

# Verderb durch Schimmel als Grenzbedingung für die Regelung von Halmgut-Satztrochnungsanlagen

Von Manfred Eimer, Dieter Hartmann und Heino Prigge, Göttingen\*)

DK 639.085.7:664.8.047:633.004.12

Die Konservierung qualitativ hochwertigen Halmfutters erfolgt vielfach durch Trocknen in Satztrochnungsanlagen. Die gestiegenen Energiepreise erfordern, die Futterstapel überwiegend mit Außenluft zu belüften. Das führt gegenüber der Trocknung mit erwärmter Luft zu einer zeitlichen Ausdehnung der Trocknung. Höhere Verluste und sogar Verderb können die Folge sein.

Um derartige Verluste zu vermeiden, ist es erforderlich, die Lagerzeiten bis zum Auftreten von Verderb zu kennen. Diese verderbfreien Lagerzeiten, ermittelt am ersten, sichtbaren Schimmel, werden für unterschiedliche Luftzustände an frischem und angewelktem Halmfutter in Versuchen bestimmt. Eine empirische Gleichung zur Abschätzung verderbfreier Zeiten wird aufgestellt und ihre Anwendung bei der Regelung von Trochnungsanlagen beschrieben.

## 1. Einleitung

In den Graslandgebieten muß bei der Feldtrochnung von Halmfutter infolge unbeständiger Witterung mit hohen Nährstoffverlusten gerechnet werden, Bild 1. Eine gesicherte örtliche Wettervorhersage ist beim derzeitigen Stand erst für eine Dauer von ein bis zwei Tagen möglich. Beim Vorwelken während einer günstigen Wetterperiode sind gegenüber mittleren Bedingungen etwa die Hälfte der sonst auftretenden Verluste zu vermeiden und gleichzeitig deutlich niedrigere Halmgutfeuchten zu erzielen. Jedoch kann in zwei Tagen auch unter besten Trochnungsbedingungen auf dem Felde nicht die für lagerfähiges Heu geforderte Feuchte erreicht werden; es bedarf einer Nachtrochnung in Satztrochnungsanlagen. Dazu steht nicht immer Außenluft mit einem ausreichenden Sättigungsdefizit zur Verfügung. Ungünstige Witterung erfordert das Aussetzen der Belüftung, um das Eintragen von Feuchte in den Futterstapel zu unterbinden. Die zeitliche Ausdehnung des Trochnungsprozesses führt zu höheren Nährstoffverlusten und kann sogar den Verderb eines Teils des Ernteguts zur Folge haben.

Mit Anwärmung der Trochnungsluft schließt man das Wetterrisiko aus. Allerdings ist es dann leicht möglich, daß sich das Verfahren bei steigenden Energiekosten als unwirtschaftlich erweist. Für die Führung eines Konservierungsprozesses, bei dem das Erntegut auch der Einwirkung feuchter Luft ausgesetzt ist, müssen daher sowohl die Grenzen beginnenden Verderbs als auch die Verlust-

Diese Arbeiten wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurde. Für die Bereitstellung der Mittel sei an dieser Stelle gedankt.

Ergänzte Fassung eines anlässlich der "Internationalen Tagung Landtechnik" in Nürnberg am 26.10.1978 gehaltenen Vortrages.

\*) *Apl. Prof. Dr. sc. agr. Dipl.-Ing. M. Eimer ist akademischer Oberrat am Landmaschinen-Institut (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Universität Göttingen. Dr. sc. agr. D. Hartmann, Brockensen, war und Dr. sc. agr. H. Prigge ist wissenschaftlicher Angestellter an diesem Institut.*

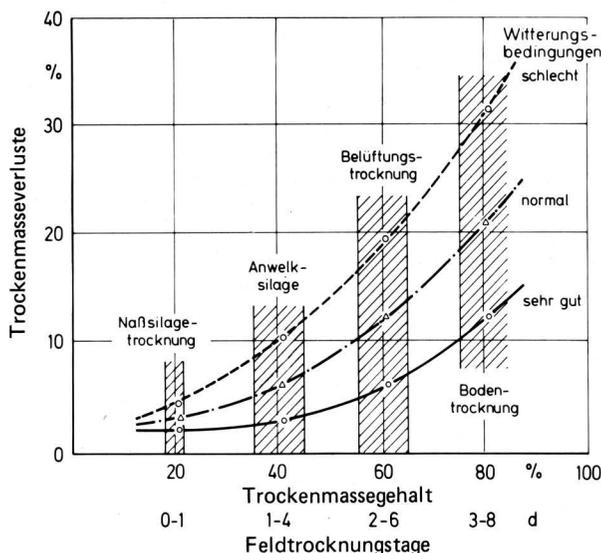


Bild 1. Feldverluste von Wiesengras bei verschiedenen Konservierungsverfahren und unterschiedlicher Witterung [1].

anteile an Nährstoffen bekannt sein, um ein Grundfutter mit gesichert hohem Nährwert trochnen zu können. Dabei kommt besonders dem Energieeinsatz für Belüften und für eventuell notwendig werdende Luftanwärmung vor allen anderen Halmgut-Konservierungsverfahren eine große Bedeutung zu [1, 2].

## 2. Ursachen der Verluste und des Verderbs in Trochnungsanlagen

Die Unterdachtrochnung von Halmfutter erfolgt in der Regel in Satztrochnungsanlagen, bei denen ein Erntegutstapel mit Außen- oder angewärmter Luft üblicherweise von unten nach oben belüftet wird. In dieser Richtung wandert auch die Trochnungszone. Bevor sie aus dem Stapel heraustritt, sind die über ihr liegenden Schichten der Einwirkung mit Feuchtigkeit nahezu gesättigter Luft ausgesetzt. Es kann hier sogar zur Rekondensation von Wasser aus der Luft kommen, wenn angewärmte Luft zur Trochnung verwandt wird und sich im Stapel abkühlt. In den oberen Schichten können daher hohe Nährstoffverluste auftreten, und es besteht die Gefahr des Verderbs.

