

Die Trocknung des Hopfens mit erhöhten
Heisslufttemperaturen unter Berücksich-
tigung ihrer Anwendung in der Darre und
im Bandtrockner.

von der
Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau der Technischen Hochschule
München

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr. - Ing.)
genehmigte
Dissertation

vorgelegt von
Dipl. - Ing. Hans-Dieter Zeisig
geboren zu Hallenfelde/Ostpreussen

1. Berichterstatter: Hon. Prof. Dr. Dr. Hupfauer.
2. Berichterstatter: PD. Dr. Kessler.
3. Berichterstatter: em. o. Prof. Dr. Dr. Brenner

Tag der Einreichung der Arbeit 14. 5. 1970.....

Tag der Annahme der Arbeit 15. 7. 1970.....

Tag der mündlichen Prüfung 18. 7. 1970.....

Vorwort

Die durch den Einsatz von leistungsfähigeren Hopfenpflückmaschinen bedingten Schwierigkeiten bei der Trocknung des Hopfens gaben den Anstoß zu der vorliegenden Arbeit, die in den Jahren 1966 - 1970 an der Bayer. Landesanstalt für Landtechnik, Weißenstephan, durchgeführt wurde. Sie soll ein Beitrag zur Schaffung von Hopfentrocknungsanlagen sein, deren Leistungsfähigkeit auch zukünftigen Ansprüchen genügt.

Herrn Prof. Dr. Ing. Dr. agr. M. Hupfauer möchte ich für seine Hinweise und Ratschläge bei der Bearbeitung des Themas meinen Dank sagen.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Priv. Doz. Dr. -Ing. H. G. Kessler für seine wertvollen Ratschläge.

Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Ing. Dr. h. c. W. G. Brenner für seine wohlwollende Unterstützung und Herrn /Dr. J. Meier vom Chemischen Laboratorium des Hans-Pfäffl-Institutes für Hopfenforschung, Hüll, für die Durchführung der Vielzahl von Analysen danken.

Des weiterengilt mein Dank auch dem Deutschen Hopfenpflanzerverband für die finanzielle Unterstützung, die die Klärung einiger wesentlicher Fragen ermöglichte.

Eine erhebliche Erleichterung der notwendigen Versuche brachte auch die Bereitwilligkeit und Aufgeschlossenheit einiger Industriefirmen und einiger landwirtschaftlicher Betriebsleiter; hier sei insbesondere Herrn Landwirt Peter Breitner, stellvertr. Landrat des Landkrs. Pfaffenhofen, Niederlauterbach, und Herrn Dipl. Landwirt Leo Höfter, Präsident des Europäischen Hopfenbaubüros, Neuhausen, gedankt.

Nicht zuletzt bedanke ich mich auch bei allen Mitarbeitern der Bayer. Landesanstalt für Landtechnik für deren tatkräftige Hilfe bei der Durchführung und Auswertung der Versuche.

<u>Inhaltsübersicht:</u>	Seite
Häufig verwendete Kurzzeichen:	1
1. <u>Einleitung:</u>	2
1. 1. Die Entwicklung der Hopfentrocknung:	3
1. 2. Derzeitiger Stand der Hopfentrocknung:	7
2. <u>Zielsetzung der Untersuchungen:</u>	11
3. <u>Spezielle Probleme der Hopfentrocknung und Untersuchungsergebnisse:</u>	12
3. 1. Vorversuche im Trockenschrank:	12
3. 2. Versuchstrockner mit Variation von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit:	14
3. 3. Trocknungsverlaufskurven und spezifischer Wärmeaufwand:	20
3. 4. Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen:	38
3. 5. Das Verhalten der durchströmten Hopfenschicht:	49
3. 5. 1. Der Strömungswiderstand:	49
3. 5. 2. Die Lockerungsgeschwindigkeit:	51
4. <u>Die Anwendung der Ergebnisse des Versuchstrockners auf die Trocknung in der Darre:</u>	55
4. 1. Anforderungen an die Darre:	55
4. 2. Durchgeführte Untersuchungen an der Darre:	58
4. 3. Ergebnisse der Darrenuntersuchungen:	59
5. <u>Die Anwendung der Ergebnisse des Versuchstrockners auf die Trocknung im Bandtrockner:</u>	68
5. 1. Anforderungen an den Bandtrockner:	68
5. 2. Durchgeführte Untersuchungen am Bandtrockner:	74
5. 3. Ergebnisse der Bandtrockneruntersuchungen:	76
6. <u>Kritische Betrachtung der Versuchsergebnisse:</u>	86
7. <u>Zusammenfassung:</u>	93
Literaturverzeichnis:	95
Anhang:	100

Häufig verwendete Kurzzeichen

A' kcal/kg	Wärmeaufwand zur Verdunstung von 1 kg Wasser während der korregierten Trocknungszeit t'
c_p kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	spez. Wärme bei konstantem Druck
F m ²	Trocknungsgrundfläche
G_L kg/min	Luftmenge
g'_D kg/kg	Trocknungsgeschwindigkeit, bezogen auf 1 kg Trockensubstanz
i kcal/kg	Enthalpie der Luft
P kp/m ² , (mmWS)	Luftdruck
Q kcal	Wärmemenge
t min	Trocknungszeit
t' min	korregierte Trocknungszeit, bezogen auf den Trocknungsabschnitt von $X = 4,0$ bis $X = 0,111$
t^+ min	Trocknungszeit von $X = 4,0$ bis $X = 0,111$ bei 60°C und $0,28$ m/s Heißluftgeschwindigkeit
V m ³ /h	Volumenstrom
v_L m/s	Luftgeschwindigkeit
X kg/kg	Feuchtegrad des Gutes, bezogen auf Trockensubstanz
x kg/kg	Feuchtegrad der Luft
ρ_L kp/m ³	Wichte der Luft
θ $^{\circ}\text{C}$	Temperatur
φ ./.	relative Feuchte der Luft
Indizes:	
1	Heißluftzustand bzw. Zustand vor der Trocknung
2	Zustand nach der Trocknung
A	Aussenluftzustand bzw. Ansaugluftzustand
D	Dampf
G	Grüngut
L	trockene Luft
T m	Trockensubstanz
T r	Trockengut
W	Wasser

Weitere Kurzzeichen sind im Text erläutert.

1. Einleitung.

Hopfen ist neben Malz und Wasser ein wichtiger Rohstoff für die Bierherstellung. Bereits in der Antike war der Hopfen als wildwachsende Pflanze bekannt, als sein Ursprungsland wird das Land zwischen Euphrat und Tigris sowie Ägypten angegeben (7, 15, 33). Schon in vorchristlicher Zeit sollen die Osseten und andere indogermanische Völker des Kaukasus die Dolde der wildwachsenden Hopfenpflanze zur Bierherstellung verwendet haben (7, 31). Die ersten sicheren Nachrichten über den Hopfen als Kulturpflanze in Mitteleuropa liegen durch Urkunden aus dem 8. und 9. Jahrhundert n. Chr. vor, und zwar durch eine Urkunde aus dem Jahre 736, in der von der Anlage eines Hopfengartens durch kriegsgefangene Wenden bei Geisenfeld in der Hallertau berichtet wird, sowie durch einen Schenkungsbrief Pipins des Kurzen aus dem Jahre 768 an das Kloster St. Denis. Ebenso ist der böhmische Hopfenbau erstmals in einem Dokument des Jahres 859 erwähnt (15, 31).

Die im 9. Jahrhundert immer üblicher werdende Verwendung von Hopfen zur Biererzeugung steigerte offensichtlich den Bedarf und führte dadurch zur vermehrten Anlage von Hopfengärten, was durch mehrere Urkunden aus dem 9. Jahrhundert belegt wird (15, 31). Um 1320 fördert Karl IV., König von Böhmen, die Kultur des Hopfens speziell in der Gegend von Saaz und im Spalter Gebiet, indem er die Beschädigung der Hopfengärten und die Ausfuhr von Hopfenfuchsern unter Androhung der Todesstrafe verbietet (31, 33). Jean Sans Peur, Herzog von Burgund, gründete 1408 den Hopfenorden mit dem Ziel, die Erzeugung von Qualitätshopfen anzuregen. 1516 erläßt Herzog Wilhelm IV. das Reinheitsgebot, das bestimmt, daß zur Bierherstellung nur allein Gerste, Hopfen und Wasser verwendet werden darf. Um 1524 brachten flämische Einwanderer die ersten Hopfenpflanzen mit nach England und begründeten somit den englischen Hopfenbau (3, 15, 33). Nach Amerika wurde kultivierter Hopfen 1629 und 1648 erstmals eingeführt. Die beiden heute wichtigsten Hopfenbaugebiete der Vereinigten Staaten begannen aber erst später mit dem Anbau des Hopfens; im Staate New York wurde 1808 und in Kalifornien 1857 der erste Hopfengarten angelegt (15).

Durch die ständige Erhöhung des Bierkonsums wuchs der Bedarf an Hopfen und brachte damit eine stetige Ausweitung der Hopfenproduktion mit sich. Einen Überblick über die Entwicklung der Hopfenerzeugung und der Anbauflächen in einigen wichtigen Hopfenbauländern der Welt gibt die nachfolgende Zusammenstellung.

Tabelle 1:

Land	1939 ⁺		1968 ⁺⁺	
	Anbaufläche (ha)	Erntemenge (dz)	Anbaufläche (ha)	Erntemenge (dz)
Australien u.				
Neu-Seeland	800	14700,0	1088	20942,5
Belgien	710	11750,0	1117	19682,5
Deutschland	7908	112085,5	13956	241027,5
davon BRD	7835	111718,5	11800	218867,5
England	7608	130556,0	7251	101109,5
Frankreich	1590	14300,0	1310	19002,5
Jugoslawien	3475	29000,0	3817	49385,0
Polen	1000	5500,0	2216	20100,0
Russland (UDSSR)	3091	12293,5	10300	92500,0
Tschechoslowakei	10557	111171,0	8749	84157,0
USA	12545	143067,0	11493	198371,5
übrige Länder	576	8450,0	6906	72817,0
Welt	49860	592873,0	68203	919095,0

⁺ n. Linke-Rebl Der Hopfenbau Hans Carl, Nürnberg 2. Aufl. 1950

⁺⁺ n. Hopfenberichterstattung 1968/69 d. Fa. Barth & Sohn, Nürnberg,
vom 30.7.1969

Fast die gesamte Welterzeugung mit rd. 900 000 dz wird für die Bierherstellung verwendet, nur ein geringer Anteil von ca. 0,5% wird heute noch von der pharmazeutischen Industrie zur Erzeugung von Medikamenten benötigt.

1.1. Die Entwicklung der Hopfentrocknung.

Die frischgepflückten Hopfendolden enthalten ca. 80% Wasser, das zum größten Teil (bis auf rd. 12%) entfernt werden muß, um den Hopfen lagerfähig zu machen. Versuche mit der Tiefkühlung in neuerer Zeit haben zwar

gezeigt, daß es grundsätzlich möglich ist, tiefgefrorenen Grünhopfen im Brauereigewerbe zu verwenden (16), jedoch dürfte sich dieses Verfahren wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten wohl kaum in großem Umfang einführen lassen, so daß nach wie vor die Trocknung das wichtigste Grundverfahren zur Erzielung eines lagerfähigen Produktes bleiben dürfte.

Nach Fruwirth (15) versuchte man, die Entfernung des Wassers aus den Hopfendolden in früheren Zeiten dadurch zu erreichen, daß man den Hopfen in der Sonne oder im Schatten ausbreitete. Offensichtlich ist man dann aber wegen des notwendigen Schutzes gegen die Witterung später dazu übergegangen, die Trocknung in überdachte Räume zu verlegen, wobei der Hopfen in dünnen Schichten (3-5 cm) auf den Dachböden der Häuser oder Scheunen ausgebreitet und täglich mehrmals gewendet wurde (31). Die notwendige Belüftung der Dachböden wurde durch eine Vielzahl von Dachluken erreicht. Bei diesem Verfahren der Bodentrocknung dauerte das Trocknen des Hopfens nach Angaben von Linke (31) bei günstigem Wetter 2 Tage, erstreckte sich aber in Regenzeiten oder bei hoher Luftfeuchte auf bis zu 10 Tagen.

Dem Nachteil der Bodentrocknung, ihr hoher Platzbedarf, wurde dadurch zu begegnen versucht, daß man den Hopfen in dünnen Schichten (2-4 cm) (15) auf Horden aufbrachte und jeweils 5 bis 7 Horden (31) übereinander stellte. Um das Durchstreichen der Luft zu erleichtern, wurde der Boden der einzelnen Horden aus Rohleinen, Drahtgeflecht oder Schilfrohr hergestellt. Durch diese Art der Hordentrocknung mit natürlichem Luftzug wurde zwar Platz gespart, jedoch dauerte die Trocknung praktisch ebenso lange wie bei der Bodentrocknung.

Zwecks Beschleunigung des Trocknungsvorganges wurde daher schon frühzeitig zur Trocknung mit vorgewärmter Luft übergegangen, und zwar besonders in Gebieten mit feuchterem Klima, wie z. B. England oder Belgien (1820) (33), oder dort, wo man mit möglichst wenig Gebäuden auszukommen versuchte (Nordamerika).

Der stärker ausgedehnte Hopfenbau brachte gegen Ende des 19. Jahrhunderts auch in den übrigen Gebieten des europäischen Festlands die Notwendigkeit mit sich, die Trocknung durch Verwendung vorgewärmter Luft zu beschleunigen. So entstanden zwischen 1885 - 1895 (31) in Bayern und Böhmen

unabhängig voneinander die ersten brauchbaren Hopfendarren, die im Gegensatz zu den bereits in England und Amerika bestehenden Anlagen den Hopfen nicht direkt mit den Feuergasen trockneten, sondern wohl hauptsächlich wegen der erhöhten Brandgefahr die Trocknungsluft an Heizröhren erwärmten.

Die ersten Darren in Bayern, bei Fruwirth (15) als "Hallertauer Darre" und bei Linke-Rebel (31) als "Deutsche Darre" bezeichnet, besaßen ähnlich wie die bereits bestehenden amerikanischen und englischen Darren nur eine Horde, auf die der Hopfen in einer Schütthöhe von 25 bis max. 40 cm aufgeschüttet wurde. Zur Überwindung des durch diese Schütthöhe gegebenen Widerstandes diente der natürliche Auftrieb der Warmluft, den man durch die entsprechend hohen Gebäude zu unterstützen suchte. Um eine möglichst gleichmäßige Trocknung zu erzielen, mußte der Hopfen während der Trocknungszeit mehrere Male vorsichtig umgeschaufelt werden. Diesen Nachteil hatte die nach Fruwirth (15) in Böhmen zuerst 1898 gebaute Löschner-Darre nicht; sie besaß 3-4 übereinanderliegende Horden, auf deren oberster Horde der zu trocknende Grünhopfen in einer Schichtstärke von 10-12 cm aufgebracht wurde. Die aus jalousieförmigen Elementen zusammengesetzten Horden ließen sich von aussen betätigen, so daß der vorgetrocknete Hopfen auf die jeweils darunterliegende Horde fiel und dabei durchmischt wurde, um schließlich in die unterste Horde, die ausziehbar war, zu gelangen. Diese Anordnung der Horden ist heute noch, zumindest auf dem europäischen Festland, die gebräuchlichste bei den Hopfen-Darren.

Neben diesen beiden grundsätzlichen Typen von Darren gab es um die Jahrhundertwende noch eine Vielzahl von Varianten, wie u. a. die Heijak-, Müller-, Weiß-, Hueber-, Linhard-, Kreißel- und Saazia-Darren, die bei Fruwirth (15) und Linke-Rebel (31) erwähnt werden. Bei fast sämtlichen dieser bisher genannten Darrsysteme wird der nahezu fertig getrocknete Hopfen der größten Hitze ausgesetzt, wobei die Warmluft sich schon bedeutend abgekühlt hat, wenn sie zu dem auf der obersten Horde bzw. in der obersten Schicht liegenden Grünhopfen kommt. Bei der Saazia-Darre dagegen wurde schon um 1905 versucht, den Grünhopfen mit höherer Temperatur zu trocknen, während der so bereits vorgetrocknete Hopfen in einem Luftstrom mit niedrigerer Temperatur fertig getrocknet werden sollte (52).

Bedingt durch den natürlichen Auftrieb der Warmluft, konnten alle diese Darren-Bauarten nur mit einer verhältnismäßig geringen Schütthöhe arbeiten. Ausserdem waren die Zugverhältnisse stark abhängig von der Witterung, was wiederum die Trocknungszeit mit beeinflusste. Da die Luftheritzer mit festen Brennstoffen arbeiteten und entsprechend wirkungsvolle Steuerungs- bzw. Regeleinrichtungen nicht bekannt waren, führte eine Verminderung des Frischluftdurchsatzes häufig zu unzulässig hohen Temperaturen und damit auch zur Schädigung des Hopfens. Diese Schädigungen äusserten sich in einer schlechten Farbe, im Fehlen von Glanz, in der Bräunung des Lupulins, in der Beeinträchtigung der Aromafeinheit und in der Senkung des Bitterwertes (18). Daher versuchte man schon frühzeitig, diese Erscheinungen durch Verwendung von Ventilatoren zu beseitigen. So entstanden um 1905 in Nordamerika die ersten "airblastkilns" (15), bei denen ein von einer Dampfmaschine angetriebener Ventilator die Warmluft durch den Hopfen drückte, wobei mehrere Horden nebeneinander angeordnet wurden.

Auch in den europäischen Hopfenbauländern wurden offensichtlich noch vor dem 1. Weltkrieg (11, 15, 31) die ersten Ventilatoren verwendet, die man zur Unterstützung des Auftriebes der Warmluft als Saugventilatoren in die Abluftschächte der Darren einbaute. Das Fortschreiten der Elektrifizierung auf dem Lande führte auch zu einem verstärkten Einsatz von Ventilatoren, so daß z. B. zwischen 1918 und 1939 sämtliche Darren in England damit ausgerüstet wurden (3). Der Einsatz der Ventilatoren als Saugventilatoren befriedigte häufig nicht (18), da sie oft durch falschen Einbau im Abluftschacht nicht den natürlichen Zug unterstützen, sondern durch die immer vorhandenen Undichtigkeiten, besonders im oberen Teil des Darrgebäudes, mehr oder minder große Mengen kalter Frischluft ansaugten. Durch den Einsatz von Druckventilatoren, die die Warmluft durch die Hopfenschicht drückten, begann man auch in den europäischen Hopfenbauländern etwa zwischen 1930 und 1940 (3, 21, 22, 31, 42, 55) diesen Nachteil zu beheben und damit auch gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Hopfendarren zu erhöhen.

Mit dem Aufkommen funktionsfähiger Ölbrenner wurden seit Anfang der 50. Jahre allmählich die Luftheritzer für feste Brennstoffe verdrängt, so daß heute zumindest in den westeuropäischen und überseeischen Hopfenbauländern das Heizöl zur Hopfentrocknung ausschließlich angewendet wird.

Die verstärkte Einführung der Maschinenpflücke in der Hopfenernte, in Nordamerika etwa ab 1945, in England zu Beginn und in Deutschland gegen Ende der 50. Jahre, brachte den Wunsch nach einer kontinuierlichen Trocknung. Die ersten Überlegungen, eine Pflückmaschine mit einem kontinuierlichen Trockner zu kombinieren, wurden 1949 in den Vereinigten Staaten angestellt und führten zur Entwicklung eines Bandtrockners, der von Albrook (1) beschrieben wird. Dieses Gerät hat jedoch offensichtlich keine stärkere Verbreitung gefunden. In England wurde 1955 der erste 5-Band-Trockner zur Hopfentrocknung eingesetzt (3), dem mehrere 1-Band-Trockner im Jahre 1957 folgten. Ab 1958 wurden auch in Deutschland die ersten Bandtrockner zur Hopfentrocknung verwendet und haben sowohl in den europäischen als auch in den überseeischen Hopfenbauländern eine gewisse Verbreitung gefunden. Der heute fast ausschließlich verwendete Typ ist ein 3-Band-Trockner, der bereits ausreichend in der Literatur beschrieben wurde (23, 35, 58).

1. 2. Derzeitiger Stand der Hopfentrocknung.

Mit der fortschreitenden Mechanisierung der Hopfenernte zeigten sich mehr und mehr Schwierigkeiten beim Trocknen des Hopfens. Diese Schwierigkeiten werden dadurch bedingt, daß durch den Einsatz von immer leistungsfähigeren Pflückmaschinen in kürzerer Zeit größere Mengen an Grünhopfen anfallen. Zur Vermeidung von Qualitätseinbußen muß der Hopfen dann möglichst schnell getrocknet werden, was dazu führt, daß die vorwiegend vorhandenen, auf die Handpflücke abgestimmten Trocknungsanlagen in der Regel überlastet sind.

Der Aufbau einer Hopfendolde ist trockenungstechnisch ungünstig. Die um die Spindel sitzenden Doldenblätter haben im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr große Oberfläche. Da die Geschwindigkeit des Wasserentzuges beim Trocknen mit Luft von der Größe der Oberfläche des Trocknungsgutes abhängt, trocknen die Doldenblätter schneller als die Spindel, die einen großen Teil des Gesamtwassergehaltes (nach Watson (53) etwa 25%) der Dolde enthält, nur eine verhältnismäßig kleine Oberfläche hat und noch dazu durch die Doldenblätter dem unmittelbaren Zutritt der Trocknungsluft entzogen ist. Die Trennung von Spindeln und Doldenblättern vor dem Trocknen ist nicht sinnvoll, da am Übergang zwischen Spindel und Doldenblättern die Lupulindrüsen sitzen, deren Inhalts-

stoffe eine vorrangige Bedeutung für die Bierherstellung haben. Bei der Trennung bzw. anschließenden Trocknung würden diese Drüsen verlorengehen.

Ein weiterer Aspekt, der trocknungstechnisch besondere Beachtung verdient, ist das Verhalten der für die Bierherstellung wichtigsten Inhaltsstoffe des Hopfens. An erster Stelle sind hier die Bitterstoffe zu nennen. Je nach ihrer Löslichkeit in verschiedenen organischen Lösungsmitteln unterscheidet man dabei folgende Substanzgruppen: Gesamtharze-Weichharze, Hartharze, α - u. β -Säuren sowie α - und β -Weichharze. Die größte Bedeutung bei der Bierherstellung kommt den α -Säuren, bzw. den beim Kochvorgang daraus entstehenden Iso- α -Säuren zu. Sie verleihen dem Bier den charakteristisch bitteren Geschmack und bedingen das Schaumbildungsvermögen sowie infolge ihrer antiseptischen Eigenschaften die Haltbarkeit des Bieres. Aufgrund des chemischen Aufbaues sind die α -Säuren relativ instabil und unterliegen insbesondere unter dem Einfluß erhöhter Temperaturen leicht oxydativen Veränderungen. Es entstehen dabei bevorzugt chemisch nicht definierte Hartharze, die keine Bitterkraft besitzen und deshalb brautechnologisch wertlos sind (37).

Die zweite Gruppe bilden die Hopfenöle, d. h. ätherische Öle, ein Gemisch aus etwa 200 Einzelkomponenten, das im Hopfen zwar nur in geringer Menge vorhanden ist, dem Bier jedoch ein charakteristisches Aroma gibt.

An dritter Stelle sind schließlich die Gerbstoffe zu nennen, die für die Bierherstellung jedoch von untergeordneter Bedeutung sind.

Insbesondere zur Vermeidung des oxydativen Abbaues der Bitterstoffe und zur Verhinderung des Verflüchtigens der Hopfenöle dürfen bei der Trocknung nicht beliebig hohe Temperaturen angewendet werden.

Diese Erfahrung ist offensichtlich aufgrund empirischer Beobachtungen schon sehr früh (15) gemacht worden und hat dazu geführt, daß man, besonders in den Gebieten, in denen Edelhopfen angebaut wurden, mit verhältnismäßig geringer Temperaturerhöhung der Trocknungsluft gearbeitet hat. So stellte Fruwirth (15) die Forderung auf, daß bei sehr sorgsamem Trocknen die Temperatur in der untersten Hopfenschicht nicht über 37°C ansteigen soll (in früheren Auflagen ist bei Fruwirth diese Temperaturgrenze noch niedriger

angegeben). Gleichzeitig berichtet er jedoch auch, daß man in England und Amerika mit Temperaturen bis zu 60°C arbeitet, wobei man früher, besonders in Amerika, mit Temperaturen bis zu ca. 82°C gearbeitet haben soll. Huber (21) berichtet, daß der Hopfen während der Trocknung keine höhere Temperatur als etwa 40° annehmen darf, wenn nicht eine Schädigung der Hopfenbestandteile und des Aussehens eintreten soll.

Die Frage des "Aussehens" des Hopfens ist sowohl in früheren Zeiten als auch heute noch für den Marktwert des Hopfens ausserordentlich wichtig, da der Kaufpreis vom Handel nicht aufgrund einer chemischen Analyse der Hopfeninhaltsstoffe bestimmt wurde und wird, sondern nur aufgrund einer "Handbonitierung", für die in neuerer Zeit bestimmte Regeln (Standardmethode der Wiss. Kommission des europäischen Hopfenbaubüros) festgelegt wurden. Dieses noch heute praktizierte Verfahren ist z. B. bereits bei Curtin Cosbie (10) aufgrund Anfang der 30. Jahre durchgeführter Versuche in Frage gestellt worden. Curtin Cosbie stellte fest, daß der Marktwert, bestimmt nach dem Aussehen des Hopfens, steigt, je niedriger die Temperatur war, bei der der Hopfen getrocknet wurde; der Brauwert des Hopfens jedoch, beurteilt nach dem Geschmack des Bieres, bei erhöhten Trocknungslufttemperaturen günstiger war. Von Watson (54) Anfang der 50. Jahre durchgeführte Versuche zum gleichen Fragenkomplex zeigten keine eindeutigen Unterschiede zwischen "Marktwert" und "Brauwert" des Hopfens, wobei der Brauwert, ebenso wie bei Fuchs (16), durch den Bitterstoffgehalt ausgedrückt wird. Die von Watson angegebenen Versuche wurden mit Lufttemperaturen von 49°C (120°F) bis 82°C (180°F) und Luftgeschwindigkeiten zwischen etwa 0,102 und 0,33 m/s durchgeführt. Jedoch muß bei der Wertung dieser Versuche berücksichtigt werden, daß der Hopfen, wie es in England üblich ist, zu Beginn des Trocknungsprozesses geschwefelt wurde. Es ist bekannt, daß durch Schwefeln Unterschiede im "Aussehen" einer Hopfenpartie ausgeglichen werden können. So gibt Burgess (8) über die Wirkung des Schwefelns folgendes an: "Schwefeldioxyd hebt den Marktwert des Hopfens für den Hopfenanbauer bei den augenblicklichen Bewertungsmaßstäben. Sein Gebrauch wandelt das natürliche Grün des Hopfens in ein Grün mit einem leichten Gelbschimmer um und reduziert die Intensität jeglicher brauner Mißfarben. Dadurch gibt es der Hopfenpartie ein mehr einheitliches und gefälliges Aussehen. Gleichzeitig wirkt es vorbeugend gegen einen stumpfen Geruch des Hopfens und wirkt antiseptisch auf die Bakterientätigkeit und auf Schimmelpilze."

Im Gegensatz zu England ist z. B. in Deutschland das Schwefeln dem Hopfenanbauer nicht erlaubt (geschwefelt wird vorwiegend nur beim Hopfenhändler bzw. in den Aufbereitungsanstalten) und dürfte sich auch aufgrund der bestehenden Marktordnung nicht einführen.

Aufgrund der Untersuchungen von Ramspeck (42) und Weise (18, 55) konnte auch in Deutschland nachgewiesen werden, daß Trocknungslufttemperaturen bis zu 60°C keine schädigenden Auswirkungen auf die Qualität des Hopfens haben. Diese Temperatur wird heute allgemein als obere Grenze angesehen und ist auch u. a. durch Untersuchungen von Verzelle (50) und Maton (33) im Wesentlichen bestätigt worden, wobei man wegen der angeblich höheren Empfindlichkeit des Grünhopfens, über die z. B. von Ramspeck (42) und De Backer (2) berichtet wird, diese Temperatur beim trockenen Hopfen bzw. fast trockenen Hopfen anwendet. Bei den auf dem europäischen Festland gebräuchlichen Darrenbauarten mit mehreren, übereinanderliegenden Horden ist automatisch der trockenste Hopfen der höchsten Temperatur ausgesetzt, wogegen bei den Einhordendarren, wie sie z. B. in England gebräuchlich sind, die Temperatur vom Beginn zum Ende der Trocknung allmählich gesteigert wird (3, 11).

Neben der Trocknungslufttemperatur kann jedoch auch die angewendete Luftgeschwindigkeit die Qualität des Trockenhopfens nachteilig beeinflussen, und zwar dann, wenn der fast trockene Hopfen im Luftstrom zu flattern beginnt und dadurch die zu Beginn dieses Abschnittes erwähnten Lupulindrüsen ausgeschüttelt werden. Diese Verluste durch "mechanische" Einwirkungen können beträchtlich sein und nach Angaben von Verzelle (50) im Extremfall bis zu 37% betragen, wobei auch eine unvorsichtige Handhabung des frisch getrockneten Hopfens die gleiche Wirkung zeigt.

Bei den älteren Darrenbauarten mit natürlichem Auftrieb der Warmluft trat ein "Flattern" des Trockenhopfens nicht auf, da die Luftgeschwindigkeit je nach Witterungsverhältnissen mit etwa $0,06\text{ m/s}$ (18), nach Angaben von Day (11) zwischen 0 und max. $0,1\text{ m/s}$ zu niedrig war. Erst mit der Einführung der Ventilatoren, insbesondere der Radiallüfter, konnten diese Luftgeschwindigkeiten wesentlich erhöht werden. Ramspeck (42) gibt als Schwebegeschwindigkeit für Trockenhopfen als untere Grenze etwa $0,7\text{ m/s}$ an und empfiehlt, um das Flattern mit hinreichender Sicherheit zu vermeiden, in den Darren nur eine max. Geschwindigkeit von $0,4\text{ m/s}$ zu verwenden.

Die heutigen Darren im Bundesgebiet arbeiten mit Heißluftgeschwindigkeiten von etwa 0,25 bis 0,31 m/s, wobei gerade bei Neu- bzw. Umbauten oft eine höhere Luftgeschwindigkeit zwischen etwa 0,3 bis 0,38 m/s angestrebt wird. Die vorwiegend eingesetzten Bandtrockner arbeiten beim Trockenhopfen ebenfalls mit Heißluftgeschwindigkeiten bis zu etwa 0,3 m/s (57), während beim Grünhopfen teilweise mittlere Luftgeschwindigkeiten von etwa 0,5 bis 0,6 m/s angewendet werden.

2. Zielsetzung der Untersuchungen.

Die aufgrund der fortschreitenden Mechanisierung der Hopfenernte auftretenden Schwierigkeiten bei der Hopfentrocknung können jedoch auch durch die im obigen Abschnitt beschriebenen Erkenntnisse nicht behoben werden. Nach wie vor stellt die Trocknung den bedeutensten Engpass des gesamten Ernteverfahrens dar.

Es muß daher als eine vordringliche Aufgabe angesehen werden, die Leistungsfähigkeit der Hopfentrocknungsanlagen wesentlich zu steigern, wobei die für die Bierherstellung notwendigen Eigenschaften des Hopfens nicht beeinträchtigt werden dürfen.

Geht man davon aus, daß zur Leistungssteigerung einer Trocknungsanlage die Vergrößerung der Grundfläche bzw. ihrer Trocknungsfläche aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht in Frage kommt, so bleibt nur die Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit bzw. der Geschwindigkeit des Wasserentzuges übrig.

Das einfachste Mittel, eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit zu erreichen, ist die Erhöhung der Trocknungstemperatur. Neben der Anwendung höherer Heißlufttemperaturen, die schon verschiedentlich versucht wurde (1, 6, 10, 25, 33, 36, 42, 54, 56), wobei bis auf die Untersuchungen von Albrook (1) wesentliche Schädigungen der Hopfenqualität festgestellt wurden, zählen dazu auch die von Petricek (41) angestellten Versuche mit der Hochfrequenz-trocknung und die Versuche von Fuchs (16) mit der Infrarot-Trocknung. Fuchs stellte fest, daß die Trocknung mit Hilfe von Infrarotstrahlen für Hopfen wegen des Aufbaues der Dolden (isolierende Wirkung der Doldenblätter) nicht anwendbar ist. Bei den von Petricek (41) durchgeführten Versuchen wurde eine gerin-

ge Menge von ca. 15 g Hopfen in ein hochfrequentes Wechselfeld gebracht und auf eine Endfeuchte von ca. 8% getrocknet. Bei einer Frequenz von 18 - 18,5 MHz betrug die Trocknungszeit 8,5 - 7 min. und die max. Doldentemperatur 99 - 110°C, wobei keine augenscheinlichen Qualitätsmängel festgestellt wurden. Nach Angaben von Petricek ist jedoch der Energie- und der apparative Aufwand für die Einführung der Hochfrequenztrochnung im großtechnischen Maßstab so hoch, daß ihre Anwendung für die Hopfentrocknung in absehbarer Zeit nicht in Frage kommen dürfte.

Die Ergebnisse von Petricek (41) und besonders auch die von Albrook (1) weisen darauf hin, daß es unter bestimmten Voraussetzungen möglich sein muß, auch ohne wesentliche Qualitätseinbußen mit höheren Heißlufttemperaturen als bisher üblich zu arbeiten und so die Leistung einer Hopfentrocknungsanlage zu steigern.

3. Spezielle Probleme der Hopfentrocknung und Untersuchungsergebnisse.

Die Umwandlung der Bitterstoffe und der ätherischen Öle in der intakten Hopfendolde stellen chemische Reaktionen dar, deren Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den äusseren Bedingungen, wie Konzentration, Wassergehalt der Dolden und Temperatur kaum untersucht ist (37). Es läßt sich jedoch z. B. aus den Ergebnissen der Untersuchungen von Meier (36) u. a. ableiten, daß diese Reaktionen relativ langsam vor sich gehen, wobei eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit zu höheren Temperaturen hin zu erkennen ist. Weiterhin scheint die Reaktionsgeschwindigkeit bei höherem Feuchtegehalt des Hopfens größer zu sein als bei niedrigem, wie es bereits die Untersuchungen von Ramspeck (42) vermuten lassen. Mit diesen Aussagen lassen sich jedoch die technischen Trocknungsbedingungen zur Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens nicht festlegen. Es waren daher eigene Versuche notwendig, die durch entsprechende Qualitätsuntersuchungen des Hopfens ergänzt werden mußten.

3.1. Vorversuche im Trockenschrank.

Um einen Überblick über evtl. mögliche Qualitätsschädigungen bei der Einwirkung verschiedener Temperaturen auf den Grünhopfen zu erhalten, wurden während der Hopfenernte 1965 Grünhopfenproben in einem Trockenschrank

ohne Zwangsbelüftung unterschiedlichen Temperaturen bei verschiedener Einwirkungsdauer ausgesetzt. Diese so behandelten Hopfenproben wurden dann anschließend in einem handelsüblichen Bandtrockner auf dem untersten Band bei Heißlufttemperaturen von 50-60°C zu Ende getrocknet und einer α -Säurebestimmung nach Hartong sowie einer Handbonitierung nach der Standardmethode der Wiss. Kommission des europäischen Hopfenbaubüros unterzogen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2:

Temp. im Trocken- schrank (°C)	Verweil- zeit (min)	Feuchte- gehalt (%)	α -Säure n. Hartong (%)	Handbonitierung Punktzahl
60	0	80,1	5,5	
	60	78,5	5,8	75
76	0	81,0	5,5	
	15		5,7	77
	30		5,4	75
	45		5,9	66
	60	77,3	6,5	59
89	0	78,8	7,9	
	15		6,6	72
	30		6,3	60
	45		6,2	54
	60	75,9	6,9	59
95	0	78,2	7,9	
	10		7,1	77
	20		5,7	70
	30		7,4	67
	40	75,7	7,1	64
109	0	78,2	7,2	
	10		7,2	74
	20		6,5	68
	30		6,9	61
	40	70,0	6,5	65

Wie aus den Werten der Spalte 3 der obigen Tabelle hervorgeht, ließ sich ein gewisser, wenn auch relativ geringer Trocknungseffekt nicht vermeiden, obwohl bei diesen Untersuchungen versucht wurde, möglichst keinen Wasserentzug während der Verweilzeit im Trockenschrank zuzulassen.

