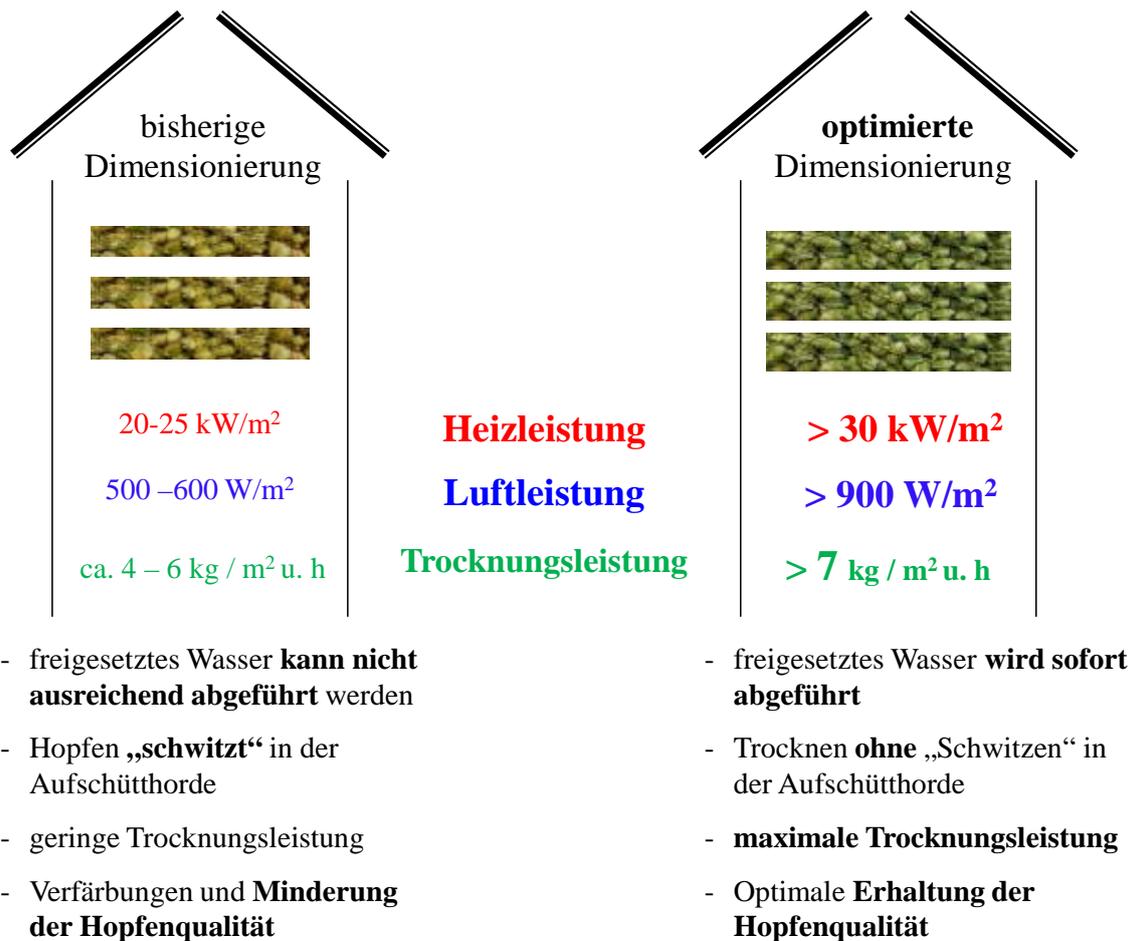


Abb. 49: Zusammenhang von Dimensionierung, Trocknungsleistung und Hopfenqualität

## 9 Optimierung der Trocknung

Eine Trocknungsanlage gilt erst dann als optimiert, sobald eine bestmögliche Trocknungsleistung bei gleichzeitig effizientestem Energieeinsatz und bester Erhaltung der Hopfenqualität erzielt wird.

### 9.1 Hordendarren

Für jede Darre existiert ein bestimmtes optimales Verhältnis der Trocknungsparameter in Abhängigkeit von Sorte, Schütthöhe und installierter Gebläseleistung. Grundsätzliches Kennzeichen eines optimierten Trocknungsverlaufs ist ein einheitlicher Befüll- und Entleer-Rhythmus, d.h. unmittelbar nach dem Entleeren des Schubers ist die Aufschütthorde sofort wieder mit Grünhopfen befüllbar. Eine maximale Trocknungsleistung setzt voraus, dass stets alle Horden mit Hopfen befüllt sind. Hierfür ist die Installation geeigneter Messtechnik zwingend erforderlich.

#### 9.1.1 Technische Hilfsmittel und wichtige Messwerte

Die Trocknung von Hopfen erfordert ein ausreichendes Maß an Erfahrung und eine hohe Beobachtungsgabe des Bedieners bzw. von demjenigen, der für die Trocknung verantwortlich ist. Mit Hilfe von Messwerten und deren graphischer Aufbereitung sind die Vorgänge bei der Trocknung mittlerweile ausreichend gut erklär-, steuer- und regelbar (Abb. 50). Ferner ermöglicht der in der Praxis inzwischen erreichte Grad der Automatisierung, dass

weitere Personen, die nicht entsprechende Kompetenzen wie der Darrverantwortliche aufweisen, in der Lage sind, anhand bestimmter Voreinstellungen ebenfalls die Trocknungsanlage bedienen zu können.

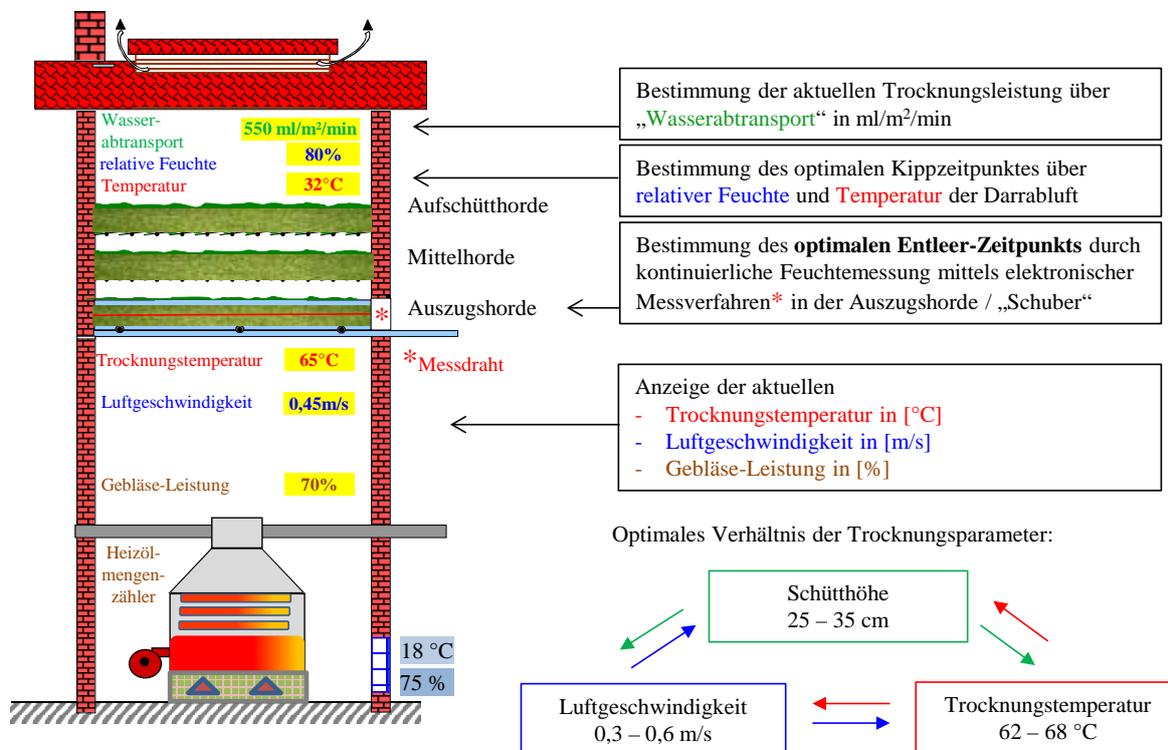


Abb. 50: Wichtige Messwerte in Hopfendarren

### 9.1.1.1 Relative Feuchte der Darrabluft

Im Zuge der ersten Versuche zur Trocknungsoptimierung wurde insbesondere die relative Feuchte der Darrabluft eingehend analysiert. Dadurch konnte aufgezeigt werden, dass der Trocknungsverlauf regelmäßiger und effektiver wird, wenn der Hopfen nicht nach Zeit, sondern nach relativer Feuchte der Abluft über der Aufschütthorde gekippt wird. In Abhängigkeit von der Witterung, Schütthöhe und Sorte sowie des Standorts und Reifezustands ergeben sich bei gleichbleibenden Einstellungen unterschiedliche Trocknungszeiten. Wird der Hopfen zu früh bzw. in einem zu feuchten Zustand von der Aufschütthorde in die Mittelhorde gekippt, erhöht sich der Luftwiderstand in den Hopfenschichten. Die Folgen sind eine ungleichmäßige Trocknung mit Nesterbildung und deutlich längeren Trocknungszeiten. Diese Ungleichmäßigkeiten verstärken sich zunehmend mit jeder weiteren Schüttung. Durch die Messung der relativen Luftfeuchte ist der darrspezifisch optimale Kippzeitpunkt, der in aller Regel zwischen 60-70% r.F. liegt, besser bestimmbar (Abb. 51).

Aus energetischer Sicht ist die beliebige Steigerung der Luftgeschwindigkeit wirtschaftlich nicht sinnvoll. Anhand der relativen Feuchte der Darrabluft sollte die Luftgeschwindigkeit derart eingestellt werden, sodass in den unterschiedlichen Trocknungsabschnitten jeweils die optimale Wasseraufnahmefähigkeit der durchströmenden Trocknungsluft erreicht wird.

#### Praxishinweis:

Die Luftgeschwindigkeit und Schütthöhe sind derart anzupassen, dass es zu keinem Zeitpunkt der Trocknung zur Kondensation der Trocknungsluft über der Aufschütthorde kommt. Damit auch unmittelbar über der Aufschütthorde ein ausreichender

Wasserabtransport garantiert ist, darf auch zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe die relative Feuchte der Darrabluft nicht über 95% r.F. ansteigen. Zugleich sollte im ersten Trocknungsabschnitt zumindest kurzzeitig eine relative Feuchte von mindestens 85% r.F. erreicht werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, sind in aller Regel die Luftgeschwindigkeit zu hoch und/oder die Schütthöhe zu niedrig eingestellt. Bei zu hohen Luftgeschwindigkeiten verlangsamt sich der Wasserentzug. Da das Wasserdampfaufnahmevermögen der Trocknungsluft nicht mehr ausgeschöpft wird, ist die Trocknung energetisch und wirtschaftlich ineffektiv. Trotz niedriger Darrabluftfeuchten wird in dieser Situation Hopfen meist in zu feuchtem Zustand in die darunterliegenden Horden gekippt, mit der Folge, dass sich die Trocknungszeit im Schubser erheblich verlängert.



Abb. 51: Messen der relativen Feuchte und der Temperatur der Darrabluft über der Aufschütthorde

#### 9.1.1.2 Darrablufttemperatur

Mit moderner Steuer- und Regelungstechnik ist es mittlerweile möglich, für definierte Trocknungsabschnitte die Trocknungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Gebläseleistung vorzugeben. Wie zuvor ausgeführt, liegt die Ursache für eine Minderung der Hopfenqualität in aller Regel nicht rein an der Höhe der Trocknungstemperatur, sondern vielmehr an einer zu niedrigen Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der entsprechend eingestellten Trocknungstemperatur zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe. Da sich mit zunehmender Temperatur sowohl die Wasserfreisetzung als auch die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft erhöhen, kann die Trocknungstemperatur nur so weit erhöht werden, so lange gewährleistet ist, dass das freigesetzte Wasser infolge ausreichender Luftgeschwindigkeit über die Trocknungsluft abführbar ist. In der Praxis werden die besten Trocknungsergebnisse und -leistungen in solchen Darren erzielt, in denen die Luftgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe des Grünhopfens in der Aufschütthorde auf mindestens 0,4m/s erhöht werden kann. Unter diesen Bedingungen ergibt sich gleichzeitig eine

Darrablufttemperatur von ca. 30°C. Bei weiterer Abkühlung der Darrabluft bis unterhalb des Taupunkts kommt es zur Kondenswasserbildung, der Hopfen „schwitzt“. Neben einer Minderung der äußeren Qualität führt dies auch zum Verlust sortentypischer Inhaltsstoffe durch enzymatische und mikrobiologische Prozesse. Gleichzeitig kommt es zum Zusammensacken der Hopfenschicht. Die Trocknungsleistung nimmt stark ab. Aufgrund der längeren Verweilzeit des Hopfens in der obersten Lage erhöht sich zudem der Verlust ätherischer Öle über die feuchte Abluft.

*Praxishinweis:*

Über die Darrablufttemperatur ist das optimale Verhältnis der Trocknungsparameter sehr gut einstellbar. Wird beispielsweise die Mindestdarrablufttemperatur von ca. 30°C bzw. die Taupunkttemperatur unterschritten, ist die Luftgeschwindigkeit zwingend zu erhöhen. Kann die Luftgeschwindigkeit aufgrund einer begrenzten Gebläseleistung nicht weiter erhöht werden, muss die eingestellte Trocknungstemperatur reduziert bzw. bei der nächsten Befüllung in der obersten Horde die Schütthöhe verringert werden. Somit ist anhand der Darrablufttemperatur die individuell geeignete Trocknungstemperatur ermittelbar.

### 9.1.1.3 Hopfenfeuchte in der Auszugshorde

Der optimale Wassergehalt des Hopfens nach unmittelbarer Entnahme aus der Trocknung liegt bei ca. 8-9%. Die Zeitspanne zwischen dem Erreichen des angestrebten Wassergehalts und einer unbeabsichtigten Übertrocknung ist jedoch sehr kurz.

Aufgrund der variierenden Strömungsverhältnisse der Trocknungsluft und der dadurch bedingten Temperaturunterschiede kann der Wassergehalt des Hopfens in der Auszugshorde über punktuelle Messungen der Temperatur und der relativen Feuchte nicht beurteilt werden. Deshalb bedient man sich der physikalischen Eigenschaften des Wassers, indem mittels indirekter Messverfahren, z.B. über die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit, des Widerstands oder der Dielektrizitätskonstante, die Veränderung der Hopfenfeuchte während der Trocknung beobachtet und beurteilt werden können. Diese indirekten Messverfahren werden in der Praxis als „Draht im Schubler“ bezeichnet (Abb. 52).

Hierbei wird in der Auszugshorde ein Messdraht gespannt, der über zwei Isolatoren vom eigentlichen Rahmen der Auszugshorde leitend getrennt ist. Anhand einer angelegten Wechselspannung wird mittels der Digitalanzeige eines Auslesegerätes oder einer Bildschirmanzeige ein repräsentativer Wert oder eine Kurve angezeigt, welche vom Wassergehalt des Trockenhopfens im Drahtstreubereich abhängig sind. Erreicht der Istwert den vom Bediener voreingestellten Sollwert, so bekommt er beispielsweise über eine Warnlampe oder ein Mobiltelefon die Meldung, dass der Hopfen im Schubler den zum Entleeren erforderlichen Trocknungsgrad erreicht hat. Zusätzlich werden die Messdaten am Computer graphisch dargestellt und aufgezeichnet. Der optimale Entleerzeitpunkt ist somit genauer bestimmbar.



Abb. 52: Messverfahren „Draht im Schubler“

#### 9.1.1.4 Kapazitive Methode

Beim System „Draht im Schubler“ ist derzeit ein kapazitives Messverfahren am weitesten verbreitet. Da hier der ermittelte Wert temperatur- und dichteabhängig ist, muss bei einer Änderung der Trocknungstemperatur, der Schütthöhe oder im Falle eines Sortenwechsels, der „Sollwert“ überprüft bzw. neu kalibriert werden. Eine digitale Temperaturüberwachung unterhalb der Auszugshorde ist deshalb unabdingbar. Grundvoraussetzung für die Funktionalität ist stets eine gleichmäßige und ausreichende Bedeckung bzw. Umhüllung des Drahts mit Hopfen.