In der landwirtschaftlichen Praxis wird der Beginn von Verderb am Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels ermittelt [3, 4]. Für hohe relative Feuchten der Luft von 90 und 95 % liegen bereits Kurven der Schimmelgrenze in Abhängigkeit von Lagertemperatur und Lagerzeit für angewelktes Wiesengras vor, Bild 2. Mikroorganismen — neben Schimmelpilzen auch Bakterien und Hefen — sowie die pflanzeigene Atmung und Enzyme tragen zu den Verlusten bei. Von den Pflanzeninhaltsstoffen werden vorzugsweise die Kohlenhydrate abgebaut und unter Wärmeabgabe zu Kohlendioxid und Wasser zersetzt, welches ebenfalls durch Trochnen abzuführen ist.

Das Wachstum der Mikroorganismen ist grundsätzlich auf das Vorhandensein von Wasser angewiesen [4, 5]; es erstreckt sich ausschließlich auf den Bereich hoher relativer Feuchten, Bild 3. Hinsichtlich der Temperaturen liegt nicht ein so stark eingegrenzter

Bereich vor, Bild 4. Die Ansprüche an die Zusammensetzung und Konzentration der Nährstoffe sind durch Halmfutter voll erfüllt. Auch bezüglich des Milieus – leicht alkalisch bis sauer – und des Salzgehalts – 0,1–10 % – bestehen keine Einschränkungen durch den Nährboden Halmgut [5]. Danach ist zu schließen, daß sich vor allem hohe relative Feuchten und auch erhöhte Temperaturen förderlich auf das Wachstum von Mikroorganismen auswirken.

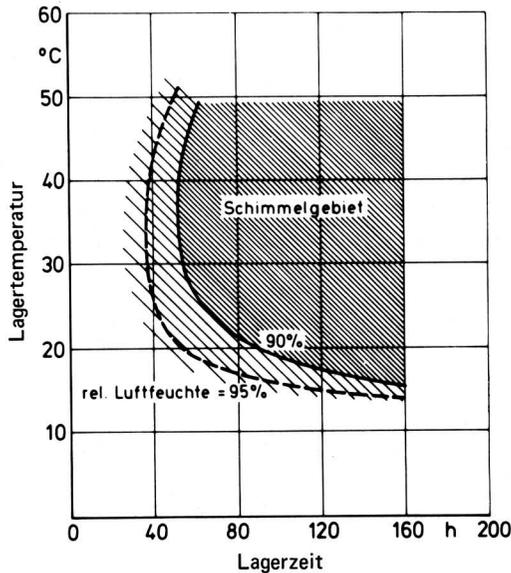


Bild 2. Schimmelgrenze für angewelktes Wiesengras in feuchter Atmosphäre [3, 4].

	Relative Luftfeuchte			
	< 70%	70 - 80%	80 - 90%	> 90%
Arten	xerophil (osmophil)		mesophil	hygrophil
Lebensbereiche	← 60%		← 70%	← 90%
	← Hefen		← Schimmelpilze	← Bakterien → 100%
			≈ 85%	

Bild 3. Feuchteansprüche von Mikroorganismen an ihre Umgebung [4].

	Temperatur			
	< 20°C	20 - 40°C	40 - 60°C	> 60°C
Arten	psychrophil	mesophil (thermotolerant)		thermophil
Lebensbereiche				→ 70°C
				→ 60°C
				→ 60°C
				→ 60°C

Bild 4. Temperaturansprüche von Mikroorganismen an ihre Umgebung (nach Angaben von Schlegel [5]).

Pflanzenbestände werden in der Regel vorwiegend während Niederschlägen durch Spritzwirkung mit Mikroorganismen von der Bodenoberfläche infiziert [6]. Für den Infektionserfolg ist die Dauer von Perioden mit günstigen Temperatur-Feuchte-Bedingungen entscheidend; geringer ist der Einfluß von Niederschlagsintensität und Windgeschwindigkeit [7]. Während Erreger von Pflanzenkrankheiten unter bestimmten Voraussetzungen in die Pflanze einzudringen vermögen, darf man davon ausgehen, daß Mikroorganismen, die während der Konservierung zur Erhöhung von Nährstoffverlusten beitragen und den Verderb beschleunigen, dies in der Regel nicht vermögen. Mit fortschreitender Vegetationsdauer muß daher mit wachsendem Infektionsgrad der Pflanze gerechnet werden, verstärkt noch durch feuchtwarme Witterung.

Nach dem dargelegten Stand des Wissens kann mit Beginn von Verderb – ermittelt am Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels – schon ab einer relativen Luftfeuchte von etwa 70 % gerechnet werden (Bild 3). In den meisten Fällen aber dürfte bei der Trocknung des Ernteguts durch Verderb infolge hoher Feuchten und gleichzeitig erhöhter Temperaturen die zeitliche Dauer des Prozesses begrenzen (Bild 2). Der Temperaturbereich in der Erntesaison für Halmgut ist mit etwa 10 °C als niedrigster Wert für die Nachtstunden und mit 35 °C für eine vertretbare Ablufttemperatur während des Tages anzusetzen.

### 3. Versuchsanstellung und -material

Zur Ermittlung der Zeiten für das Auftreten von Schimmel und der Trockenmasse-Verluste dienten Halmgutproben auf Ständern in luftdicht verschlossenen Behältern. Die Einstellung unterschiedlicher relativer Luftfeuchten in diesen Behältern erfolgte durch Wasser oder gesättigte Salzlösungen mit einem Salzüberschuß, der die während der Lagerzeit aus dem Versuchsmaterial austretende Feuchte absorbieren kann. Für die Lösungen wurden Salze ( $K_2SO_4$ ,  $KNO_3$ ,  $KCl$ ,  $NH_4Cl$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $NaCl$  und  $NaNO_3$ ) ausgewählt, die keine merklichen Auswirkungen auf das Versuchsgut und dessen Mikroorganismenflora zu haben versprochen. Je nach Art der Salzlösung und der Temperatur stellt sich im Behälter eine bestimmte, relative Luftfeuchte ein [8 bis 12]. Diese Versuchsmethode ist bei der Bestimmung von Sorptionsisothermen für Lebensmittel [z.B. 13, 14] und landwirtschaftliche Produkte [z.B. 12, 15] gebräuchlich.