Weiterhin ist aus dieser Tabelle zu ersehen, daß unter den angegebenen Versuchsbedingungen im Gegensatz zu den Untersuchungen von Verzelle (50) ein Einfluß der Temperatur auf den α -Säuregehalt (bezogen auf Trockensubstanz) mit Sicherheit nicht abzuleiten ist. Vielmehr müssen die aufgetretenen Unterschiede neben evtl. Analysenfehlern größtenteils auf die von Natur aus vorhandene Inhomogenität des Hopfens zurückgeführt werden (38).

Die Ergebnisse der Handbonitierung (letzte Spalte der Tabelle 2) zeigen einen klaren Abfall zu höheren Temperaturen und längeren Verweilzeiten hin. Dieser Abfall läßt sich offensichtlich darauf zurückführen, daß der Hopfen in praktisch ruhender Atmosphäre den hohen Temperaturen ausgesetzt wurde. Dadurch trat besonders bei längeren Verweilzeiten eine vollständige Sättigung bzw. Übersättigung der Luft im Trockenschrank ein, die teilweise zu starken Rekondensationserscheinungen führte (der Hopfen schwitzte). Durch dieses Schwitzen verfärbt sich die Hopfendolde teilweise beträchtlich, was sich auch in den Ergebnissen der Handbonitierung widerspiegelt. Die gleiche Erscheinung konnte auch bei Mehrhordendarren, insbesondere vier- und fünf-Hordendarren beobachtet werden, bei denen bei geringem Luftdurchsatz die Schütthöhe so sehr gesteigert wurde, daß die Luft schon vor dem Eintritt in die oberste Horde (Grünhopfen) vollkommen gesättigt war. Das sich unter diesen ungünstigen Bedingungen bildende Kondenswasser in der obersten Hopfenschicht führte in Verbindung mit den langen Verweilzeiten von bis zu 2 Stunden zu einer starken Verfärbung und zu einem stumpfen Aussehen des Hopfens.

3.2. Versuchstrockner mit Variation von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit.

Aus den unter Abschnitt 3.1. beschriebenen Versuchen und Beobachtungen geht hervor, daß neben der Temperatur offensichtlich auch die durchgesetzte Luftmenge bzw. die Luftgeschwindigkeit einen bedeutenden Einfluß

zumindest auf die äusseren Qualitätsmerkmale des Hopfens hat. Um diese Zusammenhänge genauer zu untersuchen und auch gleichzeitig den Einfluß von Temperatur und Luftgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf und die Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens zu ermitteln, wurde ein elektrisch beheizter Versuchstrockner gebaut, der es erlaubt, Hopfen bei in weiten Grenzen variierbaren Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen zu trocknen.

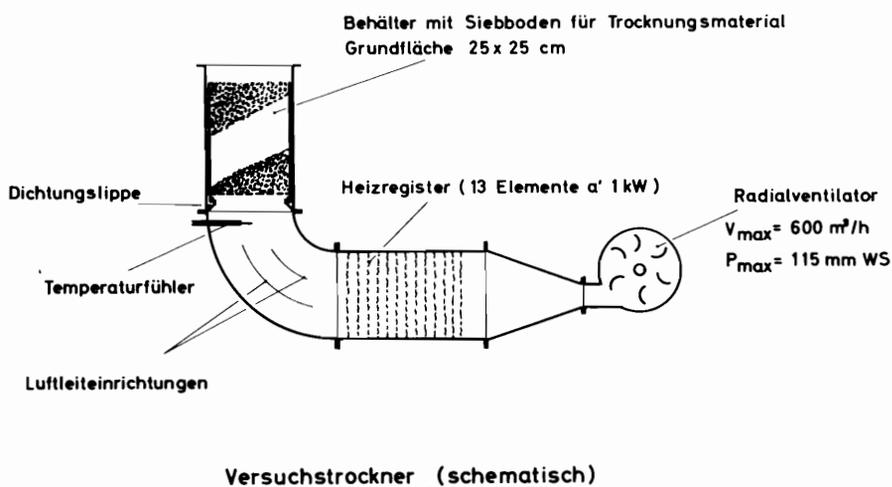
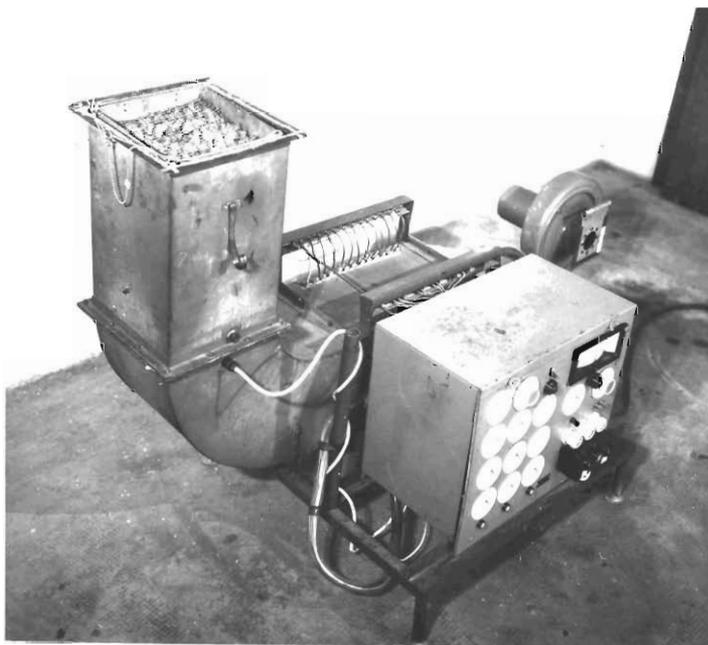


Abb. 1

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Trockners, bei dem die Luft mittels eines Radialgebläses durch das Heizregister gedrückt wird, um anschließend durch den mit einem Siebboden versehenen Trocknungsbehälter zu wandern. Zur Vermeidung von Luftverlusten sitzt der Trocknungsbehälter auf einer Dichtlippe. Die Luftmengenregulierung erfolgt saugseitig am Ventilator mittels Lochblende. Dicht unterhalb des Siebbodens befindet sich der Temperaturfühler, der zur Verminderung der Trägheit aus einem Widerstandsthermometer (Platinwendel in Hartglas) kleiner Masse besteht. Je nach durchgesetzter Luftmenge und gewünschter Temperatur werden eine

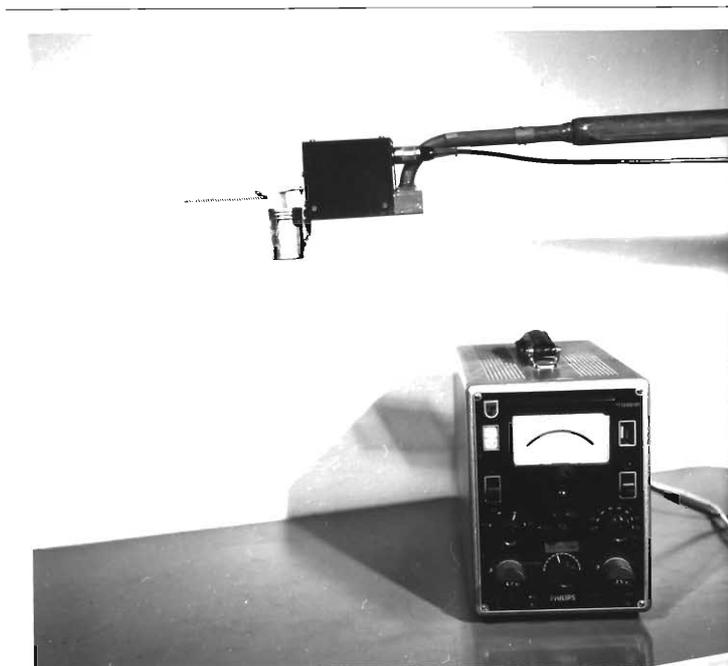
entsprechende Anzahl Heizelemente von Hand eingeschaltet, während der mit dem Temperaturfühler verbundene Einpunkt-Regler wahlweise ein oder zwei weitere Heizelemente selbsttätig zu- bzw. abschaltet. Auf diese Weise wurde erreicht, daß eine eingestellte Temperatur mit einer max. Abweichung von $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ eingehalten werden konnte (Kontrolle der Abweichung mittels Miniatur-Mantel-Thermoelementen von 1,0 mm ϕ).

Abbildung 2 zeigt eine Gesamtansicht des Versuchstrockners.



Bei der Bestimmung des Luftdurchsatzes bzw. der Luftgeschwindigkeit und deren Verteilung über dem durchströmten Querschnitt wurde in Vorversuchen festgestellt, daß Hitzdrahtanemometer in diesem Fall nicht geeignet sind, da diese Geräte durch hochfliegende Doldenblätter oder Teile davon sehr schnell zu einer Fehlmessung führen bzw. u. U. sogar beschädigt werden. Der Einsatz von Stausonden (Prandtl-Rohr) oder Flügelradanemometern war wegen der normalerweise zu geringen Geschwindigkeit der Trocknungsluft ebenfalls nicht möglich. Katameter sind u. U. zwar grundsätzlich für diesen Anwendungsfall geeignet, jedoch erwies sich die Aufnahme der Geschwindigkeitsverteilung über der durchströmten Hopfenschicht damit als

zu umständlich und zeitraubend. Daher wurde ein Gerät zur Aufnahme des Winddruckes gebaut, das auch bei den bereits beschriebenen (57, 58) Bandtrockner- und Darrenuntersuchungen verwendet wurde. Dieses Meßgerät besteht im Wesentlichen aus einem Balsaholz-Rahmen, der mit 0,2 mm starken und ca. 0,8 mm breiten Aluminiumstreifen zur Aufnahme des Winddruckes auf einer Fläche von 25 cm^2 (5 x 5 cm) bespannt ist. Über einen Öldämpfer wirkt dieser Aufnehmer auf einen Kraftaufnehmer (max. Belastbarkeit 10 p) dessen freigespannte Widerstandsdrähte (unbonded strain gage) in Vollbrücke geschaltet sind. Die Anzeige der auftretenden Kräfte erfolgt mit einem direkt anzeigenden Trägerfrequenz-Meßverstärker. Abbildung 3 zeigt die gesamte Meßanordnung.



Mit dieser Anordnung wurde eine Ansprechempfindlichkeit erreicht, die bei 0,13 m/s Luftgeschwindigkeit lag. Bedingt durch die Nullpunktwanderung des Trägerfrequenz-Meßverstärkers konnte jedoch erst bei Luftgeschwindigkeiten über rd. 0,25 m/s mit einer Abweichung unter $\pm 5\%$ gegenüber der Katametermessung in einem Meßbereich zwischen 0,25 m/s und ca. 1,6 m/s gemessen werden. Allerdings zeigte sich, daß trotz Lackierung des Balsaholz-Rahmens mit einem wasserabstossenden Lack durch Feuchtigkeitsaufnahme eine Gewichtsveränderung auftrat, die bei Messungen im unteren Luftgeschwindigkeits-

bereich (unter ca. 0,5 m/s) eine häufige Nacheichung des Meßgerätes erforderlich machte. Ausserdem eignet sich dieses Gerät nur für Messungen in einem vertikalen Luftstrom.

Die Vorversuche hatten weiterhin gezeigt, daß besonders bei niedriger Schütthöhe des Hopfens und niedrigen Luftgeschwindigkeiten die Durchströmung der Schüttung nicht gleichmäßig war, sondern sehr starke Unterschiede aufwies. Erst bei Schütthöhen über 15 cm konnten über der Hopfenschicht verhältnismäßig konstante Luftgeschwindigkeiten gemessen werden, die über etwa 0,3 m/s nicht mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert abwichen. Da bei den gebräuchlichen Hopfentrocknungsanlagen oft Schütthöhen von 25-30 cm angewendet werden, wurde auch im Versuchstrockner bei den Versuchen zur Aufstellung der Trocknungsverlaufskurven mit einer konstanten Schütthöhe von 30 cm Grünhopfen gearbeitet; ausserdem ergab bei einer Grundfläche von 25 x 25 cm diese Schütthöhe etwa 400 g Trockenhopfen, eine Menge, die für die Durchführung der verschiedenen Qualitätsuntersuchungen notwendig war.

Zur Einstellung des geplanten Luftdurchsatzes wurde in den Trockner Grünhopfen in der o. a. Schütthöhe gefüllt und die saugseitig angebrachte Blende beim Beblasen mit Kaltluft so eingestellt, daß bei der gewünschten Heißlufttemperatur die erforderliche Heißluftgeschwindigkeit erreicht wurde. Durch Luftgeschwindigkeits- und Temperaturmessungen mittels eines Sekundenthermometers dicht oberhalb der Hopfenschicht wurde während der Versuche die eingestellte Luftgeschwindigkeit mehrmals kontrolliert und bei größeren Abweichungen als 5% vom eingestellten Sollwert der Heißluftgeschwindigkeit die Blendeneinstellung korregiert, wobei der entsprechende Trocknungsversuch dann wiederholt wurde. Die in den nachfolgenden Diagrammen und Tabellen angegebenen Werte sind daher mittlere Werte der Heißluftgeschwindigkeit dicht unterhalb der Hopfenschicht, deren Meßfehler, wie bereits erwähnt, für Werte $\geq 0,3$ m/s max. etwa $\pm 10\%$ beträgt.

Weiterhin wurde sowohl bei den Vorversuchen als auch bei den Hauptversuchen festgestellt, daß die eingestellten Luftgeschwindigkeiten beim Grünhopfen und beim Trockenhopfen kaum voneinander abweichen. Diese Erscheinung, die auch bereits bei Strach und Srbek (49) beschrieben ist, deutet darauf hin, daß die Strömungswiderstände praktisch konstant sind, was auch durch entsprechende Versuche, die unter Abschnitt 3.5. beschrieben werden, bewiesen werden

Zur Aufstellung der Trocknungsverlaufskurven wurde die Abnahme des Feuchtegehaltes während der Trocknung durch Wägung ermittelt. Bei den Vorversuchen wurde festgestellt, daß eine automatische Registrierung der Trocknungsverlaufskurven mit zu großen Fehlern behaftet war, da es nicht gelang, den Trocknungsbehälter so aufzuhängen, daß einerseits der gewünschte Luftdurchsatz durch die Hopfenschicht immer gewährleistet war, zum anderen aber auch elastische Verbindungsglieder (Manschetten) zwischen Trocknungsbehälter und Heißluftschacht die Messung nicht beeinflußten. Eine weitere Schwierigkeit stellten die hohen Luftgeschwindigkeiten dar, bei denen gegen Ende der Trocknung der aus wasserfest verleimten, dünnen Preßholzplatten bestehende Trocknungsbehälter häufig durch den Luftstrom angehoben wurde, so daß er durch eine entsprechende Verriegelung nach unten gedrückt werden mußte.

Um ein "Ausblasen" des Hopfens zu verhindern, wurde er durch ein oberes Drahtgitter, das mit dem Trocknungsbehälter verbunden war, abgedeckt (siehe auch Abbildung 2).

Weiterhin hatten die Vorversuche gezeigt, daß es für den Trocknungsverlauf ohne einen meßbaren Fehler möglich ist, den Trocknungsbehälter mit dem darin befindlichen Hopfen aus dem Heißluftstrom kurzzeitig herauszunehmen und ihn auf einer Schnellwaage zu wiegen. Bei den Trocknungsversuchen wurde daher darauf geachtet, daß dieser Vorgang nicht länger als etwa 10 s dauerte, wobei diese "Verlustzeiten" bei der Trocknungszeit nicht berücksichtigt wurden.

Da bei den Trocknungsversuchen nicht nur die Trocknungsverlaufskurven zu ermitteln waren, sondern auch gleichzeitig entsprechende Qualitätsuntersuchungen angestellt werden sollten, mußte der Grünhopfen so gelagert werden, daß keine Veränderung der Qualitätsmerkmale durch eine evtl. unzweckmäßige Lagerung zu erwarten war. Die für einen oder mehrere Versuche benötigte Grünhopfenmenge wurde daher nach Entfernen der größten Verunreinigungen (Stengel- und Blatteile) von Hand gründlich gemischt und daraus durch die in der Zerkleinerungstechnik übliche Viertelung (48) die entsprechenden Proben zur Feuchtegehaltsbestimmung, zur Vergleichstrocknung und zur Versuchstrocknung gezogen. Zur Feuchtegehaltsbestimmung wurde der Grünhopfen bis zur Gewichtskonstanz, d. h., 5 1/2 Stunden, im Trockenschrank bei 106°C getrocknet. Die nicht sofort benötigten Proben für die Versuchstrocknung wur-

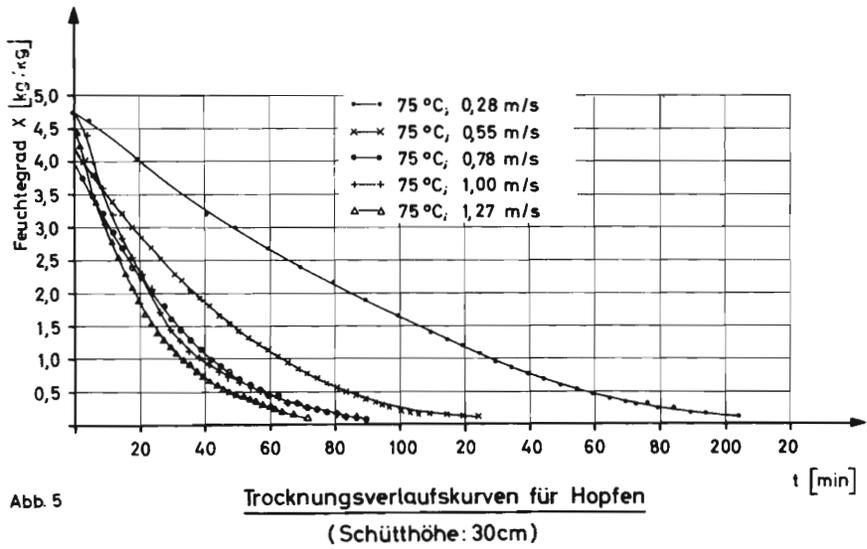
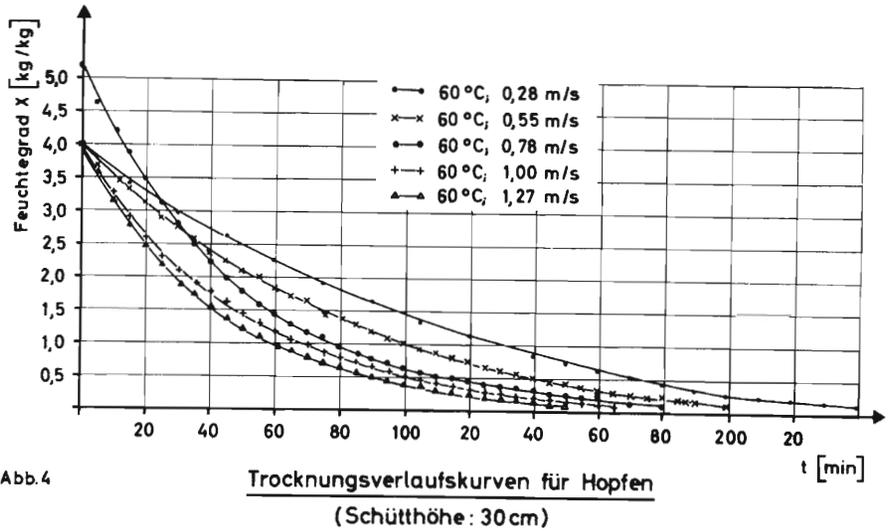
den in einem Kühlraum bei $+ 2^{\circ}\text{C}$ zwischengelagert, wobei darauf geachtet wurde, daß keine Probe länger als ca. 5 Stunden lagerte.

Die Vergleichstrocknung wurde in einem zweiten, elektrisch beheizten Trockner bei einer Temperatur von $55-57^{\circ}\text{C}$ und einer Luftgeschwindigkeit von rd. $0,25\text{ m/s}$ durchgeführt. Dieser Trockner wurde in der gleichen Einstellung bereits von Zattler und Meier (36) für Vergleiche bei Versuchen zum Angehen des Hopfens verwendet.

Bei den Trocknungsversuchen konnte eine bestimmte Endfeuchte des Hopfens nicht exakt eingehalten werden, da der Grünhopfen unterschiedliche Feuchtegehalte besaß und ausserdem die Trocknung nicht abgebrochen werden konnte, bevor nicht auch der Hopfen in der obersten Schicht so weit heruntergetrocknet war, daß Qualitätsveränderungen durch einen zu hohen Feuchtegehalt ausgeschlossen waren. Dadurch ergab sich zwangsläufig je nach Temperatur und Luftdurchsatz eine teilweise erhebliche Übertrocknung der untersten Hopfenschichten, deren mögliche Auswirkungen auf verschiedene Qualitätsmerkmale in Abschnitt 3.4. näher erläutert werden. Für die Angaben über Feuchtegehalt bzw. Feuchtegrad im nächsten Abschnitt werden jedoch die durch die oben beschriebene Wägung bestimmten Mittelwerte der gesamten Schütthöhe verwendet.

3.3. Trocknungsverlaufskurven und spezifischer Wärmeaufwand.

Zur Ermittlung des Einflusses von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens wurden die Trocknungsversuche mit Heißlufttemperaturen von 60° , 75° , 90° , 105° und 120°C jeweils bei mittleren Heißluftgeschwindigkeiten von $0,28$; $0,55$; $0,78$; $1,0$ und $1,27\text{ m/s}$ durchgeführt. Die Ergebnisse dieser während der Hopfenernte 1966 angestellten Versuche sind in den nachfolgenden Abbildungen zusammenfassend dargestellt.



Die Abbildungen Nr. 4 - 8 zeigen den Feuchtegrad des Hopfens, aufgetragen über der Zeit mit den verschiedenen Luftgeschwindigkeiten als Parameter. Bedingt durch die unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrade überschneiden sich einige der aufgenommenen Trocknungsverlaufskurven. Eine Korrektur der Kurven auf einen konstanten Anfangsfeuchtegehalt durch eine Parallelverschiebung ist nicht ohne weiteres möglich. Selbst wenn davon ausgegangen wird, daß es sich bei dem über einen Feuchtegrad von 4,0 hinausgehenden Wert nicht um eine vegetative Feuchte, sondern um eine reine Oberflächenfeuchte handelt, kann der Trocknungsvorgang bis auf einen Feuchte-

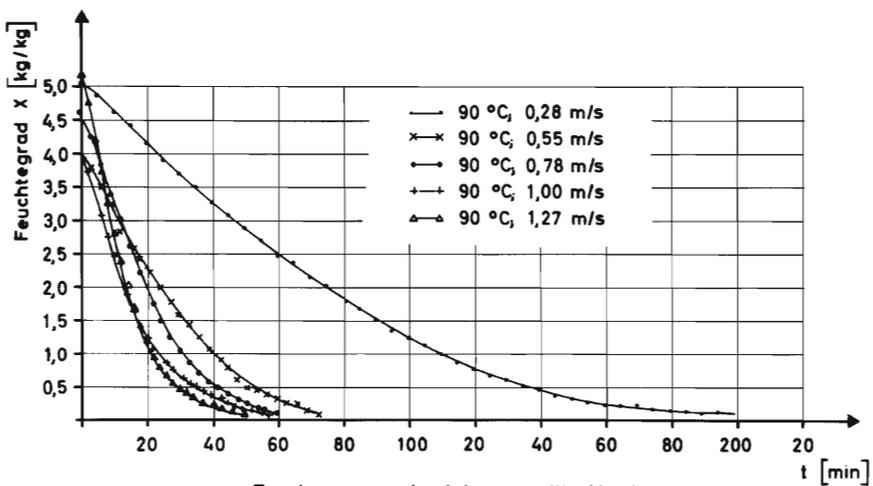


Abb. 6 Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

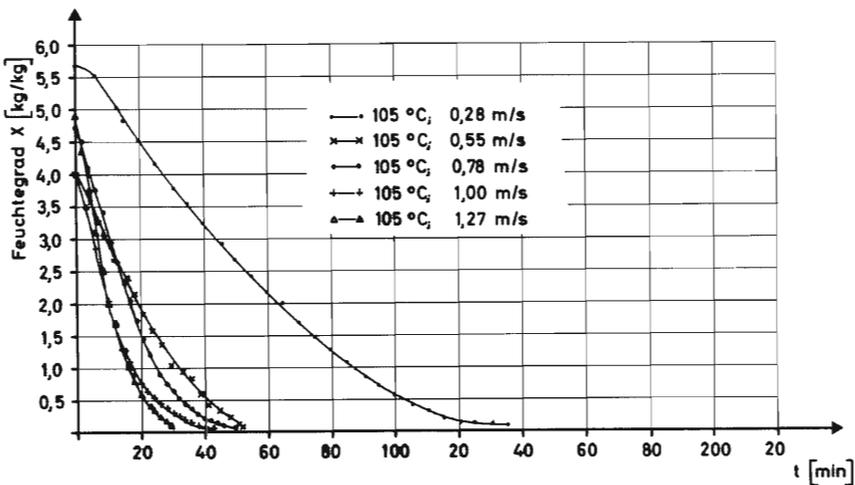


Abb. 7 Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30cm)

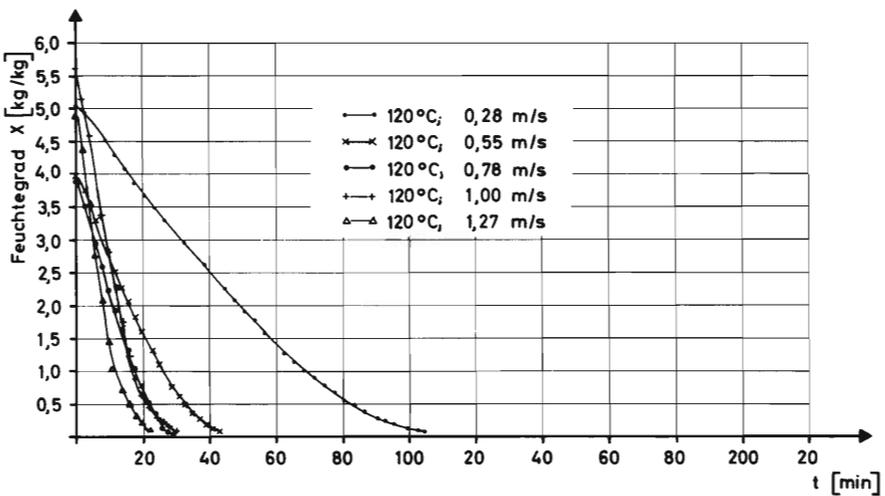


Abb. 8 Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30cm)

tegrad von 4,0 herunter nicht als reine Verdunstung von Oberflächenwasser angesehen werden. Dieses "Oberflächenwasser" sitzt auch zwischen den einzelnen Doldenblättern und ist somit, wie auch bereits in Abschnitt 1.2. erwähnt, dem unmittelbaren Zutritt der Trocknungsluft entzogen. Ausserdem wurden die Trocknungsverlaufskurven aus den in Abschnitt 3.2. erwähnten Gründen nicht an einzelnen Dolden oder einer einlagigen Schicht, sondern an einem unregelmäßig geschichteten Haufwerk von je nach Doldengröße etwa 20-25 übereinanderliegenden Doldenschichten durchgeführt.

Trotz der unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrade ist aus den obigen Kurvenscharen zu ersehen, dass bei einer Temperatur von 60 °C die Steigerung der Luftgeschwindigkeit von 0,28 auf 1,27 m/s keine übermässige Verkürzung der Trocknungszeit bedingt. Erst bei höheren Temperaturen wirken sich auch die erhöhten Heissluftgeschwindigkeiten stärker aus.

Bei den Abbildungen 9 - 13 ist ebenfalls der Feuchtegrad des Hopfens über der Zeit aufgetragen, jedoch wurde hier die Temperatur als Parameter benutzt.

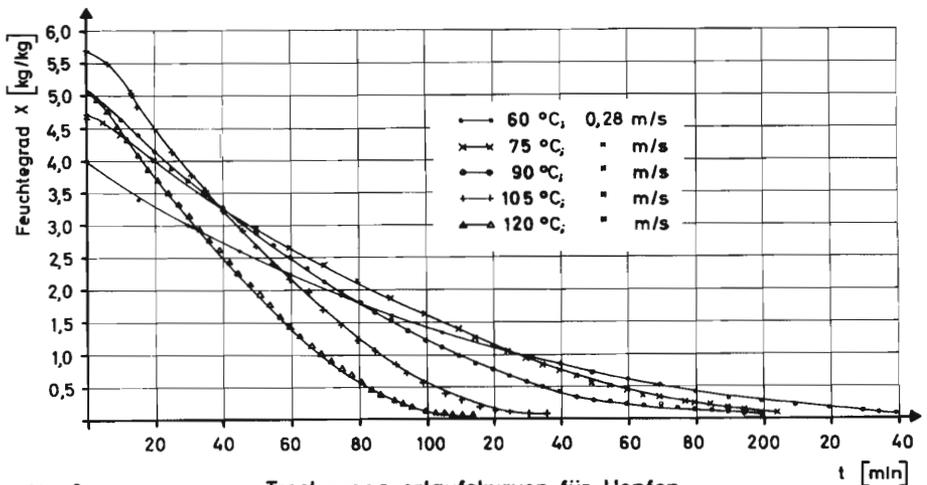


Abb. 9

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

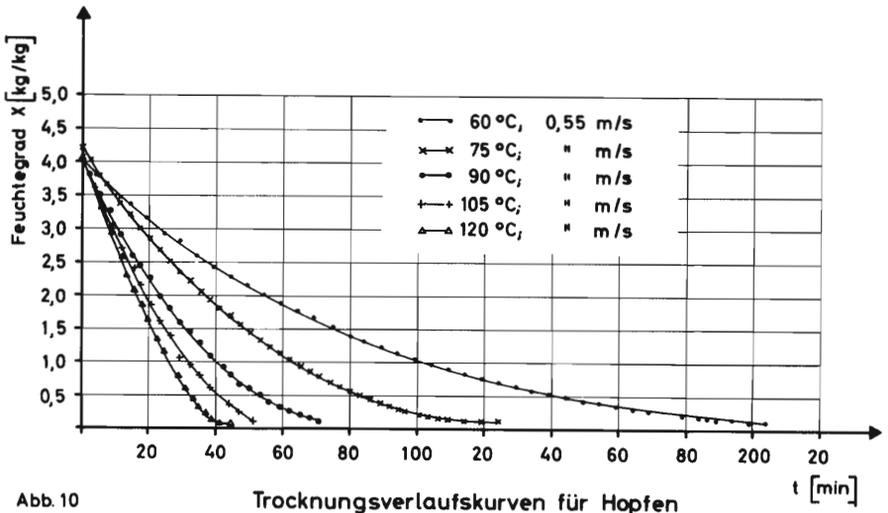


Abb. 10

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

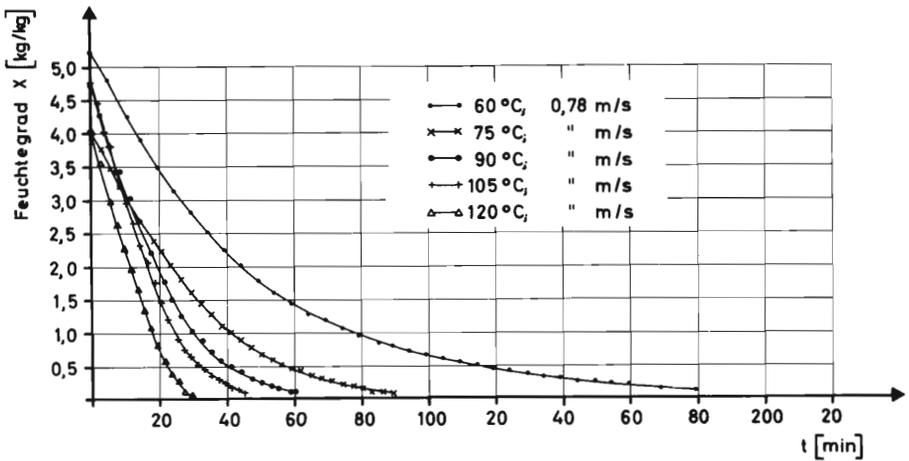


Abb. 11

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

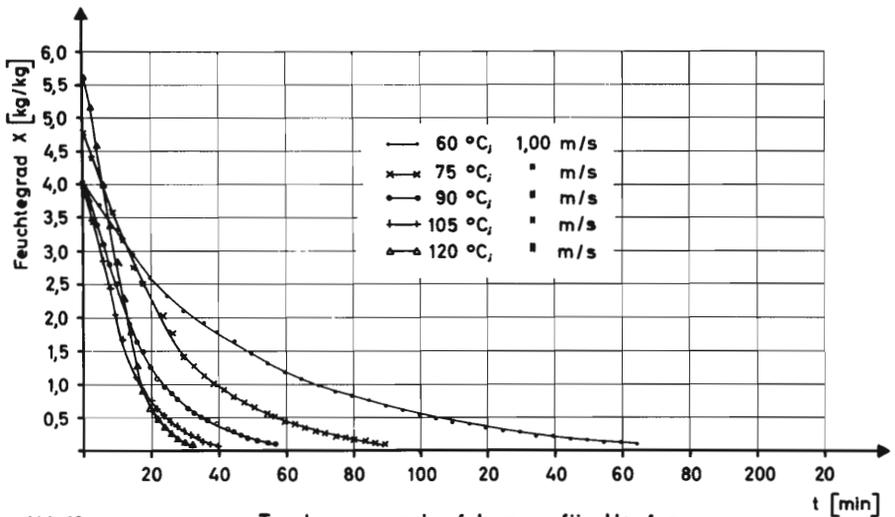


Abb. 12

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

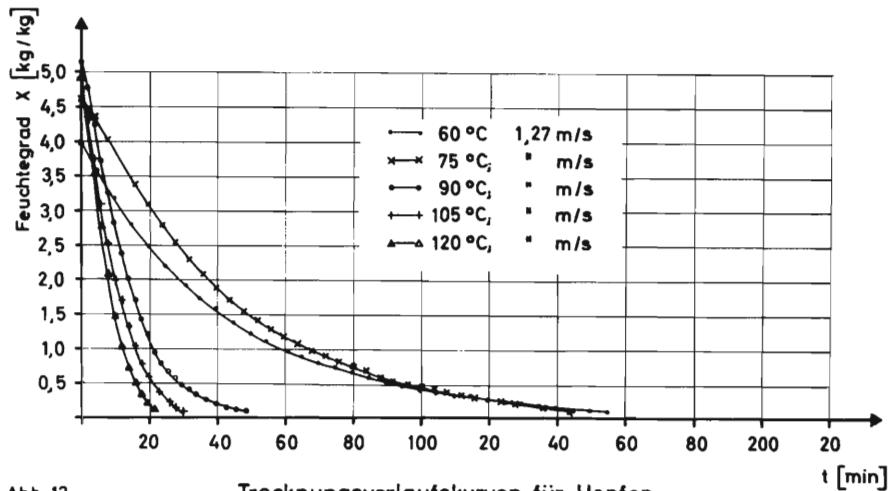


Abb. 13

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

Besonders deutlich ist bei der niedrigen Luftgeschwindigkeit von 0,28 m/s in Abbildung 9 die sprunghafte Verkürzung der Trocknungszeit durch Temperaturen über 100°C. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten (Abbildung 10-13) treten diese Unterschiede nicht so deutlich hervor, jedoch bedingen die Heißlufttemperaturen von 60°C bei allen Luftgeschwindigkeiten unter 1 m/s die mit Abstand längsten Trocknungszeiten.