#### 9.1.1.5 TDR-Methode

Die TDR-Methode (Time Domain Reflectometry, d.h. Zeitbereichsmessung) gilt als eine Weiterentwicklung der bis dato etablierten „Draht im Schubler-Systeme“. Die TDR-Methode bedient sich ebenfalls der Eigenschaft der Dielektrizitätskonstante. Da unterschiedliche Trocknungstemperaturen oder Schütthöhen keinen Einfluss auf die TDR-Werte besitzen, lassen sich TDR-Drähte aufeinander kalibrieren. Gleiche Werte entsprechen der gleichen Hopfenfeuchte. Dadurch können die einzelnen Messwerte mehrerer im Schubler und in der Mittelhorde verbauter Drähte miteinander verglichen werden.

#### *Praxishinweis*

Bei den konventionellen Hordendarren ist der weitestgehend fertig getrocknete Hopfen in der Auszugshorde direkt der Trocknungstemperatur ausgesetzt. Deshalb kann der Hopfen hier auch bei optimal eingestellter Trocknungstemperatur sehr schnell übertrocknet werden. Denn mit abnehmendem Wassergehalt nimmt auch die Kühlwirkung durch Verdunstung an der Doldenoberfläche ab, sodass die Doldentemperatur bis zur Trocknungstemperatur

ansteigen kann. Durch die schnellere Trocknung der Doldenblätter gegenüber der Spindel erhöhen sich mit ansteigenden Doldentemperaturen die Gefahren des Zerblätterns und der Bräunung des Lupulins. Eine Übertrocknung des Hopfens ist somit nicht nur abhängig von der Höhe der Trocknungstemperatur, sondern auch vom Zeitrahmen, in dem der Hopfen der Trocknungstemperatur ausgesetzt ist. Mit Hilfe des Systems „Draht im Schubler“ gelingt es, einer Übertrocknung vorzubeugen.

#### 9.1.1.6 Einfache Methode zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit

Für das Einstellen der optimalen Trocknungsparameter, wie Temperatur und Schütthöhe, ist die Kenntnis der jeweils aktuellen Luftgeschwindigkeit in [m/s] während der Trocknung von Vorteil. Aufgrund der sich während der Trocknung ständig ändernden Strömungsverhältnisse und der insgesamt niedrigen Luftgeschwindigkeiten war früher eine direkte Messung der tatsächlichen Luftgeschwindigkeit in [m/s] in der Praxis nicht möglich. Außerdem sind punktuelle Messungen der Luftgeschwindigkeit aufgrund der Ungleichmäßigkeiten bei der Abtrocknung nicht aussagekräftig. Deshalb wurde nach einem Messverfahren gesucht, welches Aussagen über die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit, über die gesamte Darrfläche hinweg, zulässt. Um einen aussagekräftigen Richtwert zu erhalten, wurde von Dr. Albert Heindl (Heindl GmbH, Mainburg) einst vorgeschlagen, die Luftgeschwindigkeit bei der Trocknung über den Heizölverbrauch des Warmlufterzeugers zu ermitteln. Dazu stellte er eine thermodynamische Formel zur Verfügung, mit der eine Tabelle erstellt werden konnte, anhand derer die Luftgeschwindigkeit in [m/s] in Abhängigkeit vom Heizölverbrauch und der Temperaturdifferenz zwischen Trocknungs- und Ansaugluft ablesbar ist (Tab. 3).

Mit Hilfe nachfolgender Tabelle wurde dem Hopfenpflanzer erstmalig ein Hilfsmittel an die Hand gegeben, mit dem er auf einfache Weise in der Lage war, die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit in [m/s] zu ermitteln und Korrekturen vorzunehmen.

#### *Praxishinweis:*

Die Tabelle dient lediglich zur einfachen und schnellen Einschätzung der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit. Nachteilig wirkt sich hierbei aus, dass die aktuelle Luftgeschwindigkeit nicht kontinuierlich zur Verfügung steht. Durch die stetige Wasserabfuhr bei der Trocknung verringern sich das Gewicht des Hopfens und somit auch der Luftwiderstand in den einzelnen Horden unentwegt. Dementsprechend verändert sich auch die Luftgeschwindigkeit über den Trocknungszeitraum hinweg. Zur Erzielung einer optimalen Trocknungsleistung und hohen Energieeffizienz muss jedoch die Luftgeschwindigkeit in dem für den jeweiligen Trocknungsabschnitt optimalen Bereich stets nachjustiert werden. Dies ist nur mit einem automatischen Regelkreis möglich.

Somit gilt diese Methode als eine Vorstufe für die Entwicklung einer Reihe von Messverfahren, bei denen die Luftgeschwindigkeit während der Trocknung stetig ermittelt und angezeigt wird.

Temperaturdifferenz zwischen Trocknungsluft und Ansaugluft [°C]	Ölverbrauch in [l/h/m <sup>2</sup> Darrfläche]																													
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0									
20	0,37	0,40	0,44	0,48	0,51	0,55	0,59	0,62	0,66	0,70	0,73	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92	0,95	0,99	1,03	1,06	1,10									
22	0,33	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,57	0,60	0,63	0,67	0,70	0,73	0,77	0,80	0,83	0,87	0,90	0,93	0,97	1,00									
24	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,92									
26	0,28	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85									
28	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,47	0,50	0,52	0,55	0,58	0,60	0,63	0,65	0,68	0,71	0,73	0,76	0,78									
30	0,24	0,27	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,54	0,56	0,59	0,61	0,63	0,66	0,68	0,71	0,73									
32	0,23	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,48	0,50	0,53	0,55	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66	0,69									
34	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,65									
36	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61									
38	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58									
40	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,53	0,55									
42	0,17	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,52									
44	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,50									
46	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45	0,46	0,48									
48	0,15	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,43	0,44	0,46									
50	0,15	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44									
52	0,14	0,15	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41	0,42									
54	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41									
56	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,20	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39									
58	Luftgeschwindigkeit in [m/s]																													
60																														

Tab. 3: Einfache Methode zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit in [m/s]

#### 9.1.1.7 Kontinuierliche Messung der Luftgeschwindigkeit

Die Firma ATEF Euringer & Friedl GmbH entwickelte in enger Kooperation mit der Arbeitsgruppe Hopfenbau, Produktionstechnik der LfL einen Prototyp eines vollautomatischen Luftgeschwindigkeitsmessgeräts. Ziel war es, die Luftgeschwindigkeit mit höchster Genauigkeit in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Dies wurde durch einen eigens dafür entwickelten Mikrocontroller bewerkstelligt, welcher in der Lage ist, sowohl sämtliche Trocknungsparameter zu messen als auch die thermodynamischen Berechnungen vorzunehmen, um die Datenfülle auf die maßgeblichen Werte zu reduzieren.

Unter Beachtung der korrekten Luftgeschwindigkeit, bedingt eine hohe Trocknungsleistung gleichzeitig einen energetisch sehr günstigen Betriebspunkt, da nur so eine große Menge an Wasser abgeführt wird. Aus diesem Grund ist die Luftgeschwindigkeit vom Zeitpunkt des Befüllens bis zum Entleeren einer Darrschüttung stetig so zu regeln, dass unentwegt ein maximaler Wasserentzug garantiert ist. Mit der neu entwickelten Messtechnik werden zusätzlich zu den bisherigen Trocknungsparametern auch die Luftgeschwindigkeit in der Darre und der Wasserabtransport in Form des aus dem Hopfen in den einzelnen Horden entzogenen Wassers kontinuierlich berechnet und über ein Display angezeigt bzw. graphisch dargestellt. Als besonders praxisrelevant erwies sich der neue Trocknungsparameter „Wasserentzug“, der in der Einheit  $[\text{ml}_{\text{Wasser}}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}] / [\text{min}]$  dargestellt wird. Mit den thermodynamisch berechneten Parametern „Luftgeschwindigkeit“ und „Wasserentzug“ kann das Leistungspotential einer Darre beurteilt und gezielter geregelt werden.

#### 9.1.1.8 Wärmebildtechnik

Die gleichmäßige Temperatur- und Luftverteilung ist Grundvoraussetzung für eine gleichmäßige Trocknung mit optimalen Trocknungsleistungen. Je länger im ersten

Trocknungsabschnitt zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe des Hopfens mit hoher Luftgeschwindigkeit getrocknet werden kann, desto höher ist die erzielbare Trocknungsleistung. Jedoch kann es auch bei optimal eingestellter Wärme- und Luftverteilung – insbesondere bei hohen Luftgeschwindigkeiten – sehr schnell zu einer ungleichmäßigen Abtrocknung in der Aufschütthorde kommen. Begründbar ist dies mit den unterschiedlichen Strömungswiderständen des Grünhopfens in der obersten Lage, der unterschiedlichen Lagerzeit im Hopfensilo vor der eigentlichen Trocknung, der variierenden Verweilzeit des Hopfens in der Aufschütthorde von Beginn bis Ende der Befüllung, der ungleichen Schütthöhen so-wie unterschiedlichen Schüttdichten. Aus unterschiedlichen Strömungswiderständen resultieren unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten der Trocknungsluft. Zumal Luft den Weg des geringsten Widerstands wählt, ergeben sich zwangsläufig Zonen mit unterschiedlichen Trocknungsgraden. Wird stets ungleichmäßig getrockneter Hopfen von der Aufschütthorde in die darunter liegenden Horden gekippt, kommt es sehr schnell zur bereits beschriebenen „Nesterbildung“ und zum Freiblasen von Löchern. Da in einer solchen Situation die installierte Gebläseleistung durch die notwendige Reduzierung der Luftgeschwindigkeit nicht mehr ausgenutzt werden kann, geht die Trocknungsleistung folglich stark zurück und die Trocknung wird zunehmend ungleichmäßiger. Mit Hilfe der Wärmebildtechnik ist es möglich, anhand der Doldenoberflächentemperaturen die Temperaturverteilung über der gesamten Aufschütthorde zu erfassen. Dadurch kann der Trocknungsvorgang auf Gleichmäßigkeit überwacht bzw. bei Bedarf durch gezielte Korrekturmaßnahmen eine gleichmäßige Abtrocknung gewährleistet werden (Abb. 53).



Abb. 53: Wärmebildkamera, Messfläche über der Aufschütthorde, zugehöriges Wärmebild (Bilder Hofer H., 2019)

#### Praxishinweis:

Anhand der Farbverläufe der Wärmebilddarstellung sind bereits während der Trocknung entstehende Feuchtenester bzw. ungleich getrocknete Bereiche frühzeitig erkennbar. Somit kann bei Bedarf durch Korrekturmaßnahmen, wie beispielsweise Umverteilung des Hopfens von Hand mit einem Rechen oder Aufstechen feuchter Zonen mit einer Gabel in der Aufschütthorde, die Gleichmäßigkeit der Abtrocknung schnell wiederhergestellt werden (Abb. 54).



Abb. 54: Kontrolle auf gleichmäßige Schüttdichte nach dem Befüllen der Aufschütthorde und auf Gleichmäßigkeit während der Trocknung (Bilder: Selmeier G., 2016)

Bei automatischen Befüllungen kann durch entsprechende Veränderungen der Einstellungen spätestens beim erneuten Befüllvorgang mit Grünhopfen rasch auf entstehende Ungleichmäßigkeiten bei der Trocknung reagiert werden. Auf diese Weise lassen sich mit den einfachen Hilfsmitteln der Wärmebildtechnik die Gleichmäßigkeit der Trocknung verbessern und höhere Trocknungsleistungen erzielen. Die Wärmebildtechnik bestätigt die alte Erfahrung des Hopfentrockners: „In der obersten Lage wird der Hopfen getrocknet!“.

#### 9.1.1.9 Doldenoberflächentemperatur

Bislang fand die Oberflächentemperatur bei der Hopfentrocknung in der Praxis kaum Beachtung. Mit Hilfe eingebauter Infrarotsensoren zwischen den Horden, konnte bei Trocknungsversuchen in Praxisdarren zwischen der Temperatur an der Doldenoberfläche und der eigentlichen Trocknungstemperatur bereits ein Bezug hergestellt werden.

Solange die Dolde Wasser abgibt, findet eine adiabate Verdunstung an der Doldenoberfläche statt und die Dolde nimmt dadurch nicht die Trocknungstemperatur an. Deshalb ist es möglich, im zweiten Trocknungsabschnitt die Trocknungstemperatur zu erhöhen, ohne hierbei Qualitätsminderungen zu verursachen.

Erst wenn die Kühlwirkung durch die Verdunstung des Doldenwassers abnimmt, nähert sich die Doldentemperatur der Trocknungstemperatur. Im dritten Trocknungsabschnitt empfiehlt sich deshalb eine Reduzierung der Trocknungstemperatur, um eine partielle Über-trocknung und damit Qualitätsminderungen zu vermeiden (Abb. 55).

Die Korrelation zwischen der Doldenoberflächen- und der Trocknungstemperatur ist vor allem bei Trocknungsversuchen von Nutzen, weil dadurch unterschiedliche Trocknungsvarianten unter reproduzierbaren Bedingungen leichter wiederholbar sind.

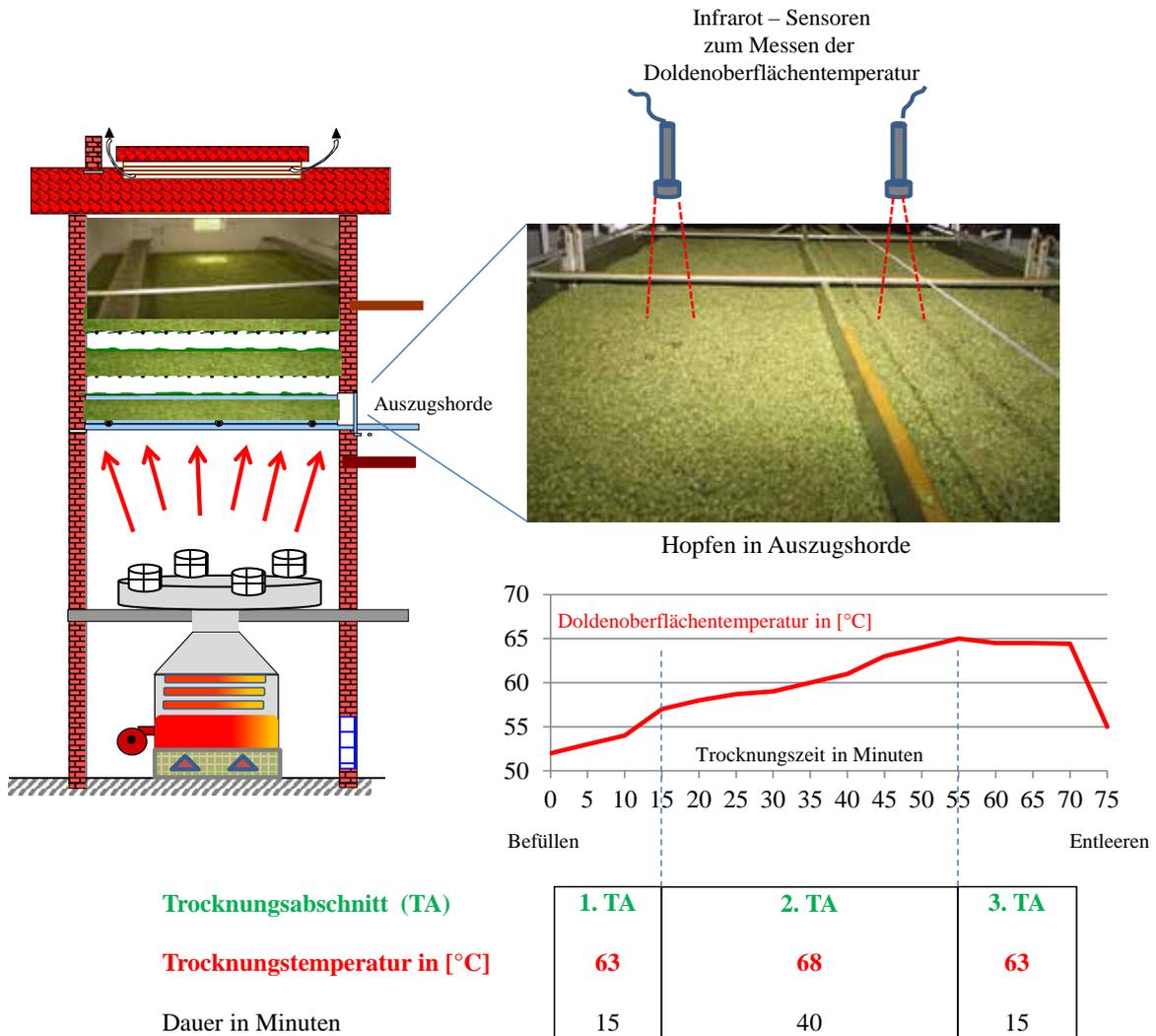


Abb. 55: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Temperatur der Trocknungsluft und der Doldenoberfläche des Hopfens in der Auszugshorde

*Praxishinweis:*

Die Trocknungs- und Doldenoberflächentemperatur sind zwei unterschiedliche Messgrößen. Solange aus dem Inneren der Dolde noch ausreichend Wasser an die Doldenoberfläche diffundiert, ist die Doldenoberflächentemperatur niedriger als die Trocknungstemperatur. Deshalb kann im zweiten Trocknungsabschnitt solange mit einer höheren Temperatur getrocknet werden, bis die Doldenoberfläche eine Temperatur von 65°C nicht übersteigt.