Das Auftreten von Schimmel und Trockenmasseverlusten wurde an Halmgutproben von 1–2 g Trockenmasse ermittelt, die in Glasbehältern mit einem Inhalt von 3 l auf Ständern mit Kunststoffnetz etwa 4 cm über der Flüssigkeitsoberfläche lagerten. Das Flüssigkeitsvolumen betrug dabei etwa 500 cm<sup>3</sup>. Bei Frischgut ergab sich die Notwendigkeit, eine geringere Masse einzulagern, um eine Wasserkondensation an den Glaswänden während des Trocknens der Probe auszuschließen. Ein lockeres, wendelförmiges Einschichten des Versuchsgutes gewährleistete die Beobachtung nahezu der gesamten Oberflächen.

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Temperaturen zwischen 10 und 35 °C, entsprechend den Temperaturen der mit Außenluft und angewärmter Luft betriebenen Trocknungsanlagen sowie auf den für Trockenmasse-Veratmung und Umsetzungen durch Mikroorganismen maßgeblichen Bereich relativer Feuchte von 70 bis 100 %. Während der Versuche wurden die Zeiten bis zum Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels und dreier weiterer Schimmelbefallsstufen bis zu etwa 30 % der Probenoberfläche protokolliert sowie die Trockenmasse-Verluste und Halmgutfeuchten zu festgelegten Zeitintervallen bestimmt. Zur Aufrechterhaltung gleichbleibender Bedingungen für eine uneinträchtigte Schimmelentwicklung war es bei dem begrenzten Volumen der Probenbehälter erforderlich, bei fortschreitendem Befall für die Abfuhr des gebildeten Kohlendioxids zu sorgen.

Als Versuchsgut dienten Gräser, Rotklee und Luzerne, die in verschiedenen Vegetationsstadien vom Schossen (Knospe) bis Beginn der Blüte oder in vergleichbaren Zuständen zu einem späteren Zeitpunkt geschnitten wurden. Ausgangsmaterial für die Versuche

war sowohl frisches und angewelktes Erntegut als auch Heu. Besondere Versuche mit wechselnden Luftzuständen in unterschiedlichen Zeitintervallen sollten gegenüber den mit konstanten Bedingungen durchgeführten darüber Aufschluß geben, unter welchen Voraussetzungen bei der Abschätzung der auftretenden Verluste und der Zeiten bis zum Beginn von Verderb eine Zusammenfassung von unterschiedlichen Teilabschnitten der Trocknung als zulässig angesehen werden kann.

#### 4. Versuchsauswertung

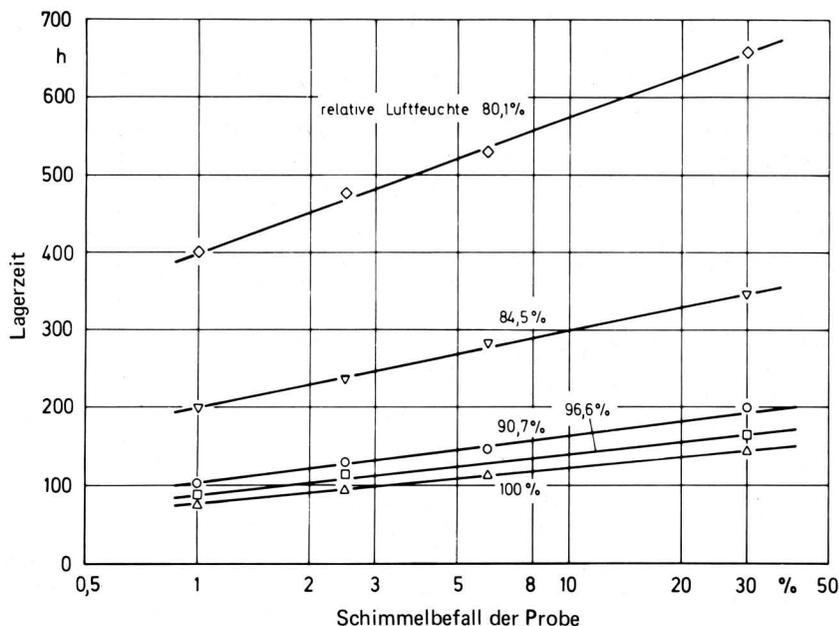
Die Versuchsergebnisse für eine Gruppe von Grasproben zeigt in halblogarithmischer Darstellung **Bild 5**, in dem die Lagerzeiten bei einer Temperatur von 30 °C über den unterschiedlichen Schimmelbefallsstufen – in diesem Beispiel von 1 % bis 30 % – aufgetragen sind. Es ergibt sich der erwartete exponentielle Zusammenhang zwischen Lagerzeit und Intensität des Schimmelbefalls im untersuchten Bereich. Diese Erfassung des Schimmelwachstums machte es möglich, die manchmal nicht eindeutig abgrenzbaren und auch von Zufälligkeiten abhängigen ersten beiden Stadien des Schimmelbefalls graphisch zu überprüfen und erlaubte es, den Versuchsaufwand zugunsten weiterer Varianten von ursprünglich drei Versuchswiederholungen auf nur eine Probe zu reduzieren.

Aus der Darstellung ist weiter ersichtlich, daß bei konstantem Luftzustand nach einem späten Schimmelbeginn (obere Kurven) auch nur mit weiterem langsamen Schimmelwachstum zu rechnen ist, was sich in dieser Art der Darstellung in einem starken Anstieg der Geraden ausdrückt.

Die relative Luftfeuchte über gesättigten Salzlösungen in geschlossenen Gefäßen unterliegt je nach dem verwendeten Salz einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Temperaturabhängigkeit; sie nimmt in der Regel mit steigenden Temperaturen infolge wachsender Salzlöslichkeit ab. Im Bereich zwischen 12 und 35 °C wird diese Abhängigkeit am Beispiel der gesättigten KNO<sub>3</sub>-Lösung (eingekreiste Punkte in **Bild 6**) deutlich; die relative Luftfeuchte sinkt hier von 96 % auf 89 % ab. Das Auftragen der Versuchswerte über der relativen Feuchte ermöglicht das Abgreifen von Kurvenwerten diskreter Parameterkombinationen für endgültige Darstellungen.