Ähnliche Zusammenhänge gehen auch aus den Abbildungen 14-18 hervor, in denen die Trocknungsgeschwindigkeit über einer dimensionslosen Verhältniszahl des Feuchtegrades aufgetragen ist. Die in diesen Abbildungen verwendete Trocknungsgeschwindigkeit g'_D ist analog dem bei Kröll (30) verwendeten spezifischen Feuchteentzug mit der Dimension kg/kg h gewählt. Die von Kri-scher (29) häufig benutzte Trocknungsgeschwindigkeit, bezogen auf 1 m² Korn- bzw. Guts oberfläche, erscheint als Bezugsgröße für Hopfen nicht geeignet, da es praktisch unmöglich ist, bei der gewählten Versuchsanordnung die am Stoffaustausch beteiligte Oberfläche der einzelnen Hopfendolden genau zu definieren.

Zur Ermittlung der Trocknungsgeschwindigkeiten wurden die Trocknungsverlaufskurven schrittweise differenziert, wobei sich g'_D aus der Beziehung

$$g'_D = \frac{(X_{n-1} - X_n)}{(t_n - t_{n-1})} \quad \cdot \quad 60 \quad (\text{kg/kg h})$$

ergibt, wenn X_n den aus der Trocknungsverlaufskurve ermittelten Feuchtegrad zur Trocknungszeit t_n bedeutet.

Bei dem in den Abbildungen 14-18 verwendeten dimensionslosen Feuchtegrad X/X_m bedeutet die Bezugsgröße X_m ein Feuchtegrad von 4,0 kg/kg entsprechend einem Feuchtegehalt des Hopfens von 80%. Dieser Wert wurde gewählt, weil sich auch in anderen Untersuchungen (57) herausgestellt hat, daß normal ausgereifter Grünhopfen ohne Tau- oder Regenfeuchte einen Feuchtegehalt von rd. 80% besitzt. Der Feuchtegrad X ist der zu dem oben definierten g'_D gehörende Mittelwert und errechnet sich aus der Beziehung:

$$X = \frac{X_{n-1} + X_n}{2} \quad (\text{kg/kg})$$

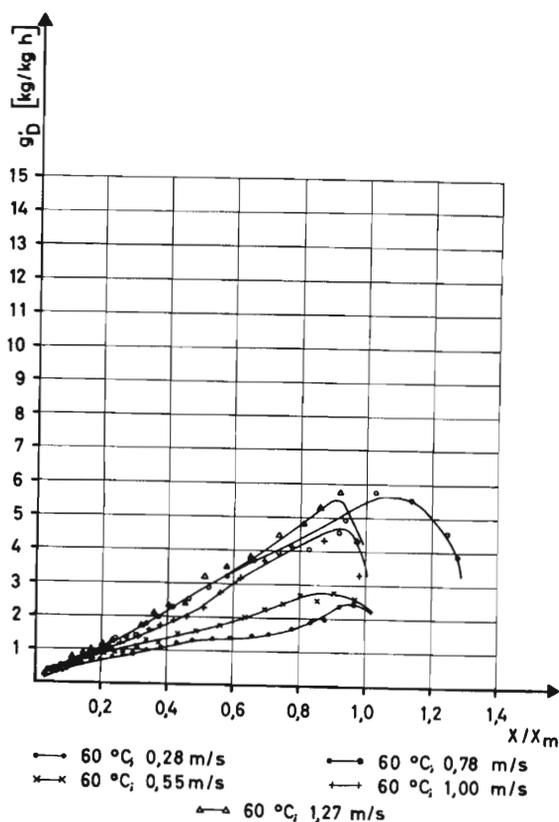


Abb.14 Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens
(Schütthöhe: 30 cm)

Um evtl. Meßfehler möglichst weitgehend auszuschließen, wurden die aus den Meßwerten gewonnenen Trocknungsverlaufskurven $X = f(t)$ in vergrößertem Maßstab, der eine dreistellige Ablesung erlaubte, aufgetragen und daraus die obigen Werte für g'_D und X/X_m ermittelt, wobei die einzelnen Differenzbildungen so gelegt wurden, daß eine möglichst weitgehende Deckung des Polygonzuges mit der Grundkurve erreicht wurde.

Aus Abbildung 14 ist zu ersehen, daß die Trocknungsgeschwindigkeiten bei einer Temperatur von 60°C und Heißluftgeschwindigkeiten zwischen 0,28 m/s und 0,55 m/s nicht wesentlich voneinander abweichen; erst bei einer Steigerung auf 0,78 m/s und darüber

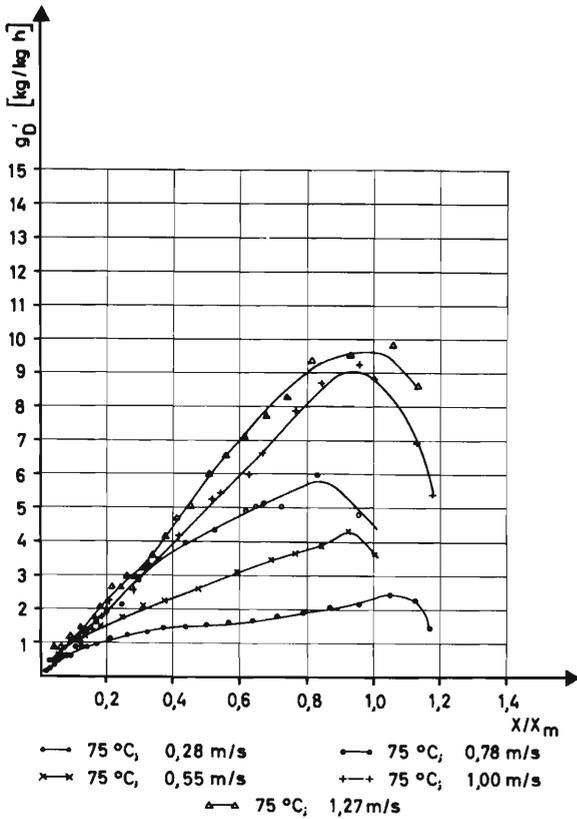


Abb. 15 Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens
(Schütthöhe: 30 cm)

ber ist eine stärkere Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit zu verzeichnen, wobei jedoch zwischen 0,78 m/s und 1,27 m/s nur relativ geringe Unterschiede vorhanden sind. Ausserdem ergibt sich aus dieser Abbildung, dass bei 60 °C unterhalb einem Wert von $X/X_m = 0,2$ entsprechend einem Feuchtegrad des Hopfens von 0,8 (oder rd. 44,5% Feuchtegehalt) die Luftgeschwindigkeit in dem gemessenen Bereich praktisch keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens hat.

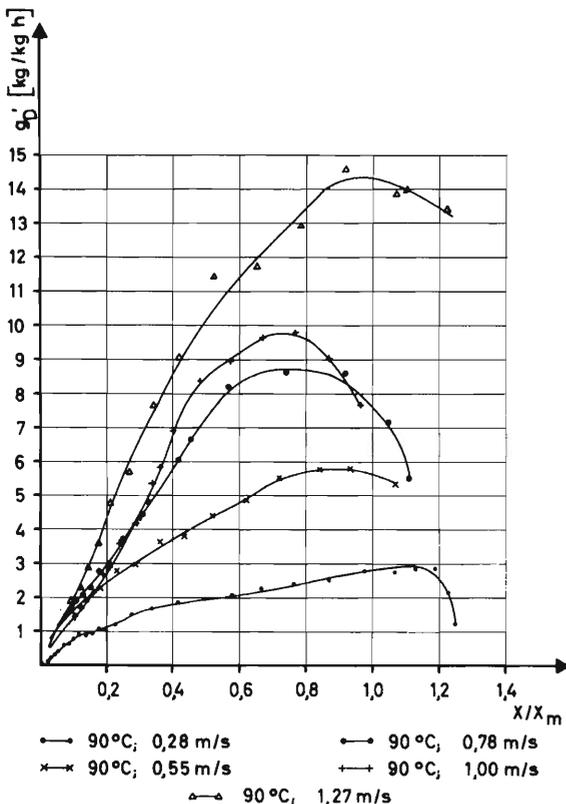


Abb. 16 Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens
(Schütthöhe: 30 cm)

Bei Lufttemperaturen von 75 °C hat die Luftgeschwindigkeit, wie aus Abbildung 15 hervorgeht, einen stärkeren Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens als bei den Bedingungen nach Abbildung 14. Gleichzeitig verschiebt sich der Bereich, in dem dieser Einfluss kaum noch vorhanden ist, auf Werte bis zu $X/X_m = 0,1$, entsprechend einem Feuchtegrad von 0,4 oder rd. 28,5% Feuchtegehalt.

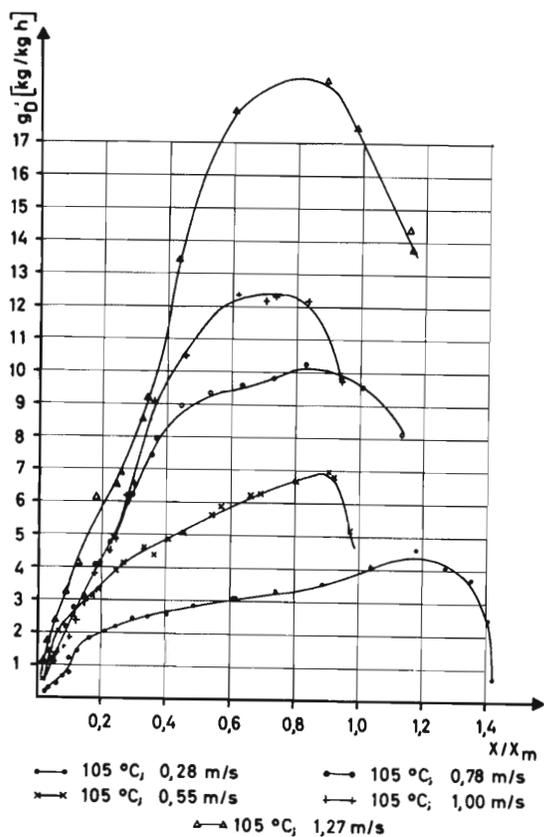


Abb. 17 Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens
(Schütthöhe: 30 cm)

Die in Abbildung 16 zusammengefassten Messungen mit 90°C zeigen einen noch stärkeren Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit, wobei jedoch die niedrige Luftgeschwindigkeit von $0,28\text{ m/s}$ in sofern eine Ausnahme macht, als daß damit im Bereich unter $X/X_m = 0,1$ nur etwa die halbe Trocknungsgeschwindigkeit der übrigen Luftgeschwindigkeiten erreicht wird. Diese Erscheinung verstärkt sich noch in den Abbildungen 17 und 18 bei Heisslufttemperaturen von 105°C bzw. 120°C .

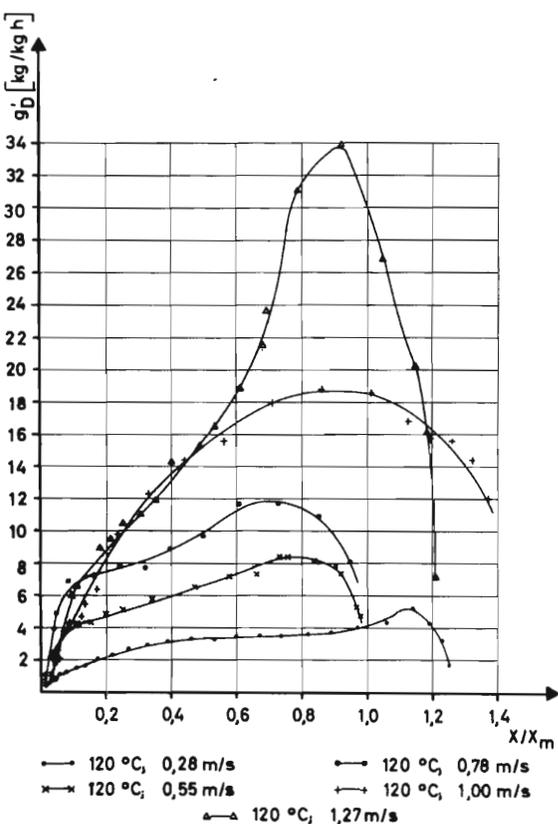


Abb. 18 Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens
(Schütthöhe: 30 cm)

Neben dem erreichbaren Durchsatz, der hauptsächlich durch die erforderliche Verweilzeit im Trockner, d. h. durch die Trocknungszeit bestimmt wird, ist für die Wirtschaftlichkeit eines Trockners jedoch auch der erforderliche Energieaufwand und hier speziell der erforderliche Wärmeaufwand mit von entscheidender Bedeutung. Aus Abbildung 19, bei der der Wärmebedarf zum Entfernen von 1 kg freiem Wasser in einem idealisierten Trockner nach Kröll (30) aufgetragen ist, geht hervor, daß, abgesehen von einem Bereich in unmittelbarer Nähe der Frischlufttemperatur, bei gleicher relativer Feuchte der Abluft der spezifische Wärmeaufwand fällt, je höher die Ablufttemperatur bzw. je höher die Heißlufttemperatur ist.

Bei der Darstellung in Abbildung 19 sind Wandungsverluste sowie der im praktischen Betrieb immer vorhandene Aufwand zur Erhöhung der Gutstemperatur und zur Überwindung von Diffusionswiderständen u. ä. nicht enthalten. Trotzdem läßt sich auch für die durchgeführten Trocknungsversuche aufgrund der Trocknungsverlaufskurven (Abbildung 4 - 13) vermuten, daß je nach verwendeter Heißlufttemperatur die Steigerung der Heißluftgeschwindigkeit nicht unbedingt auch eine Erhöhung des spezifischen Wärmeaufwandes mit sich bringt. Um jedoch einen Vergleich des spezifischen Wärmeaufwandes bei den einzelnen Trocknungsversuchen zu ermöglichen, ist es notwendig, für alle Versuche einen konstanten Trocknungsabschnitt und einen konstanten Aussenluft- bzw. Ansaugzustand festzulegen. Wie bereits am Ende des Abschnittes 3.2. erwähnt, konnte sowohl der Feuchtegehalt des Grünhopsens zu Beginn der Trocknung ebenso wie der Feuchtegehalt des Trockenhopsens nicht für alle Versuche konstant gehalten werden. Für die nachfolgenden Berechnungen

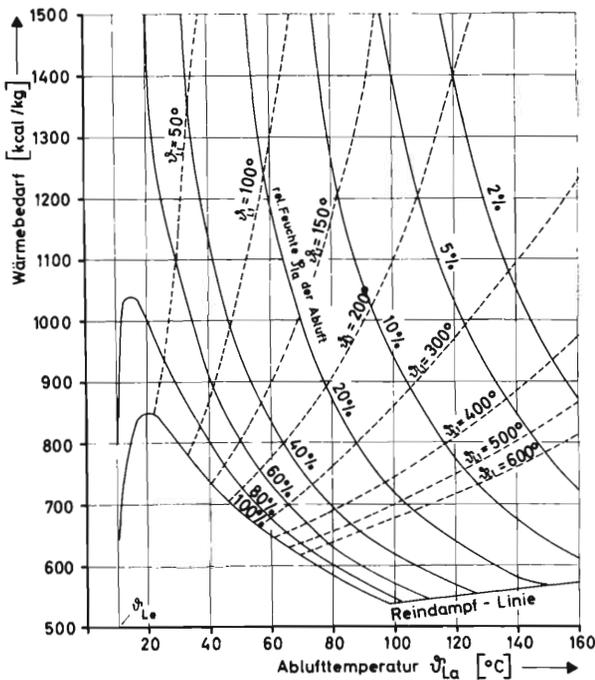


Abb. 19 Wärmebedarf zum Entfernen von 1kg freien Wassers in einem idealisierten Trockner (nach Kröll)
 $t_L = 10^\circ\text{C}$; $\varphi_L = 80\%$; $P = 1\text{kp/cm}^2$

wird daher, trotz der zu Beginn dieses Abschnittes gemachten Einschränkungen, der Feuchtegehalt des Grünhophfens mit 80%, entsprechend einem Feuchtegrad von 4,00, und der Feuchtegehalt des Trockenhophfens mit 10%, entsprechend einem Feuchtegrad von 0,111 festgelegt.

Die für diesen Bereich geltende korrigierte Trocknungszeit t' wurde aus den einzelnen Trocknungsverlaufskurven $X = f(t)$ (Analog Abbildung 4-8) entnommen und ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Für den Zustand der Ansaugluft wird eine Temperatur $\vartheta_{LA}^h = 15^\circ\text{C}$ bei einer relativen Feuchte von $\varphi_{LA} = 80\%$ und einem Gesamtdruck $P = 1 \text{ kp/cm}^2 = 10.000 \text{ mm WS}$ festgelegt.

Für die während der korrigierten Versuchszeit t' zugeführte Wärmemenge gilt dann:

$$Q = G_L \cdot t' \cdot \Delta i \quad (\text{kcal})$$

Die durchgesetzte Luftmenge G_L errechnet sich aus:

$$G_L = v_{L1} \cdot F \cdot 60 \cdot \gamma_{L1} \quad (\text{kg/min})$$

mit der Grundfläche des Trocknungsbehälters $F = 0,0625 \text{ m}^2$ und

$$\gamma_{L1} = \frac{(1 + x) \cdot P}{47,06 (0,622 + X) (273 + \vartheta_{L1}^h)} \quad (\text{kg/m}^3)$$

worin $P = \text{konstant} = 10.000 \text{ mm WS}$ eingesetzt wird, da sich die durch die unterschiedlichen Heißluftgeschwindigkeiten bedingten geringen Druckänderungen unter der Hophenschicht kaum auf das Ergebnis auswirken.

Für x ergibt sich aus dem $i - x$ - Diagramm für feuchte Luft aufgrund des oben festgelegten Ansaugzustandes ein Wert von $x = 0,0087 \text{ kg/kg}$.

Für die Enthalpiedifferenz Δi gilt:

$$\Delta i = c_{pL} (\vartheta_{L1}^h - \vartheta_{LA}^h) + x \cdot c_{pD} (\vartheta_{L1}^h - \vartheta_{LA}^h) \quad (\text{kcal/kg})$$

Mit $c_{pL} = 0,24 \quad (\text{kcal/kg grad})$

und $c_{pD} = 0,44 \quad (\text{kcal/kg grad})$

Der in Tabelle 3 in der letzten Spalte aufgeführte spezifische Wärmearaufwand A' ergibt sich aus:

$$A' = \frac{Q}{m'_w} \quad (\text{kcal/kg})$$

worin m'_w die während der korrigierten Trocknungszeit t' verdunstete Wassermenge ist und sich errechnet aus:

$$m'_w = m'_G - m'_{Tr} = m_{Tm} (1 + X'_1) - m_{Tm} (1 + X'_2) \quad (\text{kg})$$

Mit $X'_1 = 4,0$ und $X'_2 = 0,111$, dem korrigierten Feuchtegrad des Grün- bzw. Trockenhopfens. Die gesamte Masse der Trockensubstanz m_{Tm} ergibt sich aus den in Abschnitt 3.2. erwähnten Feuchtegehaltsbestimmungen des Grünhopfens - wobei für jeden Feuchtegehalt der Mittelwert aus vier Einzelmessungen gebildet wurde - und der Grünhopfenmenge im Trocknungsbehälter.

Bedingt durch Wachstumsunterschiede und unterschiedlichen Feuchtegrad des Grünhopfens differierte bei der gewählten konstanten Schütthöhe des Grünhopfens von 30 cm die Trockensubstanzmenge bei den einzelnen Versuchen. Sie ist daher neben dem Feuchtegrad des Grün- und des Trockenhopfens ebenfalls in Tabelle 3, Spalte 6, mit aufgeführt.

Tabelle 3:

Vers. Nr.	Tempera- tur	Luftgeschwin- digkeit	Feuchtegrad		Masse d. Trocken- substanz	Trock- nungs- zeit	spez. Wärm- aufwand A'
	v_{L1}^{η} (°C)	v_{L1} (m/s)	X ₁	X ₂	(kg)	t' (min)	(kcal/kg)
			(kg/kg)	(kg/kg)			
7		0,28	4,00	0,0753	0,438	235	1610
3		0,55	4,02	0,16	0,44	205	2735
21	60	0,78	5,208	0,111	0,36	170	3930
28		1,0	4,00	0,091	0,439	162	3960
29		1,27	4,00	0,032	0,44	152	4680
10		0,28	4,74	0,113	0,39	184	1795
4		0,55	4,19	0,17	0,425	120	2110
20	75	0,78	4,00	0,015	0,442	86	2065
31		1,0	4,803	0,111	0,386	82	2850
32		1,27	4,685	0,111	0,389	68	3020
14		0,28	5,034	0,112	0,372	168	2070
2		0,55	4,03	0,152	0,44	70	1430
19	90	0,78	4,59	0,113	0,396	56	1805
27		1,0	4,00	0,058	0,448	55	2010
33		1,27	5,173	0,112	0,358	43	2500
16		0,28	5,708	0,111	0,331	106	1690
5		0,55	4,00	0,14	0,448	52	1205
18	105	0,78	4,714	0,111	0,385	40	1530
23		1,0	4,00	0,024	0,445	38	1610
25		1,27	4,913	0,112	0,372	28	1805
11		0,28	5,06	0,052	0,366	89	1435
6		0,55	4,00	0,12	0,44	42	1105
13	120	0,78	4,00	0,005	0,44	27	1010
22		1,0	5,606	0,122	0,333	25	1580
24		1,27	4,88	0,112	0,417	19	1360

In Abbildung 20 ist der aufgrund der obigen Annahmen errechnete spezifische Wärmeaufwand über der Heißluftgeschwindigkeit für die verwendeten Trocknungstemperaturen aufgetragen.

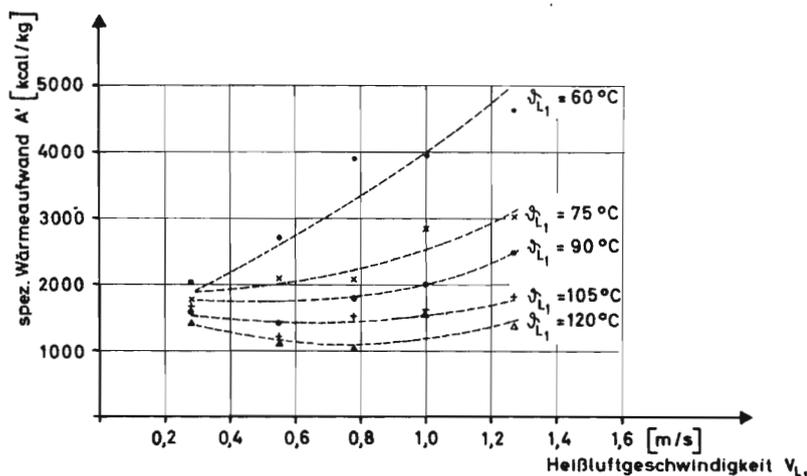


Abb.20 Wärmeaufwand für die Verdunstung von 1kg Wasser bei verschiedenen Heißlufttemperaturen
(korrigierte Werte aus den Hopfentrocknungsversuchen nach Abb. 4+8)

Da die errechneten Werte, bedingt durch die Versuchsanstellung und die Korrektur auf einen einheitlichen Trocknungsbereich, relativ stark streuen, kann die Abbildung 20 nur Tendenzen aufzeigen und insbesondere bei der Projektierung von Hopfentrocknungsanlagen im großtechnischen Maßstab nur die Abschätzung des voraussichtlichen spezifischen Wärmeaufwandes erleichtern.

Ausgehend von einer Heißluftgeschwindigkeit von 0,28 m/s zeigen alle verwendeten Trocknungstemperaturen einen spezifischen Wärmeaufwand, der etwa in der gleichen Größenordnung liegt. Es ist daher auch bei normalen Hopfentrocknungsanlagen nicht damit zu rechnen, daß bei dieser Luftgeschwindigkeit die Steigerung der Trocknungstemperatur in dem untersuchten Bereich eine wesentliche Senkung des spezifischen Wärmeaufwandes mit sich bringt. Mit steigender Luftgeschwindigkeit erhöht sich auch der spezifische Wärmeaufwand bei einer Heißlufttemperatur von 60°C und erreicht bei 1,27 m/s etwa den dreifachen Wert des bei der niedrigen Luftgeschwindigkeit festgestellten Aufwandes. Daraus lässt sich ableiten, dass in einer normalen Hopfentrocknungsanlage bei

einer Trocknungstemperatur von 60°C eine Steigerung der Heissluftgeschwindigkeit über etwa $0,3\text{ m/s}$ hinaus eine deutliche Erhöhung des spezifischen Wärmeaufwandes mit sich bringt.

Bei einer Trocknungstemperatur von 75°C ist zwar auch eine Steigerung des spezifischen Wärmeaufwandes mit steigender Luftgeschwindigkeit zu erkennen, jedoch ist sie nicht so stark wie bei 60°C , was dazu führt, daß für Großanlagen bis ca. $0,7\text{ m/s}$ Heißluftgeschwindigkeit mit etwa dem gleichen spezifischen Wärmeaufwand zu rechnen ist wie bei $0,28\text{ m/s}$. Der Bereich, in dem der spezifische Wärmeaufwand annähernd konstant ist, erweitert sich bei 90°C bis zu etwa $1,1\text{ m/s}$ und ist bei 105°C und 120°C über dem gesamten untersuchten Luftgeschwindigkeitsbereich von $0,28\text{ m/s}$ bis $1,27\text{ m/s}$ vorhanden. Ob jedoch besonders bei 120°C die Kurve für den spezifischen Wärmeaufwand tatsächlich ein Minimum bei etwa $0,8\text{ m/s}$ aufweist, läßt sich aufgrund der Versuchsanstellung nicht mit hinreichender Sicherheit klären. Es ist jedoch anzunehmen, daß aufgrund der ungleichmäßigen Luftverteilung im Behälterquerschnitt, wie sie besonders bei der niedrigen Luftgeschwindigkeit beobachtet wurde, örtlich unzureichende Feuchteaufnahmen anzutreffen sind, die einen höheren spezifischen Wärmeaufwand mit u. U. starker Streuung der einzelnen Werte bei der niedrigen Luftgeschwindigkeit bewirken können.

Trotzdem zeigt die Abbildung 20, dass auch bei der Hopfentrocknung die Steigerung der Luftgeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich zumindest nicht zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit führt, wenn die Trocknungstemperaturen genügend hoch gewählt werden. In wie weit jedoch der Anwendung hoher Temperaturen schädigende Qualitätseinflüsse entgegenstehen, wird in Abschnitt 3.4. zu klären sein.

Wie bereits in Abschnitt 1.2. erwähnt, ergibt sich in Bezug auf Qualitätsveränderungen aus den Schrifttumsangaben (2, 42) eine höhere Temperaturempfindlichkeit des Grünhopfens. Um festzustellen, ob derartige Qualitätseinflüsse auch bei erhöhtem Luftdurchsatz und gesteigerten Temperaturen überhaupt vorhanden sind und wie sie sich auswirken, wurde in zwei weiteren Versuchs-

reihen eine "gebrochene Trocknung" angewendet, d. h., der Hopfen wurde bei einer bestimmten Temperatur und Luftgeschwindigkeit bis auf einen Feuchtegehalt von etwa 45% (entsprechend einem Feuchtegrad von rd. 0,8) heruntergetrocknet und dann mit einer anderen Temperatur zu Ende getrocknet. Die Schütthöhe des Grünhopfens betrug hierbei, ebenso wie bei den vorhergehenden Versuchen, 30 cm. Da zu Beginn der einzelnen Versuche die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmungen des Grünhopfens noch nicht vorlagen, konnte der mit 45% Feuchtegehalt willkürlich gewählte Endpunkt für die Umstellung der Trocknungsbedingungen nicht immer genau eingehalten werden. Die Abweichungen sind jedoch relativ gering, wie es auch aus den nachfolgenden Trocknungsverlaufskurven der Abbildung 21 - 24 hervorgeht.

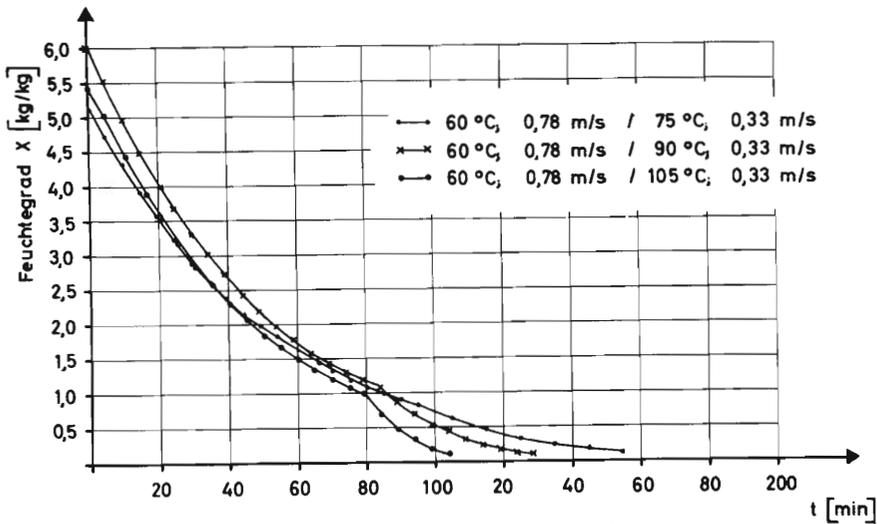


Abb. 21

Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

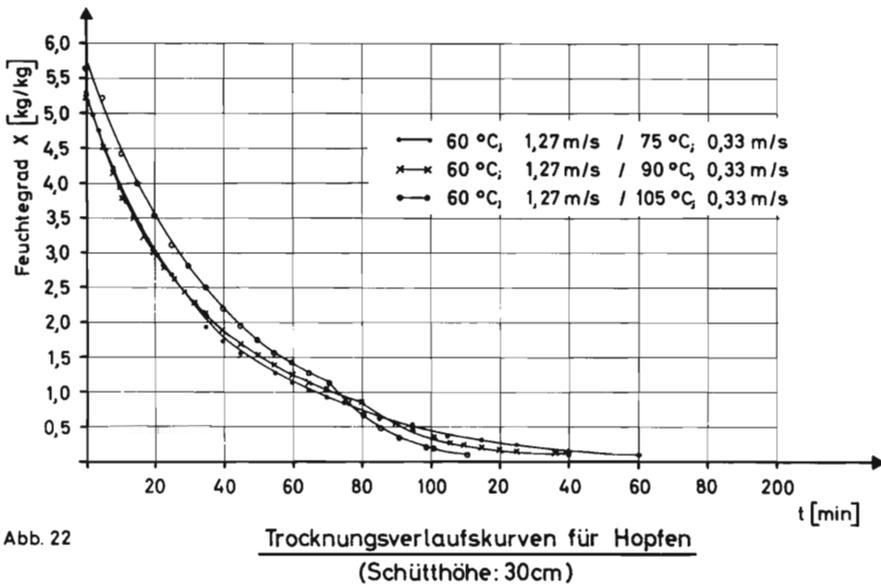


Abb. 22

Bei den Versuchen nach Abbildung 21 wurde die "Vortrocknung" mit 60°C und einer Heißluftgeschwindigkeit von $0,78\text{ m/s}$ durchgeführt, während die "Endtrocknung" mit 75°C , 90°C und 105°C bei einer Heißluftgeschwindigkeit von $0,33\text{ m/s}$ erfolgte.

Der Kurvenverlauf für $60^{\circ}\text{C} / 0,78\text{ m/s} - 75^{\circ}\text{C} / 0,33\text{ m/s}$ zeigt keinen eindeutigen Knick bei $X = 0,816$, dem Punkt der Umstellung der Trocknungsbedingungen; dies ist auch aufgrund des zu Abbildung 14-18 Gesagten nicht zu erwarten. Ähnliches gilt auch für den entsprechenden Kurvenverlauf ($60^{\circ}\text{C} / 1,27\text{ m/s} - 75^{\circ}\text{C} / 0,33\text{ m/s}$) in Abbildung 22, bei dem die Trocknungsbedingungen bei $X = 0,848$ umgestellt wurden.

Bei den in Abbildung 23 und 24 dargestellten Versuchen wurden für die Vortrocknung bis herunter zu etwa $X = 0,8$ höhere Heißlufttemperaturen und - Luftgeschwindigkeiten angewendet, während die Endtrocknung bei 60°C und $0,33\text{ m/s}$ erfolgte.

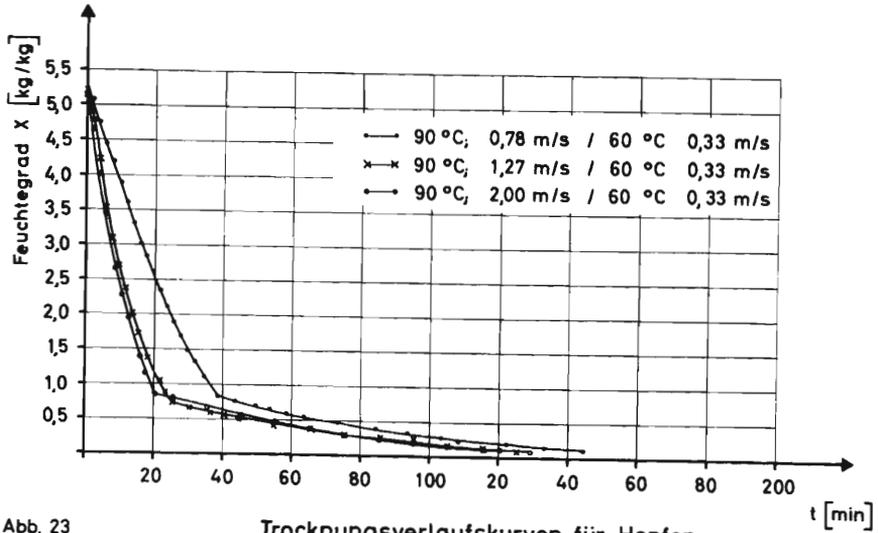


Abb. 23 Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

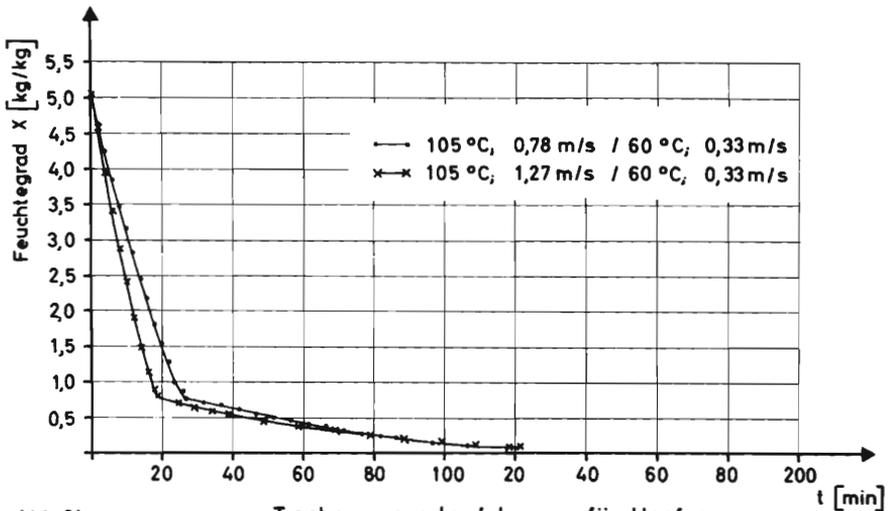


Abb. 24 Trocknungsverlaufskurven für Hopfen
(Schütthöhe: 30 cm)

Wie aus Abbildung 23 hervorgeht, bringt bei 90°C die Steigerung der Heißluftgeschwindigkeit über 1,27 m/s hinaus auch im Bereich der "Vortrocknung" keine wesentliche Verkürzung der Trocknungszeit. Die gleiche Luftgeschwindigkeit von 2,0 m/s konnte bei einer Trocknungstemperatur von 105°C (Abbildung 24) nicht gefahren werden, da die installierte Heizleistung des Versuchstrockners dafür nicht ausreichte.