9.1.1.10 Temperaturmessungen zwischen den einzelnen Horden

Anstatt besagter Infrarotmessungen kann auch durch Temperaturmessungen der Trocknungsluft zwischen den einzelnen Horden ein Bezug zur Doldenoberflächentemperatur hergestellt werden. Solange sich die Trocknungsluft beim Durchströmen der jeweiligen Trocknungslage abkühlt, ist die Doldentemperatur niedriger als die Trocknungstemperatur.

In einer trocknungstechnisch optimierten Praxisdarre wurden Temperatur- und Feuchtemessfühler gemäß den in Abbildung 9 (Kapitel 2.3.1.2) dargestellten Positionen eingebaut, um bereits während der Trocknung die aktuellen Einstromtemperaturen unterhalb der jeweiligen Trocknungsebenen beobachten zu können.



Abb. 56: Praxisbeispiel für die Dokumentation des Temperaturverlaufes der Trocknungsluft beim Einströmen in die einzelnen Trocknungslagen

In Abbildung 56 sind die unterschiedlichen Temperaturbereiche, mit welchen die einzelnen Lagen durchströmt wurden, dokumentiert. Da entstehende Temperaturunterschiede zwischen linker und rechter Darrhälfte frühzeitig erkennbar waren, konnte durch frühzeitige Korrekturmaßnahmen eine gleichmäßige Abtrocknung gewährleistet werden.

#### Praxishinweis:

Durch Messung der aus dem Schubler ausströmenden Trocknungslufttemperatur ist es möglich, die Trocknungstemperatur noch gezielter einzustellen. Damit keine Qualitätsminderungen zu befürchten sind, sollte die Temperatur der aus dem Schubler ausströmenden Trocknungsluft nicht über 65°C ansteigen.

#### 9.1.1.11 Graphische Aufbereitung wichtiger Messwerte

Die graphische Aufbereitung relevanter Messwerte über einen längeren Tageszeitraum, gilt als geeignetes Hilfsmittel bei der stetigen Optimierung des Trocknungsprozesses. Über die Veränderung der Messwerte werden trockenungsbedingte Zusammenhänge schnell erkenn- und auch erklärbar (Abb. 57).

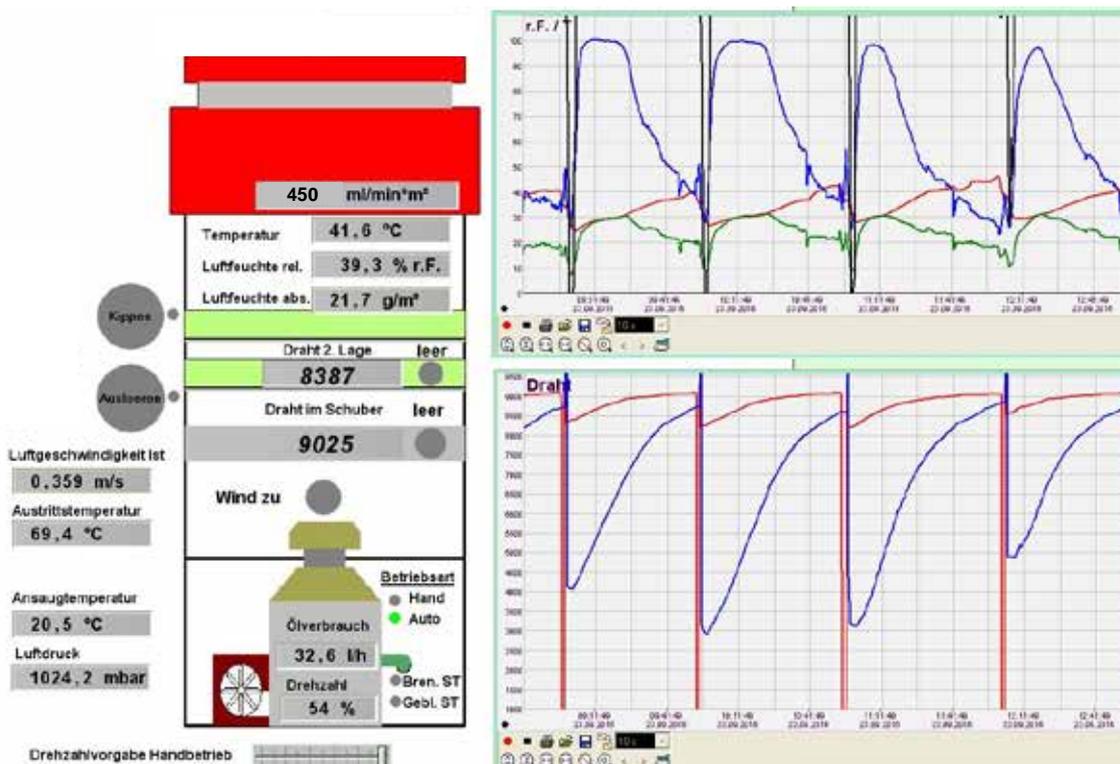


Abb. 57: Beispiel für die Anzeige und graphische Aufbereitung wichtiger Messwerte in einem Praxisbetrieb (Bild Hofer H., 2019)

In nachfolgenden Abbildungen wird an zwei Beispielen aufgezeigt, wie mit Hilfe von der Temperatur und relativen Feuchte der Darrabluft in Kombination mit dem Drahtmesswert in der Auszugshorde die Gleichmäßigkeit der Trocknung beurteilt und bei Bedarf durch Anpassung der Trocknungsparameter ein einheitlicher Befüll- und Entleer-Rhythmus eingestellt werden kann.

Abbildung 58 stellt ein Beispiel für einen einheitlichen Befüll- und Entleer-Rhythmus dar. Nach jedem Entleeren der Auszugshorde wird die Aufschütthorde ohne Zeitverzögerung sofort wieder mit Grünhopfen befüllt. Der Verlauf der Ablufttemperatur und -feuchte beweist, dass das freiwerdende Wasser stets ausreichend abtransportiert wird. Die gleichbleibenden Drahtmesswerte beim Einkippen und Entleeren (Sollwert) des Hopfens in der Auszugshorde weisen auf einen regelmäßigen und gleichmäßigen Trocknungsverlauf hin.

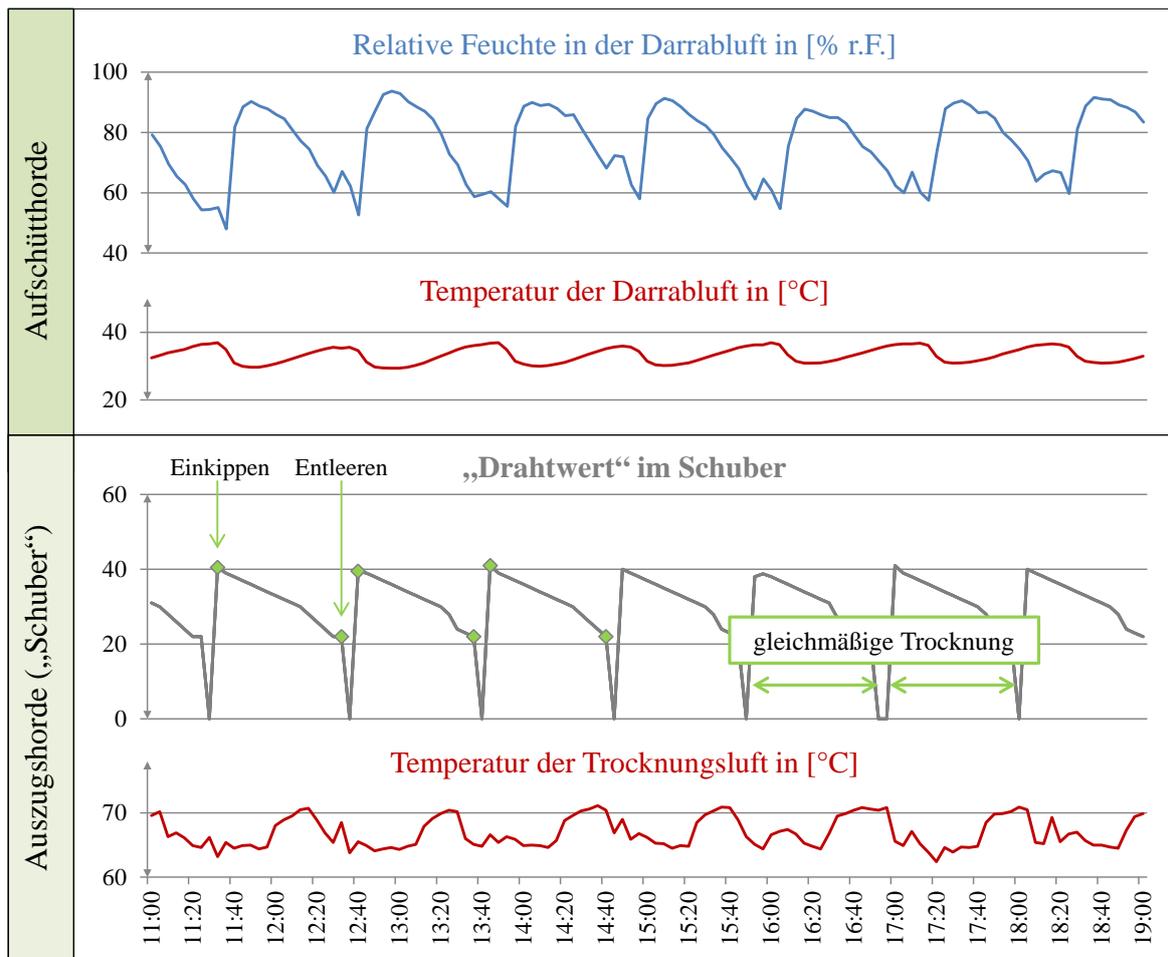


Abb. 58: Graphische Darstellung wichtiger Trocknungsparameter: Beispiel für einen gleichmäßigen Trocknungsverlauf

In Abbildung 59 ist anhand des Verlaufs der Ablufttemperatur und –feuchte erkennbar, dass das freiwerdende Wasser über der Aufschütthorde weder ausreichend noch schnell genug abtransportiert wird. Die Verweilzeit des Hopfens in der Aufschütthorde ist dadurch deutlich länger als in der Auszugshorde. Es befindet sich über einen langen Trocknungszeitraum kein Hopfen im Schubler, dadurch wird die mögliche Trocknungskapazität nicht ausgeschöpft. Da zusätzlich der Hopfen im Schubler zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe in der Aufschütthorde entnommen wird, führt die Unterbrechung des Trocknungsprozesses zwangsläufig zu einer überproportional längeren Trocknungszeit.

#### Praxishinweis:

Ursachen für einen uneinheitlichen Trocknungsverlauf liegen meist in einer zu hohen Schütthöhe, einer zu niedrigen Luftgeschwindigkeit oder einer zu hohen Trocknungstemperatur.

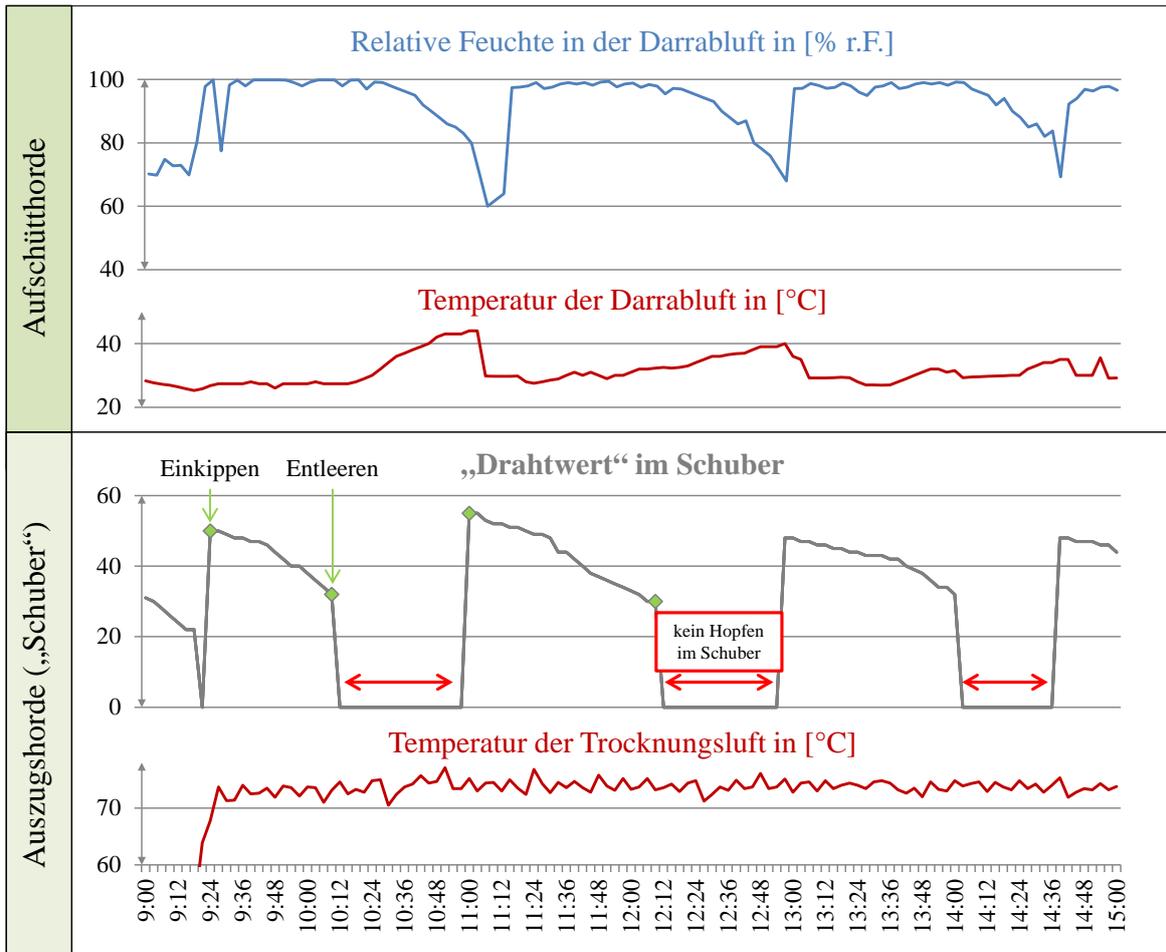


Abb. 59: Graphische Darstellung wichtiger Trocknungsparameter: Beispiel für einen ungleichmäßigen Trocknungsverlauf

9.1.1.12 Trocknungsprotokoll

Parallel zur graphischen Aufbereitung ist die Dokumentation der wichtigsten Messwerte eine unabdingbare Voraussetzung für die stetige Optimierung des Trocknungsprozesses. Durch die kontinuierliche Datenerfassung werden Unregelmäßigkeiten sofort erkannt. Ein nahtloses Reagieren und Gegenlenken sind möglich. Die frühzeitige Korrektur erforderlicher Trocknungsparameter gewährleistet einen einheitlichen Befüll- und Entleer-Rhythmus. Gleichzeitig sind die Aufzeichnungen in einem Trocknungsprotokoll eine wertvolle Hilfestellung, vor allem wenn die Trocknung von mehreren Personen bedient wird (Abb. 60).