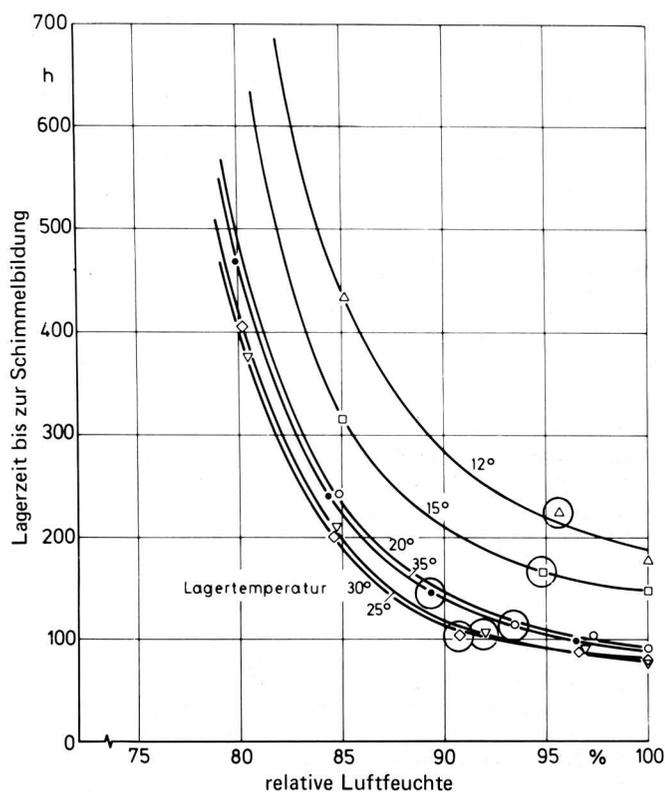
#### 5. Zeiten verderbfreier Lagerung

Die Führung von Trocknungsprozessen sollte generell den Ausschluß von Verderb gewährleisten. Der Beginn von Verderb, ermittelt am Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels, setzt damit der zeitlichen Ausdehnung des Trocknungsvorganges eine Grenze, die bei der Auslegung einer Regelung eine maßgebliche Größe darstellt. Die Bildung des ersten Schimmels erfolgt fast ausnahmslos an Schnitt-, Knick- oder Quetschstellen des Halmguts. Es sind dies die Stellen, an denen Mikroorganismen von der Oberfläche aus am leichtesten in die Pflanze eindringen können, ohne daß sie dann bereits ganz abgestorben sein muß. Unter normalen Voraussetzungen – üblicher Witterungsverlauf während der Vegetation und bei der Ernte des Versuchsguts bis zum Stadium der vollen Blüte – treten bei Feuchtlagerung je nach Temperatur und Luftfeuchte bestimmte Schimmelpilze zuerst auf, die sich in ihrer Ausbildung und Färbung deutlich von denen unterscheiden, welche unter veränderten Bedingungen wachsen oder zu einem späteren Zeitpunkt auftreten würden.



**Bild 5.** Abhängigkeit des Schimmelwachstums bei Gras von Lagerzeit und relativer Luftfeuchte.

Erntegut	Knaulgras ( <i>Dactylis glomerata</i> )
Schnittzeit	Sept. 1976
Einlagerungsfeuchte	81 %
Lagertemperatur	30 °C



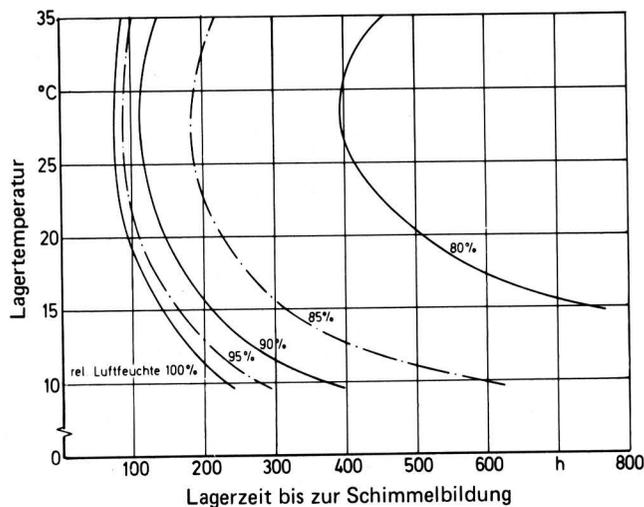
**Bild 6.** Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei Gras in Abhängigkeit von Lagerzeit, relativer Luftfeuchte und Temperatur.

Erntegut	Knaulgras ( <i>Dactylis glomerata</i> )
Schnittzeit	Sept. 1976
Einlagerungsfeuchte	81 %

## 5.1 Verderbfreie Lagerzeiten von Frischgut

In Bild 7 sind die Lagerzeiten bis zum Auftreten der ersten sichtbaren Schimmelstelle, deren Anteil an der Oberfläche des Halmguts dabei unter  $10^{-4}$  beträgt, für verschiedene Temperaturen und relative Luftfeuchten von frisch geerntetem Gras aufgetragen. Frischgut mit Einlagerungsfeuchten von etwa 80 % kann nach den Untersuchungsergebnissen bis zu 80 h bei der für das Wachstum mesophiler Schimmelpilze optimalen Temperatur um 25 °C in wassergesättigter Luft gelagert werden. Höhere Temperaturen erlauben nach den Versuchswerten etwas längere Lagerzeiten. Auf diesen Bereich wirkt sich der Witterungsverlauf vor der Ernte aus, worauf später noch eingegangen wird. Es treten hier auch solche Schimmelpilze auf, deren erstes Erscheinen durch eine optische Kontrolle vom menschlichen Auge nicht leicht erkannt werden kann. Daher sollte für die Trocknung von etwas kürzeren schimmelfreien Zeiten ausgegangen werden, als die Ergebnisse ausweisen. Temperaturen unter 25 °C führen in wachsendem Maße zu längeren verderbfreien Lagerzeiten. Mit abnehmender Luftfeuchte ist ein deutliches Anwachsen der verderbfreien Zeiten zu verzeichnen; der optimale Temperaturbereich für das Schimmelwachstum verlagert sich zu höheren Temperaturwerten.