Die Abbildungen 21 - 24 zeigen jedoch, dass eine wesentliche Verkürzung der Trocknungszeit nur dann zu erreichen ist, wenn sowohl im Bereich der Vortrocknung als auch im Bereich der Endtrocknung Temperaturen über 60°C angewendet werden.

3.4. Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen.

Die in diesem Abschnitt wiedergegebenen Qualitätsuntersuchungen wurden nach der Hopfenernte 1966 vom chemischen Laboratorium des Hans-Pföhl-Institutes für Hopfenforschung (37) durchgeführt. Sie umfassten eine Handbonitierung nach der Standardmethode der Wiss. Kommission des europäischen Hopfenbaubüros, Bitterstoffanalysen nach Wöllmer sowie Hopfenölanalysen mit Hilfe der Gaschromatographie nach einem von Meier (38) ausgearbeiteten Verfahren. Sowohl das Versuchsmaterial als auch das Vergleichsmaterial wurde dazu nach der Trocknung zunächst einige Tage in normaler Atmosphäre gelagert, um so einen Feuchteausgleich zwischen Spindel und Doldenblättern und bei über-trockneten Proben eine Wiederbefeuchtung auf etwa 10-12% Feuchtegehalt zu erhalten. Anschließend wurde aus den einzelnen Hopfenmustern eine Probe von etwa 100 g für die Handbonitierung entnommen und der Rest von etwa 250 - 300 g unter einem inerten Gas in Konservendosen gepresst. Die verschlossenen Konservendosen wurden dann bei 0°C aufbewahrt und aus diesen Preßhopfenmustern die Proben für die Bitterstoff- und Ölanalysen gezogen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Qualitätsuntersuchungen lassen aufgrund der relativ starken Streuung der Analysenergebnisse eine eindeutige Abhängigkeit der Qualitätsmerkmale von den verwendeten Trocknungsbedingungen nur schwer erkennen. Daher mußte für die nachfolgenden Abbildungen eine Darstellungsart gewählt werden, bei der die einzelnen Meßpunkte durch Geraden verbunden werden. Lediglich für die Werte der α -Säurebestimmungen läßt sich aufgrund der Untersuchungen von Meilgaard (39) ein Streubereich angeben, der sowohl die Analysenfehler als auch die durch die Inhomogenität des Hopfens bedingten Probenentnahmefehler einschließt. Für alle anderen Qualitätsanalysen ist die Angabe einer statistisch gesicherten Fehlergrenze nicht

möglich. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konnte diese Frage auch nicht geklärt werden, da die Versuchsanstellung sich wegen der anderen Zielsetzung nicht für eine statistische Auswertung eignete.

Die Ergebnisse der Handbonitierung für die Versuche nach Tabelle 3 (siehe auch Abbildung 4-8) sind in den Abbildungen 25-26 wiedergegeben und ausserdem in Tabelle 4 im Anhang beigefügt. Abbildung 25 zeigt die Gesamtpunktzahl der Handbonitierung, aufgetragen über der Heißluftgeschwindigkeit mit den verschiedenen Trocknungslufttemperaturen als Parameter.

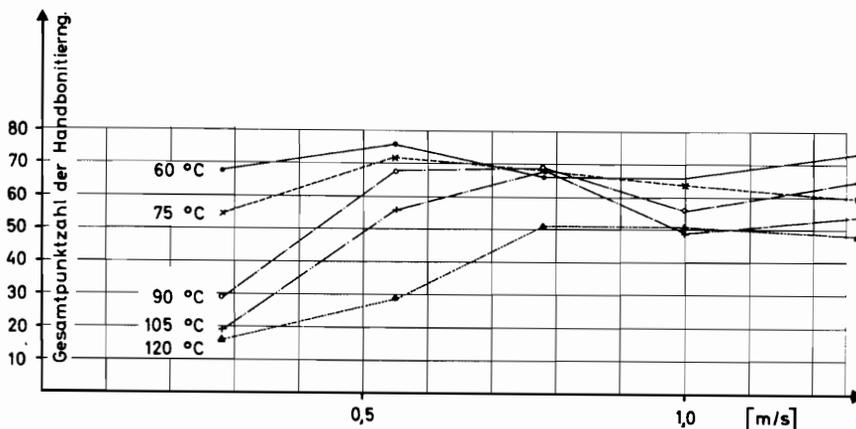


Abb. 25

Gesamtpunktzahl der Handbonitierung bei verschiedenen Temperaturen

(Hopfen: Schütthöhe 30cm)

Die untere Grenze für einen handelsfähigen Hopfen wird in Deutschland häufig mit 60 Punkten angenommen. Unter Berücksichtigung dieses offensichtlich willkürlich fixierten Grenzwertes ist eine Trocknung des Hopfens mit Temperaturen über 60°C bei einer Heißluftgeschwindigkeit von 0,28 m/s nicht möglich. Erst bei höheren Luftgeschwindigkeiten lassen sich auch höhere Temperaturen anwenden, wobei jedoch eine Trocknungstemperatur von 120°C bei keiner der angewendeten Heißluftgeschwindigkeiten ein "handelsfähiges" Produkt ergab. Die Abbildung 25 zeigt weiterhin einen deutlichen Abfall der 90 und 105°C-Versuche bei 1,0 m/s Heißluftgeschwindigkeit. Die höhere Luftgeschwindigkeit von 1,27 m/s ergab für beide Versuchsreihen wieder einen Anstieg der Gesamtpunktzahl, wobei der 90°C-Versuch sogar über der

Gesamtpunktzahl des entsprechenden 75⁰-Versuches lag. Für diese Abweichungen kann keine eindeutige Erklärung gefunden werden. Die von Natur aus vorhandene Inhomogenität des Hopfens kann dafür wohl nicht alleine verantwortlich gemacht werden, die die Abbildung 26 a, in der die Gesamtpunktzahl des Vergleichsmaterials durch das Bilden einer Verhältniszahl mit berücksichtigt wurde, in diesem Bereich ähnliche Abweichungen zeigt. Allerdings können die unterschiedlichen Endfeuchtegrade des Trockenhopfens (siehe auch Tabelle 3) einen gewissen Einfluss auf die Handbonitierung haben. So konnte z. B. auch bei der üblichen Trocknung in Darren (60⁰ C, ca. 0,25 m/s) beobachtet werden, dass das Lupulin einen leicht bräunlichen Farbton annahm, wenn der Hopfen zu stark heruntergetrocknet wurde (Feuchtegehalt ca. 4-7%).

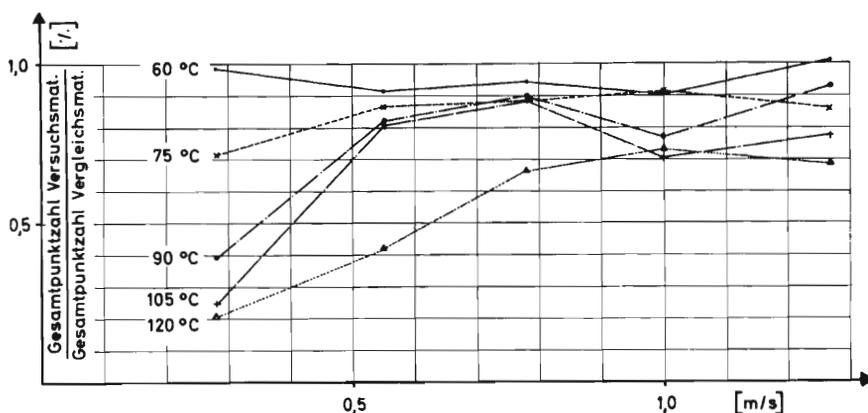


Abb 26a
Verhältnis der Gesamtpunktzahl von Versuchs- u. Vergleichsmaterial
der Handbonitierung bei verschiedenen Temperaturen
(Hopfen: Schütthöhe 30cm)

Im Übrigen zeigt die Abbildung 26 a ähnliche Tendenzen wie die Abbildung 25. Bei einer Trocknungstemperatur von 60⁰ C hat offensichtlich die Luftgeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich keinen Einfluss auf die äusseren Qualitätsmerkmale des Hopfens, während bei höheren Temperaturen nur dann eine

relativ geringe Beeinträchtigung der äusseren Qualitätsmerkmale eintritt, wenn auch entsprechend hohe Luftgeschwindigkeiten angewendet werden.

Die Gesamtpunktzahl der Handbonitierung wird gebildet aus einer Anzahl von Einzelpunkten für wertgebende Eigenschaften, von denen ein Anteil für wertmindernde Eigenschaften abgezogen wird. In diesem Komplex sind jedoch nur einige Eigenschaften enthalten, die durch die Trocknung überhaupt beeinflusst werden können. Dazu zählen z. B. Farbe und Glanz der Dolden, Beschaffenheit des Lupulins und das Aroma, nicht aber z. B. der Trockenheitszustand, da dieser durch das hygroskopische Verhalten des Hopfens entscheidend beeinträchtigt werden kann. Über das Sorptionsverhalten des Hopfens ist aufgrund eigener Untersuchungen bereits an anderer Stelle berichtet worden (59). Bei den wertmindernden Eigenschaften ist nur der Anteil für "verbrannt" in direktem Zusammenhang mit der Trocknung zu bringen, nicht aber der Anteil für "zerblättert", wenn, wie es bei den Versuchen der Fall war, dafür gesorgt wird, daß ein "Flattern" des Hopfens nicht eintreten kann. Aus den Punktzahlen der Eigenschaften, die durch die Trocknung beeinflusst werden können, wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Anteile des Vergleichsmaterials eine Verhältniszahl gebildet, die in Abbildung 26 b wiedergegeben ist.

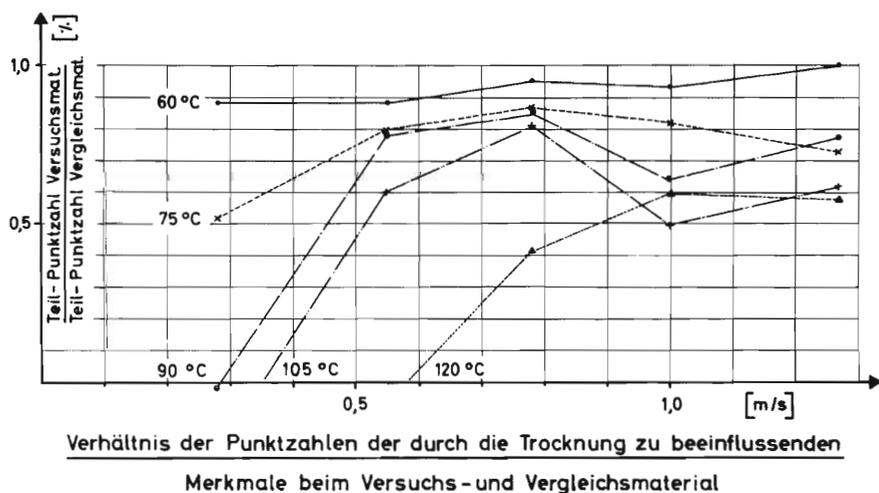


Abb. 26 b

(Hopfen: Schütthöhe 30 cm)

Aufgrund der teilweise erheblichen Abzüge für "verbrannt" bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen von 90°C , 105°C und 120°C sind die so gebildeten Verhältniszahlen negativ. Ausserdem zeigt Abbildung 26 b bis zu Luftgeschwindigkeiten von $0,78\text{ m/s}$ einen deutlichen Abfall für die oben angeführten Qualitätsmerkmale, besonders bei Temperaturen über 90°C . Die bereits bei Abbildung 25 und 26 a erwähnten Abweichungen bei den Heißluftgeschwindigkeiten von $1,0$ und $1,27\text{ m/s}$ sind auch hier vorhanden.

In den Abbildungen 27 bis 29 sind die Ergebnisse der Bitterstoffanalysen für die obigen Versuche dargestellt, deren Einzelwerte die im Anhang beigefügte Tabelle 5 enthält.

Da bei den einzelnen Versuchen die Bitterwerte nach Wöllmer sehr starke Unterschiede zeigten, ist in Abbildung 27 a der Bitterwert des Versuchsmaterials in Beziehung gebracht worden zum Bitterwert des Vergleichsmaterials.

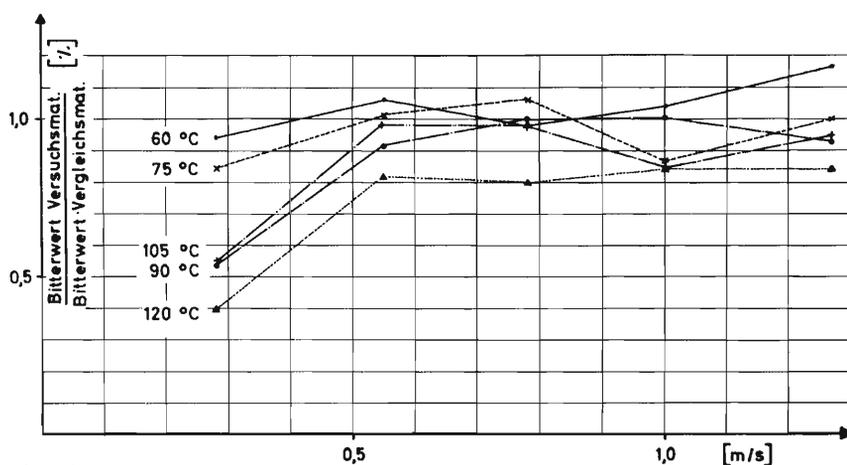
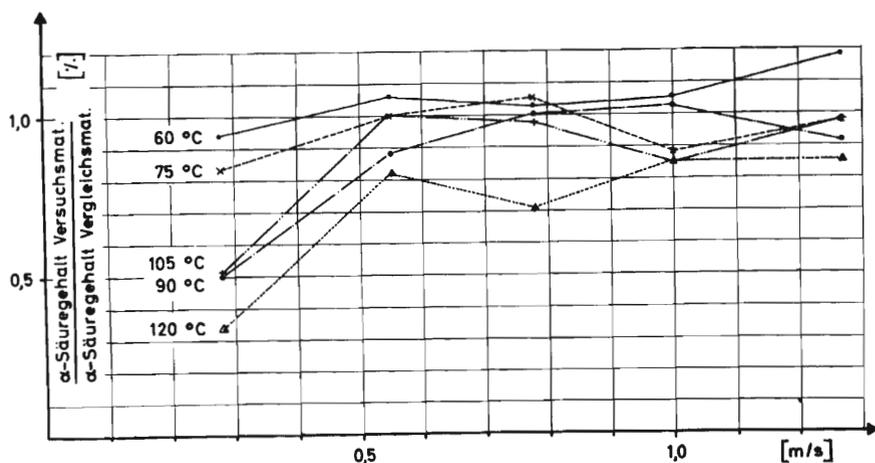


Abb. 27a
Verhältnis der Bitterwerte nach Wöllmer bei verschiedenen Temperaturen
(Hopfen: Schütthöhe 30 cm)

Auch hierbei zeigte sich, dass bei einer Luftgeschwindigkeit von $0,28\text{ m/s}$ die Erhöhung der Trocknungstemperatur über 60°C steigende Schädigungen des Bitterwertes hervorruft. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten verringert

sich auch diese Schädigung und ist z. B. bei 0,55 m/s und 75 °C überhaupt nicht mehr vorhanden. Bei Trocknungstemperaturen von 90 °C und 105 °C tritt diese Grenze offensichtlich erst bei etwas höheren Luftgeschwindigkeiten (zwischen 0,55 und 0,78 m/s) auf. Nur bei 120 °C ist für den untersuchten Bereich immer eine Schädigung des Bitterwertes vorhanden, wobei jedoch mit steigenden Luftgeschwindigkeiten die Differenz zwischen Vergleichsmaterial und Versuchsmaterial geringer wird. Abgesehen von den bereits bei der Handbonitierung festgestellten Abweichungen bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,0 m/s liegen die Meßpunkte für 105 °C und 0,28 bzw. 0,55 m/s über den entsprechenden Analysenwerten der 90 °C - Versuche. Analysenfehler sind hierfür unwahrscheinlich, da von jeder Probe eine Doppel-Bestimmung durchgeführt wurde. Vielmehr muß vermutet werden, daß, abgesehen von der bei den 60 °C - Versuchen erkennbaren Streuung der Analysenwerte und neben dem in den Erläuterungen zu Abbildung 27 b angegebenen Streubereich vor bzw. nach der Trocknung irgendeine nicht genau zu definierende Einflüsse eine Qualitätsveränderung bei einigen Hopfenproben hervorgerufen haben. Ein direkter Zusammenhang dieser Abweichungen mit den unterschiedlichen Trocknungsbedingungen ist auch unter Berücksichtigung der voneinander abweichenden Endfeuchtegrade des Trockenhopfens (siehe auch Tabelle 3) nicht erkennbar.



In Abbildung 27 b ist das Verhältnis der α -Säuregehalte von Versuchs- und Vergleichsmaterial der obigen Versuche dargestellt.

Abb. 27 b

Verhältnis der α -Säuregehalte von Versuchs- und Vergleichsmaterial bei verschiedenen Temperaturen (Hopfen: Schütthöhe: 30 cm)

Da sich der Bitterwert nach Wöllmer aus dem α -Säure-Anteil plus $1/9$ des β -Säure-Anteiles errechnet, zeigt die Abbildung 27 b auch ähnliche Tendenzen wie die Abbildung 27 a. Aufgrund der Untersuchungen von Meilgaard (39), dessen α -Säurebestimmung mit der hier verwendeten Analysenmethode vergleichbar ist, muß jedoch mit einer mittleren Abweichung von $S = 0,25$ bei einem α -Säuregehalt von 6% gerechnet werden. Daraus ergibt sich ein Fehler von $\pm 8,4\%$, wenn 95% des Kollektivs innerhalb dieser Grenzen liegen sollen. Für die Verhältniszahlen liegt dann der 95%-Bereich zwischen 0,845 und 1,185. Das bedeutet, dass 95% der Werte zwischen 0,845 und 1,185 liegen können, ohne dass eine Beeinträchtigung des α -Säuregehaltes durch die Trocknungsbedingungen vorhanden sein muss.

Der Hartharzgehalt bildet in Verbindung mit dem Gesamtharzgehalt ein Maß für die Oxydation der Bitterstoffe des Hopfens. Dieser Wert, im folgenden auch als relativer Hartharzanteil bezeichnet, ist in Abbildung 28 aufgetragen.

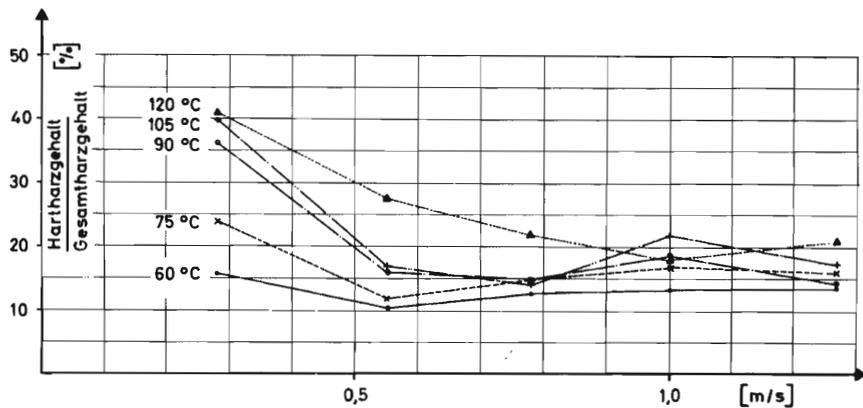


Abb 28 Relativer Hartharzanteil bei verschiedenen Temperaturen
(Hopfen: Schütthöhe 30cm)

Für normal ausgereiften Hopfen wird allgemein ein relativer Hartharzanteil bis zu 15% angenommen. Diese Grenze kann jedoch in Abhängigkeit von den Wachstumsbedingungen auch höher liegen. Im wesentlichen bestätigt auch diese Darstellung die bereits oben

getroffene Feststellung, dass die Bitterstoffe des Hopfens bei niedriger Luftgeschwindigkeit (0,28 m/s) wesentlich stärker mit steigender Temperatur geschädigt werden als bei höheren Luftgeschwindigkeiten. Mit 75 °C ist bereits bei 0,55 m/s kein Einfluss auf die Oxydation zu verzeichnen, während dieser Punkt für 90 °C und 105 °C erst bei etwa 0,78 m/s erreicht wird. Dagegen ist für 120 °C im gesamten untersuchten Luftgeschwindigkeitsbereich eine verstärkte Oxydation zu beobachten. Ein ähnliches Ergebnis zeigt auch die Abbildung 29, in der der relative Hartharzanteil des Vergleichsmaterials mit berücksichtigt wurde.

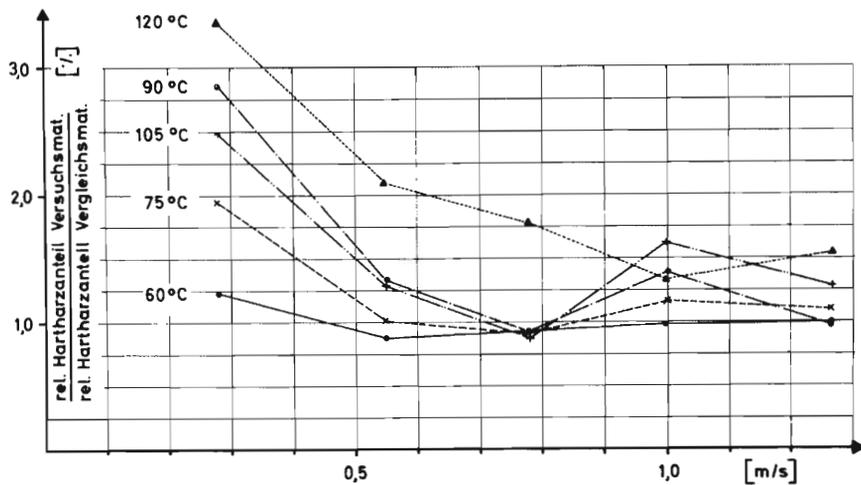
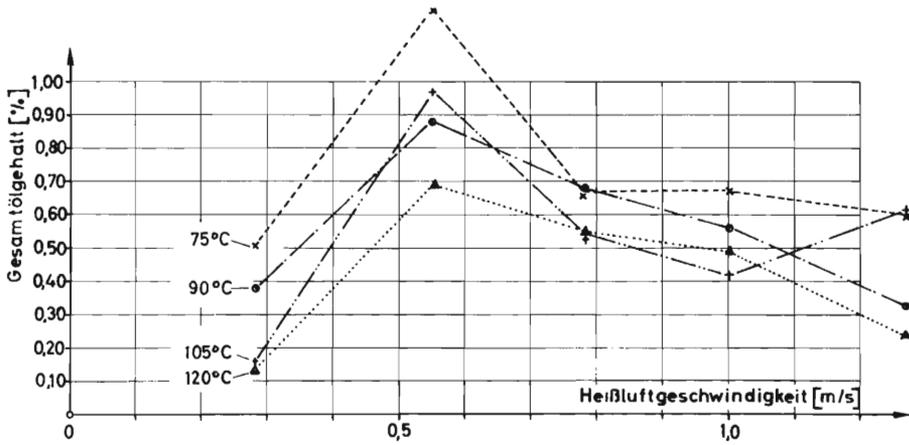


Abb. 29 Verhältnis der relativen Hartharzaranteile bei verschiedenen Temperaturen (Hopfen: Schütthöhe 30cm)

Auch hierbei zeigen sich die bereits in den Erläuterungen zu Abbildung 27 a erwähnten Abweichungen und Streuungen.

In den Abbildungen 30 und 31 sind einige Ergebnisse der Hopfenölanalysen wiedergegeben (siehe auch Tabelle 6 im Anhang). Abbildung 30 zeigt den Gesamtölgehalt der obigen Versuche, während in Abbildung 31 eine aus dem Gesamtölgehalt des Versuchsmaterials und des Vergleichsmaterials gebildete

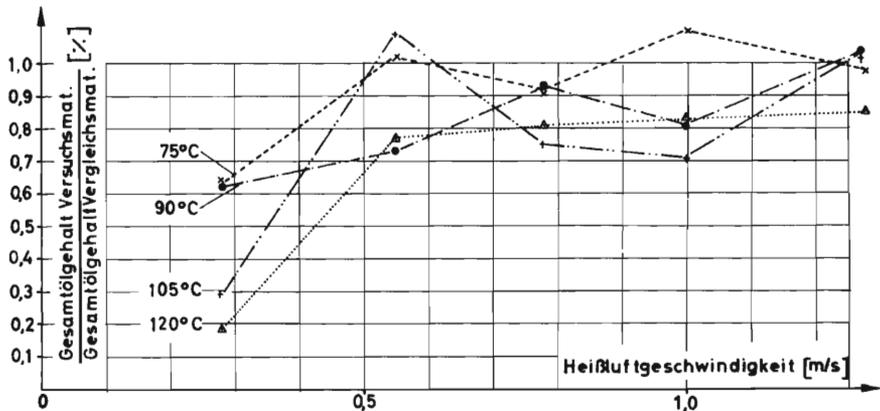
Verhältniszahl dargestellt ist. In beiden Abbildungen sind die Ergebnisse für die 60°C-Versuche nicht wiedergegeben, da durch ein Versehen nicht mehr genügend Versuchsmaterial für diese Analysen zur Verfügung stand.



Gesamtölgehalt in Prozent der Trockensubstanz bei verschiedenen Temperaturen (Hopfen-Schütthöhe 30 cm)

Abb. 30

Nach Abbildung 30 hat es den Anschein, als ob für sämtliche Versuche bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,55 m/s ein Maximum im Gesamtölgehalt vorläge. Dies trifft jedoch nicht zu, wenn der Gesamtölgehalt des Vergleichsmaterials mit berücksichtigt wird.



Verhältnis der Gesamtölgehalte bei verschiedenen Temperaturen (Hopfen-Schütthöhe:30 cm)

Abb 31

Ebenso wie bei den Bitterstoffanalysen zeigt sich auch hier ein steigender Verlust an Hopfenölen mit steigender Temperatur bei niedriger Luftgeschwindigkeit (0,28 m/s), wobei dieser Verlust mit steigender Luftgeschwindigkeit geringer wird. Aufgrund der auch bei den anderen Qualitätsuntersuchungen festgestellten starken Streuung der Analysenwerte kann jedoch nicht eindeutig geklärt werden, oberhalb welcher Luftgeschwindigkeit bei einer bestimmten Trocknungstemperatur ein Minimum an Hopfenölverlusten auftritt. Aus Abbildung 31 läßt sich lediglich ablesen, daß bei 75°C oberhalb 0,55 m/s offensichtlich keine nennenswerte Veränderung des Gesamtölgehaltes mehr eintritt und daß bei 120°C in dem untersuchten Luftgeschwindigkeitsbereich immer eine gewisse Beeinträchtigung des Gesamtölgehaltes vorhanden ist.

Die vorstehend beschriebenen Analyseergebnisse lassen erkennen, dass nur dann mit einer geringen Beeinträchtigung der einzelnen Qualitätsmerkmale des Hopfens zu rechnen ist, wenn bei steigender Heisslufttemperatur auch die Luftgeschwindigkeit entsprechend gesteigert wird.

Die nachfolgenden Abbildungen 32 - 33 zeigen Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen aus den Versuchen der "gebrochenen Trocknung" (siehe auch Abbildung 21 - 24), deren Einzelwerte in den Tabellen 7 und 8 im Anhang beigelegt sind.

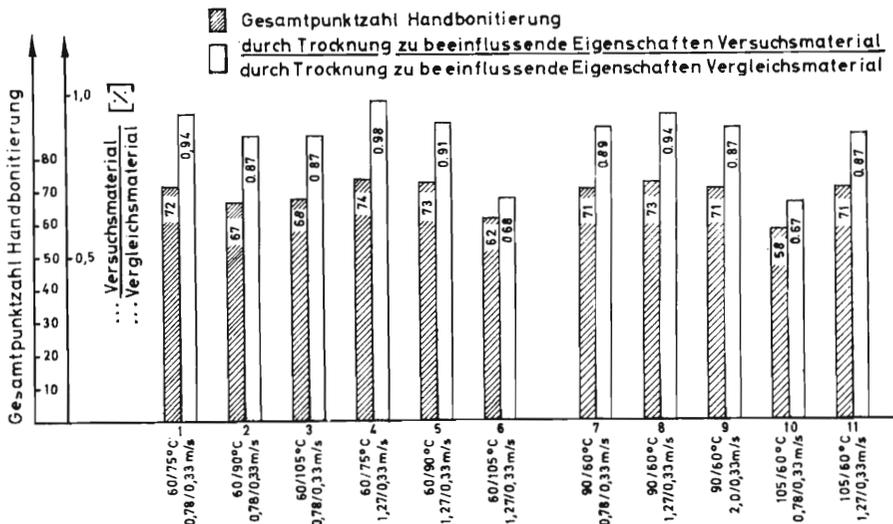


Abb. 32

Ergebnisse der Handbonitierung bei der gebrochenen Trocknung (Hopfen-Schütthöhe: 30 cm)

Die für die "Handelsfähigkeit" des Hopfens entscheidende Grenze der Gesamtpunktzahl von 60 Punkten wird nur bei dem Versuch mit 105°/60°C - 0,78/0,33 m/s (Säulenpaar 10) unterschritten.

Ein Vergleich der Teilpunktzahlen, gebildet aus den evtl. durch die Trocknungsbedingungen zu beeinflussenden Eigenschaften (siehe auch Erläuterung zu Abbildung 26 b) zeigt für die korrespondierenden Versuche wie z. B. Säulenpaar 2 mit Säulenpaar 7 oder Säulenpaar 5 mit Säulenpaar 8 einen leichten Vorteil für die Trocknungsbedingungen, bei denen die höheren Temperaturen beim Grünhopfen angewendet wurden. Eine Ausnahme davon bildet der Versuch mit 60°/105°C - 0,78/0,33 m/s im 3. Säulenpaar und dessen Umkehrung im 10. Säulenpaar. Ob diese Unterschiede jedoch nur auf die Trocknungsbedingungen zurückzuführen sind, läßt sich aufgrund der zu Beginn dieses Abschnittes gemachten Einschränkungen nicht eindeutig klären.

Eine ähnliche Tendenz zeigen auch die Ergebnisse der Bitterstoffanalysen in Abbildung 33 besonders bei den relativen Hartharzanteilen.

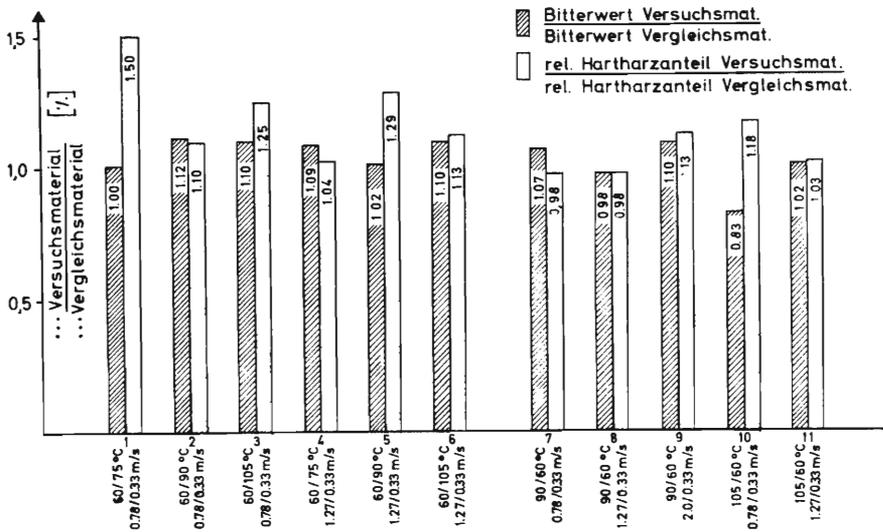


Abb.33 Ergebnisse der Bitterstoffanalysen bei der gebrochenen Trocknung (Hopfen · Schütthöhe 30 cm)

Da der relative Hartharzanteil ein Maß für die Oxydation der Bitterstoffe darstellt, hat er in diesem Zusammenhang eine größere Bedeutung als der Vergleich der Bitterwerte.

Obwohl die Unterschiede relativ gering sind, lässt sich aus diesen Versuchen doch ableiten, dass in dem untersuchten Bereich der Trocknungsbedingungen auf jeden Fall die Temperaturempfindlichkeit des Grünhopfens nicht größer ist als die des Trockenhopfens.

3. 5. Das Verhalten der durchströmten Hopfenschicht.

3. 5. 1. Der Strömungswiderstand.

Bereits die Vorversuche mit dem Versuchstrockner hatten gezeigt, daß die eingestellten Luftgeschwindigkeiten beim Grünhopfen und beim Trockenhopfen kaum voneinander abwichen, d. h., die festgestellten Abweichungen lagen immer innerhalb der Fehlergrenze des Meßgerätes. Daraus läßt sich ableiten, daß der Strömungswiderstand des Hopfens im Verlauf der Trocknung sich nicht wesentlich verändern kann; wobei zu beachten ist, daß z. B. eine 10%ige Änderung des Widerstandes nicht auch eine gleichgroße Veränderung des Luftdurchsatzes mit sich bringt, da dieser auch durch die Kennlinie des Gebläses beeinflusst wird.

Nach Strach und Srbek (49) ist der Strömungswiderstand beim Grün- und Trockenhopfen konstant. Den gleichen Schluß lassen auch die in Abbildung 34 wiedergegebenen Messungen von Bailey (3) zu, bei denen der Überdruck in einer Einhorden-Darre während der Trocknung für 2 verschiedene Flächenbelegungen festgestellt wurde.

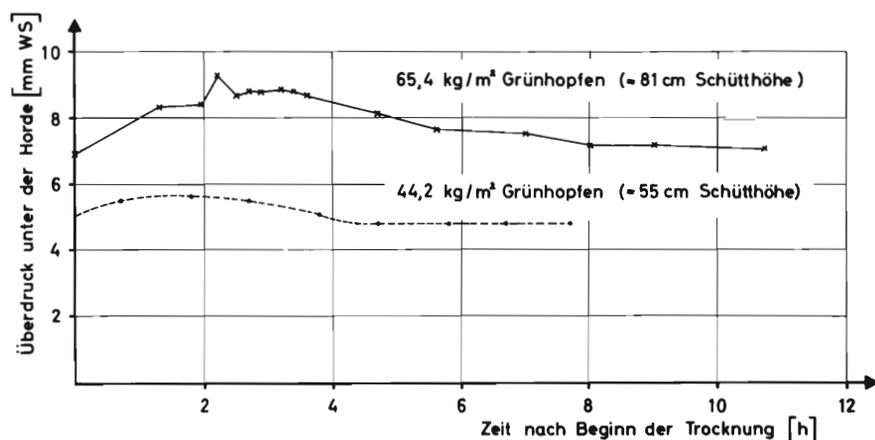


Abb. 34 Veränderung des Widerstandes während der Trocknung
bei einer Ein-Horden-Darre (nach Bailey)
(Luftgeschwindigkeit: =0,18 m/s)

In der obigen Abbildung ist ausserdem die aus den Angaben von Bailey errechnete, ungefähre Schütthöhe eingetragen.

Da der Strömungswiderstand bei höheren Luftgeschwindigkeiten als 0,4 m/s nicht hinreichend bekannt ist, ergab sich die Notwendigkeit, entsprechende Messungen vorzunehmen. Dazu wurde in einen Behälter mit der Grundfläche von 25 x 25 cm, dessen Boden aus einem grobmaschigen Drahtgewebe bestand, Grünhopfen in einer Schütthöhe von 1 m eingefüllt. Der bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten entstehende Überdruck dicht unterhalb der Hopfenschicht wurde durch 4 Drucksonden erfasst, die mit einer Ringleitung verbunden waren und auf ein Feinstdruckmanometer (Debro-Gerät) wirkten. Der Grünhopfen wurde dann anschließend im gleichen Behälter getrocknet, wobei sich während des Trocknens die Schütthöhe auf etwa 94 cm verringerte. Nach Beendigung der Trocknung mußte daher durch Nachfüllen von weiterem Trockenhopfen die Schütthöhe wieder auf 1 m gebracht werden, um dann die entsprechenden Widerstandsmessungen für Trockenhopfen vornehmen zu können. Um ein Ausblasen des Hopfens zu vermeiden, wurde sowohl beim Grün- als auch Trockenhopfen eine obere Abdeckung aus einem grobmaschigen Drahtgewebe so angebracht, daß eine Bettausdehnung nicht stattfinden konnte. Die unter diesen Bedingungen erhaltenen Strömungswiderstände sind in Abbildung 35 graphisch dargestellt.