Trocknungsprotokoll Ernte 20 13 Schlagbezeichnung: Hausgarten Darrfläche 16m<sup>2</sup>  
 Datum: 17.8. Sorte: Herkules  
 Temp. der Aussugluft: 10°C - 18°C Schüttgewicht in kg/m<sup>3</sup>: 59,5  $\gamma^* = 5800 \text{ kg}$   
 Trocknungstemperatur in °C: 62°C - 68°C Luftgeschwindigkeit in m/s (0,3 - 0,4m/s): 0,7-0,8 Heizstand/Verbrauch: 23<sup>m</sup> = 67,82 €

Darr-Nr.	Uhrzeit beim Befüllen bzw. Entleeren		Trocknungs-dauer in Std.	Werte in Aufschütthorde				Schütthöhe in cm	Schuber Drahtwerte		Bemerkungen
	Aufschütthorde	Schuber		nach Befüllen °C	% r. F.	beim Klippen °C	% r. F.		ein	aus	
62	6 <sup>30</sup>	10 <sup>10</sup>	3,20	30,0	35	36,2	58	500	54,7	48,7	
62	7 <sup>46</sup>	11 <sup>34</sup>	3,28	30,2	34	36,8	61	520	58,7	48,7	
63	8 <sup>43</sup>	12 <sup>24</sup>	3,35	29,1	35	37,5	55	535	48,7	48,7	
70	10 <sup>18</sup>	13 <sup>35</sup>	3,12	30,0	33	32,4	60	535	50,6	48,7	
71	11 <sup>27</sup>	14 <sup>43</sup>	3,20	30,0	34	32,8	60	545	50,3	48,7	
72	11 <sup>32</sup>	15 <sup>12</sup>	3,20	30,4	32	32,2	58	545	48,4	48,2	
73	11 <sup>44</sup>	15 <sup>02</sup>	3,18	30,0	34	32,4	56	545	48,7	48,2	
74	11 <sup>52</sup>	15 <sup>41</sup>	3,22	29,4	35	32,6	58	545	50,4	48,4	
75	11 <sup>52</sup>	16 <sup>32</sup>	3,22	29,4	35	32,0	58	545	48,5	48,7	
76	12 <sup>11</sup>	20 <sup>44</sup>	3,38	29,8	34	32,2	57	545	48,2	48,0	
77	12 <sup>24</sup>	21 <sup>34</sup>	3,20	29,2	34	32,7	56	535	47,4	48,2	Bohle aufgestellt
78	13 <sup>40</sup>	23 <sup>11</sup>	3,20	29,3	36	32,0	50	545	46,8	48,2	am 21 <sup>m</sup>
79	20 <sup>30</sup>	23 <sup>35</sup>	3,25	30,2	30	32,2	61	540	52,2	48,0	
80	22 <sup>06</sup>	3 <sup>11</sup>		30,1	32	36,3	60	520	49,7	48,4	
Trocknungsleistung in kg/m <sup>2</sup> und Stunde <sup>1)</sup> :										8,2	

1) siehe Beitrag 'Grünes Heff' Bereich Trocknung  
 2) unterschiedliches Schüttgewicht der Sorten erfordert Anpassung der Schütthöhe und Zustand des Grünhopfens  
 3) Berechnung: Trockenhopfen in kg/Darrfläche in m<sup>2</sup>/Betriebszeit Lüfterhitzer in Std. (Praxiswert: 4-10 kg/m<sup>2</sup>/Std)

Abb. 60: Praxisbeispiel für die Dokumentation wichtiger Messwerte in einem Trocknungsprotokoll

### 9.1.2 Hinweise zur praktischen Umsetzung bisheriger Erkenntnisse

Die beschriebene Einteilung in Trocknungsabschnitte verdeutlicht, dass eine effektive und qualitätserhaltende Trocknung am besten erreicht wird, wenn die Luftgeschwindigkeit und die Trocknungstemperatur regelbar sind. Die optimale Trocknungstemperatur beträgt ca. 62-68°C. Es sei angemerkt, dass Hochalphasorten bedingt durch den niedrigeren Wassergehalt und ihre Doldenbeschaffenheit im ersten und zweiten Trocknungsabschnitt tendenziell mit höheren Temperaturen getrocknet werden können als Aromasorten. Die Trocknungsparameter sind derart einzustellen, dass stets ein einheitlicher Entleer- und Befüllrhythmus gewährleistet ist. Praxiserfahrungen bestätigen mittlerweile, dass im ersten Trocknungsabschnitt zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe, durch niedrigere Trocknungstemperaturen höhere Trocknungsleistungen und bessere Hopfenqualitäten bei gleichzeitig niedrigerem Energieaufwand erzielbar sind. Durch zu hohe Trocknungstemperaturen oder zu niedrige Luftgeschwindigkeiten, wird durch die Trocknungsluft mehr Wasserdampf unmittelbar nach dem Befüllen der Aufschütthorde aus dem Hopfen im Schuber und in der Mittelhorde aufgenommen. Als Folge eines bereits zu hohen Sättigungsgrads kommt es unter diesen Bedingungen in der Aufschütthorde oder spätestens beim Ausströmen meist zur Kondensation und zu einer starken Abkühlung der Darrabluft. Qualitätsminderungen und längere Trocknungszeiten sind unvermeidbar. Durch niedrigere Temperaturen oder höhere Luftgeschwindigkeiten nimmt die Trocknungsluft weniger Wasser vom Hopfen in den unteren Horden auf. Je weniger die Trocknungsluft beim Einströmen in die Aufschütthorde mit Wasserdampf gesättigt ist, desto schneller wird das freie Wasser vom Hopfen in der Aufschütthorde abgeführt.

Bei Beachtung dieser Zusammenhänge wird es möglich, in jeder Trocknungsanlage die maximale Trocknungsleistung bei den einzelnen Hopfensorten auszuschöpfen. Vom Befüllen bis zum Entleeren der Aufschütthorde dauert die Trocknungszeit je nach eingestellter Temperatur ca. 60-80min. Diese Zeit ist für den Wasserentzug erforderlich. Deshalb ist es

ausschließlich nur durch Erhöhung der Schütthöhe möglich, die Trocknungsleistung zu steigern, weil in der gleichen Zeit mehr Hopfen getrocknet werden kann. Die Schütthöhe darf soweit erhöht werden, bis bei maximal möglicher Gebläseleistung und einer gleichzeitigen Reduzierung der Trocknungstemperatur bis auf 60-62°C zum Zeitpunkt der höchsten Wasserabgabe eine Darrablufttemperatur von ca. 30°C nicht unterschritten wird. Sobald die Temperatur der Darrabluft ansteigt bzw. die relative Feuchte abnimmt, sollte im zweiten Trocknungsabschnitt die Trocknungstemperatur erhöht werden. Durch eine Reduzierung der Trocknungstemperatur im dritten Trocknungsabschnitt bzw. am Ende eines Trocknungsdurchgangs verringert sich die Gefahr einer Übertrocknung des Trockenhopfens in der Auszugshorde. Da beim nächstmaligen Befüllen der Aufschütthorde, der unmittelbar in die darunterliegenden Lagen eingefüllte Hopfen somit einer geringeren Trocknungstemperatur ausgesetzt ist, wird eine unkontrollierte Wasserfreisetzung mit all den beschriebenen negativen Auswirkungen verhindert.

## **9.2 Bandtrockner**

### **9.2.1 Ausgangssituation**

In vielen Betrieben gelangt die Hopfentrocknung aufgrund stetig ansteigender Hopfenflächen zunehmend an ihre Grenzen. Eine Erhöhung der Trocknungskapazität bzw. -leistung ist meist unabdingbar. Aufgrund zahlreicher neuer Erkenntnisse aus Versuchen zur Optimierung der Bandtrocknung in Kombination mit entsprechenden Praxiserfahrungen stellt diese Trocknungsart inzwischen für viele Betriebe eine wirtschaftlich interessante Alternative gegenüber der konventionellen Hordentrocknung dar.

Anstatt des Neubaus einer klassischen Hopfendarre, entschieden sich in den letzten Jahren immer mehr Betriebe für die Anschaffung eines gebrauchten Bandtrockners. Durch das begrenzte Angebot am Markt werden sich zukünftig Anfragen nach speziell für die Hopfentrocknung konzipierten Bandtrocknern häufen.

### **9.2.2 Technische Hilfsmittel und Grundeinstellung**

Bei den Versuchen zur Optimierung der Hopfentrocknung in Hordendarren konnte die Trocknungsleistung gesteigert, der Energieeinsatz optimiert sowie die Qualität verbessert werden. Entscheidend hierbei ist das richtige Verhältnis der Parameter Trocknungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Schütthöhe bzw. Schüttgewicht. Voraussetzung ist eine Messtechnik, mit der die wichtigsten Trocknungsparameter nicht nur erfasst, sondern insbesondere auch graphisch dargestellt werden können. Überträgt man die Erkenntnisse aus der Horden- auf die Bandtrocknung, werden auch bei letzterem die dort ablaufenden Trocknungsvorgänge gut erklär- und damit auch regelbar.

Analog zur klassischen Hordendarre wird auch beim Bandtrockner der Hopfen in drei Lagen kontinuierlich getrocknet. Der feuchtere Grünhopfen befindet sich auf dem obersten Band, während der trockenere Hopfen bis zur optimalen Endfeuchte auf dem untersten Band verbleibt. Mittels Abluftventilatoren wird die feuchte Luft aus dem Bandtrockner abgesaugt. Durch Messung der Temperatur und der relativen Feuchte der Abluft, sind die Leistungen der Absaugventilatoren am besten über Frequenzumrichter regelbar. Im Rahmen diverser Versuche konnte aufgezeigt werden, dass die äußere Qualität des Hopfens am besten erhalten bleibt, wenn die relative Feuchte der Abluft im ersten Trocknungsabschnitt des Bandtrockners unter 50% r.F. verbleibt. Dadurch ist garantiert, dass die den Dolden entzogene Feuchtigkeit schnellstmöglich abtransportiert wird. Die maximal zulässige relative Abluftfeuchte ist am einfachsten durch eine regelmäßige Bonitur auf Farbe und Glanz des fertig getrockneten Hopfens ermittelbar. Zum Zeitpunkt der größten Wasserabgabe des

Hopfen bestimmt die Luftgeschwindigkeit – und nicht die Trocknungstemperatur – die Trocknungsgeschwindigkeit. Deshalb führen Trocknungstemperaturen von über 65°C im ersten Drittel des oberen Bandes, aufgrund einer zu hohen Anreicherung der Trocknungsluft mit Wasserdampf, sehr schnell zu Qualitätseinbußen, ungleichmäßiger Trocknung und geringerer Trocknungsleistung (Abb. 61).

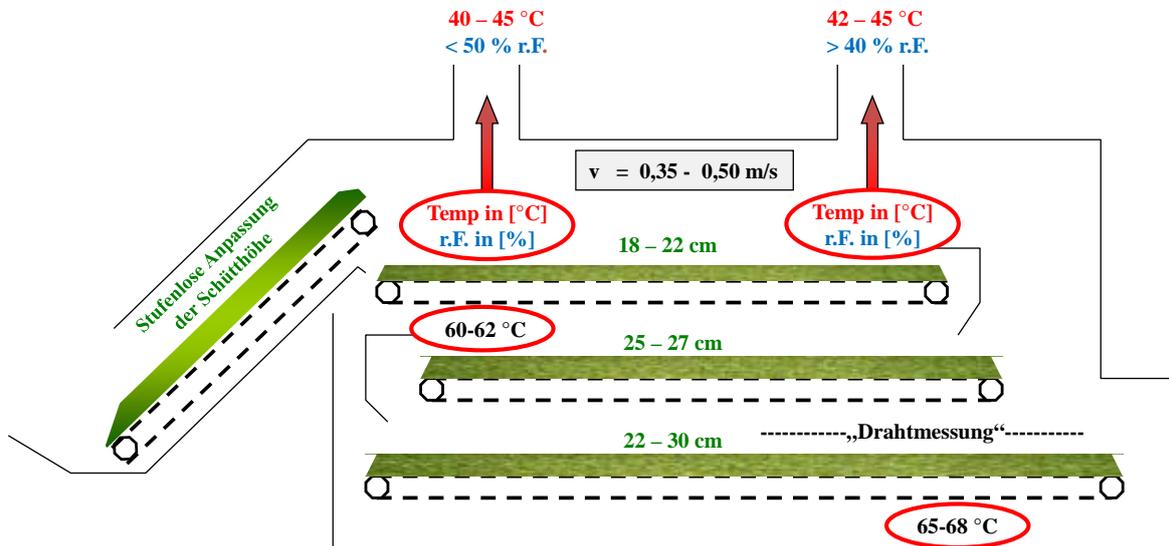


Abb. 61: Messpunkte und mögliche Grundeinstellungen beim Bandtrockner

Damit der Hopfen nicht zu feucht vom oberen auf das mittlere Band fällt, sollte der Trocknungsverlauf zumindest über die Temperatur und die relative Feuchte der Trocknungsabluft im letzten Viertel des oberen Bandes kontrolliert werden, um bei Bedarf die Einstellungen anpassen zu können. Der Wert der relativen Feuchte der Abluft darf nicht unter 40% r.F. fallen, da ansonsten der Heizölverbrauch deutlich ansteigen würde.

Damit der Hopfen nicht übertrocknet wird, kann auch hier mit einem Verfahren zur konventionellen kapazitiven Feuchtigkeitsbestimmung, dem bereits in 9.1.1.3 beschriebenen Messverfahren „Draht im Schubler“, ermittelt werden. Dabei wird in der letzten Hälfte des unteren Bandes ein Messdraht oder ein Edelstahlrohr parallel zur Bandlaufrichtung angebracht, an dem eine Wechselspannung angelegt wird. Speziell beim Bandtrockner bietet sich die Verwendung einer Messlanze an, da der Hopfen dann widerstandslos vorbeigleiten kann und es zu keinen „Aufstauungen“ des zu trocknenden Guts kommt (Abb. 62). Über ein Auslesegerät wird dann ein dimensionsloser Wert oder per Bildschirmanzeige eine graphische Auswertung angezeigt, die von der Hopfenfeuchte abhängig ist. Gilt in diesem Messbereich der eingestellte Sollwert als noch nicht erreicht, da der Hopfen noch zu feucht ist, wird auf Basis der Messergebnisse entweder die Bandgeschwindigkeit des unteren Bandes reduziert oder die Trocknungstemperatur erhöht. Ist der Hopfen im gemessenen Abschnitt hingegen zu trocken, wird die Bandgeschwindigkeit erhöht bzw. die Trocknungstemperatur verringert, um entsprechend gegen zu wirken.

Vorgegebene Sollwerte können grundsätzlich am besten eingehalten werden, wenn die Bandgeschwindigkeiten des Auftragsbandes und der drei Trocknungsbänder jeweils separat einstellbar sind.



Abb. 62: Kapazitive Feuchtigkeitsmessung mittels einer Messlanze im Bandrockner

### 9.2.3 Technische Voraussetzungen

Für eine ordnungsgemäße Trocknung muss der Bandrockner über die gesamte Bandbreite gleichmäßig mit Grünhopfen beschickt werden. Grundvoraussetzung hierfür ist die gleichmäßige Beladung des Auftragsbandes, ohne hierbei Unterschiede in der Schüttdichte herbeizuführen (Abb. 63).



Abb. 63: Schichtweise Beladung des Auftragbandes mit einem Befüllband

Das seitliche Einströmen der Trocknungsluft verursacht derzeit vor allem bei den in der Praxis überwiegend vorherrschenden Dreibandrocknern tschechischer Bauart ein Freibleasen von Löchern. Zumal an den Rändern die Schüttung abfällt, trocknet der Hopfen in diesem Bereich schneller. Aufwirbelungen und Freibleasen von Löchern sind bereits am Ende des obersten Bandes die Folge (Abb. 64). Durch Anbringung von Gummilappen im Außenbereich des Auftragbandes sowie Kürzung der Stacheln der Dosierwalze an den Rändern, ist die Situation verbesserbar. In manchen Trocknern ermöglichen individuell eingebaute

Vorrichtungen eine gleichmäßigere Verteilung des Hopfens im vorderen Bereich des oberen Trocknungsbandes.