Untersuchungen an anderen Gräsern, wie Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*), Wiesenlieschgras (*Phleum pratense*) und Wiesenschwingel (*Festuca pratensis*), führten zu wenig abweichenden Ergebnissen; so ist begründet zu vermuten, daß bei allen Gräsern mit gleichen schimmelfreien Zeiten zu rechnen ist.

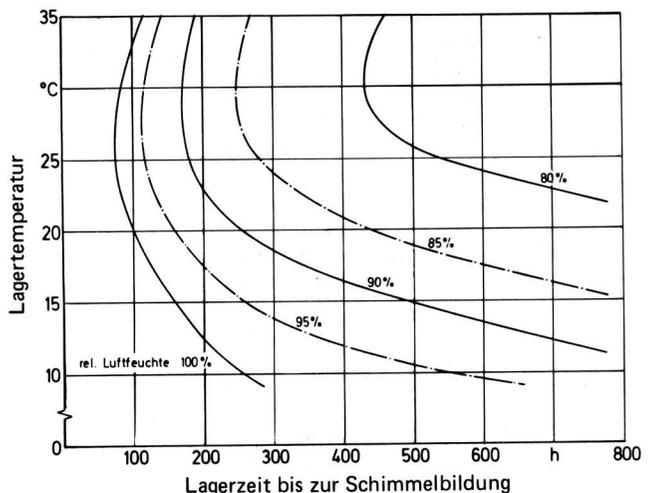


**Bild 7.** Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei Gras in Abhängigkeit von Temperatur, Lagerzeit und relativer Luftfeuchte.

Erntegut	Knaulgras ( <i>Dactylis glomerata</i> )
Schnittzeit	Sept. 1976
Einlagerungsfeuchte	81 %

Das Lagerungsverhalten von Luzerne bis zum Auftreten von Verderb in wassergesättigter Luft, Bild 8, gleicht dem von Gras (Bild 7) trotz deutlicher Unterschiede in der Nährstoffzusammensetzung. Danach ist davon auszugehen, daß in wassergesättigter Luft auch für alle anderen Futterpflanzen gleiche Zeiten angenommen werden können. Bei niedrigen Feuchten hingegen weist Luzerne noch längere schimmelfreie Lagerzeiten als Gras auf.

Die Kurven für verderbfreie Zeiten von Frischgut lassen eine Wechselbeziehung zwischen Lagerzeit und Temperatur im Bereich bis zu 25 °C (30 °C) vermuten; sie weisen einen hyperbelähnlichen Verlauf mit Asymptoten parallel zu den Diagrammachsen auf.



**Bild 8.** Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei Luzerne in Abhängigkeit von Temperatur, Lagerzeit und relativer Luftfeuchte.

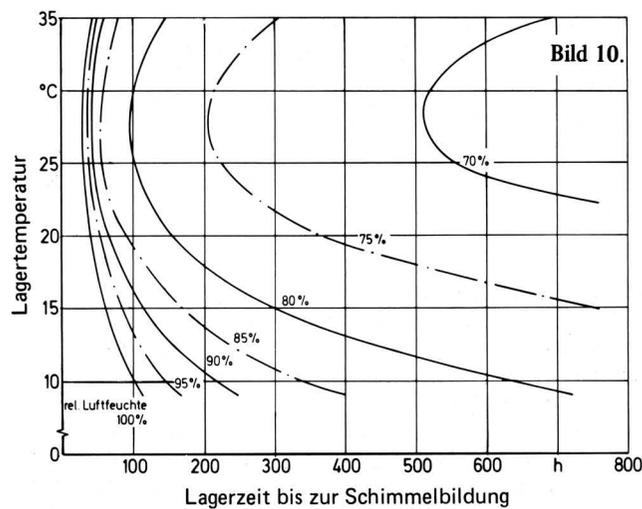
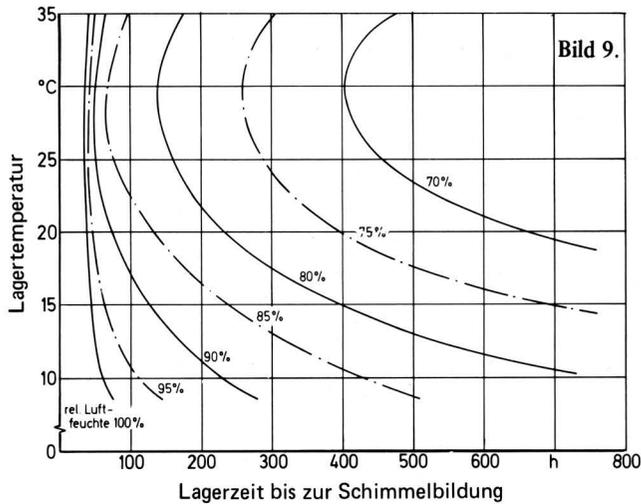
Erntegut	Luzerne ( <i>Medicago sativa</i> )
Schnittzeit	August 1977
Einlagerungsfeuchte	81 %

## 5.2 Verderbfreie Lagerzeiten von Anwelkgut

Das Anwelken von Erntegut führt gegenüber Frischgut (Bild 7) sowohl zu einer drastischen Verkürzung der verderbfreien Lagerzeit im untersuchten Feuchtebereich als auch zu einer Ausweitung des Temperaturbereichs optimaler Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze, Bild 9 und 10. Bei vorgewelktem Gras mit einer Feuchte von 56 %, Bild 9, reduziert sich bei feuchtigkeitsgesättigter Luft und einer Temperatur von 25 °C die Zeit auf 40 h, gegenüber 80 h für Frischgut. Für eine Einlagerungsfeuchte von 29 %, Bild 10, sind es dann nur noch 35 h. Die Ergebnisse für hohe relative Luftfeuchten decken sich gut mit denen in Bild 2, wenn man bei diesen von einer Einlagerungsfeuchte um 45 % ausgeht.