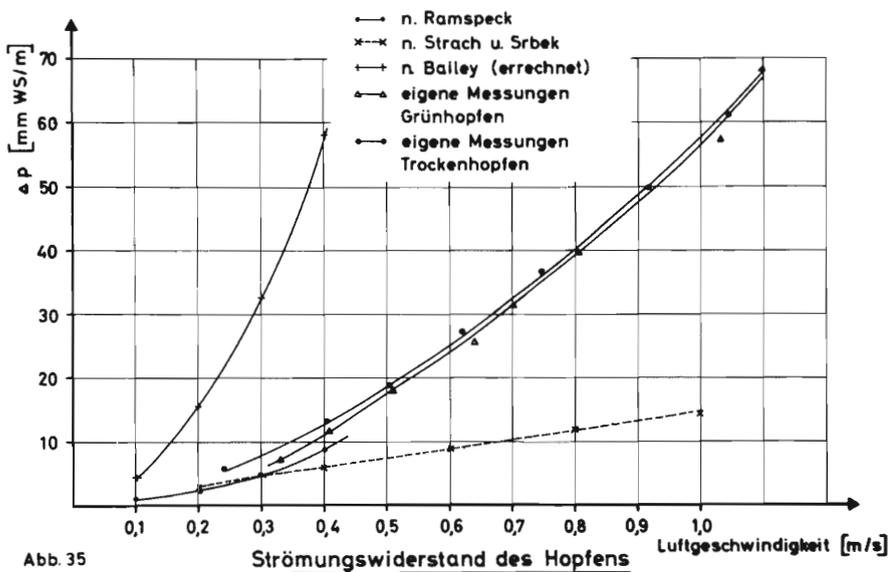


Abbildung 35 zeigt weiterhin den von Ramspeck (42), Strach und Srbek (49) sowie den von Bailey (3) festgestellten Widerstandsverlauf. Die Kurve nach Ramspeck, der die Werte für 1 m Schütthöhe interpoliert hat, weicht nur geringfügig von den eigenen Ergebnissen ab. Strach und Srbek geben einen linearen Widerstandsverlauf an, bemerken jedoch, daß ihre Ergebnisse, offensichtlich bedingt durch die Versuchsanstellung, besonders bei höheren Luftgeschwindigkeiten zu niedrig liegen. Die für Grünhopfen geltenden Werte von Bailey (3) schließlich liegen wesentlich über den eigenen Messungen. Sie wurden bei einer Schütthöhe von ungefähr 9", entsprechend etwa 23 cm, festgestellt und nach Angaben von Bailey auf 1 m Schütthöhe unter Abzug des durch den Hordenboden gegebenen Widerstandes umgerechnet. Diese Werte liegen im übrigen auch über den in Abbildung 34 wiedergegebenen Messungen von Bailey, in denen der durch die Horde bedingte Widerstand mit enthalten ist. Sorten- oder Wachstumsunterschiede (Bailey verwendete für seine Versuche Hopfen der Sorte Early Bird Goldings, während die eigenen Versuche mit der Sorte Hallertauer Mittelfrüh durchgeführt wurden) können für diese großen Abweichungen nicht verantwortlich gemacht werden, da eigene Tastversuche mit der Sorte Northern Brewer, Hallertauer Herkunft, Strömungswiderstände ergeben haben, die nicht wesentlich von den in Abbildung 35 wiedergegebenen eigenen Messungen abwichen.

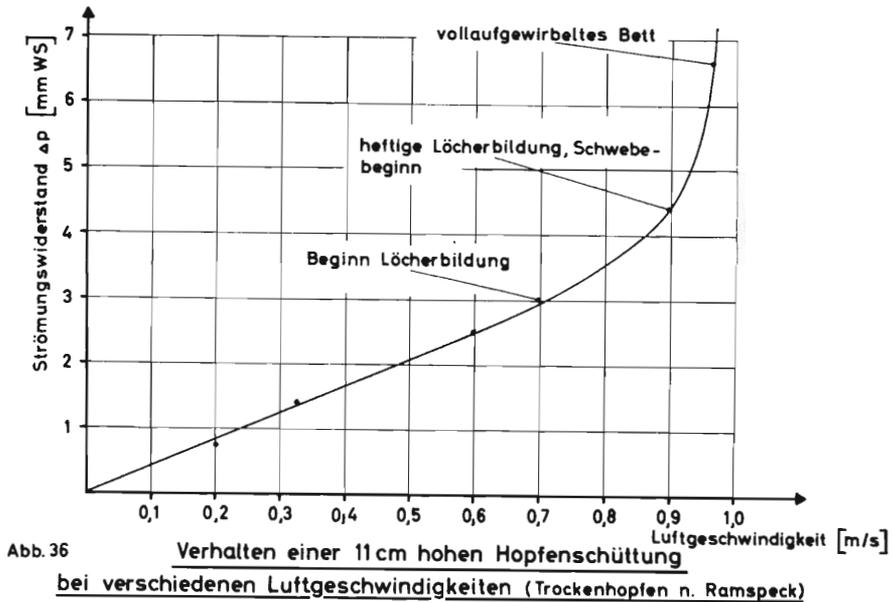
Die eigenen Messungen bestätigen die eingangs dieses Abschnittes geäußerte Vermutung, daß die Strömungswiderstände beim Grün- und beim Trockenhopfen nicht wesentlich voneinander abweichen.

3. 5. 2. Die Lockerungsgeschwindigkeit.

Wie bereits in Abschnitt 2 erläutert, muß das "Flattern" des Hopfens während der Trocknung wegen der Gefahr des Lupulinverlustes (Qualitätseinbuße) nach Möglichkeit vermieden werden. Ausserdem ist bei einer durchströmten Hopfenschicht, bei der einzelne Dolden zu flattern bzw. zu schweben beginnen, immer die Gefahr vorhanden, daß an einer Stelle der Hopfen ausgeblasen wird wobei dann durch das so entstandene Loch in verstärktem Maße Heißluft strömt, was dazu führt, daß die Hopfenschicht vollkommen ungleichmäßig trocknet. Durch das inhomogene Gemisch von kleinen und großen Dolden sowie evtl.

unterschiedlichen Anteilen von Doldenblättern, aus dem eine Hopfenschüttung besteht, wird diese Gefahr noch verstärkt.

Nach Untersuchungen von Ramspeck (42) die in Abbildung 36 wiedergegeben sind, beginnt bei einer 11 cm hohen Trockenhopfenschicht die Löcherbildung, d. h. das Ausblasen einzelner Dolden, bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,7 m/s



Allerdings muß hierbei berücksichtigt werden, daß diese Luftgeschwindigkeit nicht die Schwebegeschwindigkeit des Hopfens ist, da sie nicht als örtliche Geschwindigkeit an einer einzelnen Dolde, sondern als mittlere Geschwindigkeit im freien Strömungsquerschnitt definiert ist. In den schmalen Spalten bzw. Kanälen einer Schüttung muß zwangsläufig die örtliche Luftgeschwindigkeit höher sein und kann Werte erreichen, die ein Schweben bzw. sogar einen Transport einzelner Dolden an der Oberfläche der Schüttung hervorrufen. Im Inneren der Schüttung wird das Schweben oder der Transport durch die benachbarten bzw. die darüberliegenden Dolden behindert, was dazu führt, daß bereits kurz vor dem Beginn des Ausblasens die Schüttung ihr Volumen vergrößert (Bettausdehnung). Es erscheint zweckmäßig, für diese auf den freigelegten Strömungsquerschnitt bezogene Luftgeschwindigkeit den Begriff "Lockerungsgeschwindigkeit" zu wählen, der auch bei Kröll (30) verwendet wird.

In Abbildung 37 ist nach Untersuchungen von Bailey (3) die Lockerungsgeschwindigkeit für eine zweilagige Hopfenschicht aufgetragen, wobei Bailey den Beginn des Schwebens vereinzelter Dolden der oberen Schicht als Kriterium verwendet hat.

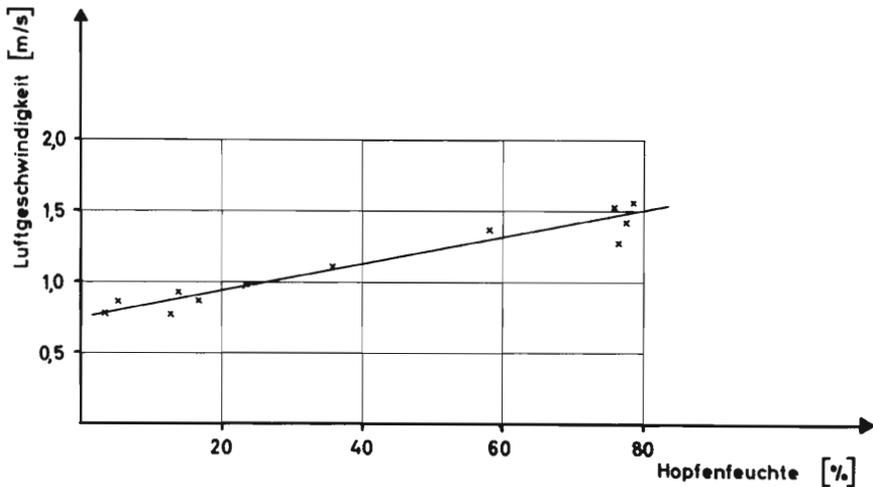


Abb. 37

Lockerungsgeschwindigkeit für eine
zweilagige Hopfenschicht (nach Bailey)

Da aufgrund des oben Gesagten vermutet werden kann, daß bei einer viellagigen Hopfenschüttung andere Luftgeschwindigkeiten als bei einer zweilagigen Schicht zur Lockerung erforderlich sind, die Lockerung jedoch aufgrund eigener Beobachtungen bei Bandtrockner - und Darrenuntersuchungen (58) kurz vor dem Ausblasen erfolgt, wurden entsprechende Versuche vorgenommen, deren Ergebnisse in Abbildung 38 dargestellt sind.

Bei dem zu diesen Versuchen verwendeten Hopfen der Sorte Hallertauer Mittelfrüh wurden sämtliche Verunreinigungen (Stengel- und Blatteile sowie Doldenblätter) von Hand ausgelesen und nach gründlicher Durchmischung jeweils 5 Proben zur Bestimmung des Anfangsfeuchtegehaltes nach der Trockenschrank-Waage-Methode (5 1/2 Stunden bei 106°C, siehe auch Abschnitt 3.2.) gezogen. Das Versuchsmaterial wurde in einen Trocknungsbehälter (Grundfläche 25x25cm, siehe auch Abbildung 1) mit einer Schütthöhe von 30 cm eingefüllt und anschließend durch Öffnen der Ansaugblende (siehe auch Erläuterungen zu Abbildung 1 und Abbildung 2) die Luftgeschwindigkeit so weit gesteigert, bis sich die Oberfläche der Hopfenschicht um 1 cm anhub. Diese Betausdehnung ist als Kriteri-

um für die Lockerungsgeschwindigkeit verwendet worden. Der Beginn des Ausblasens wurde dadurch ermittelt, daß anschließend die Luftgeschwindigkeit so weit gesteigert wurde, bis sich der Hopfen an dem 5 cm über der Hopfenschicht befindlichen, grobmaschigen Drahtgewebe befand. Der mittlere Feuchtegrad der gesamten Hopfenschüttung ergab sich durch Wägung des Trocknungsbehälters (siehe auch Abschnitt 3. 2.) in Verbindung mit der Feuchtegehaltsbestimmung des Ausgangsmaterials. Nach stufenweiser Trocknung wurde der Hopfen zur Abkühlung jeweils mit Kaltluft beblasen und die Versuche zur Bestimmung der Lockerungs- und der Ausblasgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom mittleren Feuchtegrad auch mit Kaltluft durchgeführt, um so eine Änderung des Feuchtegrades während der Messungen möglichst weitgehend zu vermeiden. Die unter diesen Bedingungen ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 38 zusammenfassend dargestellt.

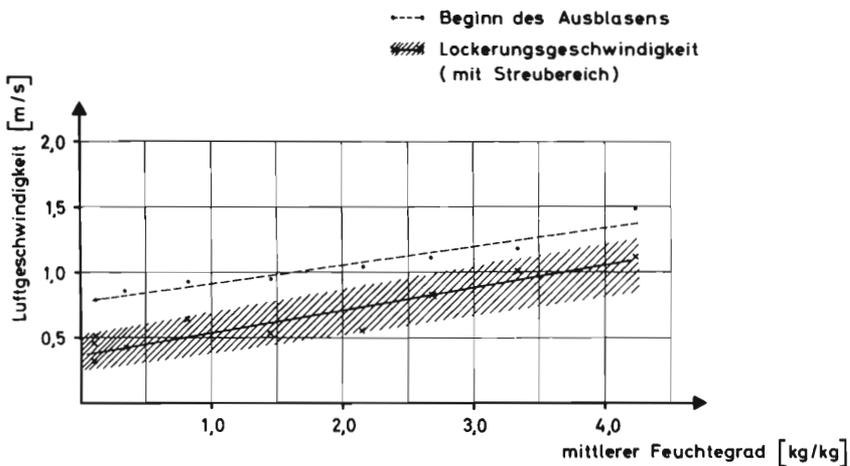


Abb. 38 Verhalten einer 30 cm hohen Hopfenschüttung während der Trocknung (Behältergrundfläche 25x25 cm)

Bedingt durch die Schwierigkeit, die Luftgeschwindigkeit so einzustellen, daß gerade nur eine Bettausdehnung von 1 cm stattfindet und wahrscheinlich auch durch unterschiedliche Schüttungen (Doldengröße usw.) besitzen die Werte für die Lockerungsgeschwindigkeit einen relativ großen Streubereich. In diesem Bereich sind die Meßpunkte einer Meßreihe eingetragen.

Aus Abbildung 38 ist zu ersehen, dass bei 30 cm Schütthöhe die Lockerungsgeschwindigkeit für Trockenhopfen (Feuchtegrad = 0,111) zwischen

etwa 0,3 und 0,5 m/s und für Grünhopfen (Feuchtegrad = 4,0) zwischen etwa 0,85 und 1,25 m/s liegt. Diese Ergebnisse stehen damit in Widerspruch zu den von Ramspeck (42) gegebenen Empfehlungen (siehe auch Abschnitt 1.2.). Sie bestätigen jedoch die bei Bandtrockner- und Darrenuntersuchungen (57,58) gemachten Beobachtungen, nach den bereits bei einer Heissluftgeschwindigkeit von 0,3 m/s einzelne Dolden zu flattern beginnen.

4. Die Anwendung der Ergebnisse des Versuchstrockners auf die Trocknung in der Darre.

Aufgrund der in Abschnitt 3.4. zusammengefassten Ergebnisse kann vermutet werden, daß bei der Hopfentrocknung eine Leistungssteigerung ohne wesentliche Beeinträchtigung der Qualitätsmerkmale möglich ist. Um zu überprüfen, ob die mit dem Versuchstrockner ermittelten Werte sich auch bei der Trocknung in der Darre bestätigen, wurden die nachfolgend beschriebenen Versuche in der Hopfenernte 1967 an einer 16,9 m² großen Mehrhordendarre durchgeführt. Die obere Grenze für die anzuwendenden Trocknungsbedingungen bildete dabei hauptsächlich die Leistungsfähigkeit der auf dem Betrieb vorhandenen Hopfenpflückmaschine. Weiterhin mußten die Trocknungsbedingungen so gewählt werden, daß eine Schädigung größerer Hopfenmengen nicht eintrat.

Da die entsprechenden Qualitätsuntersuchungen relativ langwierig sind, konnten sie während der Hopfenernte nicht durchgeführt werden, sodaß in Bezug auf die Qualität des Hopfens die obere Grenze der Trocknungsbedingungen in diesen Versuchen offensichtlich nicht erreicht wurde.

4.1. Anforderungen an die Darre.

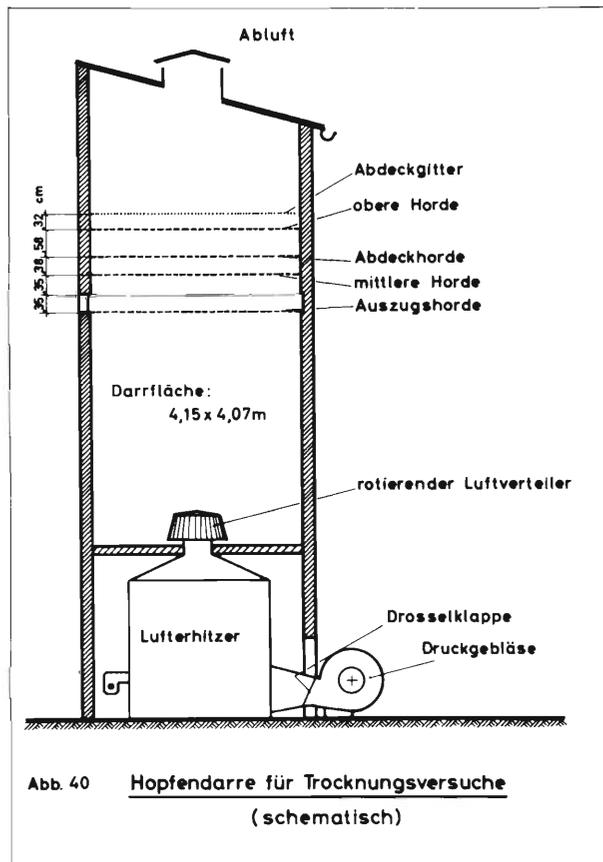
Eine wesentliche Erhöhung der Trocknungsleistung läßt sich nur dann erzielen, wenn die Trocknungstemperatur über den üblichen Wert von 60°C gesteigert wird. Gleichzeitig ist es aber auch erforderlich, den Luftdurchsatz, d.h. die Luftgeschwindigkeit, zu erhöhen, um so mögliche Qualitätsschädigungen auf ein Minimum zu begrenzen. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten als etwa 0,3m/s

(siehe auch Abbildung 38) besteht jedoch die Gefahr, daß die Hopfenschicht aufreißt und somit die Trocknung ungleichmäßig wird. Wie bereits die vorangegangenen Untersuchungen verschiedener Darren (58) gezeigt haben, wirkt sich dies am stärksten aus, wenn das Aufreißen bzw. die Löcherbildung der Hopfenschicht auf der obersten Horde, d.h. beim Grünhopfen, erfolgt. Weiterhin kann die Löcherbildung zum "Zerblättern" des Hopfens und damit besonders beim Trockenhopfen zum Verlust von Lupulin führen. Um diese Erscheinungen zu verhindern, wurde daher bei der zu untersuchenden Darre die obere Horde durch ein engmaschiges, aufklappbares Drahtgitter abgedeckt (siehe auch Abbildung 39).



Ausserdem wurde die Auszugshorde versuchsweise ebenfalls mit einer ein-schiebbaren Drahtgewebe-Abdeckung versehen, die bei jedem Kippen der Hor-den entfernt werden mußte. Weiterhin wurden von den drei vorhandenen Kipp-horden die mittlere tiefer gesetzt, um sie als Abdeckung für die darunter lie-gende Horde verwenden zu können. Bei den Versuchen zeigte es sich, daß die Abdeckung der obersten Horde nicht mehr als 5-7 cm von der Oberfläche der Hopfenschicht bei der verwendeten Schichthöhe von 25 - 27 cm entfernt sein darf, wenn die Löcherbildung beim Grünhopfen mit Sicherheit vermieden wer-den soll. Zur Verhinderung der Löcherbildung bei den darunterliegenden Schich-ten ist dieser geringe Abstand nicht notwendig; bei der Auszugshorde zeigte es

sich sogar, daß auf die ursprünglich vorgesehene, einschiebbare Abdeckung ohne wesentliche Nachteile verzichtet werden konnte, da die Hopfenschicht bei Heißluftgeschwindigkeiten über $0,5 \text{ m/s}$ bis an die Unterseite der darüberliegenden Horde angehoben wurde. In dem schematischen Querschnitt der Darre in Abbildung 40 sind die wichtigsten Maße eingetragen.



Zum Entleeren der Darre und zum Kippen der Horden muß der Luftdurchsatz soweit gedrosselt werden, daß in der Darre Heißluftgeschwindigkeiten von etwa $0,25 \text{ m/s}$ herrschen. Beim Überschreiten dieses Wertes wird bereits beim Öffnen der Klappe für die Auszugshorde eine je nach Luftgeschwindigkeit und Gebläsekennlinie unterschiedliche Menge Trockenhopfen ausgeblasen. Bei den durchgeführten Versuchen wurde die Verminderung der Luftgeschwindigkeit mit Hilfe einer vom Hopfenboden aus zu betätigenden Drosselklappe am Druckgebläse erreicht (siehe auch Abbildung 40), die, mit verschiedenen Anschlägen versehen, auch zum Einstellen der für die Versuche erforderlichen verschiedenen Luftdurchsätze diente.

4. 2. Durchgeführte Untersuchungen an der Darre.

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Darre wurde für die Versuche als Dreihorden-Darre verwendet, wobei die Schütthöhe des Grünhoppers, bedingt durch die Abmessungen der Auszugshorde, auf rd. 25 cm begrenzt war. Die Messungen beschränkten sich im wesentlichen auf die Durchsatzbestimmungen des Grün- und Trockenhoppers, die Bestimmung des eingestellten Luftdurchsatzes und die Feststellung des Heizölverbrauches. Ausserdem wurden zur Kontrolle des Wärmetauscherwirkungsgrades Orsat-Analysen durchgeführt sowie der Temperaturverlauf in der Darre mit Hilfe von Thermoelementen und einem Zwölf-Kanal-Schreiber registriert.

Für die Durchsatzbestimmung des Grünhoppers wurde jeweils die gesamte Aufschüttung einer Horde gewogen. Bedingt durch unterschiedlichen Feuchtegehalt und unterschiedliche Beschaffenheit des Grünhoppers schwankte auch bei der konstanten Schütthöhe von 25 cm die aufgeschüttete Grünhoppermenge um einen Mittelwert von 480 kg mit Extremwerten von 450-540 kg. Ähnliche Schwankungen waren daher auch beim Trockenhopper festzustellen, bei dem, ebenso wie beim Grünhopper, jeweils die gesamte Masse einer Auszugshorde gewogen wurde. Zur Feuchtegehaltsbestimmung des Trockenhoppers nach EBC (Trockenschrank, 106°C, 1 Stunde, - Waage) zwecks Kontrolle der Gleichmäßigkeit wurden aus der Oberfläche der Auszugshorde jeweils 16 bzw. 32 Proben nach dem bereits früher beschriebenen Schema (58) gezogen.

Die Proben für die Qualitätsanalysen wurden sowohl vom Grünhopper als auch vom Trockenhopper entnommen, wobei darauf geachtet wurde, daß sie aus dem gleichen Bereich der Darre, d. h. möglichst vom gleichen Ausgangsmaterial stammten. Gegenüber den Versuchen mit dem Versuchstrockner wurden hier die Analysen des Trockenhoppers durch Probesude ergänzt.

Der Luftdurchsatz und damit in Verbindung mit der Heißlufttemperatur auch die auf den freien Querschnitt der Darre bezogene Heißluftgeschwindigkeit wurde über Luftgeschwindigkeitsmessungen im Ansaugstutzen des Druckgebläses bestimmt. Hierbei wurden die durch Wirbelbildungen an dieser Meßstelle verursachten Meßfehler in einer Eichkurve berücksichtigt, zu deren Aufstellung der tatsächliche Luftdurchsatz beim Eintritt in die Druckkammer der Darre hinter einem Gleichrichtergitter gemessen wurde. Die Ermittlung des Aussenluftzustandes erfolgte über Psychrometermessungen (Assmann-

Psychrometer) und Luftdruckmessungen mit Hilfe eines Quecksilber-Barometers.

Die je nach Luftdurchsatz und am Thermostat eingestellter Temperatur unterschiedlich großen Regelschwankungen des Luftherhitzers führten dazu, daß die unter der Auszugshorde mit Hilfe von 3 Thermoelementen gemessenen Mittelwerte der Heißlufttemperatur vom eingestellten Sollwert abwichen. Im nachfolgenden Abschnitt beziehen sich daher die Angaben über die Heißlufttemperatur auf die unter der Auszugshorde gemessenen Mittelwerte. Für die Berechnung der Heißluftgeschwindigkeit sind die gleichen Temperaturwerte verwendet worden, wobei die geringfügige Erhöhung des statischen Druckes, wie bereits in Abschnitt 3.3., nicht berücksichtigt wurde.

In den tabellarischen Zusammenstellungen des folgenden Abschnittes sind nur die Versuche berücksichtigt, bei denen auch Qualitätsuntersuchungen durchgeführt wurden.

4.3. Ergebnisse der Darrenuntersuchungen.

Wie schon am Ende des Abschnittes 4.2. erwähnt, bereitete die Einstellung und das Einhalten einer bestimmten Heißlufttemperatur besondere Schwierigkeiten. So gelang es z. B. nicht, den Zwei-Stufen-Ölbrenner des Luftherhitzers so einzustellen, daß eine Heißlufttemperatur von 60°C unter der Auszugshorde ohne große Regelschwankungen eingehalten wurde. Bei höheren Temperaturen war dies leichter möglich, jedoch mußte hierbei, um geringe Schwankungen zu erzielen, darauf verzichtet werden, die Temperaturwerte der Versuche mit dem Versuchstrockner (siehe auch Abschnitt 3.3.) genau einzuhalten.

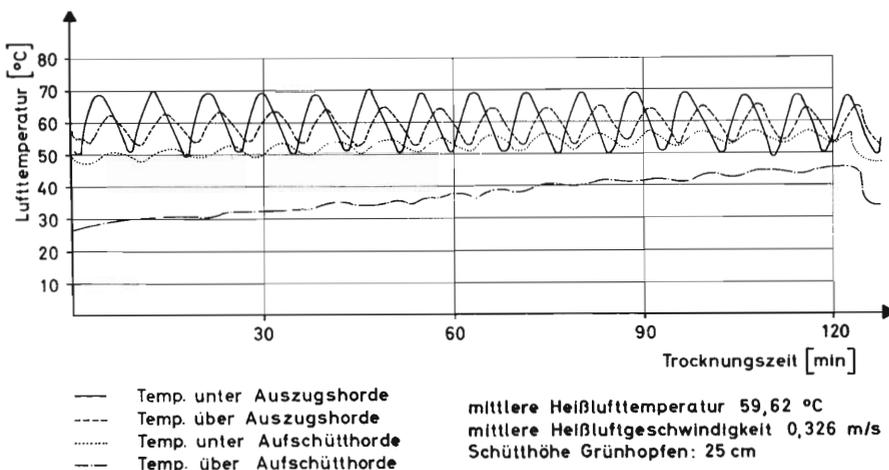


Abbildung 41 ist ein Beispiel für den Temperaturverlauf in der Darre bei einem Versuch mit 60°C .

Der ausgezogene Linienzug zeigt für einen Meßpunktabstand von 1 min die Temperatur unter der Auszugshorde mit max. - Werten von $69,5^{\circ}\text{C}$ und min. - Werten von 50°C bei einem Mittelwert von $59,6^{\circ}\text{C}$. Diese Regelschwankungen sind, wenn auch in abgeschwächter Form, noch unter der Aufschütthorde meßbar. Lediglich die Ablufttemperatur (Temperatur über der Aufschütthorde) steigt hierbei fast linear von $26,5^{\circ}\text{C}$ auf 46°C an, wobei sie den Wert von 46°C kurz vor Beginn der neuen Aufschüttung nach 124 min erreicht.

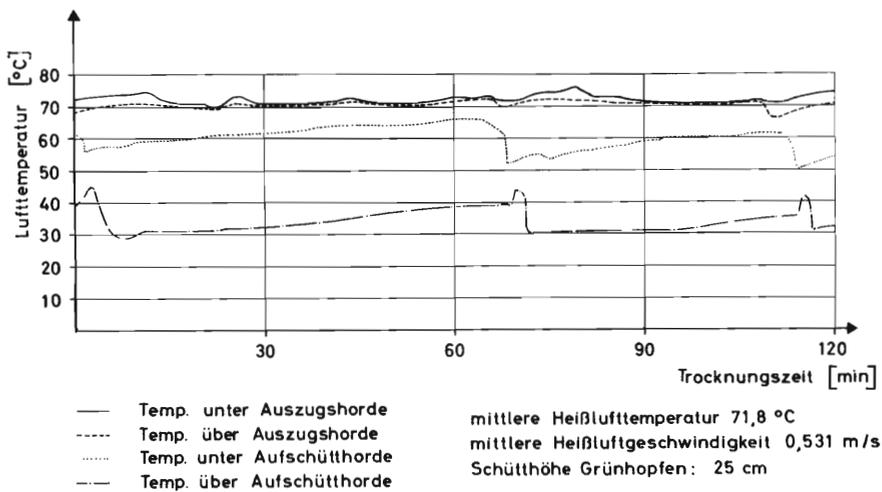


Abb. 42 Temperaturverlauf in einer Drei - Horden - Darre

Abbildung 42 zeigt den Temperaturverlauf in der Darre für einen Versuch, bei dem eine Heißlufttemperatur von 75°C und eine Luftgeschwindigkeit von $0,55\text{ m/s}$ mit möglichst kleinen Regelschwankungen erreicht werden sollte. Die Heißlufttemperatur beträgt hierbei im Mittel $71,8^{\circ}\text{C}$ mit max. - Werten von $75,5^{\circ}\text{C}$ und min. - Werten von $69,5^{\circ}\text{C}$. Innerhalb der Messzeit von 120 min erfolgten bei diesem Beispiel 3 Aufschüttungen, wobei die Zeiten zwischen den Aufschüttungen unterschiedlich waren. Diese Abweichungen führen jedoch nicht zwangsläufig zu unterschiedlichen Feuchtegehalten des Trockenhopfens bei den einzelnen Partien, wenn für die einzelnen Aufschüttungen eine durch die Trocknungsbedingungen bestimmte, konstante Gesamt-Verweilzeit in der Darre eingehalten wird. Obwohl bei allen Aufschüttungen versucht wurde, den Grünhopfen

in möglichst kurzer Zeit auf die Aufschütthorde zu bringen, ist dies nicht immer gelungen. Ein Beispiel dafür ist die erste Aufschüttung in Abbildung 42.

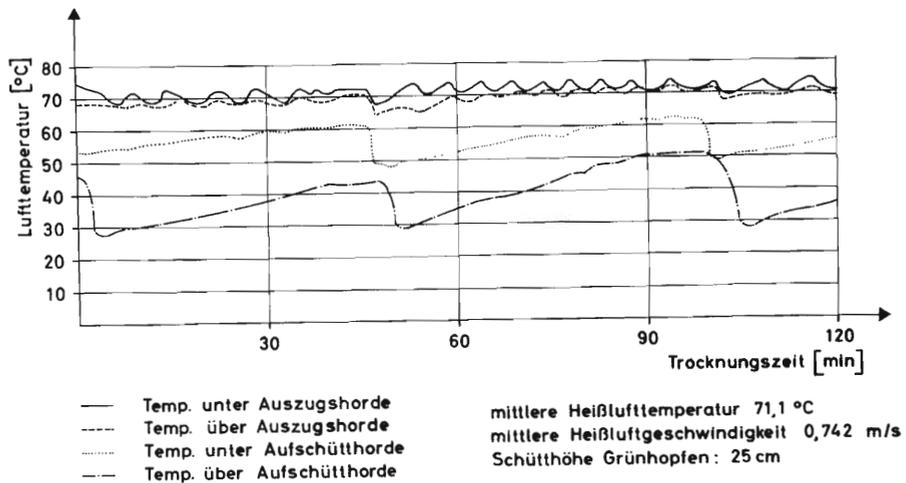


Abb. 43

Temperaturverlauf in einer Drei-Horden-Darre

Das Beispiel in Abbildung 43 zeigt den Temperaturverlauf in der Darre bei der gleichen Temperatureinstellung wie in dem Beispiel nach Abbildung 42, jedoch mit einer auf 0,742 m/s erhöhten Heißluftgeschwindigkeit. Der Mittelwert der Heißlufttemperatur beträgt 71,1 °C mit Maximalwerten bis 75 °C und Minimalwerten von 68 °C. Auch bei diesem Beispiel lagen innerhalb der Trocknungszeit von 120 min 3 Aufschüttungen mit etwas unterschiedlichen Zeitintervallen.

Mit der vereinfachenden Annahme einer adiabaten Zustandsänderung ergeben die Meßwerte der Lufttemperatur in Verbindung mit dem Aussenluftzustand einen Anhaltswert für die relative Feuchte der Abluft. Sie erreicht bei dem Beispiel der Abbildung 41 ihren Maximalwert von 98% kurz nach der ersten Aufschüttung und ihren Minimalwert mit ca. 22% kurz vor Beginn der nächsten Aufschüttung. Bei dem Beispiel nach Abbildung 42 ändert sich die relative Feuchte der Abluft von ca. 97% auf ca. 44% für die erste Aufschüttung bzw. von ca. 90% auf 62% für die zweite Aufschüttung. Für das Beispiel nach Abbildung 43 betragen die gleichen Werte ca. 97% bis ca. 32% für die erste Aufschüttung und ca. 95% bis 18% für die zweite Aufschüttung. Bei allen Beispielen wurde die in den Abbildungen 41 - 43 angegebenen mittleren Heißlufttemperaturen als Ausgangspunkte für die Adiabate verwendet. Diese verein-

fachenden Annahmen erscheinen gerechtfertigt, da auch Kontrollmessungen mit Psychrometern (Assmann-Psychrometer mit geringer Thermometermasse) nur wenig abweichende Werte für die relative Feuchte der Abluft ergaben.

Der bei den angewandten Trocknungsbedingungen erzielte Durchsatz der beschriebenen Darre und der spezifische Wärmeaufwand für die Verdunstung von einem kg Wasser ist in Tabelle 9 aufgeführt. Wie bereits erwähnt, wurden dafür nur die Versuche berücksichtigt, bei denen auch Qualitätsanalysen durchgeführt wurden.

Tab. 9

Probe Nr.	mittl. Heißluft-		Durchsatz		Feuchtegehalt Grünhopfen [%]	spez. Wärme- aufwand [kcal / kg]	Wirkungsgrad d. Luffthitzer [%]
	-temperatur [°C]	-geschwindigkeit [m/s]	Grünhopfen [kg/h]	Trockenhopfen [kg/h]			
3	60,6	0,329	337,5	73,9	81,5	1170	77,0
4	60,2	0,328	287,3	64,1	79,7	1330	79,2
54	71,6	0,531	501,9	108,2	82,41	1190	85,0
71	72,0	0,532	458,6	110,9	79,68	1355	85,0
108	71,8	0,745	599	145,2	79,17	1415	84,5
145	73,1	0,752	528,4	114,3	80,85	1625	85,0
109	85,5	0,776	?	?	?	?	?

Bei dem in der obigen Tabelle aufgeführten Versuch mit der Probennummer 109 wurden lediglich Qualitätsanalysen vorgenommen. Für eine Durchsatzbestimmung hätten mindestens 6 Aufschüttungen den angegebenen Trocknungsbedingungen ausgesetzt werden müssen; davon wurde jedoch abgesehen, da die Gefahr einer wesentlichen Qualitätsbeeinträchtigung größerer Hopfenmengen (ca. 650 kg Trockenhopfen) zum Zeitpunkt der Durchführung der Versuche zu groß erschien. Aus diesem Grunde wurden die in der letzten Zeile der obigen Tabelle angegebenen Trocknungsbedingungen nur in der letzten halben Stunde vor dem Entleeren der Auszugshorde angewendet, - die Vortrocknung erfolgte mit einer mittleren Heißlufttemperatur von $74,3^{\circ}\text{C}$ und einer mittleren Heißluftgeschwindigkeit von $0,757\text{ m/s}$.