*Abb. 64: Aufwirbelungen und Freiblasen von Löchern gegenüber der Einströmseite der Trocknungsluft*

Ähnlich der obersten Lage in der Darre bildet sich auch beim Bandtrockner am Ende des obersten Bandes ein signifikantes vertikales Feuchtegefälle in der Schüttung. Der direkt auf dem Stangengewebband aufliegende Hopfen ist weitaus trockener als der Hopfen an der Oberfläche der Schüttung. Somit nimmt die Feuchtigkeit, im Querschnitt der Schüttung betrachtet, von unten nach oben zu. Diese ungleichmäßige Trocknung wird nur teilweise durch zweifaches Umschichten der Hopfenschüttung beim Fallen auf das jeweils darunter liegende Band ausgeglichen. Durch den Einbau eines Produktwenders oder speziell konzipierter Umwälz- und Umschichtungsvorrichtungen im Bereich der ersten Hälfte des oberen Bandes kann die Gleichmäßigkeit der Trocknung verbessert werden.

Naturgemäß wählt Luft grundsätzlich den Weg des geringsten Widerstands. Über Schlitze, Öffnungen und Bereiche mit mangelnder oder gar vollständig fehlender Abdichtung strömt die Trocknungsluft leichter, anstatt ihren eigentlichen Weg durch die Hopfenschichten zu nehmen. Dadurch geht wertvolle Trocknungsluft verloren. Ein Überströmen verschlechtert die Luft- und Wärmeverteilung, verringert die Trocknungsleistung und bewirkt eine ungleichmäßigere Abtrocknung. Abbildung 65 zeigt Beispiele mit individuell umgesetzten Abdichtungen.



*Abb. 65: Praxisbeispiele für Bandabdichtungen (Anfang und Ende oberes Band sowie Übergang zu zweitem Band)*

### 9.2.4 Schütthöhe und Luftgeschwindigkeit

Wie in Hordendarren besteht auch beim Bandrockner eine enge Korrelation zwischen Schütthöhe und Luftgeschwindigkeit. Dies wird nachfolgend an einem Praxisbeispiel erläutert.

Während eines Erntetags wurden bei einem Bandrockner mit einer Grundfläche von  $18\text{m}^2$  mehrmals die aktuelle Luftgeschwindigkeit in  $[\text{m/s}]$  in Abhängigkeit vom Ölverbrauch und der Temperaturdifferenz zwischen Trocknungs- und Ansaugluft mit Hilfe der bereits in 9.1.1.6 beschriebenen Methode zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit ermittelt. Bei einer installierten Gebläseleistung des Warmlufterzeugers von rechnerisch  $833[\text{W}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}]$  waren Luftgeschwindigkeiten der Trocknungsluft von bis zu  $0,55[\text{m/s}]$  realisierbar.

Über Transportbänder gelangte der fertig getrocknete Hopfen vom Bandrockner in zwei zur Verfügung stehende Konditionierungskammern. Der Zeitpunkt und die Dauer der Befüllung jeder einzelnen Kammer wurden in einem Trocknungsprotokoll dokumentiert und der konditionierte Hopfen beim Absacken gewogen. Dadurch konnte die Trocknungsleistung in  $[\text{kg}_{\text{Trockenhopfen}}/\text{m}^2_{\text{Trocknungsfläche}}/\text{h}_{\text{Trocknungszeit}}]$  für die jeweilige Befülldauer der Konditionierungskammer bestimmt werden. Durch Zuordnung der ebenfalls in diesem Zeitabschnitt ermittelten Luftgeschwindigkeit war es möglich, eine Relation zwischen Luftgeschwindigkeit und Trocknungsleistung herzustellen.

Während der Trocknung wurde bei gleichbleibender Schütthöhe und konstanter Drehzahl des Ansauggebläses eine stets unterschiedliche Luftgeschwindigkeit in  $[\text{m/s}]$  ermittelt. Begründbar ist dies mit dem unterschiedlichen Schüttgewicht des Grünhopfens: Innerhalb einer Sorte ändert sich das Schüttgewicht sogar während eines Erntetages in Abhängigkeit von der Reifezeit, den Wachstumsbedingungen, der Witterung und des Feuchtegehalts. Zusätzlich unterscheiden sich die Sorten im spezifischen Gewicht und im Trocknungsverhalten.

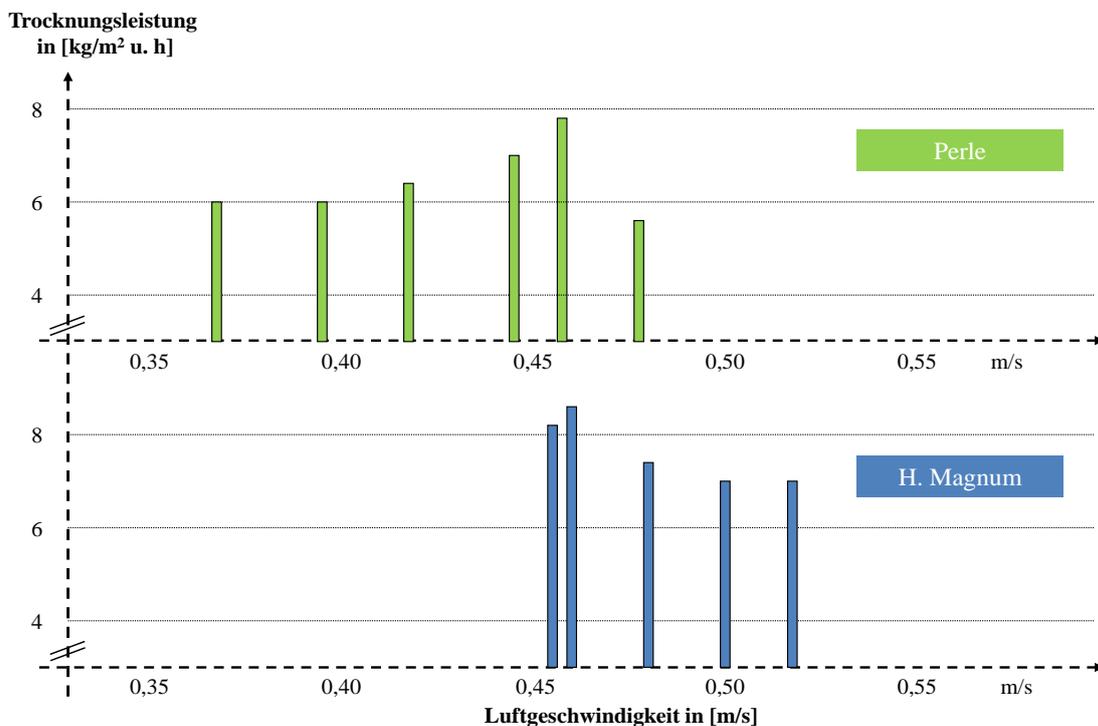


Abb. 66: Trocknungsleistung der Sorten Perle und Hallertauer Magnum in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei gleichbleibender Schütthöhe

Abbildung 66 zeigt den Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsleistung. Sowohl bei der Sorte Perle als auch bei der Sorte Hallertauer Magnum wurden bei Luftgeschwindigkeiten von ca. 0,45m/s die höchsten Trocknungsleistungen erzielt. Des Weiteren konnte das unterschiedliche Trocknungsverhalten der jeweiligen Sorten aufgezeigt werden. Bei gleicher Schütthöhe ergaben sich bei der Sorte Perle eher niedrigere und bei der Sorte Hallertauer Magnum tendenziell zu hohe Luftgeschwindigkeiten. Deshalb sollte beim Bandtrockner durch eine stetige Anpassung der Schütthöhe die Luftgeschwindigkeit derart eingestellt werden, dass immer die optimale Trocknungsleistung erzielt wird.

*Praxishinweis:*

Die Messungen bestätigen, dass die richtige Luftgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Trocknungsleistung besitzt. Da beim Bandtrockner alle drei Trocknungsebenen mit unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten durchströmt werden, ist nur über die Gesamtluftmenge bzw. über die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit eine Relation zur Trocknungsleistung herstellbar. Die Einhaltung der erforderlichen Luftgeschwindigkeit kann am einfachsten durch die ständige Regulierung und Anpassung der Schütthöhe erreicht werden.

### 9.2.5 Umsetzung bisheriger Erkenntnisse

Im Rahmen eines von der Erzeugergemeinschaft Hopfen HVG e.G. finanzierten Forschungsprojekts zum Thema „Entwicklung von Luftverteilsystemen in Bandtrocknern“ wurde eine Software zur Steuerung und Regelung von Bandtrocknern entwickelt, bei deren Umsetzung alle bis dato vorliegenden Erkenntnisse und Forschungsergebnisse berücksichtigt wurden. Im Erntejahr 2019 war diese Software bei fünf Praxisbetrieben mit baugleichen Dreibandtrocknern tschechischer Bauart erfolgreich im Einsatz (Abb. 67). Dies ermöglicht den direkten Vergleich gewonnener Erfahrungen, Erkenntnisse und Ergebnisse, um gemeinsam mit der Hopfenforschung die Trocknungsprozesse weiter zu optimieren.



Abb. 67: Anzeige relevanter Einstellungen und Messwerte bei der Bandtrocknersteuerung

Auf Basis der über dem oberen Trocknungsband gemessenen Temperaturen und relativen Luftfeuchten der Abluft erfolgt die automatische Anpassung der Schütthöhe (Abb. 68). Weichen voreingestellte Sollwerte ab, z.B. aufgrund einer Änderung der Witterung,

Schüttdichte oder des Trocknungsverhaltens, wird die Schütthöhe automatisch systemseitig nachgeregelt. Erfolgt die Anpassung der Schütthöhe früh genug, brauchen andere Trocknungsparameter für das Aufrechterhalten des bisherigen Trocknungsablaufs in aller Regel nicht verändert werden.



*Abb. 68: Messung der Temperaturen und relativen Luftfeuchten über dem oberen Trocknungsband des Bandtrockners zur automatischen Schütthöhenregelung*

### **9.2.6 Regelmäßige Kontrolle auf äußere Qualität**

Das richtige Verhältnis der Trocknungsparameter ist am besten überprüfbar, indem während eines Erntetags mehrere Proben des mit dem Bandtrockner frisch getrockneten Hopfens für eine Bonitur auf äußere Qualität entnommen werden (Abb. 69).



*Abb. 69: Bonitur auf äußere Qualität von Hopfenproben aus dem Bandtrockner*

Durch die zeitliche Zuordnung relevanter, per Trocknungsprotokoll dokumentierter Messwerte wird es möglich, die richtigen Einstellungen zum Erzielen der optimalen Qualität

herauszuarbeiten. Dokumentation und Bonitur sind essenzielle Maßnahmen und gleichzeitig Voraussetzung für die Optimierung der Trocknungsabläufe!

Werden die Trocknungsparameter insbesondere bei vorwiegend nasser oder wechselhafter Witterung in Abhängigkeit der äußeren Bedingungen nicht nachgeregelt, ergeben sich im Zuge eines Erntetags zumeist große Unterschiede in der äußeren Qualität des getrockneten Hopfens (Abb. 70).



*Abb. 70: Farbe und Glanz von Trockenhopfen der Sorte Perle während eines Erntetags bei gleichbleibender Einstellung der Trocknungsparameter*

### 9.2.7 Vermeidung von Kondensationsluft

In aller Regel wird der Bandtrockner am Abend aus- und erst am darauffolgenden Morgen wieder eingeschaltet. Währenddessen verbleibt der zum Zeitpunkt des Ausschaltens im Bandtrockner befindliche Hopfen im Trockner. Jedoch wäre insbesondere beim Bandtrockner ein ununterbrochener Trocknungsprozess wünschenswert, da sich nach erneutem Einschalten das Erreichen der gewünschten Trocknungsbedingungen stets aufs Neue als kompliziert und verhältnismäßig langwierig erweist. Die Qualität des über Nacht im Trockner verbleibenden, noch nicht fertig getrockneten Hopfens leidet unter Kondenswasser, das sich im Zuge der abkühlenden Temperaturen während der Nacht bildet. Dieses Kondenswasser verursacht insbesondere beim Hopfen auf dem obersten Trocknungsband teils erhebliche Verluste hinsichtlich der äußeren Qualität wie Farbe und Glanz. Aus diesem Grund ist es ratsam, am Ende der Trocknung nach Abschalten des Brenners zunächst den Hopfen weiter zu belüften. Hat sich die Temperatur im Bandtrockner dann bis auf Umgebungstemperatur abgekühlt, sollte zunächst das Druckgebläse und schlussendlich auch das Absauggebläse abgeschaltet werden. Um während der Ruhephase dem Entstehen möglicher Umgebungsfeuchten um den Hopfen entgegenzuwirken, sind zumindest geringe Luftströme innerhalb des Bandtrockners zu gewährleisten. Hierfür müssen alle vorhandenen Luftklappen geöffnet werden. Steuerungen oder Regelungen neueren Datums aktivieren während der Nachtstunden nach Erreichen einer vorgegebenen Luftfeuchte im Trockner automatisch eine sogenannte Antikondensationsbelüftung. Dabei werden kurzzeitig die Absaug- und Druckgebläse des Bandtrockners zum Abtransport der feuchten Luft eingeschaltet.

### 9.2.8 Aktuelle Situation

Alle bislang zur Optimierung der Hopfentrocknung in Hordendarren gewonnenen Erkenntnisse konnten während der letzten Jahre auch auf Dreibandrockner kleinerer Bauart mit einer Grundfläche von bis zu 30m<sup>2</sup> übertragen werden. Bei ausreichender Dimensionierung sind mittlerweile mit derartigen Bandtrocknern vergleichbare Trocknungsleistungen erzielbar, ähnlich wie bei Hordendarren. Grundvoraussetzung hierfür sind neben einer gezielten Luftführung und einer gleichmäßigen Luft- und Wärmeverteilung, vor allem frequenzgeregelte Abluftventilatoren, eine Schütthöhenanpassung durch separate Regelung der Bandgeschwindigkeit des Auftragsbandes sowie eine unabhängige Einstellung der Bandgeschwindigkeit des unteren Trocknungsbandes.

Bei Hordendarren ist ein einheitlicher Befüll- und Entleer-Rhythmus durch ein aufeinander abgestimmtes Verhältnis der Trocknungsparameter Temperatur, Luftgeschwindigkeit und

Schütthöhe erreichbar. Beim Bandtrockner kommt jedoch erschwerend hinzu, dass zusätzlich auch die Bandgeschwindigkeit der einzelnen Trocknungsbänder zu regeln ist, um einen entsprechenden gleichmäßigen Trocknungsrhythmus zu erreichen. Durch stetige Optimierung des Trocknungsprozesses unter Zuhilfenahme intelligenter Mess-, Steuer- und Regelungstechnik konnte während der vergangenen Jahre auch bei Dreibandtrocknern tschechischer Bauart mit einer Trocknungsgrundfläche von ca.  $55\text{m}^2$  die Trocknungsleistung um ca. 20-25% auf  $5\text{-}7\text{ kg/m}^2/\text{h}$  erhöht werden.

### 9.2.9 Erforderliche technische Verbesserungen

Im Hopfenanbauggebiet Hallertau sind derzeit überwiegend gebrauchte Dreibandtrockner tschechischer Bauart im Einsatz. In den letzten Jahren konnten hierbei durch Messungen, Versuche sowie Dokumentationen und Auswertungen zahlreiche neue Erkenntnisse gewonnen werden. In Abhängigkeit davon, wird anhand dieses Bandtrocknertyps nachfolgend der künftige Forschungsbedarf erläutert bzw. aufgezeigt. Weiterentwicklungen wären sowohl bei der Nachrüstung und dem Wiederaufbau gebrauchter Trockner als auch beim Neubau von Bandtrocknern umsetzbar.