Vor dem Schnitt des Ernteguts, welches auf eine Materialfeuchte von 56 % vorgewelkt wurde (Bild 9), herrschte während 10 Tagen feuchtwarmes Wetter, das bei allen Luftzuständen im Lager deutlich zu einer zusätzlichen Verkürzung der verderbfreien Zeiten beitrug. Bei der Gegenüberstellung von Bild 9 mit den Bildern 8 und 10 können daher nur die tendenzmäßigen Unterschiede und Trends herausgestellt werden. Die Tatsache, daß das Versuchsmaterial in verschiedenen Jahren und Vegetationszeiten aber vergleichbaren Vegetationsstadien geerntet wurde, wirkte sich nur wenig auf die Schimmelentwicklung aus.

Ergebnisse eines anderen Versuchs zeigen Bild 11 und 12, für den das gesamte Erntegut an einem Nachmittag geschnitten und unter nahezu konstanten und günstigen Bedingungen in einer Versuchshalle auf mehrere Vorwelkstufen bis herunter zu Heu getrocknet wurde. Während des Vorwelkens entwickeln sich die Schimmelsporen bereits auf dem Erntegut. So ist zu vermuten, daß mit wachsenden Vorwelkzeiten nur noch verkürzte Zeiten für die Resttrocknung in Satz- und Trocknungsanlagen bis zum Auftreten von Verderb zur Verfügung stehen. Dies bestätigen die Versuchsergebnisse, die kürzere verbleibende Trocknungszeiten bis zur sichtbaren Schimmelbildung bei abnehmender Erntegutfeuchte bis zu 30 % und hohen relativen Luftfeuchten aufweisen. Bei trockenem Material kann hingegen wieder mit etwas verlängerten, verderbfreien Zeiten gerechnet werden. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß trockenes Gut erst wieder Feuchte aus der Luft aufnehmen muß, um Schimmelwachstum zu ermöglichen.



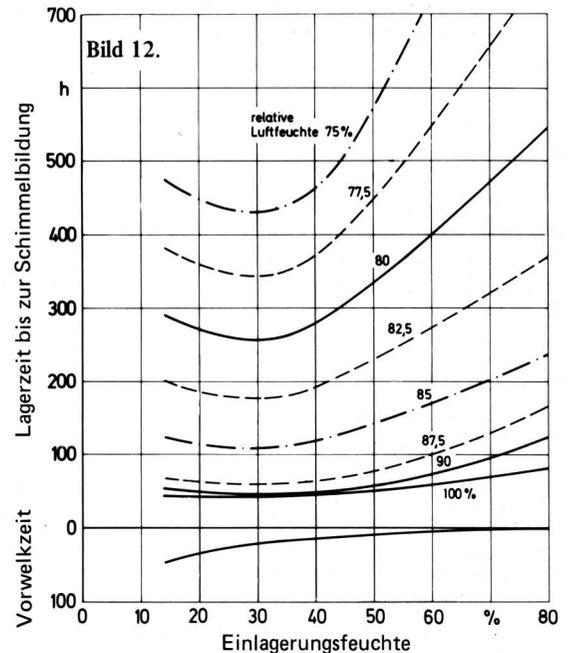
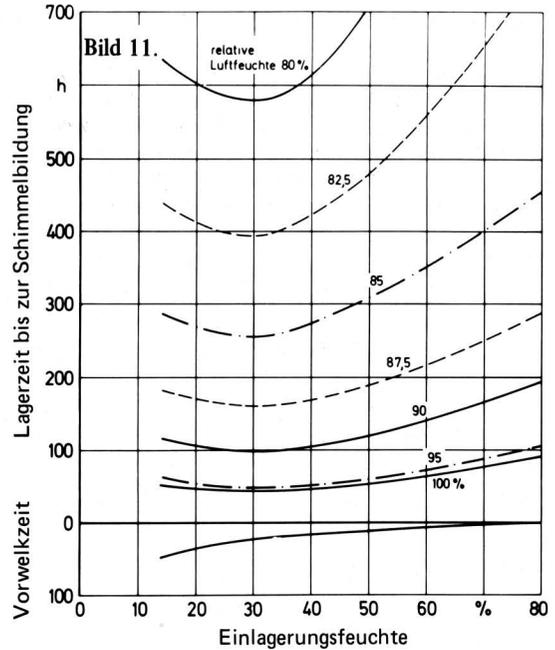
**Bild 9 und 10.** Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei angewelktem Gras in Abhängigkeit von Temperatur, Lagerzeit und relativer Luftfeuchte.

Erntegut	Knaulgras ( <i>Dactylis glomerata</i> )
Bild 9: Einlagerungsfeuchte	56 %
Schnittzeit	Juli 1977
Bild 10: Einlagerungsfeuchte	29 %
Schnittzeit	Sept. 1976

Bezieht man die Vorwelkzeiten in die Lagerzeit ein, so ergeben sich nahezu gleiche Zeiten für die Lagerung bei hoher Luftfeuchte im Bereich der Erntegutsfeuchte ab 30 %. Geringere Luftfeuchten lassen wachsende Zeiten für verderbfreie Lagerung zu. Lagertemperaturen von 25 bis 35 °C (Bild 12) weisen bei Luftfeuchten zwischen 87,5 und 100 % nur wenig unterschiedliche Zeiten bis zur Bildung ersten sichtbaren Schimmels auf. Deutlich längere Zeiten ergeben sich für die verderbfreie Lagerung bei niedrigeren Temperaturen unter 20 °C und besonders im Bereich von Luftfeuchten unter 90 % (Bild 11).

Vor der Ernte beschädigte und angewelkte Pflanzenteile sind häufig die Ursache für vorzeitiges Auftreten von Schimmel. Der Anwelkgrad dieser Teile und die Höhe ihres Anteils bestimmen die verfügbaren verderbfreien Zeiten der Trocknung.