In den beiden ersten Zeilen der obigen Tabelle (Probe Nr. 3 und 4) sind als Beispiel zwei 60^o-Versuche wiedergegeben. Die Heißlufttemperaturen schwankten hierbei in dem gleichen Bereich wie bei dem Beispiel nach Abbildung 41. Bedingt durch unterschiedliche Aufschüttmengen des Grünhopfens und voneinander abweichende Verweilzeiten in der Darre war auch der Trockenhopfendurchsatz nicht konstant. Im Mittel sämtlicher Versuche ergab sich jedoch unter diesen Trocknungsbedingungen ein Durchsatz von 59,5 kg/h. Trockenhopfen mit Extremwerten von 56,5 und 73,9 kg/h. Weiterhin zeigte es sich, daß unter diesen Trocknungsbedingungen für normal feuchten Grünhopfen (Hopfenfeuchte 80%) eine Verweilzeit von 5,5 Stunden in der Darre erforderlich war, um eine mittlere Endfeuchte des Trockenhopfens von 10-11% zu erhalten. Dieser mittlere Feuchtegehalt des Trockenhopfens, der aus der Wägung des Grün- und des Trockenhopfens sowie der Feuchtegehaltsbestimmung des Grünhopfens ermittelt wurde, weicht von den Werten der Feuchtegehaltsbestimmungen, die zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Trocknung durchgeführt wurden, teilweise erheblich ab. Abbildung 44 zeigt die an 16 Punkten der Oberfläche der Auszugshorde gemessene Hopfenfeuchte für den in Tabelle 9 mit der Probe Nr. 4 bezeichneten Versuch, bei dem eine mittlere Endfeuchte des Trockenhopfens von rd. 9% ermittelt wurde.

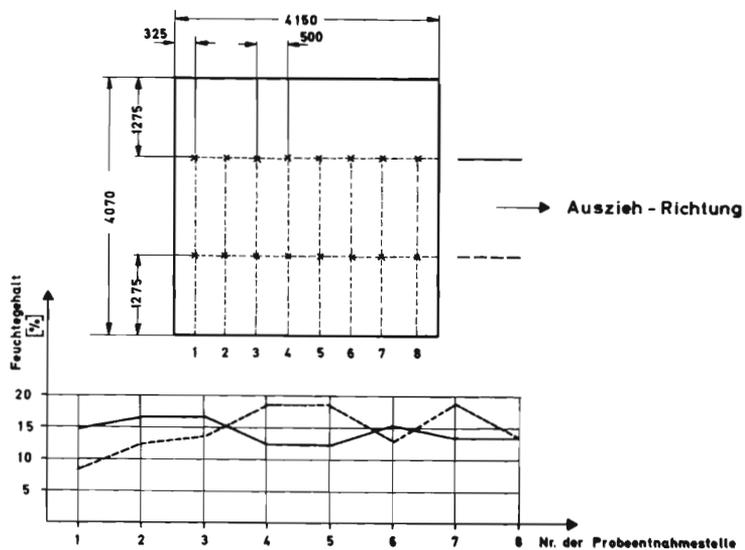


Abb. 44

Feuchtegehaltsverteilung in der Oberfläche
der Auszugshorde einer Hopfendarre

Bereits frühere Untersuchungen (57) an mehreren Darren hatten ähnliche Abweichungen gezeigt.

Bei den Werten für den spezifischen Wärmeverbrauch zur Verdunstung von 1 kg Wasser ist der Wirkungsgrad des Lufterhitzers mit zu berücksichtigen. Offensichtlich bedingt durch den ungünstigen Betriebsbereich betrug der Wirkungsgrad nur 77-79,2%. Bei einem Wirkungsgrad von 85%, der, wie frühere Untersuchungen (57, 58) gezeigt haben, mit einem neuen Wärmetauscher durchaus zu erzielen ist, würde der spezifische Wärmeverbrauch für die Versuche mit der Probe Nr. 3 und 4 1060 bzw. 1240 kcal/kg betragen.

Die Proben Nr. 54 und 71 in Tabelle 9 sind als Beispiel für zwei 75°-Versuche mit niedriger Luftgeschwindigkeit wiedergegeben, wobei, wie bereits zu Beginn dieses Abschnittes erwähnt, die gewünschte Temperatur von 75°C nicht genau einzuhalten war. Die Heißlufttemperaturen schwankten um die angegebenen Mittelwerte in dem gleichen Bereich wie bei dem Beispiel nach Abbildung 42. Auch bei diesen Versuchen war der Trockenhopfendurchsatz nicht konstant, er betrug jedoch im Mittel sämtlicher Versuche mit dieser Einstellung 103 kg/h, wobei Extremwerte von 95,5 und 110,9 kg/h auftraten. Um eine Endfeuchte des Trockenhopfens von 10-11% zu erhalten, war unter diesen Trocknungsbedingungen für normal feuchten Grünhopfen (Hopfenfeuchte 80%) eine mittlere Verweilzeit in der Darre von rd. 3,2 Stunden erforderlich.

Der spezifische Wärmeverbrauch zur Verdunstung von 1 kg Wasser lag für die Versuche mit den Proben Nr. 54 und 71 im gleichen Bereich wie bei den beiden aufgeführten 60°-Versuchen, allerdings war hier, offensichtlich bedingt durch den günstigeren Betriebsbereich, der Wirkungsgrad des Lufterhitzers besser.

Mit den Proben Nr. 108 und 145 sind in Tabelle 9 zwei Beispiele für 75°-Versuche mit höherer Luftgeschwindigkeit angegeben. Ebenso wie bei den Versuchen mit der Probe Nr. 54 und 71 schwankten auch hier die Heißlufttemperaturen um die angegebenen Mittelwerte in dem gleichen Bereich wie bei dem Beispiel nach Abbildung 43. Der Trockenhopfendurchsatz betrug im Mittel sämtlicher Versuche unter diesen Trocknungsbedingungen 117 kg/h, wobei die beiden aufgeführten Beispiele gleichzeitig die Extremwerte angeben. Die erforderliche Verweilzeit für normal feuchten Grünhopfen, (Hopfenfeuchte 80%) beträgt bei dieser Trocknungseinstellung rd. 2,75 Stunden, um eine Endfeuchte des Trockenhopfens von 10-11% zu erhalten.

Der spezifische Wärmeaufwand zur Verdunstung von 1 kg Wasser lag bei diesen Trocknungsbedingungen im Durchschnitt um 20% über den Werten, die bei den Versuchen mit der niedrigeren Luftgeschwindigkeit (Proben Nr. 54 bis 71) festgestellt wurden.

Bei der Handbonitierung nach der Standardmethode der Wiss. Kommission des europäischen Hopfenbaubüros wurde jede Probe von 3 Bonitierern beurteilt (37), deren Ergebnisse in Tabelle 10 zusammengefasst sind.

Tab 10

Handbonitierung

Probe Nr.	mittlere Heißluft- temperatur [°C] geschwindigkeit [m/s]		Versuchsmat.		Vergleichsmat.		...Versuchsmat. ...Vergleichsmat.	
			Gesamt- punktzahl	Teilpunkt- zahl	Gesamt- punktzahl	Teilpunkt- zahl	Gesamtpunkt-	Teilpunkt-
							Gesamtpunkt-	Teilpunkt-
3	60,6	0,329	67	40	71	42	0,944	0,952
			60	37	60	39	1,0	0,949
			61	36	62	37	0,984	0,973
4	60,2	0,328	69	44	67	40	1,03	1,1
			66	43	69	44	0,957	0,977
			67	42	64	39	1,047	1,08
54	71,6	0,531	63	37	73	43	0,863	0,86
			58	39	65	44	0,892	0,886
			61	37	64	39	0,953	0,949
71	72,0	0,532	68	38	66	41	1,03	0,927
			57	37	65	38	0,877	0,974
			58	34	62	39	0,935	0,872
108	71,8	0,745	64	41	65	41	0,985	1,0
			54	35	54	34	1,0	1,03
			64	39	59	36	1,08	1,08
145	73,1	0,752	63	38	67	40	0,94	0,95
			63	36	66	41	0,955	0,878
			65	37	71	42	0,915	0,881
109	85,5	0,776	63	42	65	41	0,869	1,02
			68	43	54	34	1,28	1,26
			71	43	68	38	1,203	1,19

Für die in der obigen Tabelle aufgeführten Teilpunktzahlen des Versuchs- und des Vergleichsmaterials gilt die gleiche Definition wie für die in Abschnitt 3.4., Abbildung 26 a - 26 b beschriebenen Qualitätsuntersuchungen. Die beiden letzten Spalten der Tabelle 10, in denen die aus der Gesamtpunktzahl bzw. der Teilpunktzahl des Versuchsmaterials und des Vergleichsmaterials gebildete Verhältniszahl angegeben ist, lassen erkennen, daß die Beurteilung der einzelnen Bonitierern, wie z. B. bei Probe Nr. 71, teilweise erheblich voneinander abweicht. Die Probe Nr. 54 zeigt bei der Beurteilung der äusseren Qualitätsmerkmale das schlechteste Ergebnis, während die Probe Nr. 109 am günstigsten liegt. Unterschiedliche Endfeuchtegehalte des Trockenhopfens können dafür nicht alleine verantwortlich gemacht werden, da zwar die Probe Nr. 54 mit einem Mittelwert von rd. 18,2% Hopfenfeuchte nach Beendigung der Trocknung den höchsten Wert aller Versuche aufwies, die Probe Nr. 71 jedoch mit einem

Mittelwert von rd. 16,2% in ähnlicher Höhe lag. Weiterhin zeigen die beiden letzten Spalten der Tabelle 10, daß die verschärften Trocknungsbedingungen keine eindeutige Verschlechterung der äusseren Qualitätsmerkmale bewirken. Die Ergebnisse der Bitterstoffanalysen (37) sind in Tabelle 11 wiedergegeben.

Tab. 11 Bitterstoffanalysen (Prozentangaben bezogen auf Trockensubstanz)

Probe Nr.	mittl. Heißluft		Versuchsmaterial					Vergleichsmaterial					Versuchsmat.		Vergleichsmat.			
	-temp.	geschw.	Bitterwert nach Wöllmer	α -Säure	Gesamtharz - gehalt	Hartharz - gehalt	rel. Hartharz - anteil	Bitterwert nach Wöllmer	α -Säure	Gesamtharz - gehalt	Hartharz - gehalt	rel. Hartharz - anteil	Bitterwert	Bitterwert	α -Säure	α -Säure	rel. Hartharz.	rel. Hartharz.
	[°C]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3	60,6	0,329	5,9	5,1	14,5	1,9	13,1	6,1	5,3	14,6	1,9	13,0	0,967	0,962			1,01	
4	60,2	0,328	5,8	4,9	15,1	1,8	11,9	5,8	5,0	13,9	1,8	12,9	1,0	0,982			0,924	
54	71,6	0,531	6,8	5,9	16,3	2,3	14,1	6,4	5,6	15,2	2,4	15,8	1,06	1,05			0,892	
71	72,0	0,532	6,4	5,5	15,3	2,1	13,6	6,5	5,7	15,5	2,2	14,2	0,985	0,965			0,957	
108	71,8	0,745	6,4	5,6	15,1	1,9	12,6	6,1	5,3	14,9	2,2	14,8	1,05	1,056			0,85	
145	73,1	0,752	6,4	5,5	15,2	1,8	11,8	6,2	5,4	14,8	2,1	14,2	1,03	1,02			0,831	
109	85,5	0,776	6,3	5,5	15,2	2,1	13,8	6,1	5,3	14,9	2,2	14,8	1,03	1,04			0,933	

Insbesondere die letzten 3 Spalten dieser Tabelle, in denen die Bitterwerte, die α -Säure-Gehalte und relativen Hartharzanteile des Versuchsmaterials und des Vergleichsmaterials durch das Bilden einer Verhältniszahl miteinander in Verbindung gebracht wurden, zeigen, dass die angewendeten Trocknungsbedingungen keinen schädigenden Einfluss auf die Bitterstoffe des Hopfens haben. Bei den Bitterwerten nach Wöllmer liegen lediglich die Proben Nr. 3 und 71 unter den Werten des Vergleichsmaterials - beim α -Säure-Gehalt zeigt sich das gleiche auch für die Probe Nr. 4, wobei der in Abschnitt 3.4. durch die Analysen bedingte Streubereich zu berücksichtigen ist. Bei den relativen Hartharzanteilen, die ein Maß für die Oxydation der Bitterstoffe darstellen, zeigten bis auf die Probe Nr. 3 alle Proben des Versuchsmaterials eine geringere Oxydation als das Vergleichsmaterial.

Mit den Proben Nr. 3, 4, 54, 145 und 109 wurden ausserdem im Institut für Chemisch-technische-Analyse in Weihenstephan (Direktor: Prof. Dr. Ing. E. Schild) Probesude gebraut. Um alle Sude unter den gleichen Voraussetzungen zu brauen, wurde dafür eine helle, ungehopfte Betriebswürze einer Brauerei verwendet. In Analogie zu den üblichen Sudverfahren wurden 2/3 der Hopfengabe 90 min und 1/3 nur 30 min mitgekocht. Für die einzelnen Probesude wurden gleiche α -Säuremengen eingesetzt.

Wegen des unterschiedlichen α -Säuregehaltes der einzelnen Proben wurden folgende Gesamt-Hopfengaben ermittelt:

Probe Nr.	Hopfengabe (g/hl)
3	264
4	274
54	254
145	259
109	269

Das Kochen im Würzekessel und das Ansetzen der Biere wurde bei allen Proben unter den gleichen Bedingungen vorgenommen. Nach 4-wöchiger Lagerzeit im Tank erfolgte die Filtration und Abfüllung auf Flaschen. Bei der Vergärung und Lagerung wurden zwischen den einzelnen Suden keine Unterschiede festgestellt. Die mit 10 Kostern durchgeführte Kostprobe der 5 Probesude hatte folgendes Ergebnis:

Kein Koster konnte mit Sicherheit Unterschiede zwischen den einzelnen Bieren feststellen.

Damit haben die hier beschriebenen Versuche gezeigt, dass die angewendeten Trocknungsbedingungen sowohl auf die Bitterstoffe als auch auf den Geschmack des Bieres keinen Einfluss haben.

5. Die Anwendung der Ergebnisse des Versuchstrockners auf die Trocknung im Bandtrockner.

Durch die Anwendung höherer Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten besteht ebenso wie bei der Darre auch beim Bandtrockner die Möglichkeit, die Trocknungsleistung zu erhöhen. Ausserdem läßt sich, bedingt durch den konstruktiven Aufbau, beim Bandtrockner die "gebrochene Trocknung" mit einfacheren Mitteln verwirklichen. Aus früheren Untersuchungen (57) ist bekannt, daß etwa $\frac{2}{3}$ der gesamten wirksamen Bandlänge bei der üblichen Trocknerbauart benötigt werden, um den Hopfen von einem Anfangsfeuchtegehalt von 80% auf einen Feuchtegehalt von rd. 45% herunter zu trocknen. Geht man davon aus, daß für die Endtrocknung mit Rücksicht auf evtl. vorhandene Qualitätsschädigungen die Trocknungsbedingungen nicht verschärft werden sollen, so liesse sich auf jeden Fall im ersten Bereich der Trocknung die Trocknungszeit und damit die dafür erforderliche Bandlänge verkürzen; oder, bei gleicher Bandlänge und -breite, die Trocknungsleistung erhöhen. Eine weitere wesentliche Steigerung der Trocknungsleistung ergibt sich, wenn auch in der Endtrocknung höhere Temperaturen angewendet werden; die Ergebnisse der in Abschnitt 4.3. beschriebenen Sudversuche deuten darauf hin, daß auch dies möglich ist.

5.1. Anforderungen an den Bandtrockner.

Ebenso wie bei der Darre muß auch im Bandtrockner bei einer Steigerung der Heißlufttemperatur über den üblichen Wert von 60°C der Luftdurchsatz, d. h. die Luftgeschwindigkeit, erhöht werden. Die damit verbundene Gefahr des Ausblasens von Hopfen bzw. Doldenblättern aus der Hopfenschicht und ihre schädlichen Auswirkungen besonders auch auf die Gleichmäßigkeit der Trocknung ist bereits erwähnt worden. Es muß daher im Bandtrockner ebenfalls dafür gesorgt werden, daß in der Hopfenschicht keine Löcherbildung auftreten kann; die technischen Möglichkeiten dazu sind bekannt und bereits von Albrook (1) auch für die Hopfentrocknung angewendet worden.

Durch die mit steigender Temperatur erforderliche höhere Luftgeschwindigkeit ist der Luftführung im Bandtrockner besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Wie die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Messungen und deren Ergebnisse gezeigt haben, sind die Übergabestellen von einem Band auf das andere kritische Bereiche, da hier durch die unter Umständen geringere Schichtstärke des Hopfens mehr oder minder große Mengen Heißluft ungenutzt entweichen können und für die Durchströmung der Hopfenschicht verloren gehen.

Die Verwirklichung der "gebrochenen Trocknung" im Bandtrockner erfordert zwei Bereiche mit unterschiedlichen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten, wobei es aufgrund der Abbildung 14-18 angebracht erscheint, die höheren Temperaturen beim Grünhopfen, d. h. in der Vortrockenstufe, anzuwenden.

Für die durchzuführenden Versuche konnte ein handelsüblicher Bandtrockner nicht verwendet werden. Es war vielmehr eine Neukonstruktion zu entwickeln, die einmal die Anwendung extremer Trocknungsbedingungen besonders bei der "gebrochenen Trocknung" erlaubt, zum anderen aber auch keinen übermäßig großen Durchsatz haben sollte, damit die Hopfenmenge, die evtl. durch die Trocknung geschädigt wird, nicht zu groß wird.

Aus der Vielzahl der vorhandenen Möglichkeiten zur Konstruktion eines derartigen Bandtrockners sind hier nur zwei an Hand der nachfolgenden Abbildung näher erläutert.

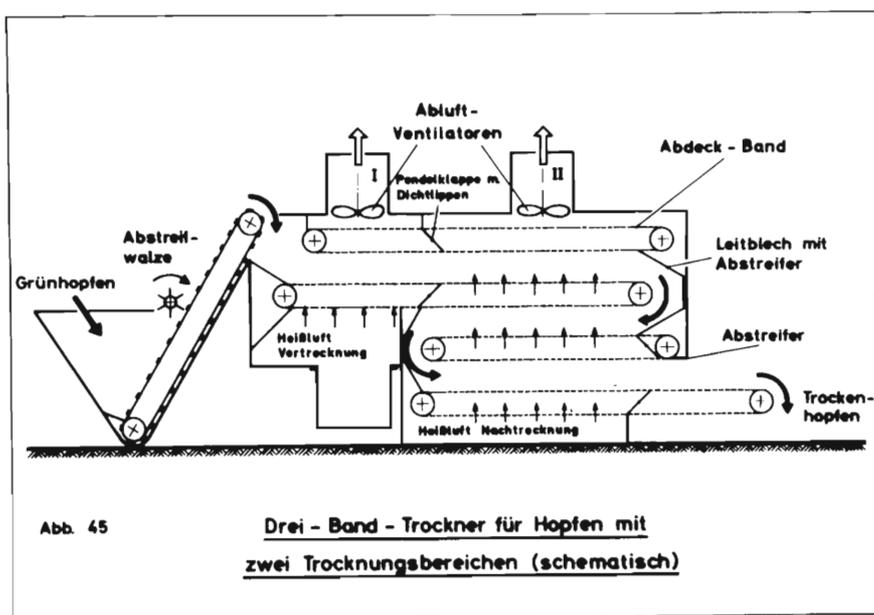


Abbildung 45 zeigt das Prinzip eines Bandtrockners im Längsschnitt mit zwei Trocknungsbereichen. Der Grünhopfen gelangt über einen Steilförderer, der mit einer Abstreifwalze zur Dosierung des Hopfens versehen ist, in den Trockner und fällt dort auf das obere Band. Die Schütthöhe auf dem oberen Band kann in bekannter Weise (23, 57) durch den Abstand der Abstreifwalze und durch die Geschwindigkeit des Steilförderers reguliert werden. Sie muß, um ein Ausblasen des Hopfens zu verhindern, so groß gewählt werden, daß die Hopfenschicht den gesamten Raum zwischen oberem Band und Abdeckband einnimmt. Am Ende des oberen Bandes fällt der Hopfen auf das mittlere Band, wobei der Abstreifer dafür sorgt, daß bei hoher Luftgeschwindigkeit an der Unterseite des Abdeckbandes schwebende Dolden bzw. Doldenblätter auch übergeleitet werden. Der Abstand zwischen mittlerem Band und oberem Band ist so zu wählen, daß der Rücklauf des oberen Bandes gleichzeitig als Abdeckung für das mittlere Band dienen kann; das gleiche gilt auch für das untere Band. Am Ende des unteren Bandes verläßt der Hopfen den Trockner. Die Heißluft für die Vortrocknung tritt im vorderen Bereich in den Trockner, durchströmt die zwischen oberem Band und Abdeckband sich langsam fortbewegende Hopfenschicht und wird durch den Abluftventilator I abgesaugt. Um das Übertreten der Trocknungsluft aus dem Bereich der Vortrocknung in den Bereich der Nachtrocknung möglichst weitgehend zu verhindern, müssen entsprechende Luftleiteinrichtungen auch zwischen Ober- und Untertrum des oberen Bandes und des Abdeck-Bandes vorgesehen werden.

Für den Bereich der Nachtrocknung wird die Heißluft unterhalb des unteren Bandes dem Trockner zugeführt. Beim Durchströmen der Hopfenschichten kühlt die Trocknungsluft durch Feuchtaufnahme ab. Um diesen Effekt auszugleichen, kann zwischen Ober- und Untertrum des mittleren und des oberen Bandes zusätzliche Heißluft zugeführt werden; allerdings erhöht sich dann auch die Luftgeschwindigkeit für die beiden oberen Hopfenschichten. Da bei entsprechend hohem Feuchtentzug in der Vortrockenstufe die Sättigung der Abluft in der Nachtrockenstufe gering sein wird (siehe auch 57), empfiehlt es sich, die gesamte Abluft des Ventilators II (oder zumindest ein Teil davon) über die Heizung der Vortrockenstufe wieder zuzuführen.

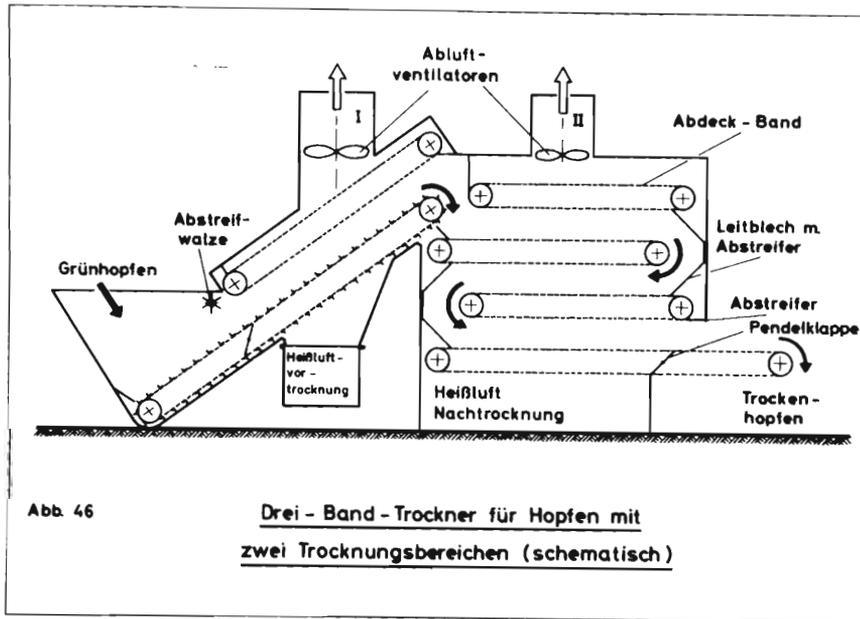


Abbildung 46 zeigt schematisch eine zweite Variante eines Bandtrockners mit zwei Trocknungsbereichen. Gegenüber Abbildung 45 ist hier die Vortrocknungsstufe in den Elevator verlegt, der ebenso wie das obere Band des eigentlichen Drei-Band-Trockners, mit einem Abdeckband versehen sein muß. Die Schütthöhe auf dem Elevatorband wird durch die einstellbare Abstreifwalze reguliert. Während bei der Lösung nach Abbildung 45 an das Elevatorband keine besonderen Anforderungen zu stellen sind, ist bei Abbildung 46 auch dieses Band, wie alle übrigen, aus einem engmaschigen Drahtgewebe zu fertigen. Im übrigen gelten auch hierbei die zu Abbildung 45 gegebenen Erläuterungen.

Für die Gleichmäßigkeit der Trocknung erscheint es wichtig, daß der Hopfen besonders in der Nach-trocknungs-Stufe mehrere Male umgeschüttet wird, was bei den Lösungen nach Abbildung 45 und 46 durch die Übergabe von einem Band auf das andere geschieht. Bereits früher durchgeführte Bandtrockneruntersuchungen (57, 58) haben gezeigt, daß bei einer Schütthöhe von ca. 30 cm die direkt auf dem Band aufliegende Hopfenschicht einen um rd. 1-1,5% niedrigeren Feuchtegehalt aufweist als die Dolden der Oberfläche. Es erscheint daher nicht zweckmäßig, in der Nach-trocknungs-Stufe mit nur einer Schicht großer Höhe ohne Wendung zu arbeiten. Eine Schütthöhe von z. B. 90 cm würde zwar etwa die gleiche Sättigung der Abluft ergeben wie drei Lagen á 30 cm, jedoch dürften die angegebenen Feuchtegehaltsunterschiede sich dann wesentlich verstärken.

für die Vortrocknung und Nachtrocknung verwendet. Zur Einstellung der gewünschten Luftmenge dienten Drosselklappen, die zwischen Druckgebläse und Lufterhitzer eingebaut waren.

Die Heißluft wurde für die Vortrockenstufe direkt unter den oberen Teil des Elevatorbandes geleitet (siehe auch Abbildung 46) während sie für die Nachtrocknung zunächst in eine seitlich neben dem Trockner angeordnete Druckkammer (siehe auch Abbildung 48) kam und von dort durch einstellbare Schlitze in den eigentlichen Trockenraum trat.

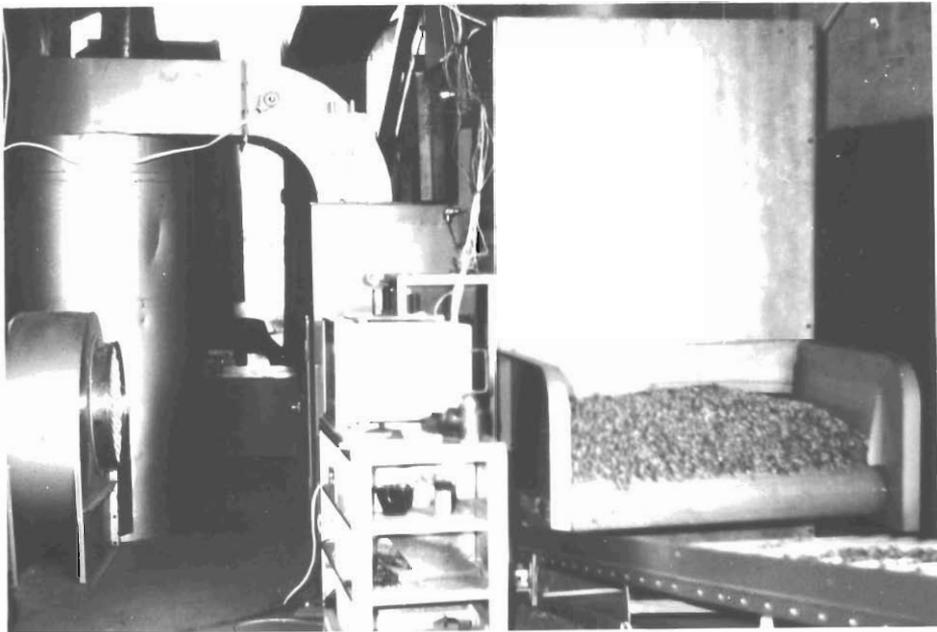


Abb. 48: Teilansicht des untersuchten Bandrockners mit zwei Trocknungsbereichen während der Messungen.

Die Abluft aus dem Bereich der Nachtrocknung konnte wahlweise ins Freie geblasen oder über eine Rohrleitung dem Druckgebläse für die Vortrocken-Stufe wieder zugeführt werden.

5. 2. Durchgeführte Untersuchungen am Bandtrockner.

Bei der im obigen Abschnitt beschriebenen Konstruktion des Bandtrockners war zunächst die Funktion der einzelnen Baugruppen zu untersuchen. Hier war insbesondere zu klären, ob der Transport des Hopfens im Bereich der Vortrocknung und Nachtrocknung ohne Störungen abläuft und ob sich mit den eingebauten Luft-Leiteinrichtungen auch die gewünschte Luftverteilung im Trockner erzielen läßt. Die bei diesen Untersuchungen festgestellten Mängel und ihre Auswirkungen werden im nächsten Abschnitt näher erläutert. Die anschließend durchgeführten Untersuchungen beschränkten sich im wesentlichen auf die Durchsatzbestimmungen des Grün- und Trockenhopfens, die Bestimmung des eingestellten Luftdurchsatzes und die Feststellung des Heizölverbrauches. Ausserdem wurden zur Ermittlung der Wärmetauscherwirkungsgrade Orsat-Analysen durchgeführt sowie die Temperaturverteilung in den verschiedenen Bereichen des Bandtrockners mit Hilfe von Thermoelementen über zwei 12-Kanal-Schreiber gemessen.

Für die Durchsatzbestimmungen des Grünhopfens wurde jeweils über einen Zeitraum von mindestens einer Stunde die gesamte durchgesetzte Grünhopfenmenge gewogen. Zu Beginn jeder Messung wurde im Einschüttrichter des Elevatorbandes ein bestimmter Pegelstand markiert, der auch am Ende der Messung vorhanden sein mußte. Über den gleichen Zeitraum wie der Grünhopfen war auch der Trockenhopfen am Ende des Trockners zu wiegen.

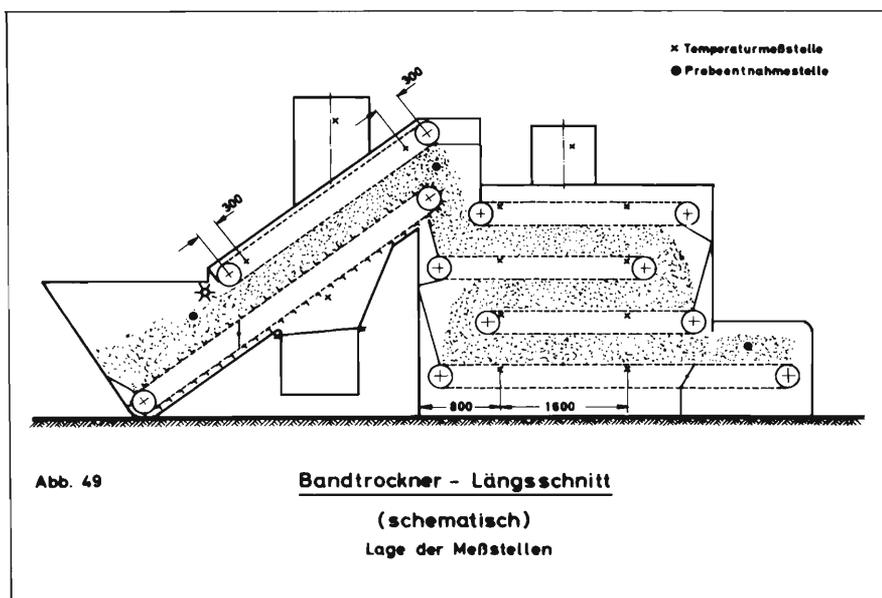
Die Feuchtegehaltsbestimmung des Grünhopfens erfolgte, ebenso wie bei den in Abschnitt 3. und 4. 2. beschriebenen Messungen nach der Trockenschrank-Waage-Methode bei einer Verweilzeit der Hopfenproben im Trockenschrank von 5 1/2 h. Zur Feuchtegehaltsbestimmung des Trockenhopfens nach EBC (1 Stunde bei 106 °C) wurden die Proben am Ende des Trockners von 5 Punkten, verteilt über der Breite des Trockenbandes, entnommen. Diese Art der Probeentnahme diente gleichzeitig zur Kontrolle der Feuchtegehaltsverteilung über der Bandbreite.

Für die Qualitätsanalysen fand die Probeentnahme sowohl beim Grünhopfen als auch beim Trockenhopfen statt, wobei darauf zu achten war, daß die Proben vom gleichen Ausgangsmaterial stammten. Um dies zu ermöglichen, wurde bei der Probeentnahme des Grünhopfens eine mitlaufende Markierung (Holzstab) auf das Elevatorband gelegt und die Trockenhopfenprobe gezogen, wenn die

Markierung das Trocknerende erreicht hatte. Ebenso wie bei den Versuchen mit der Darre (siehe auch Abschnitt 4.2. und 4.3.) wurden auch hier die Analysen des Trockenhopfens durch Probesude ergänzt.

Der Luftdurchsatz in den Bereichen der Vortrocknung und Nachtrocknung des Bandtrockners und damit in Verbindung mit der jeweiligen Heißlufttemperatur auch die auf die freie Trocknungsfläche bezogene Heißluftgeschwindigkeit wurde über Luftgeschwindigkeitsmessungen in dem Ansaugstutzen der beiden Druckgebläse bestimmt. Zur Vermeidung von Wirbelbildungen waren die Ansaugstutzen mit Gleichrichtergittern (siehe auch Abbildung 48) versehen. Die Bestimmung des Ansaugluftzustandes erfolgte über Psychrometermessungen (Assmann-Psychrometer) und Luftdruckmessungen mit Hilfe eines Quecksilber-Barometers direkt vor dem Ansaugstutzen der Druckgebläse. In die beiden Heißluftschächte eingebaute Psychrometer (siehe auch Abbildung 48) dienten lediglich zur Kontrolle des Heißluftzustandes.

Die im nachfolgenden Abschnitt angegebenen Temperaturen unter bzw. über der jeweiligen Hopfenschicht sind Mittelwerte aus jeweils 4 mit Thermoelementen versehenen Meßstellen. Die Lage der einzelnen Meßstellen geht aus den beiden nachfolgenden schematischen Darstellungen hervor.