#### 9.2.9.1 Luftverteilsystem

Mittlerweile sind mit Bandtrocknern tschechischer Bauart aus energetischer und qualitativer Sicht sehr gute Ergebnisse erzielbar. Für viele Betriebe stellt eine Steigerung ihrer aktuell zu niedrig erreichbaren Trocknungsleistung – vergleichbar mit der erzielbaren Leistung einer Hordendarre nach aktuellem Stand der Forschung und Technik – den wohl wichtigsten Forschungsbedarf dar. Bei Hordendarren besteht eine enge Korrelation zwischen der installierten Gebläse- und der erzielbaren Trocknungsleistung. Im Gegensatz hierzu konnte beim Bandtrockner bislang sogar bei einer für die Trocknungsfläche überdimensionierten Gebläseleistung die Trocknungskapazität nicht wesentlich gesteigert werden. Die Ursache hierfür ist in der sich bei steigendem Luftdurchsatz verschlechternden Luftführung begründet. Ausschließlich durch eine gezielte Luftführung wird es möglich, dass die Trocknungsluft in größeren Mengen dorthin gelangt, wo auch die größte Wasserfreisetzung erfolgt. Somit wird eine Steigerung der Trocknungsleistung nur dann möglich, wenn es gelingt, dass die Trocknungsluft den noch feuchten Hopfen im vorderen Drittel des oberen Trocknungsbandes mit höheren Luftgeschwindigkeiten durchströmt, als dies bislang der Fall ist. Bei der standardmäßigen Konzeption der Luftführung kann auch bei steigendem Luftdurchsatz die Luftgeschwindigkeit im vorderen Drittel des Trocknungsbandes nur geringfügig erhöht werden. Da Luft grundsätzlich den Weg des geringsten Widerstands wählt, strömt auch die Trocknungsluft vielmehr in die Trocknungszonen, in denen der Hopfen bereits stärker getrocknet ist. Dadurch erhöht sich die Gefahr einer ungleichmäßigen Trocknung und somit des Freiblasens von Löchern im letzten Drittel des oberen Trocknungsbandes.

Luftgeschwindigkeitsermittlungen belegen diese aktuell nach oben begrenzt mögliche Trocknungsleistung, da bislang bei diesem Bandtrocknertyp keine höheren Luftgeschwindigkeiten als  $0,32\text{m/s}$  ermittelt werden konnten.

Erfahrungen aus der Praxis bestätigen, dass nach einer Umrüstung von Luftverteilsystemen mit ursprünglich quer zur Bandlaufrichtung einströmender Luft, auf eine Luftverteilung mit einem in Bandlaufrichtung umgelenkten Luftstrom, deutlich höhere Trocknungsleistungen bei gleichzeitig homogenerer Trocknung erzielbar sind. Technisch umsetzbar ist dies über eine Kombination aus Verteil- und Glättungsgittern oder mit speziell für den Bandtrockner konzipierten Modulkassetten. „Die Strömungsumlenkung um  $90^\circ$  ist von großer Bedeutung für jeden Bandtrockner. In jedem Warmluftbandtrockner muss die Luft verzögert oder beschleunigt, gerichtet, (um)gelenkt, aufgeteilt und gleichmäßig an das Trockengut geführt

werden. Eine strömungstechnisch richtige Gestaltung des Trockners führt zu verringerten Druckverlusten und damit zu einem reduzierten Elektroenergieverbrauch für die Ventilatoren.“ (Heindl A., 2015).

#### 9.2.9.2 Abluftsystem

Neben zuvor genannter Luftverteilung erweist sich das standardmäßige Abluftsystem der Bandtrockner als weiterer Schwachpunkt hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Trocknungsleistung. Über einzelne Schächte, die über den eigentlichen Trocknungszonen positioniert sind, gelangt die Abluft über einen Sammelkanal durch ein zentrales Sauggebläse ins Freie (Abb. 71).



Abb. 71: Abluftsystem beim Dreibandtrockner tschechischer Bauart

Die Öffnungsquerschnitte der einzelnen Schächte sind über Klappen verstellbar, deren Einstellung bislang rein durch Probieren und anhand von Erfahrungswerten erfolgt. Durch die nur sehr grobe Einstellmöglichkeit kann auf den Trocknungsverlauf jedoch nur in geringem Maß Einfluss genommen werden. Bei Bandtrocknern kleinerer Bauart und mit geringerer Trocknungsfläche wird die Abluft hingegen in der Regel über zwei Abluftschächte abgesaugt. Hierbei wird die Leistung der frequenzgesteuerten Abluftventilatoren in Abhängigkeit der Sollwerte von Temperatur und relativer Feuchte der Abluft geregelt. Sobald der Hopfen sein Trocknungsverhalten ändert, wird mittels zuvor genannter Feinjustierung derart entgegengewirkt, sodass hierbei keine Anpassung der Schütthöhe erforderlich wird. Erst eine gravierendere Abweichung der Sollwerte von Temperatur und relativer Feuchte der Abluft bedingt eine Anpassung der Schütthöhe.

Aus obig genanntem Grund ist es in Erwägung zu ziehen, das standardmäßige Abluftsystem der Bandtrockner tschechischer Bauart derart umzubauen, dass die Abluft zumindest über zwei voneinander unabhängigen frequenzgeregelten Abluftventilatoren abgeführt wird: Während der eine Ventilator die feuchte Abluft im vorderen Drittel des Trockners absaugt, bedient der andere Ventilator die restliche Trocknungsfläche.

Beim Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen in Hordendarren wird die gesamte Abluft mithilfe von Abluftgebläsen über einen Wärmetauscher hinweg ins Freie, wie in 10.5 beschrieben, abgeführt. Die Leistungen und Wirkungsgrade der Druck- und Sauggebläse sind so aufeinander abgestimmt, dass die Luftmengen von Zu- und Abluft stets identisch sind. Durch energieeffiziente frequenzgeregelter Hochdruckgebläse wird die Abluft mit einem derartigen Druck abgesaugt, dass über der Aufschütthorde stets ein permanenter Unterdruck vorherrscht. Infolge des einheitlichen statischen Unterdrucks, konnte in mehreren

untersuchten Hordendarren auf der gesamten Trocknungsfläche eine gleichmäßigere Trocknung festgestellt werden.

### 9.2.9.3 Abluftventilatoren

Überträgt man diese Erkenntnis auf den Bandrockner, wird die essenzielle Bedeutung druckstabiler Abluftventilatoren für die erzielbare Trocknungsleistung ersichtlich. Derzeit erfolgt die Absaugung bei den Dreibandrocknern tschechischer Bauart über vorwärtsgekrümmte Gebläse aus den 1970er Jahren mit einer installierten Leistung von meist 30kW. Der ohnehin schlechte Wirkungsgrad dieser Ventilatoren ist zudem im Saugbetrieb auch noch niedriger als im Druckbetrieb. Da die Summe der installierten Gebläseleistung der Warmluftherzeuger beim Bandrockner meist höher ist als die Absaugleistung und zusätzlich die Ventilatoren der Wärmezuführung einen höheren Wirkungsgrad aufweisen, sind diese lediglich im Teillastbetrieb ausnutzbar. Mit zunehmender Erhöhung des Luftstroms der Zuluft bei gleichbleibender Drehzahl des Abluftgebläses ist die Trocknungsleistung demzufolge nicht steigerbar. Jedoch erhöht sich die Gefahr einer ungleichmäßigen Trocknung mit Freiblasen von Löchern infolge zu hoher Luftgeschwindigkeiten. Somit wird der nächste Optimierungsschritt erst dann möglich, wenn sich sowohl für die Zu- als auch für die Abluftgebläse ein optimaler Betriebspunkt einstellen lässt.

## 10 Alternative Energiequellen

Zur Einsparung fossiler Energieträger nimmt das Interesse zum Einsatz alternativer Energiequellen insbesondere an Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung bei der Hopfentrocknung zu. Für deren effizienten Einsatz gilt es, nachfolgend ausgeführte Grundsätze und Zusammenhänge zu beachten.

### 10.1 Vorwärmung der Ansaugluft

Je höher die Temperatur der vom Warmluftherzeuger angesaugten Luft ist, desto mehr reduziert sich der zur Lufterwärmung erforderliche Heizölverbrauch bei gleicher Trocknungsleistung. Mit der durch alternative Energiequellen erzeugten Wärme kann die Ansaugluft der Trocknung vorgewärmt und somit der Heizölbedarf verringert werden. Die mögliche Einsparung in  $[I_{\text{Heizöl}}/h_{\text{Trocknung}}]$  richtet sich nach der Nennwärmeleistung der alternativen Energiequelle. Die Bereitstellung von 10kWh Wärme entspricht einem Äquivalent von 11 eingespartem Heizöl. Basierend auf dieser Umrechnung ist die effektive Wärmeleistung einer alternativen Energiequelle einfach ermittelbar. Demzufolge ersetzt beispielsweise eine Hackschnitzelheizung mit einer Leistung von 100kW und einem 90%igen Wirkungsgrad 9l Heizöl pro Stunde. Das zum Erreichen der geforderten Trocknungsleistung resultierende Leistungsspektrum der eingesetzten Ölbrenner liegt je nach Anlagengröße in einem Bereich von ca. 300–1.200kW. Anhand des hohen Energiebedarfs der in der Praxis verwendeten Ölbrenner ist erkennbar, dass der hierdurch bedingte Heizölverbrauch lediglich anteilmäßig durch zusätzliche alternative Wärmequellen ersetzbar ist.

Die Vorwärmung der Ansaugluft erfolgt über sogenannte Warmwasser-Heizregister. Dieses wird vom erwärmten Wasser der zusätzlichen alternativen Energiequelle von im Betrieb bereits vorhandenen Hackschnitzelheizungen oder aus der Abwärme von Biogasanlagen durchflossen, sodass sich die hindurchströmende Ansaugluft erwärmt (Abb. 72).

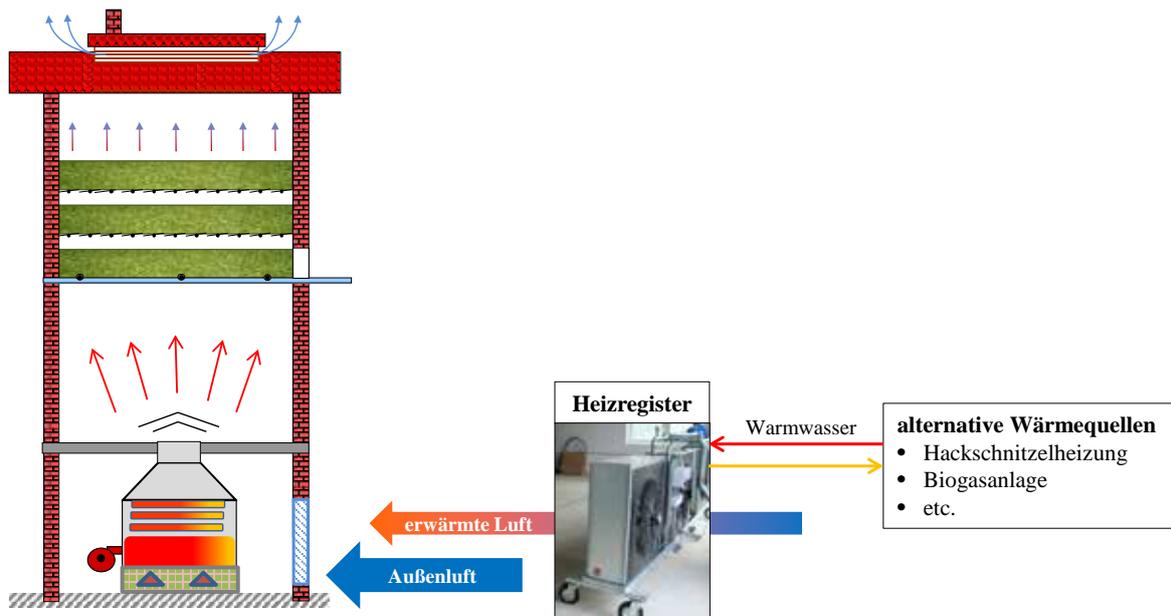


Abb. 72: Prinzip der Vorwärmung der Ansaugluft mittels Warmwasser-Heizregisters

Diesbezügliche Dokumentationen zeigen Wirkungsgradunterschiede bei in der Praxis installierten Heizregistern von 20-80% auf. Gründe für die signifikanten Abweichungen im Wirkungsgrad waren die unterschiedlichen Arten und Positionierungen der Heizregister.



Abb. 73: Positionierung eines Warmwasser-Heizregisters mit Gebläse im Ansaugluftstrom zweier Warmluftferzeuger

## 10.2 Positionierung der Heizregister

Für eine optimale Wärmeübertragung muss ein Heizregister derart im Luftstrom der Ansaugluft positioniert sein, dass die zusätzlich bereitgestellte Energie vollständig erfasst wird. Darüber hinaus ist der Wärmetauscher konkret auf den individuell vorliegenden Luftdurchsatz abzustimmen und derart ins Gesamtsystem einzubinden, sodass die Strömungsverhältnisse der Trocknungsluft nicht beeinflusst werden (Abb. 73).

### 10.3 Nutzung der Abwärme von Stromaggregaten

Zahlreiche Betriebe nutzen zur Stromerzeugung Stromaggregate. Die Bereitstellung von 10kWh nutzbarer Wärmeleistung erfordert 3l Heizöl. Davon werden 1/3 in elektrische und 2/3 in thermische Energie gewandelt, wovon 50% ungenutzt in Form von Abgasen verloren gehen. Jedoch besteht die Möglichkeit, die Abwärme eines Stromaggregats direkt zur Vorwärmung der Ansaugluft zu verwenden. Demzufolge sind beispielsweise mit der Abwärme eines 60kW-Stromaggregats bei einem theoretischen Wirkungsgrad von 100%  $6l_{\text{Heizöl}}/h_{\text{Trocknungszeit}}$  ersetzbar. Ähnlich wie beim Wärmetauscher ist auch der hinsichtlich einer möglichen Abwärmenutzung erzielbare Wirkungsgrad eines Stromerzeugers von dessen Positionierung abhängig. Wird die Abwärme vollständig vom Luftstrom der Ansaugluft erfasst, sind Wirkungsgrade von bis zu 90% realistisch erzielbar. Dokumentationen in der Praxis zeigten bei der Abwärmenutzung Wirkungsgradunterschiede von 10-90% in Bezug auf die optimale Positionierung von Stromaggregaten.

### 10.4 Nutzung solarer Gebäudewärme

In vielen Hopfengebäuden ist die Luft durch die Wärmeabstrahlung von den Hopfendarren und dem solaren Einfluss unter der Dacheindeckung deutlich wärmer als die Außenluft. Begründbar ist dieser Effekt zum einen durch die innenseitige Wärmeabstrahlung des Gebäudes und zum anderen durch den solaren Einfluss unter der Dacheindeckung. Gelingt es, wärmere Gebäudeluft mit einem auf die vorhandene Luftmenge energetisch angepassten Gebläse oder Ventilator über Schächte oder Lüftungsschläuche der für die Trocknung angesaugten Luft beizumischen, wird es möglich, mit verhältnismäßig geringem Aufwand Energie einzusparen (Abb. 74).

Derartige Baumaßnahmen erfordern zwingend die Einhaltung aller aktuell gültigen brandschutzrechtlichen Vorschriften und Gesetze. Hierzu zählen beispielsweise der Einbau von Brandschutzklappen sowie entsprechender Staubfilter. Ansprechpartner für derartige Anlagenveränderungen sind der jeweils zuständige Kaminkehrer und Gebäudeversicherer. Zusätzlich sind die Empfehlungen des Herstellers der jeweils vorliegenden Trocknungsanlagen zu beachten. Für einen effektiven Wirkungsgrad sollte die Temperatur der genutzten Gebäudeluft mindestens 25°C betragen. Zudem darf die absolute Feuchte der zu nutzenden Luft nicht höher sein als die absolute Feuchte der Außenluft.