Geht man davon aus, daß während der begrenzten Dauer für den Trocknungsprozeß bei einer Temperatur von 5 °C kein Verderb auftritt und für die Entwicklung sichtbaren Schimmels auf Halmgut eine Mindestzeit von 30 h erforderlich ist, kann mit guter Annäherung die nachstehende Beziehung zur Abschätzung schimmel-freier Zeiten dienen:



**Bild 11 und 12.** Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei frischem und angewelktem Gras in Abhängigkeit von Lagerzeit, Einlagerungsfeuchte und relativer Luftfeuchte.

Erntegut	Knaulgras ( <i>Dactylis glomerata</i> )
Schnittzeit	Sept. 1977
Vorwelken:	Temperatur 20 °C
	relative Luftfeuchte 45 %
Bild 11:	Lagertemperatur 20 °C
Bild 12:	Lagertemperatur 35 °C

$$[(\vartheta - \vartheta_0) (t - t_0)]^{\varphi^a} = \text{konstant} \quad (1)$$

worin

$\vartheta$	Lagertemperatur in °C
$\vartheta_0$	Lagertemperatur ohne Schimmelbildung in °C
$t$	Lagerzeit bis zum Schimmelbeginn in h
$t_0$	Mindestlagerzeit bis zum Schimmelbeginn in h
$\varphi$	relative Luftfeuchte, als Dezimalbruch
$a$	Schimmelkoeffizient.

Wird für Frischgut bei wassergesättigter Luft und einer Temperatur von 25 °C eine schimmelfreie Lagerzeit von 80 h zugrundegelegt (Bild 5 und 6), so ergibt sich unter den oben genannten Bedingungen für die Konstante in der Gleichung der Zahlenwert 1000. Durch den Exponenten a wird das je nach Pflanzenart unterschiedliche Schimmelverhalten bei niedrigen Luftfeuchten berücksichtigt. Es wurde für Gras der Schimmelfkoeffizient a = 1,05 und für Luzerne a = 1,35 im Bereich relativer Feuchten von 75 % bis zur Sättigung und für Temperaturen von 10 bis 35 °C ermittelt.

Die kürzeren verderbfreien Lagerzeiten bei Einlagerung von vorgewelktem Erntegut in Satztrocknungsanlagen können durch einen Verhältniswert, gebildet aus den verderbfreien Lagerzeiten von Anwelk- und Frischgut, Vorwelkkoeffizient c genannt, mit guter Annäherung abgeschätzt werden. In dem Temperatur- und Luftfeuchtebereich, der die Trocknung bei verderbfreier Lagerung zeitlich am stärksten einengt, ergeben sich für die Vorwelkkoeffizienten nur wenig streuende Verhältniszahlen, deren Mittelwerte in Tafel 1 zusammengestellt sind. Unter günstigen Lagerbedingungen ergeben sich mit den Tafelwerten geringere Zeitverkürzungen als die durch Versuche ermittelten, die aber im Bereich langer, schimmelfreier Lagerzeiten liegen, welche weit über die in der Praxis vertretbaren Trocknungszeiten hinausgehen.

Einlagerungsfeuchte %	15	30	45	60	80
Vorwelkkoeffizient c	0,52	0,46	0,54	0,7	1,0

Tafel 1. Faktor der Zeitverkürzung für die Einlagerung von vorgewelktem Gras.

Erste Versuche sind angestellt worden, um auch den Einfluß des Anwelkens auf dem Felde im Hinblick auf das Auftreten von Schimmel bei der Satztrocknung für eine Abschätzung verderbfreier Zeiten zu erfassen. Die Untersuchungen darüber sind noch nicht abgeschlossen.

### 5.3 Einfluß von Vegetationszeit und Witterung auf die verderbfreie Lagerzeit

Der Infektionsgrad des Ernteguts wird durch die Länge der Vegetationsperiode und die während dieser Zeit herrschende Witterung bestimmt. Kurz nach Vegetationsbeginn gewachsenes und nach einem Schnitt frisch aufgewachsenes Erntegut weist deutlich längere schimmelfreie Lagerzeiten als später geerntetes Gut auf, Bild 13. Dies kann trotz unterschiedlicher Nährstoffzusammensetzung der Pflanzen wohl ausschließlich auf eine geringere Infektion zurückgeführt werden. Die Versuchsergebnisse in Bild 13 zeigen, daß mit fortschreitender Vegetationszeit eine Verkürzung der schimmelfreien Zeiten um einen konstanten Faktor über den gesamten untersuchten Bereich der Luftzustände erfolgt.

Es ist vorstellbar, daß der Infektionsgrad eines Bestandes auch durch Düngung beeinflusst wird. Diese Frage wurde bei den derzeitigen Versuchsanstellungen nicht berücksichtigt.

Auf den Einfluß der Witterung wurde zuvor bereits kurz hingewiesen. Feuchte Witterung vor der Ernte führt zu geringeren Zeiten für die Schimmelentwicklung im Temperaturbereich über 25 °C (Bild 9). Warme und feuchte Tage verkürzen deutlich die schimmelfreien Lagerzeiten des Ernteguts bei allen untersuchten Luftzuständen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Zeitspanne von 8 bis 12 Tagen vor der Ernte.

Zur Abschätzung der schimmelfreien Lagerzeiten bei Vorliegen unterschiedlicher Infektionsbedingungen ist es notwendig, einen Infektionskoeffizienten, hier mit b bezeichnet, einzuführen. Wird für diese Größe bei einem Infektionszustand nach durchschnittlichem Witterungsverlauf bis zur Ernte in den Vegetationsstadien vom Schossen bis Beginn der Blüte – oder einem vergleichbaren