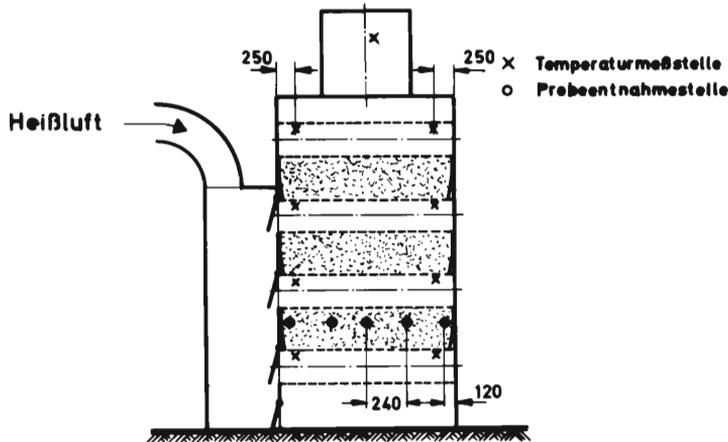


Abb. 50

Bandrockner - Querschnitt

(schematisch)

Lage der Meßstellen

5.3. Ergebnisse der Bandrockneruntersuchungen.

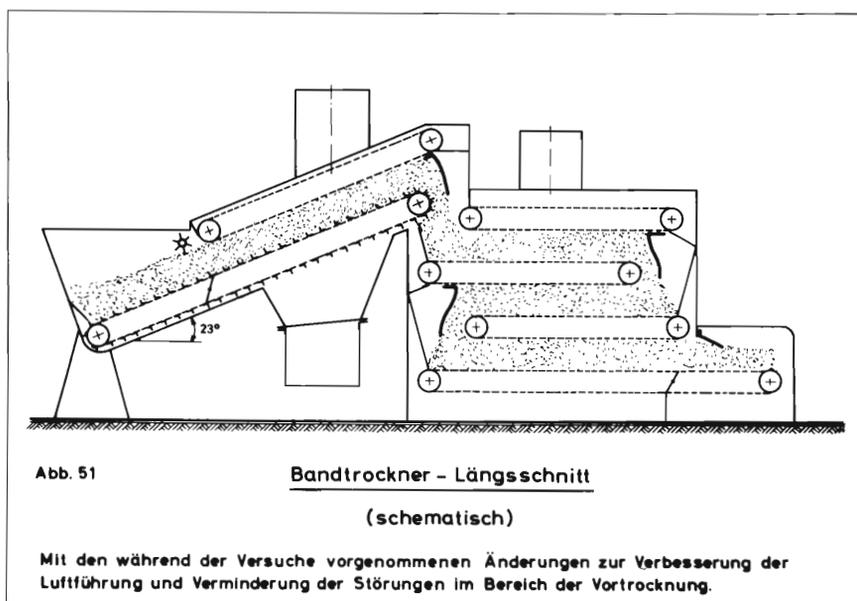
Bereits die ersten Tastversuche mit dem Bandrockner nach Abbildung 47 haben gezeigt, daß der Hopfen in der Vortrockenstufe nicht einwandfrei transportiert wird; besonders größere Schütthöhen (> 15 cm) und niedrige Bandgeschwindigkeiten führten zu starken Stauungen an beiden Seiten des Elevatorbandes. Bedingt durch diese Stauungen war auch die Verweilzeit des Hopfens in der Vortrockenstufe nicht konstant, sondern bei der gleichen Einstellung von Bandgeschwindigkeit, Luftdurchsatz und Heißlufttemperatur starken Schwankungen unterworfen. Ausserdem bewirkten die an beiden Seiten des Elevatorbandes in unregelmäßigen Abständen sich bildenden Löcher in der Hopfenschicht, daß ein Teil der zugeführten Heißluft hier ungenutzt entweichen konnte und somit die Gleichmäßigkeit der Trocknung zusätzlich noch beeinflußt wurde. Der Versuch, das Abdeckband der Vortrockenstufe tiefer zu setzen als die Abstreifwalze, um so eine stärkere Pressung des Hopfens zwischen Elevator- und Abdeckband zu erzielen, brachte keine Verminderung der Störung. Lediglich eine

Verminderung der Steigung des Elevatorbandes von ursprünglich 35° auf 23° führte zu einem gleichmäßigeren Transport des Hopfens in der Vortrockenstufe. Weiterhin zeigten die ersten Versuche, daß der gewünschte Luftdurchsatz und damit die gewünschte Heißluftgeschwindigkeit in der Vortrockenstufe nicht eingestellt werden konnte, da, abgesehen von den durch die Stauung hervorgerufenen Ungleichmäßigkeiten, ein nicht kontrollierbarer Teil der zugeführten Heißluft unterhalb des Elevatorbandes in den Bereich des Einschüttrichters strömte. Dies führte dazu, daß bereits im Einschüttrichter der Hopfen erwärmt wurde und je nach Heißlufttemperatur mehr oder minder starke Kondensationserscheinungen auftraten. Besonders bei größerer Füllmenge im Einschüttrichter war die Verweilzeit des Hopfens in dieser feuchtigkeitsgesättigten, warmen Atmosphäre zu lang, so daß sich der Hopfen schon vor dem Eintritt in die Vortrockenstufe mit steigender Heißlufttemperatur zunehmend gelblich-braun verfärbte. Die Verfärbung der Hopfendolden, die im übrigen auch bereits bei den in Abschnitt 3.1. erwähnten Versuchen beobachtet wurde, wurde geringer, wenn die Verweilzeit im Einschüttrichter durch Steigerung der Geschwindigkeit des Elevatorbandes und durch Verringerung der Schütthöhe gesenkt wurde.

Sowohl die Schwierigkeiten bei der Förderung des Hopfens in der Vortrockenstufe als auch die Unzulänglichkeiten der Luftführung in diesem Bereich führten dazu, daß die Versuche nicht in der ursprünglich geplanten Weise durchgeführt werden konnten. So mußte z. B. darauf verzichtet werden, den Hopfen in der Vortrockenstufe auf einen mittleren Feuchtegehalt von ca. 45% (Analog den in Abschnitt 3.3. beschriebenen Versuchen mit dem Versuchstrockner) herunterzutrocknen. Weiterhin konnte wegen der auftretenden Stauungen auch die Schütthöhe von 30 cm (siehe auch Abschnitt 3.3.) nicht eingehalten werden.

Für den Bereich der Nachtrocknung ergaben die ersten Versuche, daß auch hier die Luftführung nicht einwandfrei war. Besonders am Übergang vom oberen Band auf das mittlere Band konnte, wie Temperaturmessungen zeigten, ein Teil der zugeführten Heißluft ungenutzt entweichen. Bei verminderter Schütthöhe (< 30 cm) verstärkte sich dieser Luftverlust und wurde auch am Übergang vom mittleren auf das untere Trockenband sowie beim Austritt des Hopfens

aus dem Trockner beobachtet. Durch den Einbau von Schürzen aus Leinewebe an den in Abbildung 51 skizzierten Punkten konnten diese "Luftverluste" vermindert werden.



Weiterhin zeigten die ersten Versuche, daß es nicht möglich war, sämtliche Heißluft für den Bereich der Nachrocknung unterhalb der untersten Hopfenschicht zuzuführen, da dann trotz eingebauter Schürze am Ende des Trockners beim Trockenhopfen je nach eingestelltem Luftdurchsatz etwa 30-50% der zugeführten Heißluft verloren gingen. Auch eine starke Reduzierung der Schütthöhe auf weniger als 15 cm pro Band brachte keine befriedigenden Ergebnisse, so daß mit der bei Bandtrocknern üblichen Heißluftzuführung unter jedem Trockenband gearbeitet werden mußte. Durch entsprechende Einstellung der zwischen Druckkammer und Trockerraum angeordneten Schlitze wurde jedoch versucht, den größten Teil der Heißluft unter dem unteren und mittleren Band zuzuführen. Diese Art der Luftzuführung machte durch starke Wirbelbildungen eine Messung der Luftgeschwindigkeitsverteilung für die beiden unteren Hopfenschichten unmöglich.

Der Einbau der Schürzen zur Verbesserung der Luftführung wirkte sich auf den Transport des Hopfens in der Nachrockenstufe nachteilig aus. Besonders bei Schütthöhen von rd. 30 cm und hohem Anteil von Doldenblättern in der

Hopfenschüttung kam es zu Stauungen, die bei einer Verminderung der Schütthöhe auf max. 23-25 cm seltener auftraten.

Diese durch die gewählte Konstruktion des Bandrockners bedingten Unzulänglichkeiten des Hopfentransportes und der Luftführung lassen einen Vergleich der nachfolgend aufgeführten Versuchsergebnisse mit den in den Abschnitten 3.2. - 3.4. beschriebenen Versuchen nicht zu. Trotzdem erscheinen diese Ergebnisse wichtig in Bezug auf das Verhalten der einzelnen Qualitätsmerkmale des Hopfens bei den angewendeten Trocknungsbedingungen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass wegen der oben erläuterten Schwierigkeiten die Trocknungsbedingungen im Hinblick auf die Luftgeschwindigkeit und auf die Verweilzeit im Trockner nicht genau definiert werden können.

In den nachfolgenden tabellarischen Zusammenstellungen wurden nur die Versuche berücksichtigt, bei denen sämtliche Qualitätsuntersuchungen einschl. der Probesude durchgeführt wurden.

Tab. 12

Probe Nr.	Vortrockner		Nachrockner			Durchsatz		Feuchtegehalt		mittl. Schütthöhe Trockenhopf. [cm]
	mittl. Heißlufttemperatur [°C]	theor. Heißluftgeschwindigkeit [m/s]	mittl. Heißlufttemperatur [°C]	theor. Heißluftgeschwindigkeit [m/s]	mittl. Heißlufttemperatur unter oberem Band [°C]	Grünhopfen [kg/h]	Trockenhopfen [kg/h]	Grünhopfen [%]	Trockenhopfen [%]	
101/105	116,7 (111,0 + 119,0)	1,49	75,9 (75,0 + 77,5)	0,89	64,9	143,9	28,3	82,5	11,3	= 21
76/80	109,8 (108,0 + 112,0)	1,46	74,7 (71,5 + 76,5)	0,9	66,3	117,4	26,2	80,1	11,1	= 24
88/92	92,4 (91,0 + 95,0)	1,39	74,8 (72,5 + 77,0)	0,88	64,0	98,5	23,0	80,7	17,2	= 21
119/123	112,3 (109,5 + 115,5)	1,46	60,9 (59,5 + 62,0)	0,562	55,7	75,2	17,1	78,3	4,6	= 19
131/135	95,7 (93,0 + 97,5)	1,43	60,0 (59,5 + 61,0)	0,566	51,0	66,5	13,9	80,2	5,8	= 16
136	65,5 (63,5 + 68,0)	0,59	61,7 (59,5 + 62,0)	0,572	54,7	62,6	12,1	81,9	6,9	= 18

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die angewendeten Trocknungsbedingungen. In der ersten Spalte sind die Probennummern der einzelnen Versuche aufgeführt. Die 2. und 4. Spalte zeigt die während der jeweiligen Versuchszeit gemessene, mittlere Heißlufttemperatur der Vortrockenstufe bzw. der Nachtrockenstufe. Bedingt durch die thermostatische Steuerung der Lufterhitzer waren die Heißlufttemperaturen sowohl in der Vortrockenstufe als auch in der Nachtrockenstufe nicht konstant, sondern gewissen Regelschwankungen unterworfen; über die Größe der Regelschwankungen geben die in Spalte 2 und 4 mit angeführten Klammerwerte Auskunft. Spalte 3 zeigt die Heißluftgeschwindigkeit in der Vortrockenstufe, die aus dem am Ansaugstutzen des Druckgebläses gemessenen Luftdurchsatz, dem Ansaugluftzustand, der Heißlufttemperatur und der für die Vortrocknung vorhandenen Grundfläche von $2,55 \text{ m}^2$ errechnet wurde. Die durch den Strömungswiderstand der Hopfenschicht bedingte Druckerhöhung ist hierbei, ebenso wie in Abschnitt 3.3. und 4.3. nicht berücksichtigt.

Die Heißluftgeschwindigkeiten sind nur theoretische Werte, da, wie bereits erwähnt, durch den unzureichenden Transport des Hopfens und durch das Entweichen von Heißluft in den Bereich des Einschüttrichters und der Nachtrocknung unkontrollierbare Mengen für die Durchströmung der Hopfenschicht in der Vortrockenstufe verloren gingen. Die durchzusetzende Luftmenge wurde daher am Druckgebläse so eingestellt, daß für die ersten 5 Versuche der Tabelle 12 im mittleren Teil der Vortrockenstufe dicht über der Hopfenschicht eine mittels einer Stausonde gemessene Luftgeschwindigkeit von ca. 0,9 bis 1,0 m/s (entsprechend einer Heißluftgeschwindigkeit von ca. 1,0 bis 1,1 m/s) herrschte. Dabei wurden an beiden Seiten des Elevatorbandes im Bereich der Vortrocknung teilweise Meßwerte bis zu 2,2 m/s festgestellt. Für den Versuch mit der Probe Nr. 136 wurde der Luftdurchsatz so eingestellt, daß im mittleren Teil des Bandes eine Luftgeschwindigkeit von etwa 0,3 bis 0,4 m/s vorhanden war.

Die in Spalte 5 angegebene Heißluftgeschwindigkeit für das obere Band der Nachtrockenstufe ist ebenfalls aus dem Luftdurchsatz des Druckgebläses, dem Ansaugluftzustand, der in Spalte 6 aufgeführten Heißlufttemperatur unter dem oberen Band und der freien Grundfläche der oberen Schicht von $2,36 \text{ m}^2$ berechnet worden. Auch dieses sind nur theoretische Werte, da trotz der in

Abbildung 51 skizzierten Schürzen erhöhte Luftgeschwindigkeiten und auch erhöhte Temperaturen im Bereich der Umlenkrollen festgestellt wurden. Der Luftdurchsatz am Druckgebläse der Nachtrockenstufe wurde daher so eingestellt, daß im mittleren Bereich oberhalb der oberen Hopfenschicht (gemessen zwischen Ober- und Untertrum des Abdeckbandes) für die ersten 3 Versuche eine Luftgeschwindigkeit von etwa 0,7 m/s - entsprechend ca. 0,75 m/s Heißluftgeschwindigkeit für die obere Hopfenschicht - vorhanden war. Für die letzten 3 Versuche der Tabelle 12 waren die entsprechenden Werte etwa 0,4 m/s - d.h. ca. 0,5 m/s Heißluftgeschwindigkeit - für die obere Hopfenschicht. Spalte 7 und 8 zeigen den gemessenen Grün- bzw. Trockenhopfendurchsatz, während in Spalte 9 und 10 die dazugehörigen Feuchtegehalte angegeben sind. Die zu Beginn dieses Abschnittes beschriebenen Schwierigkeiten in Bezug auf die aufgetretenen Stauungen und die damit verbundene unzureichende Auslastung der Vortrockenstufe haben zur Folge, daß auch der Durchsatz entsprechend geringer war. In Spalte 11 ist zwar die mittlere Schütthöhe des Trockenhopfens (gemessen am Ende des unteren Bandes) angegeben, jedoch können keine Angaben für die Schütthöhe des Hopfens in der Vortrockenstufe gemacht werden, da diese zu stark schwankte. Das Gleiche gilt auch für den Feuchtegehalt des Hopfens am Übergang von der Vortrockenstufe zur Nachtrockenstufe. Im Mittel lagen diese Werte jedoch für die ersten 5 Versuche der Tabelle 12 bei etwa 50% mit unregelmäßigen Schwankungen zwischen 21,4 und 64,7%. Bei dem Versuch mit der Probennummer 136 lag der entsprechende Mittelwert des Feuchtegehaltes bei 66% mit einer Schwankungsbreite zwischen 64,01 und 69,28%.

Bedingt durch die beschriebenen Unregelmäßigkeiten der Luftführung und des Hopfentransportes im Trockner ist es nicht möglich, vergleichbare Angaben über den spezifischen Wärmeaufwand zur Verdunstung von 1 kg Wasser zu erhalten; auf die Wiedergabe der bei den Versuchen ermittelten Werte wird daher verzichtet.

Bei der Handbonitierung nach der Standardmethode der Wiss. Kommission des europäischen Hopfenbaubüros wurde jede Probe von 2 Bonitierern beurteilt (37), deren Ergebnisse in Tabelle 13 zusammengefasst sind.

Tab. 13

Ergebnisse der Handbonitierung

Probe Nr.	Versuchsmaterial		Vergleichsmaterial	 Versuchsmaterial Vergleichsmaterial	
	Gesamtpunkt- zahl	Teilpunkt- zahl	Gesamtpunkt- zahl	Teilpunkt- zahl	Gesamtpunkt z. Gesamtpunkt z.	Teilpunkt zahl Teilpunktzahl
101 / 105	52	24	72	43	0,72	0,56
76 / 80	54	26	75	46	0,72	0,57
88 / 92	58	30	67	39	0,87	0,77
119 / 123	56	28	70	43	0,80	0,65
131 / 135	54	27	70	45	0,77	0,60
136	70	43	70	45	1,0	0,96

Für die in der obigen Tabelle angeführten Teilpunktzahlen des Versuchs- und Vergleichsmaterials gilt die gleiche Definition wie für die in Abschnitt 3. 4. ,
Abbildung 26 a - 26 b beschriebenen Qualitätsuntersuchungen. Die beiden letzten
Spalten der Tabelle 13, in denen die aus der Gesamtpunktzahl bzw. der Teil-
punktzahl des Versuchs- und des Vergleichsmaterials gebildete Verhältniszahl
angegeben ist, lassen erkennen, daß bis auf den Versuch mit der Probennummer
136 eine teilweise erhebliche Beeinträchtigung der äusseren Qualitätsmerkmale
stattgefunden hat. Aufgrund der bereits in Abschnitt
3. 4. erwähnten unteren Grenze von 60 Punkten
für ein handelsfähiges Produkt hätte ausser
der letzten Probe keine der anderen Trockner-
einstellungen einen handelsfähigen Hopfen erge-
ben.

Die Ergebnisse der Bitterstoffanalysen (37) sind in Tabelle 14 wiedergegeben.

Tab. 14

Bitterstoffanalysen (Prozentangaben bezogen auf Trockensubstanz)

Probe Nr.	Versuchsmaterial					Vergleichsmaterial					...Versuchsmaterial ...Vergleichsmaterial		
	Bitterwert nach Wöllner [$\%$]	α -Säure [$\%$]	Gesamtharz- gehalt [$\%$]	Hartharz- gehalt [$\%$]	rel. Harz- harzanteil [$\%$]	Bitterwert nach Wöllner [$\%$]	α -Säure [$\%$]	Gesamtharz- gehalt [$\%$]	Hartharz- gehalt [$\%$]	rel. Harz- harzanteil [$\%$]	Bitterwert [$\%$]	Bitterwert [$\%$]	α -Säure [$\%$] α -Säure [$\%$]
101/ 105	6,0	5,0	18,5	4,2	22,7	5,6	4,6	16,8	3,1	18,5	1,07	1,09	1,23
76/ 80	6,2	5,2	17,7	3,1	17,5	7,1	5,9	19,5	2,8	14,4	0,87	0,88	1,22
88/ 92	6,6	5,5	18,5	3,3	17,8	7,2	6,0	19,0	1,8	9,5	0,92	0,92	1,87
119/ 123	5,7	4,7	17,4	3,7	21,3	6,6	5,5	17,9	2,8	15,6	0,86	0,85	1,37
131/ 135	5,9	4,8	17,7	3,0	16,9	6,0	5,0	17,6	3,6	20,5	0,98	0,96	0,82
136	6,2	5,0	18,1	2,0	11,1	6,0	5,0	17,6	3,6	20,5	1,03	1,00	0,54

Insbesondere die letzten 3 Spalten dieser Tabelle, in denen die Bitterwerte, die α -Säure-Gehalte und relativen Hartharzanteile des Versuchsmaterials und des Vergleichsmaterials durch das Bilden einer Verhältniszahl miteinander in Verbindung gebracht wurden, zeigen den Einfluss der beschriebenen Trocknungsbedingungen.

Die Bitterwerte des Versuchsmaterials weichen bis auf die Versuche mit den Proben Nr. 76/80 und 119/123 nur unwesentlich von denen des Vergleichsmaterials ab. Aufgrund der über-
ragenden Bedeutung des α -Säure-Gehaltes beim Bitterwert (siehe auch Erläuterung zu Abbildung 27 b im Abschnitt 3.4.) kann jedoch angenommen werden, dass auch diese Proben innerhalb der Fehlergrenzen der Analyse liegen. Gerade unter Berücksichtigung dieses, in Abschnitt 3.4. angegebenen Streubereiches, lässt der Vergleich der α -Säure-Gehalte in der vorletzten Spalte der Tabelle 14 keinen Einfluss der Trocknungsbedingungen erkennen.

Die relativen Hartharzanteile sind nur für die letzten beiden Proben der obigen Tabelle geringer als die entsprechenden Werte des Vergleichsmaterials, wobei jedoch ein relativer Hartharzanteil von 20,5% für das Vergleichsmaterial zu hoch erscheint, vor allem, wenn man bedenkt, daß dieser Hopfen nur mit 55 - 57°C (siehe auch Abschnitt 3.2.) getrocknet wurde. Der hohe Wert des relativen Hartharzverhältnisses (letzte Spalte der Tabelle 14) für den Versuch mit der Probe Nr. 88/92 ist offensichtlich auf den mit 9,5% sehr niedrigen relativen Hartharzanteil des Vergleichsmaterials zurückzuführen.

Mit den in den obigen Tabellen angegebenen Proben wurden ausserdem im Institut für Chemisch-technische-Analyse (Direktor: Prof. Dr. Drawert) Probe-sude durchgeführt. Um alle Sude unter gleichen Voraussetzungen zu brauen, wurde dafür eine helle, ungehopfte Betriebswürze einer Brauerei angewendet. In Analogie zu den üblichen Sudverfahren wurden 2/3 der Hopfengabe 90 min und 1/3 nur 30 min mitgekocht. Für die einzelnen Probesude wurden gleiche α -Säuremengen eingesetzt. Über die gesamte, aus dem α -Säure-Gehalt (nach Hartong) ermittelte Hopfengabe gibt die nachfolgende Aufstellung Aufschluss:

Probe Nr.	101/105	240 g/hl
Probe Nr.	76/80	245 g/hl
Probe Nr.	88/92	236 g/hl
Probe Nr.	119/123	240 g/hl
Probe Nr.	131/135	258 g/hl
Probe Nr.	136	202 g/hl

Das Kochen im Würzekessel und das Ansetzen der Biere für alle Proben wurde unter den gleichen Bedingungen vorgenommen. Nach 5-wöchiger Lagerzeit im Tank erfolgte die Filtration und Abfüllung auf Flaschen. Bei der Vergärung und Lagerung wurden zwischen den einzelnen Suden keine Unterschiede festgestellt.

Bei der ersten, mit 8 Kostern durchgeführten Kostprobe konnte keiner der Koster irgendwelche Unterschiede zwischen den 6 Suden feststellen. Eine weitere Kostprobe, die 2 Tage später mit 12 Kostern durchgeführt wurde, hatte folgendes Ergebnis:

Probe Nr.	1. Rang	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang	6. Rang
101/105	1	3	1	2	5	./.
76/80	8	./.	3	1	./.	./.
88/92	2	2	2	4	./.	2
119/123	2	2	4	3	1	./.
131/135	1	./.	1	./.	3	7
136	2	4	1	1	2	2

In der obigen Übersicht ist unter dem jeweiligen Rang die Anzahl der Koster angegeben, die das entsprechende Bier in diesen Rang eingestuft haben. Daraus geht hervor, daß die Spitze das Bier mit der Probe Nr. 76/80 bildet, während das Bier mit der Nr. 131/135 die letzte Stelle einnimmt. Alle anderen Biere liegen dazwischen, wobei von sämtlichen Kostern übereinstimmend festgestellt wurde, daß die Unterschiede zwischen den einzelnen Bieren sehr gering und daher nur schwer feststellbar sind.

Daraus folgt, dass trotz der eingangs erwähnten Schwierigkeiten der Trocknung des Hopfens und trotz der festgestellten Schädigung, besonders der äusseren Qualitätsmerkmale, die angewendeten Trocknungsbedingungen praktisch keine geschmacklichen Unterschiede des Bieres bewirken.

6. Kritische Betrachtung der Versuchsergebnisse.

Aus den Versuchen mit dem Versuchstrockner läßt sich eine für die verschiedenen Trocknungsbedingungen allgemein gültige Trocknungszeit nur dann ermitteln, wenn auch vom Trocknungsmaterial her alle Faktoren konstant sind; dies war aber bei den in Abschnitt 3. beschriebenen Versuchen nicht der Fall. Bedingt durch Wachstumsunterschiede und durch unterschiedliche Feuchtegehalte des Grünhopfens differierte bei der konstanten Schütthöhe von 30 cm nicht nur die Masse des für jeden Versuch eingefüllten Grünhopfens, sondern auch die in Tabelle 3, Spalte 6 mitaufgeführte Masse der Trockensubstanz. Die Differenzen bedingen offensichtlich auch unterschiedliche Trocknungszeiten für einen bestimmten Trocknungsabschnitt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 22 zu sehen, bei dem bei 2 Versuchen der Feuchtegrad des Grünhopfens zwar konstant war, die in diesem Bereich unter konstanten Trocknungsbedingungen aufgenommenen Trocknungsverlaufskurven jedoch unterhalb eines Feuchtegrades von ca. 2,25 voneinander abweichen. Ähnliche Abweichungen wurden auch bei Wiederholungen der Versuche nach Abbildung 4 - 8 festgestellt, wobei besonders bei der niedrigen Heißluftgeschwindigkeit bei 0,28 m/s die größten Differenzen auftraten. Sie betragen für die korrigierte Trocknungszeit t' bis zu max. 10% von den in Tabelle 3 angegebenen Werten. Die mit $\pm 10\%$ angegebene Toleranz der Heißluftgeschwindigkeit kann, wie aus den nachfolgenden Abbildungen hervorgeht, dafür nicht alleine verantwortlich gemacht werden.

Bereits in Abschnitt 3. 3. wurde die Einführung eines konstanten Trocknungsabschnittes und damit einer definierten Trocknungszeit t' zur Ermittlung des spezifischen Wärmeaufwandes begründet. Trotz der damit verbundenen Fehlerquellen (- auch bei tau- oder regennassem Hopfen ist der Beginn der Trocknung wegen des Aufbaues der Hopfendolden nicht als reine Verdunstung von Oberflächenwasser, sondern als eine Mischung von Verdunstungs- und Diffusionsvorgängen zu betrachten -) ist die Verwendung dieser Trocknungszeit t' zur Ermittlung der möglichen Durchsatzsteigerungen bei den üblichen Trocknerbauarten notwendig. In Abbildung 52 a ist die korrigierte Trocknungszeit t' aus Tabelle 3 über der Heißlufttemperatur aufgetragen.

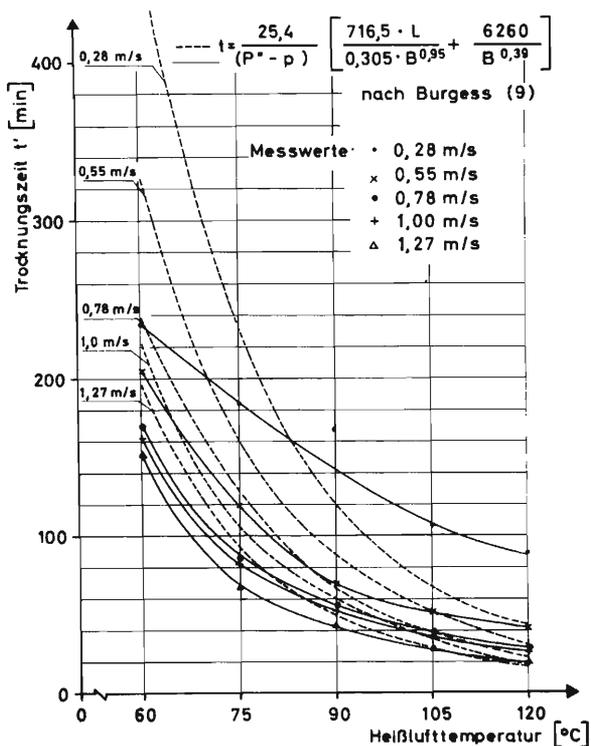


Abb. 52a Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Heißlufttemperatur

Parameter: Heißluftgeschwindigkeit
 Hopfen-Schütthöhe: 30 cm

Bis auf eine Ausnahme bei den Versuchen mit 0,28 m/s Heißluftgeschwindigkeit folgen alle Meßwerte hyperbel ähnlichen Linienzügen. Die Abweichung bei 90° C und 0,28 m/s läßt sich mit der gewählten Versuchsanordnung nicht eindeutig klären; es muß jedoch vermutet werden, daß hier trotz Versuchswiederholungen zumindest teilweise ein Meßfehler vorliegt. Weiterhin fällt auf, daß die Trocknungszeiten zwischen 0,78 m/s und 1,0 m/s keine großen Unterschiede aufweisen. Die Gründe dafür sind in der angegebenen Toleranz der Luftgeschwindigkeitsmessungen zu suchen.

In Abbildung 52 a ist ausserdem die mit Hilfe der Nährungsformel von Burgess (9) errechnete Trocknungszeit für die gegebenen Trocknungsbedingungen eingetragen. In der ebenfalls mit aufgeführten Burgess-Formel bedeuten:

- P'' (mm Hg) = Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei der jeweiligen Heißlufttemperatur
- p (mm Hg) = Partialdruck des Wasserdampfes bei einem angenommenen Außenluftzustand von $\vartheta_{LA} = 15^\circ \text{C}$ und $\varphi_{LA} = 80\%$
- L (kg/m^2) = pro Flächeneinheit zu verdunstende Wassermenge, die sich aus der in Abschnitt 3.2. erläuterten Wassermenge m_W und der Grundfläche des Trocknungsbehälters errechnet
- B = 196,85 $\cdot v$, die Heißluftgeschwindigkeit in ft/min.

Die gegenüber der ursprünglichen Burgess-Formel geänderten Zahlenwerte ergeben sich durch die Übertragung des engl. in das metrische Maßsystem. Die getrickelten Linienzüge in Abbildung 52 a zeigen, daß die Nährungsformel von Burgess für den untersuchten Bereich der Trocknungsbedingungen nicht

anwendbar ist. Das Gleiche gilt auch für die von Bailey (3) erweiterte Burgess-Formel, bei der der Geschwindigkeitsanteil B mit dem Faktor 1,5 erweitert wird.

Eine bessere Näherung wird mit der folgenden empirischen Formel erreicht:

$$t = \frac{24,8}{(P^+ - p)^{1,885 + 0,1 v}} \left(\frac{15 \cdot L}{v} + \frac{910}{v^{0,2}} \right) \text{ (min)}$$

Hierin bedeutet:

P^+ (mm Hg) = Sättigungsdruck bei adiabater Änderung des Heißluftzustandes

p (mm Hg) = Partialdruck des Wasserdampfes bei einem angenommenen Außenluftzustand von $\vartheta_{LA} = 15^\circ\text{C}$ und $\varphi_{LA} = 80\%$

L (kg/ m²) = zu verdunstende Wassermenge, die sich aus der in Abschnitt 3.2. erläuterten Wassermenge m_W und der Grundfläche des Trocknungsbehälters errechnet

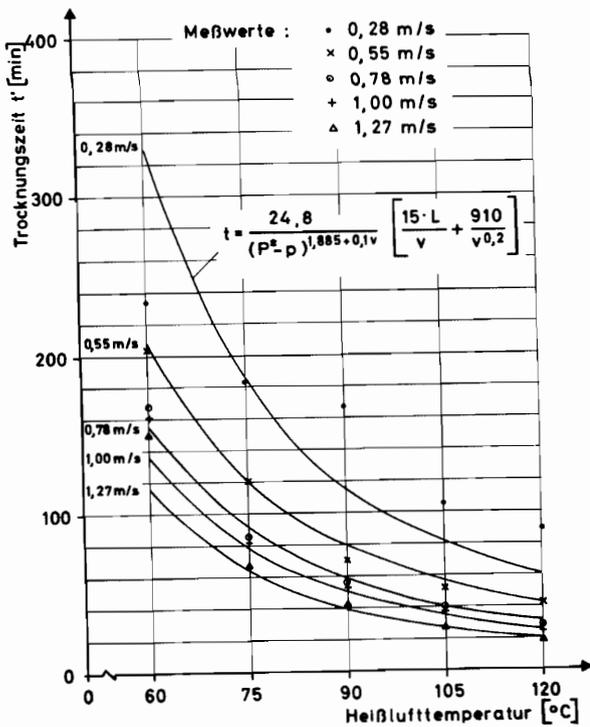


Abb: 52 b Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Heißlufttemperatur

Parameter: Heißluftgeschwindigkeit
 Hopfen- Schütthöhe: 30 cm

Die mit Hilfe dieser Formel errechnete Trocknungszeit für den Trocknungsbereich von $X = 4,0$ bis $X = 0,111$ ist in Abbildung 52 b aufgetragen.

Daraus geht hervor, daß in einem Bereich zwischen 75 und 120°C und $0,55 - 1,27$ m/s die Nahrungsformel nur eine Abweichung von rd. 10% gegenüber den Meßwerten aufweist. Bei Luftgeschwindigkeiten von $0,28$ m/s und bei Temperaturen von 60°C ist die angegebene Nahrungsformel bis auf die Werte $60^{\circ}\text{C} - 0,55$ m/s und $0,78$ m/s nicht brauchbar.

Eine weitergehende rechnerische Erfassung der Trocknungszeit erscheint wenig sinnvoll, da die gewählte Versuchsanstellung nicht die erforderlichen Kenngrößen liefert. So konnte z. B. auch der Trocknungsabschnitt der reinen Oberflächenverdunstung (nach Krischer (29): erster Trocknungsabschnitt) durch Temperaturmessungen an einzelnen Hopfendolden nicht bestimmt werden. Aufgrund des Verlaufes der Sorptionsisothermen (59) in Abbildung 53 muß jedoch vermutet werden, daß dieser erste Trocknungsabschnitt nur relativ kurz ist und bei der Trocknung des Hopfens auf einen Endfeuchtegehalt von 10% eine untergeordnete Rolle spielt.

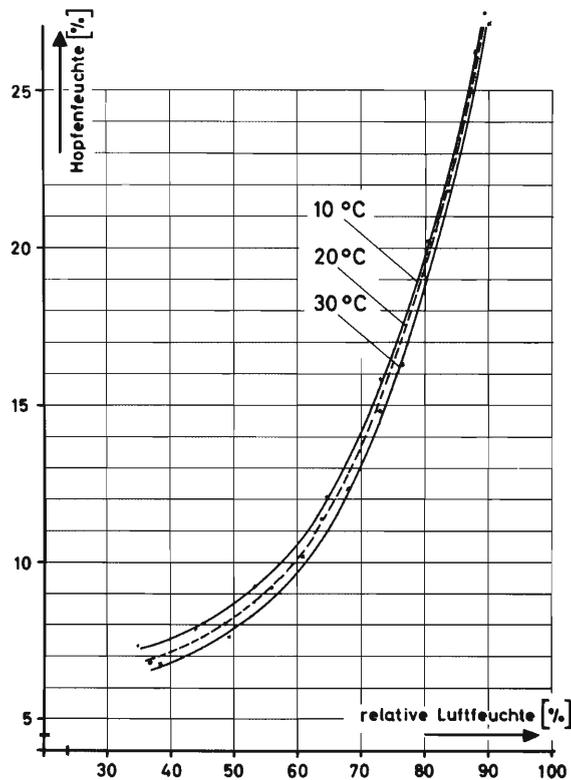


Abb. 53 Sorptionsisothermen von Hopfen
(Adsorption)

Um die für die verschiedenen Trocknungsbedingungen gefundenen Trocknungszeiten auch auf die Trocknung des Hopfens in der Darre übertragen zu können, ist die Einführung einer Durchsatzkennziffer erforderlich.

Für die Durchsatzkennziffer t^+ / t' gilt:

t^+ = korrigierte Trocknungszeit bei 60°C und 0,28 m/s Heißluftgeschwindigkeit
keit

t' = korrigierte Trocknungszeit bei anderen Trocknungsbedingungen

In Abbildung 54 ist die Durchsatzkennziffer über der Heißluftgeschwindigkeit aufgetragen.