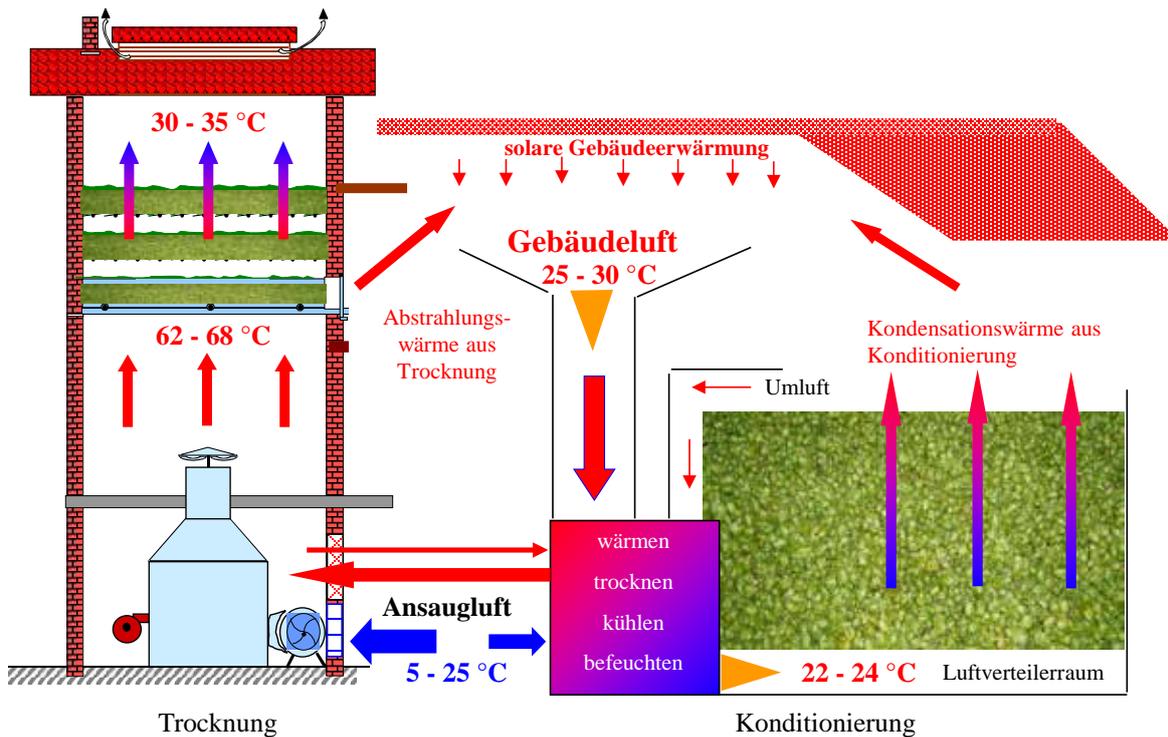


Abb. 74: Beispiel für Nutzung alternativer Energiequellen in einem Hopfenerntezentrum

## 10.5 Wärmerückgewinnung aus der Trocknungsabluft

Neueste Trends sehen die Integration von Wärmerückgewinnungen vor, mit deren Hilfe die warme Abluft aus der Trocknung über Platten- oder Kreuzstromwärmetauscher zum Anwärmen der Ansaugluft genutzt wird. Dieses System eignet sich in gleichem Maße für konventionelle Hordentrocknungen als auch für Bandtrockner. Hierbei wird die Abluft aus der Trocknung per Gebläse über einen Wärmetauscher ins Freie ausgeblasen. Gleichzeitig saugt der Warmluft erzeuger über diesen Wärmetauscher die kühlere Ansaugluft im Kreuzstromverfahren gegen den Abluftstrom an. Der Luftstrom der Zuluft wird dadurch bei gleichbleibender absoluter Feuchte vorgewärmt (Abb. 75).

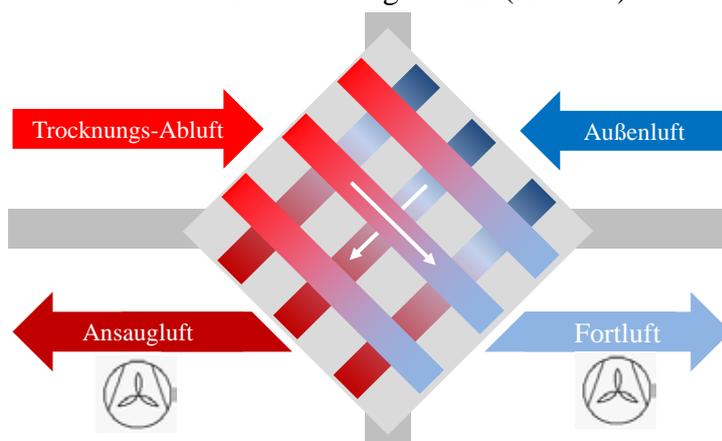


Abb. 75: Prinzip eines Kreuzstrom-Wärmetauschers

Je höher die Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Ansaugluft ist, desto effizienter arbeitet eine entsprechende Anlage. Im Vergleich zur konventionellen Hordendarre ist die Wirtschaftlichkeit der Investition in eine Wärmerückgewinnungsanlage bei einem Bandtrockner aufgrund der höheren Ablufttemperaturen eher gegeben.

### 10.6 Heizöl einsparung

Auf Basis der in Kapitel 9.1.1.6 erläuterten Tabelle zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit über den Ölverbrauch und die Temperaturdifferenz zwischen der Ansaug- und der Trocknungstemperatur sind Rückschlüsse auf die reale Heizöl ersparnis durch eine alternative Energiequelle möglich. Die Bewertung einer energieeinsparenden Investition hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Kriterien basiert nicht auf der Menge eingesparten Heizöls, sondern um wieviel Grad die Ansaugtemperatur durch die Maßnahme erhöht werden kann. Abbildung 76 zeigt ein entsprechendes Fallbeispiel zur Bestimmung möglicher Heizöl ersparnis.

**à 24% Heizöl ersparnis**

Temperaturdifferenz zwischen Trocknungsluft und Ansaugluft [°C]	Ölverbrauch in [l/h/m <sup>2</sup> Darrfläche]																													
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0									
20	0,37	0,40	0,44	0,48	0,51	0,55	0,59	0,62	0,66	0,70	0,73	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92	0,95	0,99	1,03	1,06	1,10									
22	0,33	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,57	0,60	0,63	0,67	0,70	0,73	0,77	0,80	0,83	0,87	0,90	0,93	0,97	1,00									
24	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,92									
26	0,28	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85									
28	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,47	0,50	0,52	0,55	0,58	0,60	0,63	0,65	0,68	0,71	0,73	0,76	0,78									
30	0,24	0,27	0,30	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,54	0,56	0,59	0,61	0,63	0,66	0,68	0,71	0,73									
32	0,23	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,48	0,50	0,53	0,55	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66	0,69									
34	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,65									
36	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61									
38	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58									
40	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58									
42	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,53	0,55									
44	0,17	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,52									
46	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,50									
48	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45	0,46	0,48									
50	0,15	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,43	0,44	0,46									
52	0,15	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44									
54	0,14	0,15	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41	0,42									
56	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41									
58	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,20	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39									
60	Luftgeschwindigkeit in [m/s]																													

10°C Temperaturdifferenz

0,31

0,31

0,31

Abb. 76: Bestimmung der Heizöl ersparnis mit der Tabelle zur Ermittlung der Luftgeschwindigkeit

### 10.7 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Investition zur Nutzung alternativer Energiequellen bzw. von Wärmerückgewinnungssystemen ist abhängig von deren Anschaffungskosten, den laufenden Betriebskosten, der voraussichtlichen Nutzungsdauer, der Auslastung sowie des eingesparten Heizöls unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen Heizölpreises. Die jährliche Einsparung variabler Trocknungskosten errechnet sich aus den geminderten Heizölkosten abzüglich der variablen Kosten, wie beispielsweise der Nutzung alternativer Energiequellen, des anfallenden Hackschnitzelverbrauchs oder im Falle einer Wärmerückgewinnung der eingesetzten elektrischen Energie für die zusätzlichen Gebläse.

## 11 Konditionierung

### 11.1 Notwendigkeit einer Nachbehandlung

Unmittelbar nach der Trocknung ist noch nicht gewährleistet, dass der Hopfen bereits haltbar und lagerfähig ist. Für hohe Qualitätsansprüche ist eine optimale Nachbehandlung unabdingbar. Auf Basis vieler Forschungsergebnisse durch den Arbeitsbereich Hopfen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft können inzwischen auch für eine optimale Nachbehandlung des Trockenhopfens konkrete Empfehlungen gegeben werden.

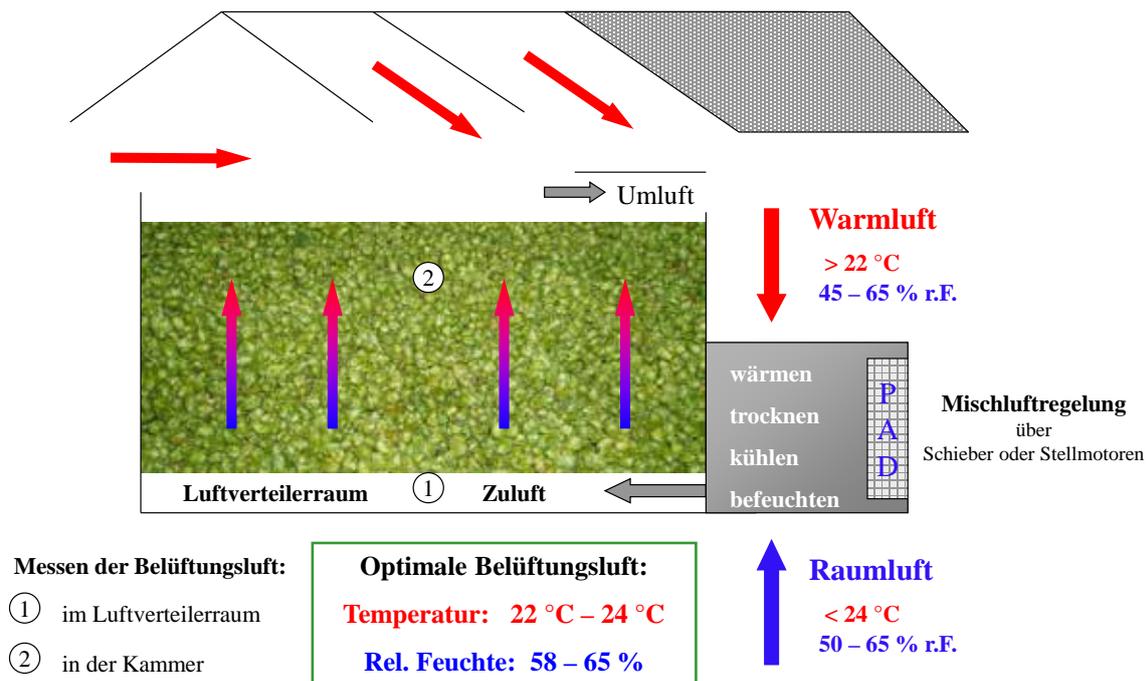


Abb. 77: Schematische Darstellung der Nachbehandlung von Hopfen in Konditionierungskammern

Der optimale Wassergehalt des Hopfens unmittelbar nach der Trocknung bewegt sich zwischen 8-9%. In diesem Zustand liegt der Wassergehalt der Spindel zwischen 20-35% und bei den Doldenblättern nur noch bei 4-7%. Eine ausreichende Homogenisierung ist für den Qualitätserhalt und die Lagerstabilität unumgänglich. Traditionell wurde der Hopfen bis zum Pressen auf dem Hopfenboden gelagert, mindestens einmal durchgemischt und bis zu drei Meter hoch aufgeschüttet. Während der Lagerung kam es einerseits zum Ausgleich der großen Wassergehaltsunterschiede zwischen Spindel und Doldenblättern innerhalb der Dolde und andererseits zum Ausgleich der unterschiedlichen Wassergehalte des inhomogenen Hopfens. Zusätzlich konnte dieser noch Feuchtigkeit von der Raumluft aufnehmen: Er hatte „angezogen“. Da für diese Art des Feuchtigkeitsausgleichs und des „Anziehens“ ausreichend Zeit erforderlich war, musste der Hopfen einige Tage gelagert werden. Dazu war ausreichend Lagerraum erforderlich. Der sich ergebende Wassergehalt zum Zeitpunkt des Pressens war abhängig davon, wie stark der Hopfen getrocknet wurde und welcher Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft er während der Lagerung auf dem Hopfenboden ausgesetzt war. In einer Konditionierungskammer ist der lange und arbeitsintensive „Anziehvorgang“ des Hopfens auf dem Hopfenboden jedoch bereits in wenigen Stunden mittels Belüftung erreichbar (Abb. 77).

## 11.2 Sorptionsverhalten des Hopfens

Hygroskopische Produkte, zu denen auch der Hopfen zählt, sind in der Lage, auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft durch Wasserdampfabgabe oder -aufnahme zu reagieren. Unter Sorptionsverhalten versteht man die Eigenschaft von Hopfen, solange Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen bzw. an diese abzugeben, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Wassergehalt des Hopfens und der Umgebungsfeuchte eingestellt hat (Abb. 78). Diese Vorgänge sind sowohl bei der Trocknung (siehe Kapitel 4) als auch bei der Konditionierung von grundlegender Bedeutung und bestimmen weitestgehend den Wassergehalt des homogenisierten Hopfens.

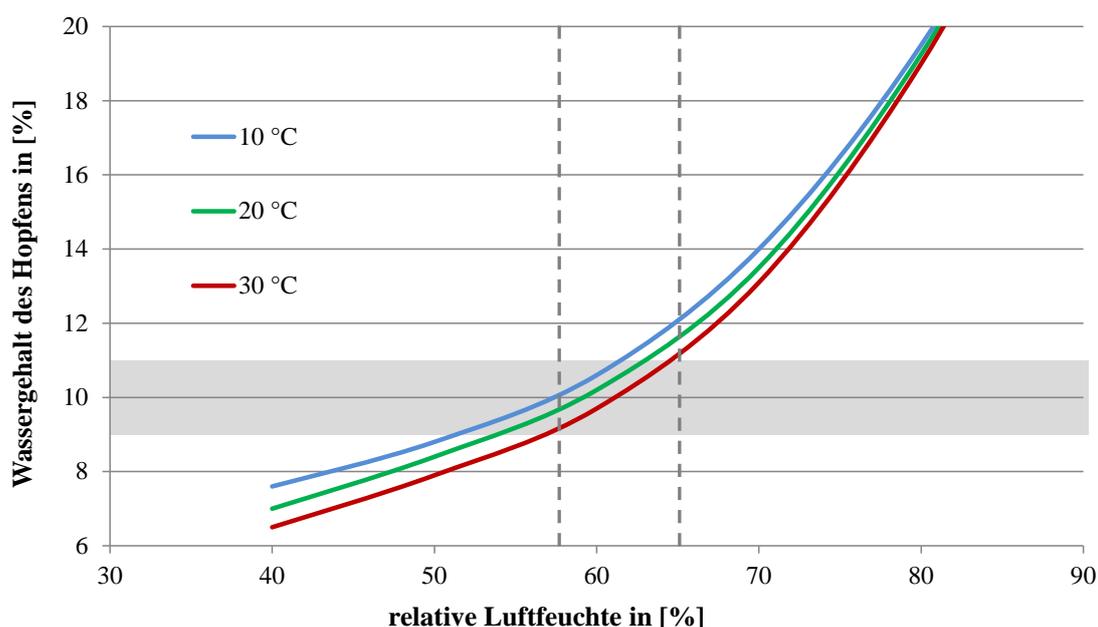


Abb. 78: Sorptionsverhalten von Hopfen

## 11.3 Feuchteausgleich innerhalb der Dolde

Der Ausgleich der großen Wassergehaltsunterschiede innerhalb der Dolden, d.h. zwischen Spindel und den Doldenblättern, beginnt unmittelbar nach der Trocknung. Dabei wird das Spindelwasser weiter über die Kapillaren an die Doldenblätter abgeführt. Zusätzlich nehmen die Doldenblätter auch Feuchtigkeit von der Umgebungsluft auf. Dieser Feuchteausgleich gilt als beendet, sobald die Spindel und die Doldenblätter die gleiche Restfeuchte aufweisen. Bei ausgeglichenem Hopfen bleibt der Wassergehalt der Dolden sehr stabil und ändert sich durch den Einfluss von Umgebungs- oder Belüftungsluft nur noch sehr langsam. Solange Feuchteunterschiede zwischen der Spindel und den Doldenblättern vorhanden sind, kann durch die richtige Belüftungsluft der Wassergehalt der Dolden gezielt verändert bzw. beeinflusst werden. Wie in Abbildung 79 schematisch dargestellt, besitzt hierbei die Temperatur für den Feuchteausgleich innerhalb der Dolde einen großen Einfluss.