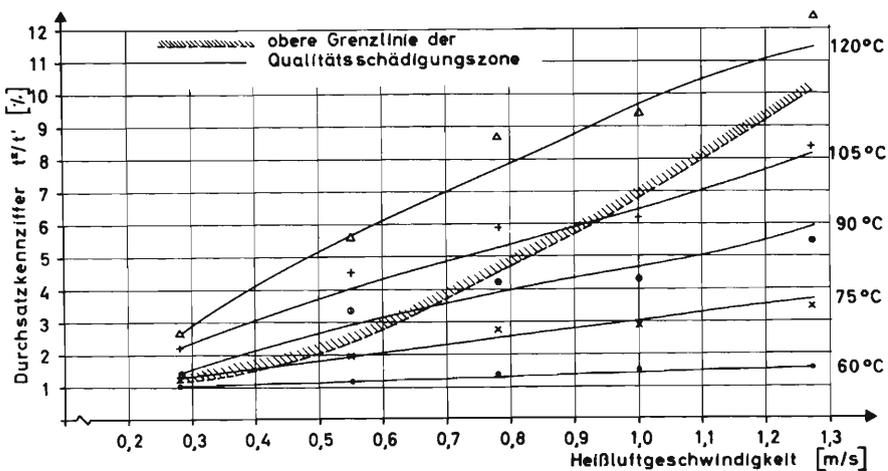


Abb. 54

Durchsatzkennziffer in Abhängigkeit von der Heißluftgeschwindigkeit

Parameter: Heißlufttemperatur; Hopfen - Schütthöhe: 30 cm

Die in dieser Abbildung markierten Punkte sind aus den in Tabelle 3 angegebenen Trocknungszeiten t' errechnet worden, während für die ausgezogenen Linienzüge die in Abbildung 52 b dargestellte Nahrungsformel in ihrem angegebenen Gültigkeitsbereich verwendet wurde. Lediglich bei der 60°C - Linie und bei der Luftgeschwindigkeit von 0,28 m/s mußten wegen der starken Abweichungen der Nahrungsformel die in Tabelle 3 angegebenen Werte von t' benutzt werden. Da die ausgezogenen Linienzüge angenähert als Geraden mit unterschiedlichem Steigungsmaß betrachtet werden können, erscheint die Abschätzung der Durchsatzkennziffer auch für Zwischenwerte der Trocknungsbedingungen durch

Interpolation möglich. Aus Abbildung 54 geht hervor, daß sich mit einer Trocknungstemperatur von z. B. 75°C und einer Heißluftgeschwindigkeit von ca. $0,575\text{ m/s}$ etwa der doppelte Durchsatz gegenüber den Trocknungsbedingungen 60°C und $0,28\text{ m/s}$ erzielen läßt. Für 120°C und $1,27\text{ m/s}$ beträgt die mögliche Durchsatzsteigerung sogar etwa das 11,5-fache. Allerdings sind der beliebigen Steigerung der Trocknungstemperatur durch die in Abschnitt 3.4. beschriebenen Schädigungen der Qualitätsmerkmale des Hopfens Grenzen gesetzt. In Abbildung 54 ist daher aufgrund der in Abschnitt 3.4. beschriebenen Qualitätsuntersuchungen in Verbindung mit den Probesuden eine Grenzlinie eingezeichnet, die die Anwendung der oberhalb dieser Linie liegenden Trocknungsbedingungen wegen der zu erwartenden starken Beeinträchtigung der Hopfenqualität ausschließt.

Auch unterhalb dieser Grenzlinie wird u. U. mit einer gewissen, wenn auch geringen Beeinträchtigung einzelner Qualitätsmerkmale des Hopfens zu rechnen sein, jedoch können darüber wegen der starken Streuung der in Abschnitt 3.4. angegebenen Werte der Qualitätsuntersuchungen keine genaueren Angaben gemacht werden. Aus den in Abschnitt 4.3. beschriebenen Ergebnissen der Darrenuntersuchungen geht jedoch hervor, daß die dort angegebenen Trocknungsbedingungen (73°C und $0,53 - 0,75\text{ m/s}$ sowie $85,5^{\circ}\text{C}$ und $0,776\text{ m/s}$) gegenüber der üblichen Hopfentrocknung mit 60°C keinen Einfluß auf den Geschmack des Bieres haben.

Bei der in den Abbildungen 14 - 18 dargestellten Trocknungsgeschwindigkeit des Hopfens ist teilweise eine erhebliche Streuung der aus den Trocknungsverlaufskurven ermittelten Meßwerte vorhanden. Da jede dieser Trocknungsgeschwindigkeitskurven eine Summenkurve darstellt, die sich aus der Trocknungsgeschwindigkeit von je nach Doldengröße 20-25 unregelmäßig übereinandergeschichteten Doldenschichten ergibt, ist eine rechnerische Erfassung nicht möglich. Ausserdem läßt sich aus der Versuchsanstellung nicht ableiten, welche Gesetzmäßigkeiten für die einzelne Doldenschicht gelten. In Verbindung mit der in Abbildung 54 eingezeichneten Grenzlinie zeigen die Abbildungen 14 - 18 jedoch, daß unterhalb einem Feuchtegrad des Hopfens von etwa $0,8$ (entsprechend ca. $44,5\%$ Feuchtegehalt) bei einer Trocknungstemperatur von 60°C die Erhöhung der Heißluftgeschwindigkeit über einen Wert von $0,28\text{ m/s}$ praktisch keine Vergrößerung der Trocknungsgeschwindigkeit und damit keine Verkürzung der Trocknungszeit bewirkt. Bei 75°C ist mit einer Erhöhung der

Luftgeschwindigkeit über einen Wert von 0,55 m/s für den Bereich der Endtrocknung unterhalb einem Feuchtegrad des Hopfens von 0,4 (28,5% Feuchtegehalt) keine Verkürzung der Trocknungszeit zu erreichen. Ähnlich liegen die Verhältnisse auch bei 90°C und 105°C, wo die Luftgeschwindigkeitssteigerung über einen Wert von 0,78 m/s bzw. 1,0 m/s für den Bereich der Endtrocknung (Feuchtegrad unter 0,4) keine Verkürzung der Trocknungszeit erwarten läßt.

Bei den in Abschnitt 4.2. und 4.3. beschriebenen Darrenuntersuchungen wurde bereits erläutert, weshalb die Trocknungsbedingungen der Versuche mit dem Versuchstrockner (Abschnitt 3) nicht eingehalten werden konnten. Mit Hilfe der in Abbildung 54 dargestellten Durchsatzkennziffer läßt sich jedoch auch für diese abweichenden Trocknungsbedingungen der erreichbare Durchsatz näherungsweise berechnen: Die bei 60°C angewendete Heißluftgeschwindigkeit betrug $\approx 0,33$ m/s - nach Abbildung 54 entspricht dies einer Durchsatzkennziffer von $\approx 1,05$ -, hiermit wurde bei der verwendeten Darre ein mittlerer Durchsatz von 59,5 kg Trockenhopfen/h erzielt. Dies entspricht bei 60°C und 0,28 m/s einem mittleren Durchsatz von ca. 56,5 kg/h. Für 72°C und 0,53 m/s ist die Durchsatzkennziffer (interpoliert nach Abbildung 54) ungefähr 1,7, entsprechend einem Durchsatz von ca. 96,5 kg/h, während der gemessene mittlere Durchsatz 103 kg/h betrug. Mit ca. 72°C und 0,75 m/s ist die Durchsatzkennziffer 2,15, das bedeutet einen erzielbaren Durchsatz von ca. 121,5 kg/h, bei einem gemessenen mittleren Durchsatz von 117 kg/h. Diese geringen Abweichungen zeigen, daß mit Hilfe der Durchsatzkennziffer eine brauchbare Berechnung bzw. Abschätzung des erreichbaren Durchsatzes möglich ist.

Aufgrund der in Abschnitt 5.3. wiedergegebenen Ergebnisse der Versuche mit gebrochener Trocknung kann festgestellt werden, daß die mit der Handbonitierung erfaßbaren Qualitätsmerkmale des Hopfens auf den Geschmack des Bieres offensichtlich keinen Einfluß haben. Ebenso zeigten die durchgeführten Probe-sude, daß die in Abschnitt 5.3. angegebenen Trocknungsbedingungen keine geschmacklichen Unterschiede des Bieres bewirken. Daher kann die Anwendung der gebrochenen Trocknung mit unterschiedlichen Trocknungsbedingungen beim Grün- und beim Trockenhopfen positiv beurteilt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß die in Abschnitt 5.3. beschriebenen technischen Probleme der Luftführung und des Hopfentransportes im Bandtrockner einwandfrei gelöst werden. Die in den Abbildungen 4 - 8 wiedergegebenen Trocknungsverlaufskurven können dann einen Anhaltswert für die erforderlichen Verweilzeiten in den verschiedenen Trocknungsbereichen geben.

7. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, die Möglichkeiten zu untersuchen, die zu einer wesentlichen Leistungssteigerung bei den gebräuchlichen Hopfentrocknungsanlagen führen. Dabei war das Verhalten der verschiedenen Qualitätsmerkmale des Hopfens zu beobachten.

1. Durch Trocknungsversuche in einem Versuchstrockner konnte der Einfluß der Heißluft-Temperatur und -Geschwindigkeit auf die Trocknungszeit in einem Temperaturbereich von 60°C bis 120°C und in einem Geschwindigkeitsbereich von $0,28\text{ m/s}$ bis $1,27\text{ m/s}$ geklärt werden.
Bei einer Temperatur von 60°C läßt sich mit der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von $0,28\text{ m/s}$ auf $1,27\text{ m/s}$ nur eine Verkürzung der Trocknungszeit um 35% erreichen, während bereits die Steigerung der Temperatur auf 75°C bei einer Luftgeschwindigkeit von $0,55\text{ m/s}$ eine Verkürzung der Trocknungszeit um rd. 49% gegenüber 60°C und $0,28\text{ m/s}$ mit sich bringt.
2. Für eine Hopfenschütthöhe von 30 cm wurde eine Nährungsformel zur Bestimmung der Trocknungszeit ermittelt und deren Gültigkeitsbereich angegeben.
3. Aufgrund der ermittelten Trocknungszeiten wurde eine Trocknungskennziffer angegeben, die eine Vorausbestimmung des erzielbaren Durchsatzes und der erforderlichen Verweilzeit in Hopfendarren bei Änderung der Trocknungsbedingungen erlaubt.
4. Das Verhalten der durchströmten Hopfenschicht wurde untersucht und der Strömungswiderstand sowie die Lockerungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Hopfens angegeben.
5. An Hand von Untersuchungen an einer Drei-Horden-Darre wurden die Ergebnisse der Versuche mit dem Versuchstrockner überprüft und die technischen Voraussetzungen für die Anwendung erhöhter Heißluft-Temperaturen und -Geschwindigkeiten erläutert.
6. Die Anwendung der "gebrochenen Trocknung", bei der im Gegensatz zu der Trocknung in der Darre der Grünhopfen höheren Temperaturen ausgesetzt wird als der Trockenhopfen, erscheint beim Bandtrockner mit einfacheren Mitteln möglich. Aufgrund von Untersuchungen an einem Drei-Bandtrockner

mit Vortrockenstufe werden die auftretenden Schwierigkeiten der Luftführung und des Hopfentransportes erläutert und Hinweise zu ihrer Beseitigung gegeben.

7. Das Verhalten der durch die Handbonitierung erfaßbaren äusseren Qualitätsmerkmale und der Qualitätsmerkmale, die durch die Bitterstoffanalyse ermittelt werden können, wird in Abhängigkeit von den beim Versuchstrockner angewendeten Trocknungsbedingungen angegeben und diskutiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß es entgegen der allgemein verbreiteten Ansicht möglich ist, Hopfen auch mit hohen Temperaturen zu trocknen, wenn gleichzeitig auch der Luftdurchsatz gesteigert wird. Weiterhin wird auf die durch die Inhomogenität des Hopfens bedingten Abweichungen und Fehlermöglichkeiten hingewiesen und eine Grenzlinie der Trocknungsbedingungen angegeben, oberhalb der wesentliche Beeinträchtigungen der Qualitätsmerkmale zu erwarten sind.
8. Mit Hilfe von Probesuden bei den Darrenuntersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß bei entsprechendem Luftdurchsatz die Steigerung der Heißlufttemperatur von 60°C auf 75° bzw. 90°C keine Unterschiede im Geschmack des Bieres hervorruft. Ebenso zeigten die Probesude bei den Bandtrockneruntersuchungen keinen negativen Einfluß auf den Geschmack des Bieres, selbst wenn in der Vortrockenstufe bei entsprechender Luftgeschwindigkeit mit der extremen Temperatur von 116°C gearbeitet und der Trockenhopfen einer Heißlufttemperatur von 75°C ausgesetzt wurde.

Literaturverzeichnis

- (1) Albrook, R. L.: Development of a continuous hop drier
Commun. Master Brew, Ass. Amer. 13. Jahrg.
1952, 10
- (2) De Baker, M. H.: Le Sechage, la Conservation et l'emploi du Houblou
en brasserie
Le Petit Journ. Brasseur 67. Jahrg. 1959 S. 825 ff.
- (3) Bailey, P. H.: Hop Drying Investigations
Journ. of Agri.Eng. Research, Vol. 3, 1958 S. 35 ff.
- (4) Bailey, P. H.,
Shea, M. W.: Drying Hops
Wye College-Department of Hop Research
Anunal Report 1963
- (5) Bolvary-Zahn: Optimierung von Bandtrocknern
Chem. - Ing. - Techn. 39. Jahrg. 1967, S. 254 ff.
- (6) Borde: Sachgemäße Pflücke, Trocknung und Nachbehand-
lung als Voraussetzung für eine gute Hopfenquali-
tät
Der Hopfenbau 1964 DDR S. 1 - 17
- (7) Braungart: Geschichtliches über den Hopfen
Wochenschrift f. Brauerei 1891
- (8) Burgess, A. H.: The use of Sulphur in hop-drying
Wye-College-Department of hop-research Anual
Report, London 1950
- (9) Burgess, A. H.: Notes on the Physies of Hop Drying
Wallerstein Laboratories Communicatious
Nr. 45 June 1951 Bd. XIV, S. 111-116
- (10) Curtin-Cosbie, A. J.: Der Einfluss der Darrtemperatur auf den Wert
des Hopfens
Zeitschrift f. d. gesamte Brauwesen, 60. Jahrg.
1937, S. 69 ff.
- (11) Day, E.: Entwicklungen in der Verarbeitung und Trocknung
der englischen Hopfen
Vortrag vor der Techn. Kom. des XVI. Kongr. des
EHB, Prag 1966
- (12) Dolzmann, H.: Einfluss der Trocknung und Nachbehandlung auf die
Qualität des Hopfens
Brauwelt 101 Jahrg. 1961, S. 1684 ff.

- (13) Dradon, J.:
Nouvelle application du point froid pour le sechage
du houblou
Le Petit Journ. Brasseur, 69. Jahrg. 1961,
S. 248 ff.
- (14) Fischer, R.:
Die Trocknung des Hopfens und deren techn.
Voraussetzungen
Hopfenrundschau, 9. Jahrg. 1958, S. 95 ff.
- (15) Fruwirth, E.:
Hopfenbau und Hopfenbehandlung
Parey Berlin 1928, 3. Aufl.
- (16) Fuchs, R.A.:
Untersuchung neuer, bisher im Braugewerbe nicht
üblicher Trocknungs- und Lagerungsmethoden
Diss. TH-München 1962
- (17) Görling, P.:
Untersuchungen zur Aufklärung des Trocknungs-
verhaltens pflanzlicher Stoffe
VDI-Forschungsheft 458 Düsseldorf 1956
- (18) Hampp H.,
Jehl:
Die Entwicklung der Hopfendarren und Versuche
zu ihrer Verbesserung
Hopfenrundschau, 2. Jahrg. 1951, S. 168 ff.
- (19) Hoed, F.:
Un Sechoir A Houblou De Laboratoire
Le Petit Journ. Brasseur 70. Jahrg. 1962, S. 263 ff.
- (20) Howard, G.A.,
Slater, C.A.:
Effect of Ripeness and Drying of Hops on the
essential Oil
Journ. Inst. Brew. 64. Jahrg. 1958, S. 234 ff.
- (21) Huber, J.:
Untersuchungen über Hopfendarren
Zeitschrift f. d. gesamte Brauwesen, 54. Jahrg.
1931, S. 110 ff.
- (22) Huber, J.:
Das Trocknen des Hopfens
Zeitschrift f. d. gesamte Brauwesen, 57. Jahrg.
1934, S. 45 ff.
- (23) Hupfauer, M.:
Untersuchungen an Bandtrocknern für Hopfen
Vortrag vor der Techn. Kom. des XVI. Congr.
des EHB, Prag 1966
- (24) Iglisch:
Vorlesungen Mathematik an der TH-Braunschweig
WS 1954 - SS 1956
- (25) Isebaert, L.:
Sortenfragen und rationelle Verwendung des Hop-
fens
Brauwelt, 103. Jahrg. 1963, S. 756 ff.

- (26) Kieninger, H.: Untersuchungen an einer neuen Hopfendarre in der Hallertau
Brauwelt, 99. Jahrg. 1959, S. 1342 ff.
- (27) Kieninger, H.: Entwicklungstendenzen in der Hopfentrocknung
Hopfenrundschau, 16. Jahrg. 1965, S. 137 ff.
- (28) Kieninger, H.: Über die techn. und technolog. Wirkungsweise einer Vortrockenst. bei diskontinuierlich arbeitenden Hopfentrocknungsanlagen und die direkte Aufbereitung des getrockneten, aber ungeschwefelten Hopfens nach dem Weinerschen Vakuum-Konditionierungsverfahren
Hopfenrundschau, 17. Jahrg. 1966, S. 345 ff.
- (29) Krischer: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik
Springer, Berlin 1963, 2. Auflage
- (30) Kröll: Trockner und Trocknungsverfahren
Springer, Berlin 1959
- (31) Linke, W.,
Rebl, A.: Der Hopfenbau
Hans Carl, Nürnberg 1950, 2. Auflage
- (32) Makovec, K.: Režim Vlhkosti Hlávek v Závislosti na ovzduší Chmelarstvi 38. Jahrg. 1965, S. 192 ff.
- (33) Maton, A.: Contribution a la Conaissance des Facteurs qui déterminent la vailleur brassicole du houblon et de la technique de séchage du houblon en particulier
Diss. Universität Lille (Frankreich) 1961
- (34) Maton, A.: Moderne Auffassungen über Bau und Ausstattung von Hopfendarren
Mitt. d. XII. Europäischen Hopfenbaukongresses Warschau 1962
- (35) Maton, A.,
Vautilborgh, L.: Die kontinuierliche Trocknung von Hopfen mit dem Bandtrockner
Mitt. d. Techn. Komm. des XV. Kongresses d. EHB, Tettngang 1965
- (36) Meier, J.: zitiert von Zattler:
Hopfentrocknung, Handbeurteilung und Bitterstoff-analyse
Hopfenrundschau, 17. Jahrg. 1966, S. 282 ff.
- (37) Meier, J.: Unveröffentlichte Mitteilungen des Institutes für Hopfenforschung, Hüll/Wolnzach

- (38) Meier, J.: **Zusammensetzung des Hopfenöles in Beziehung zur Sorte und Qualität des Hopfens und zu seinen Umwandlungsprodukten**
Brauereiwissenschaft 19. Jahrg. 1966, S. 425 ff.
- (39) Meilgaard, M.: **Probenahme und Analyse des Hopfens in der Brauerei**
Brauwelt 97. Jahrg. 1957, S. 737 ff.
- (40) Müller, J.: **Zur Praxis der Hopfentrocknung**
Hopfenrundschau 13. Jahrg. 1962, S. 30 ff.
- (41) Petricek, J.: **Poizkusno susjenje hmelja z dielektričnim visokofrekvenčnim ogrevanjem**
Hmeljar 2. Jahrg. 1961, S. 86 f.
- (42) Ramspeck, E.: **Untersuchungen Hopfentrocknung 1935/36**
Unveröffentlichter Versuchsbericht des Institutes für Landmaschinenlehre der Universität Jena
- (43) Rázga, Z.: **Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und "Hydratur" des Hopfens**
Brauwissenschaft, 16. Jahrg. 1963, S. 12 ff.
- (44) Rintelen, P.,
Steinhauser, H.: **Die Erzeugungskosten von Hopfen im Anbaugebiet Hallertau**
Bayer. Landwirtsch. Jahrbuch, 38. Jahrg. 1961
S. 553 ff.
- (45) Schmidt, E.: **Technische Thermodynamik**
5. Auflage, Springer Berlin 1953
- (46) Schuster, K.,
Kieninger, H.: **Technische und technologische Betrachtungen zur Frage der Hopfentrocknung**
Hopfenrundschau, 6. Jahrg. 1955
- (47) Segler, G.: **Vorlesungen über Verfahrenstechnik an der TH - Braunschweig, WS 1956/57**
- (48) Stöckmann: **Vorlesungen und Übungen Zerkleinerungstechnik TH-Braunschweig 1957/58**
- (49) Strach L.,
Srbek, A.: **Laboratorní pokusy se susením chmele**
Chmelarství, 32. Jahrg. 1959, S. 56 f.
- (50) Verzelle, M.,
Eugene, P.: **L'évolution des acides amers pendant la période de maturation du houblon.**
Fermentatio 12. Jahrg. 1948, Nr. 10

- (51) Wagner: **Das Trocknen des Hopfens**
Mitteilungen des Deutschen Hopfenbauvereins
1905, S. 87 f.
- (52) Wagner: **Mitteilungen des Deutschen Hopfenbauvereins**
1907, S. 106 f.
- (53) Watson, G. A.: **Report on current research into hop-drying**
Wye-College Department of Hop Research
Annual Report 1953
- (54) Watson, G. A.: **Effekt of Drying Temperature and Air-Speed**
on Hop Quality
Journ. Inst. Brew. 64. Jahrg. 1958, S. 242 ff.
- (55) Weise, R.: **Trocknungstechnische Untersuchungen an einer**
Stockwerksdarre beim Trocknen von Hopfen.
Wärme- und Kältetechnik 41. Jahrg. 1939, S. 173 f.
42. Jahrg. 1940, S. 6 ff.
- (56) Zattler: **Versuche über den Einfluss der Temperatur**
während der Trocknung des Hopfens auf seinen
Bitterstoffgehalt und Bitterwert
Hopfenrundschau 4. Jahrg. 1953, S. 275 ff.
- (57) Zeisig, H. D.: **Untersuchungen an Bandtrocknern im Hopfenbau**
1965/66
Unveröffentlichter Versuchsbericht der Bayer.
Landesanstalt für Landtechnik
- (58) Zeisig, H. D.,
Hecht, H.: **Untersuchungen von Hopfentrocknungsanlagen**
Hopfenrundschau 18. Jahrg. 1967, S. 203 ff.
- (59) Zeisig, H. D.,
Kreitmeier, J.: **Die Feuchteaufnahme des Trockenhopfens bei der**
Lagerung
Hopfenrundschau 20. Jahrg. 1969, S. 256 ff.
- (60) **Hütte, 28. Auflage, Band I und II a**
Ernst & Sohn, Berlin 1955
- (61) **Trocknungstechnische Grundbegriffe VDMA 24351**
Beuth-Vertrieb, Berlin 1963

Tab. 4

Ergebnisse der Handbonitierung nach der Standardmethode der Wissenschaftl. Kommission des Europäischen Hopfenbaubüros der Hopfentrocknungsversuche nach Tab. 3 (Abb. 4 + 8)

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Luftgeschw. (m/S)	Versuchsmaterial									Gesamtpunktzahl	Vergleichsmaterial									Gesamtpunktzahl		
			wertgebende Eigenschaften							wertmindernde Eigenschaften			wertgebende Eigenschaften							wertmindernde Eigenschaften				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
7	60	0.28	4	5	9	11	11	9	23	1	v. 3	68	3	4	9	11	10	9	25	2	+	69		
3		0.55	4	5	11	12	11	10	24	+	v. 1		76	4	5	13	12	12	12	25	+		+	83
21		0.78	4	5	8	9	11	8	24	1	a. 2		66	4	4	9	11	11	9	24	1		a.1	70
28		1.0	4	4	10	9	11	9	23	2	a. 2		66	4	4	11	10	11	11	23	1		+	73
29		1.27	4	4	11	11	11	10	24	1	+		74	4	4	11	10	11	11	23	1		+	73
10	75	0.28	4	5	9	11	11	8	17	1	v. 9	55	4	4	12	11	11	11	25	1	+	77		
4		0.55	4	5	9	12	11	10	23	+	v. 2		72	4	5	13	12	12	12	25	+		+	83
20		0.78	4	4	9	9	10	10	24	1	v. 1		68	4	5	11	11	10	12	25	1		+	77
31		1.0	4	4	9	10	10	9	23	1	v. 4		64	4	3	11	10	11	11	24	1		z.z.v.1	70
32		1.27	4	4	8	9	11	8	22	1	v. 5		60	4	3	11	10	11	11	24	1		z.z.v.1	70
14	90	0.28	4	5	5	10	11	2	4	+	v.12	29	4	4	10	11	10	11	24	1	+	73		
2		0.55	3	5	9	12	11	9	24	2	v. 3		68	4	5	13	12	12	12	25	+		+	83
19		0.78	4	3	8	11	11	9	24	1	+		69	4	5	11	11	10	12	25	1		+	77
27		1.0	4	4	6	8	11	8	22	+	v. 7		56	4	4	11	10	11	11	23	1		+	73
33		1.27	4	4	8	10	11	10	21	+	v. 3		65	4	3	11	10	11	11	24	1		z.z.v.1	70
16	105	0.28	3	5	2	11	11	1	1	+	v.15	19	4	5	11	11	10	12	25	1	+	77		
5		0.55	4	5	8	12	11	7	18	2	v. 7		56	3	4	9	11	10	9	25	2		+	69
18		0.78	4	4	9	10	12	9	22	1	v. 2		67	4	5	11	11	10	12	25	1		+	77
23		1.0	4	4	7	10	11	6	16	1	v. 8		49	4	4	9	11	11	9	24	1		a.1	70
25		1.27	4	4	6	9	11	7	21	+	v. 8		54	4	4	9	11	11	9	24	1		a.1	70
11	120	0.28	4	5	1	11	10	0	0	+	v.15	16	4	4	12	11	11	11	25	1	+	77		
6		0.55	4	5	5	12	11	1	3	+	v.12		29	3	4	9	11	10	9	25	2		+	69
13		0.78	4	4	7	12	12	6	15	1	v. 8		51	4	4	12	11	11	11	25	1		+	77
22		1.0	4	5	7	10	11	6	16	1	v.a.7		51	4	4	9	11	11	9	24	1		a.1	70
24		1.27	4	4	6	10	11	5	17	1	v. 8		48	4	4	9	11	11	9	24	1		a.1	70

Zeichenerklärung:

- 1 = Punktzahl für Pflücke
- 2 = Punktzahl für Trockenheitszustand
- 3 = Punktzahl für Farbe und Glanz
- 4 = Punktzahl für Zapfenwuchs
- 5 = Punktzahl für Gehalt an Lupulin
- 6 = Punktzahl für Beschaffenheit des Lupulins
- 7 = Punktzahl für Aroma
- 8 = Punktzahl für Befall d. pflanzl. oder tierische Schädlinge
- 9 = Punktzahl für Mängel durch fehlerhafte Behandlung
- v = verbrannt
- a = angegangen
- z = zerblättert

Ergebnisse der Bitterstoffanalysen der Hopfentrocknungsversuche nach Tab. 3 (Abb. 4 + 8)
 (Prozentangaben bezogen auf Trockensubstanz)

Probe Nr.	Temp. °C	Luftgeschw. m/s	Versuchsmaterial					Vergleichsmaterial				
			Bitterwert nach Wöllmer ./.	-Säure %	Gesamtharz- gehalt %	Hartharz- gehalt %	relativer Hartharzant. %	Bitterwert nach Wöllmer ./.	-Säure %	Gesamtharz- gehalt %	Hartharz- gehalt %	relativer Hartharzant. %
7	60	0,28	6,2	5,2	16,3	2,6	15,95	6,6	5,5	17,7	2,3	13,0
3		0,55	6,4	5,3	15,6	1,6	10,3	6,0	5,0	16,1	1,9	11,8
21		0,78	5,0	4,1	14,2	1,8	12,7	5,1	4,0	15,6	2,1	13,45
28		1,0	5,0	4,0	15,1	2,0	13,25	4,8	3,8	14,2	1,9	13,4
29		1,27	5,6	4,5	16,4	2,2	13,4	4,8	3,8	14,2	1,9	13,4
10	75	0,28	4,9	4,0	15,5	3,7	23,7	5,8	4,8	16,5	2,0	12,15
4		0,55	6,1	5,0	15,7	2,0	11,9	6,0	5,0	16,1	1,9	11,8
20		0,78	5,1	4,1	14,4	2,1	14,6	4,8	3,9	15,0	2,4	16,0
31		1,0	4,6	3,8	13,0	2,2	16,95	5,3	4,3	15,3	2,2	14,4
32		1,27	5,3	4,2	14,4	2,3	15,95	5,3	4,3	15,3	2,2	14,4
14	90	0,28	2,6	2,0	12,4	4,5	36,3	4,9	4,0	14,2	1,8	12,7
2		0,55	5,5	4,4	17,1	2,7	15,8	6,0	5,0	16,1	1,9	11,8
19		0,78	4,8	3,9	14,3	2,1	14,7	4,8	3,9	15,0	2,4	16,0
27		1,0	4,8	3,9	15,0	2,8	18,5	4,8	3,8	14,2	1,9	13,4
33		1,27	4,9	3,9	15,5	2,2	14,2	5,3	4,3	15,3	2,2	14,4
16	105	0,28	2,6	2,0	12,8	5,1	39,9	4,8	3,9	15,0	2,4	16,0
5		0,55	6,5	5,5	17,4	2,9	16,7	6,6	5,5	17,7	2,3	13,0
18		0,78	4,7	3,8	14,3	2,0	14,0	4,8	3,9	15,0	2,4	16,0
23		1,0	4,3	3,4	14,7	3,2	21,8	5,1	4,0	15,6	2,1	13,45
25		1,27	4,8	3,9	14,9	2,6	17,4	5,1	4,0	15,6	2,1	13,45
11	120	0,28	2,3	1,6	12,5	5,1	40,8	5,8	4,8	16,5	2,0	12,15
6		0,55	5,4	4,5	17,2	4,7	27,3	6,6	5,5	17,7	2,3	13,0
13		0,78	4,6	3,4	15,1	3,3	21,8	5,8	4,8	16,5	2,0	12,15
22		1,0	4,3	3,4	13,4	2,4	17,8	5,1	4,0	15,6	2,1	13,45
24		1,27	4,3	3,4	14,4	3,0	20,8	5,1	4,0	15,6	2,1	13,45

$$\text{relativer Hartharzanteil} = \frac{\text{Hartharzgehalt}}{\text{Gesamtharzgehalt}} \times 100$$

Tab. 6

**Gesamtölgehalte aus den Hopfentrocknungsversuchen
nach Tab. 3 (Abb. 4 + 8)
(Prozentangaben bezogen auf Trockensubstanz)**

Probe Nr.	Temp. °C	Luftgeschw. m/S	Versuchsmaterial Gesamtölgehalt %	Vergleichsmaterial Gesamtölgehalt %
10	75	0,28	0,51	0,80
4		0,55	1,22	1,20
20		0,78	0,67	0,73
31		1,0	0,67	0,61
32		1,27	0,60	0,61
14	90	0,28	0,38	0,61
2		0,55	0,88	1,20
19		0,78	0,68	0,73
27		1,0	0,56	0,69
33		1,27	0,49	0,47
16	105	0,28	0,21	0,73
5		0,55	0,97	0,89
18		0,78	0,55	0,73
23		1,0	0,42	0,59
25		1,27	0,61	0,59
11	120	0,28	0,14	0,80
6		0,55	0,69	0,89
13		0,78	0,65	0,80
22		1,0	0,49	0,59
24		1,27	0,50	0,59

Tabelle 7

Ergebnisse der Handbonitierung nach der Standardmethode der Wissenschaftl. Kommission des Europäischen Hopfenbaubüros der Hopfentrocknungsversuche nach Abb. 21 + 24 (gebrochene Trocknung)

Vers. Nr.	Temp. °C	Luftgeschw m/S	Versuchsmaterial										Gesamt- punktzahl	Vergleichsmaterial							Gesamtpunktzahl	
			wertgebende Eigenschaften							wertmindernde Eigenschaften		wertgebende Eigenschaften							wertmindernde Eigenschaften			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	1		2	3	4	5	6	7	8		9
39	60/75	0,78/0,33	4	4	11	10	11	10	23	1	+	72	4	4	11	10	11	12	24	2	+	74
41	60/90	0,78/0,33	4	4	10	10	10	9	22	2	+	67	4	4	11	11	11	11	25	1	+	76
42	60/105	0,78/0,33	4	5	9	10	11	9	23	1	v.2	68	4	4	11	11	11	11	25	1	+	76
46	60/75	1,27/0,33	4	5	10	11	11	10	25	2	-+	74	4	4	11	11	12	10	25	2	z.1	74
47	60/90	1,27/0,33	4	4	9	11	12	10	23	+	+	73	4	4	11	11	12	10	25	2	z.1	74
43	60/105	1,27/0,33	4	5	8	11	11	9	20	1	v.5	62	4	4	11	11	11	11	25	1	+	76
36	90/60	0,78/0,33	4	5	9	11	10	10	25	1	v.2	71	4	4	11	10	11	12	24	2	+	74
37	90/60	1,27/0,33	4	5	10	10	11	10	25	1	v.1	73	4	4	11	10	11	12	24	2	+	74
44	90/60	2,0/0,33	4	4	9	11	11	10	24	1	v.1	71	4	4	11	11	11	11	25	1	+	76
35	105/60	0,78/0,33	4	4	8	10	11	8	19	1	v.5	58	4	3	11	10	11	11	24	1	z.2,v.1	70
38	105/60	1,27/0,33	5	4	9	10	11	10	24	+	v.2	71	4	4	11	10	11	12	24	2	+	74

Zeichenerklärung:

- 1 = Punktzahl für Pflücke
- 2 = Punktzahl für Trockenheitszustand
- 3 = Punktzahl für Farbe und Glanz
- 4 = Punktzahl für Zapfenwuchs
- 5 = Punktzahl für Gehalt an Lupulin
- 6 = Punktzahl für Beschaffenheit des Lupulins
- 7 = Punktzahl für Aroma
- 8 = Punktzahl für Befall durch pflanzl. oder tierische Schädlinge
- 9 = Punktzahl für Mängel durch fehlerhafte Behandlung
- v = verbrannt
- a = angegangen
- z = zerblättert

Tabelle 8

Ergebnisse der Bitterstoffanalysen der Hopfentrocknungsversuche nach Abb. 21 + 24 (gebrochene Trocknung)
(Prozentangaben bezogen auf Trockensubstanz)

Vers. Nr.	Temp. °C	Luftgeschw. m/S	V e r s u c h s m a t e r i a l					V e r g l e i c h s m a t e r i a l				
			Bitterwert nach Wöllmer ./.	α -Säure %	Gesamtharz- gehalt %	Hartharz- gehalt %	relativer Hartharz- anteil %	Bitterwert nach Wöllmer ./.	α -Säure %	Gesamt- harzgehalt %	Hartharz- gehalt %	relativer Hartharz- anteil %
39	60/75	0,78/0,33	5 4	4 7	14 7	3,3	22,5	5,2	4,3	14,7	2,2	14,95
41	60/90	0,78/0,33	5 5	4 5	15 6	2,4	15,4	4,9	3,9	15,0	2,1	14,0
42	60/105	0,78/0,33	5 4	4 5	15 4	2,7	17,55	4 9	3 9	15,0	2,1	14,0
46	60/75	1,27/0,33	5 9	4 9	16,4	2,7	16,45	5,4	4,3	16,4	2,6	15,85
47	60/90	1 27/0,33	5 5	4,5	17,1	3,5	20,5	5 4	4,3	16,4	2,6	15,85
43	60/105	1 27/0,33	5 4	4 4	15 8	2,5	15,8	4,9	3,9	15,0	2,1	14,0
36	90/60	0,78/0,33	5 6	4,6	15 6	2,3	14,75	5,2	4,3	14,7	2,2	14,95
37	90/60	1 27/0,33	5,1	4,1	14 9	2,2	14,75	5,2	4,3	14,7	2,2	14,95
44	90/60	2,0/0,33	5 4	4 4	15,8	2,5	15,8	4,9	3,9	15,0	2,1	14,0
35	105/60	0,78/0,33	4,4	3 5	14,1	2,3	17,0	5,3	4 3	15,3	2,2	14,4
38	105/60	1 27/0,33	5 3	4 4	14 9	2,3	15,4	5 2	4,3	14,7	2,2	14,95

relativer Hartharzanteil = Hartharzgehalt/Gesamtharzgehalt x 100