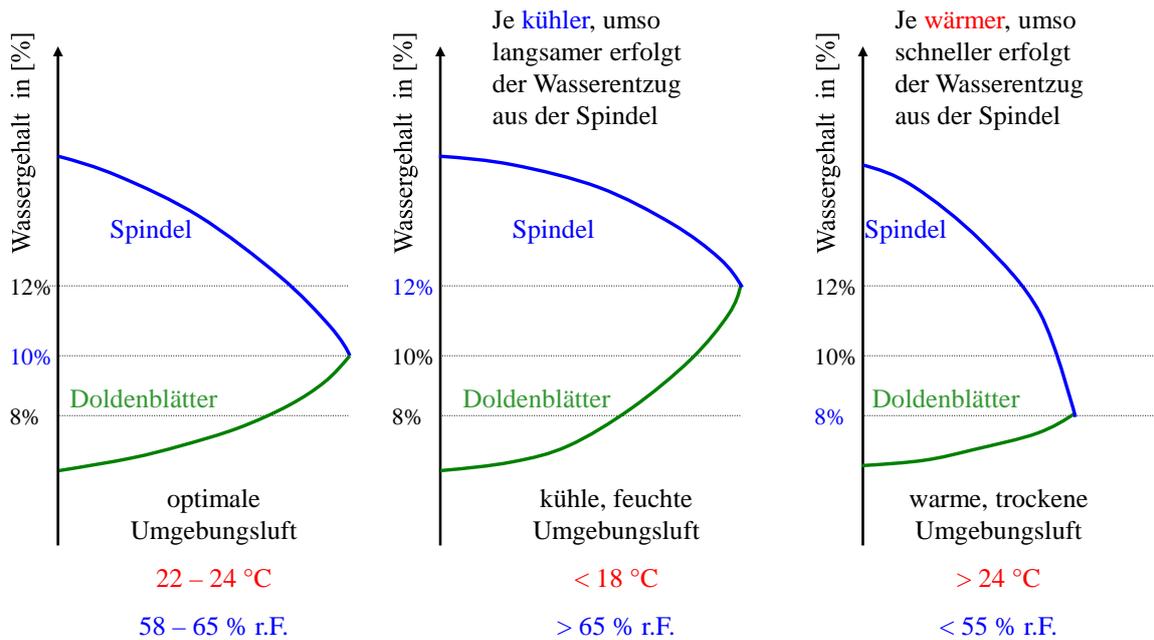


Abb. 79: Feuchteausgleich innerhalb der Dolde nach der Trocknung in Abhängigkeit von der Temperatur

Während der Lagerung und der Belüftung muss ständig gewährleistet sein, dass das Wasser aus der noch feuchten Spindel kontinuierlich über die Doldenblätter bis zum vollständigen Feuchteausgleich abgeführt wird. Bei kühlen Temperaturen verlangsamt sich der Wasserentzug aus der Spindel. Ist es nach der Belüftung aufgrund zu kühler Belüftungstemperaturen nicht gelungen, das Wasser der Spindel ausreichend zu reduzieren, besteht die Gefahr, dass es aufgrund mikrobiologischer Prozesse und enzymatischer Verderbs-Reaktionen mit der Folge von Erwärmung zu Qualitätsminderungen kommt. Für eine vollständige Homogenisierung mit bester Qualitätserhaltung sollte der Hopfen deshalb bei Temperaturen von 22 – 24 °C belüftet werden.

#### 11.4 Befüllen der Konditionierungskammer

Wird der Hopfen vor oder beim Befüllen der Konditionierungskammer gemischt, beginnt bereits schon vor der Belüftung ein Feuchteausgleich des inhomogenen Hopfens. Bei der Belüftung werden dann vor allem die großen Feuchteunterschiede zwischen Spindel und Doldenblättern ausgeglichen. Das Mischen des Trockenhopfens besitzt erheblichen Einfluss auf die Gewährleistung homogener Partien mit einem einheitlichen Wassergehalt (Abb. 80).



Abb. 80: Befüllen der Konditionierungskammer mit Hopfen frisch aus der Trocknung

### 11.5 Beurteilung der Hopfenfeuchte vor der Belüftung bzw. bei Belüftungsbeginn

Durch ein Messen der relativen Feuchte und Temperatur der Umgebungsluft des Hopfens in der Konditionierungskammer kann bereits vor der Belüftung bzw. unmittelbar bei Belüftungsbeginn der Wassergehalt des Hopfens abgeschätzt werden (Abb. 77). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass zu Beginn der Belüftung das Spindelwasser über die relative Luftfeuchtigkeit noch nicht ausreichend erfasst wird. Eine relative Luftfeuchte von weniger als 45% deutet darauf hin, dass der Hopfen in der Kammer bei einer Belüftung nur mit Umluft sich auf einen Wassergehalt von unter 9% einstellen würde. Wird dagegen bereits am Anfang der Belüftung mit einer optimalen Belüftungsluft von 22-24°C und 58-65% r.F. im zu belüftenden Hopfen eine relative Feuchte von über 50% gemessen, ist davon auszugehen, dass die Spindelfeuchte noch zu hoch ist. In beiden Fällen ist zunächst eine „Klimatisierungsbelüftung“ vor der Homogenisierung erforderlich (Abb. 81).

### 11.6 Optimale Belüftungsluft

Für eine optimale Homogenisierung und Einstellen einer gewünschten Hopfenfeuchte muss bei der Konditionierung die Temperatur und die relative Feuchte der Belüftungsluft geregelt werden. Da der Feuchteausgleich innerhalb der Dolde temperaturabhängig ist, hat die Temperatur zunächst einen größeren Einfluss auf den Wassergehalt des Hopfens als die relative Feuchte der Belüftungsluft. Für die Kapillarwasserbewegung von der Spindel in die Doldeblätter ist eine Temperatur von 22-24°C optimal, da in diesem Temperaturbereich gewährleistet ist, dass die Doldeblätter sowohl Feuchte von der Spindel und gleichzeitig auch von der Belüftungsluft aufnehmen können. Die relative Feuchte von 58-65% r.F. der Belüftungsluft orientiert sich am sortenbedingten Sorptionsverhalten.

Die Dolde ist homogenisiert, wenn sich bei Spindel, Doldenblätter und Belüftungsluft die Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat.

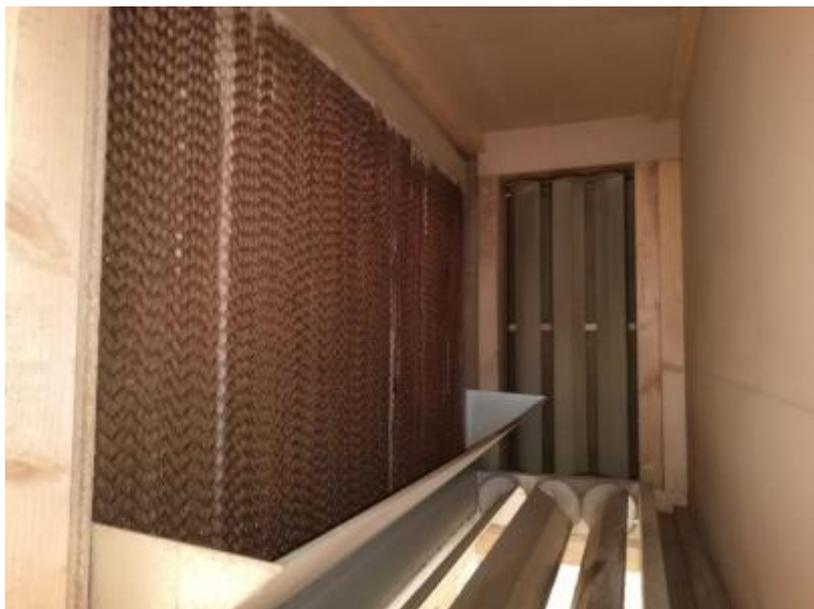
	1. Befüllen der Kammer	2. Klimatisierungsbelüftung			3. Homogenisierungsbelüftung	4. Ruhephase
Kammer	gleichmäßiges Verteilen und gute Durchmischung 	falls r.F. < 45 % Anreicherung mit Wasserdampf erforderlich r.F. > 50 % Reduzierung der Spindelfeuchte		Anreicherung mit Wasserdampf Reduzierung der Spindelfeuchte		
Zuluftkanal		22 °C - 24 °C 58 % - 65 % r.F.	< 22 °C 65 - 70 % r.F.	> 22 °C 50 - 55 % r.F.	22 °C - 24 °C 58 % - 65 % r.F.	ohne Belüften
Dauer	keine zu lange Lagerung bis zum Belüftungsbeginn	ca. 5-15 min	ca. 1-2 h		ca. 3-6 h	ca. 3-6 h
Ziel	beginnender <b>Feuchteausgleich</b> des inhomogenen Hopfens	<b>Beurteilung des Trockengrades</b> des Hopfens in der Konditionierungskammer		Annäherung an die <b>Sorptionszielfeuchte</b>	Erreichen und Halten der angestrebten <b>Gleichgewichtsfeuchte</b> von Spindel, Doldenblätter und Belüftungsluft	vollständige <b>Homogenisierung</b> , Beurteilung des Konditionierungsergebnisses über Temperatur und relativer Feuchte im belüfteten Hopfen

Abb. 81: Verfahrensschritte bei der Nachbehandlung von Hopfen in Konditionierungsanlagen

### 11.7 Mischluftregelung

Durch Messung der Temperatur und der relativen Feuchte im Zuluftkanal bzw. im Luftverteilterraum der Konditionierungskammer kann über die Mischluftregelung die optimale Belüftungsluft eingestellt werden.

Ist der Hopfen in der Kammer zu trocken oder zu feucht, wird der Belüftungsluft nach Bedarf temperierte Luft mit höherer bzw. niedrigerer Feuchte zugemischt, bis die Mischluft die gewünschte Temperatur und relative Feuchte erreicht hat.



*Abb. 82: Kühl- bzw. Feuchte-Pad zum Einstellen der richtigen Belüftungsluft*

Zum Erreichen der optimalen Belüftungsluft haben sich in der Praxis auf die Anlagengröße dimensionierte „Kühl- bzw. Feuchte-Pads“ bewährt. Diese bestehen aus Papier- oder Kunststoffwaben, über die kontinuierlich Wasser herabfließt (Abb. 82). Bei richtiger Anordnung und Auswahl des Pads kann dieses sowohl die Funktion eines Luftbefeuchters als auch einer Kühlung übernehmen. Eine stetige Einstellung der erforderlichen Belüftungsparameter ist durch eine elektronische Steuereinheit sinnvoll.

## **11.8 Regelung der Belüftungsluft**

Durch Messung der Temperatur sowie der relativen und absoluten Feuchte der Belüftungsluft und deren graphischen Dokumentation ist der Konditioniervorgang mittlerweile gut erklär-, steuer- und regelbar. Anhand des Sorptionsverhaltens der Hopfensorten werden die erforderliche Temperatur und relative Feuchte der Belüftungsluft unabhängig voneinander, entweder von Hand, halb- oder vollautomatisch geregelt.

## **11.9 Einfluss der Messtechnik**

Je exakter die Feuchte und Temperatur erfasst werden, desto besser erfolgt die Regelung der Belüftungsluft und desto genauer wird der gewünschte Wassergehalt erreicht. Infolge der Anforderungen gibt es eine Vielzahl von Feuchtefühlern, von denen die meisten ein kapazitives Messprinzip aufweisen. Es gibt aber auch Feuchtemesssysteme, die auf einem elektrolytisch-resistiven Messprinzip basieren. Hierbei werden Messtoleranzen von lediglich 0,5% relativer Feuchte erreicht.

Voraussetzung ist das regelmäßige Kalibrieren jeglicher Messtechnik, welche gewährleistet, dass die Belüftungs-Parameter korrekt gemessen werden und dadurch eine optimale Regelung und Steuerung möglich ist. Nur so kann durch die stets richtige Belüftungsluft die gewünschte Hopfenfeuchte erreicht und die geforderte Hopfenqualität auch während der Lagerung gesichert und erhalten werden.

## 12 Zusammenfassung

Da bei der Hopfentrocknung große Warmluftmengen erforderlich sind, gestaltet sich dieser Prozess als äußerst kosten-, zeit- und energieintensiv. Um das Ziel einer effektiven, wirtschaftlichen und qualitätserhaltenden Trocknung zu erreichen, ist die wissenschaftliche Erforschung optimaler Trocknungsabläufe in Hordendarren und Bandtrocknern eine stetige Herausforderung. Über das Verhalten der Hopfendolden bei der Trocknung und Konditionierung liegen mittlerweile fundierte Kenntnisse vor. Durch die Berücksichtigung des über Jahre erarbeiteten Wissens auf dem Gebiet der Hopfentrocknung und Konditionierung ist es nunmehr möglich, Trocknungsergebnisse mit höherer Effizienz und gleichzeitig besserer Qualität zu erreichen. Im Umkehrschluss ergeben sich kürzere Trocknungszeiten, die sich wiederum positiv auf den Erhalt der qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe und die äußere Doldenbeschaffenheit auswirken. Eine produktschonende Trocknung garantiert zudem eine bessere Vermarktung. Die Verkürzung der Trocknungszeit geht unmittelbar mit der Einsparung von Energie einher.

Bei einem Verbrauch von  $0,44 \text{ l}_{\text{Heizöl}}/\text{kg}_{\text{Trockenhopfen}}$  und der aktuellen durchschnittlichen Jahresproduktion von 42.000t Trockenhopfen in der Hallertau, beträgt der Bedarf an hierfür erforderlichem Heizöl 18,5 Millionen Liter. Dokumentationen aus der Praxis bestätigen, dass durch eine entsprechende Optimierung der Trocknungsprozesse der Heizölverbrauch während der vergangenen Jahre bis auf  $0,35 \text{ l}_{\text{Heizöl}}/\text{kg}_{\text{Trockenhopfen}}$  gesenkt werden konnte. Dies entspricht einer Heizöleinsparung von ca. 20%.

Die Minderung des Heizölbedarfs in der Hallertau um 3,8 Millionen Liter bedingt eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von ca. 10600 Tonnen pro Jahr. Bei einem Preis von ca. 60 Euro für 100 Liter Heizöl resultiert zusätzlich eine jährliche Kostenersparnis in Höhe von 2,3 Millionen Euro. Die Optimierung der Trocknung stellt somit einen wesentlichen Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz dar.

Aufgrund der bisher gewonnenen Erkenntnisse über die Hopfentrocknung in Hordendarren und Bandtrocknern können Erweiterungen oder Neuanschaffungen zukünftig noch gezielter auf den Trocknungsbedarf abgestimmt werden.

## 13 Literatur

Euringer C., (2019), Persönliche Mitteilungen

Heindl A., (2015), Praxisbuch Bandtrocknung

Heindl A., (2019), Persönliche Mitteilungen

Heiss R. & Eichner K., (1971), Haltbarmachen von Lebensmitteln

HTCO GmbH, Strömungssimulation Bandtrockner

Krischer O. & Kast W., (1978), Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik

Sturm B., (2010), Einfluss der Führung des Trocknungsprozesses auf den Trocknungsverlauf und die Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter, Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik

Sturm, B., Münsterer, J., Kammhuber, K., Crichton, S. (2016). Einfluss des Schüttgewichts auf das Trocknungsverhalten und die Hopfenqualität nach dem Trocknen

Sturm, B., Crichton, S., Münsterer, J., Kammhuber, K., (2016). Messung des Hopfenfeuchtigkeitsgehalts und der Chromatizität während des Trocknens mit hyperspektraler VNIR-Bildgebung

Ziegler T., (2017), Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen, Leibnitz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie

[www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/ventilator.php](http://www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/ventilator.php)