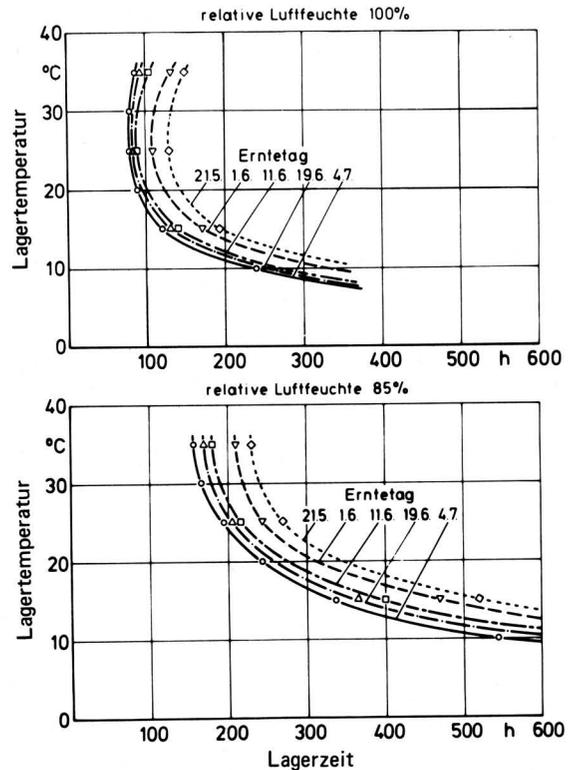


Bild 13. Grenzkurven für das Auftreten von Schimmel bei Gras in Abhängigkeit von Temperatur, Lagerzeit, relativer Luftfeuchte und Vegetationsdauer.

Erntegut Wiesenlieschgras (*Phleum pratense*)  
Erntejahr 1979

Stadium nach dem ersten Schnitt – der Zahlenwert "1" eingeführt, so können sich insgesamt Werte zwischen b = 0,6 (für einen vorzeitigen Schnitt in einem frühen Vegetationsstadium) und b = 1,35 (bei überständigem Erntegut und ungünstiger Witterung) ergeben.

Die Gleichung zur Abschätzung von Lagerzeiten bis zum Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels für konstanten Luftzustand wird dann wie folgt um die beiden Koeffizienten erweitert, die den Erntegutzustand bei Einlagerung als Folge von Vorwelken und Infektion weitergehend beschreiben:

$$\frac{b}{c} [(t - t_0) (t - t_0)]^{a} = \text{konstant} \quad (2).$$

### 5.4 Einfluß wechselnder Luftzustände auf die verderbfreien Lagerzeiten

In Satztrocknungsanlagen wird während des Trocknungsprozesses bei bevorzugter Belüftung mit Außenluft das Erntegut wechselnden Luftzuständen ausgesetzt. Allein durch den Tag-Nacht-Wechsel und besonders bei Wetteränderung treten deutliche Unterschiede bei Temperatur und Feuchte auf. Als Bezugsgrößen für eine Bewertung der Lagerzeiten bei simuliertem Wechselklima dienen wieder die in Versuchen ermittelten Zeiten bis zum Auftreten des ersten Schimmels bei konstanten Luftzuständen. Die sich aus den empirischen Beziehungen Gln. (1) und (2) ergebende Gleichwertigkeit von Temperatur- und Zeiteinfluß bei konstanter Luftfeuchte konnte durch Versuche bestätigt werden. Wird die verderbfreie Lagerzeit durch mehrfaches Ansetzen der Gln. (1) oder (2) für die verschiedenen Lagerbedingungen abgeschätzt, dann ist die Mindestlagerzeit bis zum Schimmelbeginn ( $t_0$ ) nur einmal in voller Höhe zum Abzug zu bringen. Bei ein- oder zweimaligem Wechsel des Luftzustandes sollte dies beim ersten Zeitintervall erfolgen.

Eine Zusammenfassung der Auswirkung von Teilzeiten unterschiedlicher Luftzustände auf das Auftreten des ersten, sichtbaren Schimmels führte im mittleren Wertebereich der Luftzustände zu Konstanten, letzte Spalte in **Tafel 2**, die den bei Besprechung von Gl. (1) genannten durchaus vergleichbar sind. Dabei war die Reihenfolge der Intervalle mit verschiedenen Temperaturen und relativen Luftfeuchten und auch ihre zeitliche Dauer ohne nachweisbaren Einfluß auf den Schimmelbeginn. Bei extremen Temperatur-Feuchte-Wechseln ergaben sich größere Zahlenwerte für die Konstante; dies vor allem dann, wenn Frischgut zuerst längere Zeit einem Luftzustand mit hohem Sättigungsdefizit ausgesetzt und dabei die Trocknung deutlich fortgeschritten war, ehe das Erntegut dann in feuchtere Luft gelangte. Nötige Adsorptionszeiten können hier der Grund für verzögerte Schimmelentwicklung sein.

Luft-zustand	$\vartheta_1$ [°C]	$\varphi_1$ [%]	$t_1$ [h]	$\Sigma_1$	$\vartheta_2$ [°C]	$\varphi_2$ [%]	$t_2$ [h]	$\Sigma_2$	$\Sigma_{ges}$
konstant	15°	85	360						926
	15°	100	125						950
	25°	84,7	200						926
	25°	100	78						960
wechselnd	25°	84,7	105	543	15°	100	55	400	943
	15°	100	70	550	25°	84,7	82	423	973
	25°	84,7	7x16	578	15°	100	6x8	330	908

**Tafel 2.** Lagerung von Gras bis zum Auftreten ersten sichtbaren Schimmels bei gleichbleibenden und wechselnden Luftzuständen;  $\vartheta$  und  $\varphi$  vorgegebene Luftzustandsgrößen,  $t$  beobachtete Lagerzeiten bis zum Auftreten von Schimmel,  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  und  $\Sigma_{ges}$  nach Gl. (3) mit  $a = 1,05$  errechnete Teilsummen bzw. Summen.

Erntegut                      Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*)  
Schnittzeit                Okt. 1979  
Einlagerungsfeuchte    80 %

Abgesehen von dieser Tatsache, die eine zusätzliche Zeitreserve darstellt, darf man davon ausgehen, daß die Abschätzung verderbfreier Lagerzeiten bei wechselnden Luftzuständen durch Aufsummierung der Auswirkungen von verschiedenen Teilzeiten auf das Schimmelwachstum möglich ist. Ein Abzug der Mindestlagerzeit bis zum Schimmelbeginn erscheint für den Betrieb von Trocknungsanlagen bei allen Intervallen gleichermaßen gerechtfertigt zu sein; denn zumindest durch den Tag-Nacht-Wechsel treten deutliche Luftzustandsänderungen auf, welche nach ihrer zeitlichen Ausdehnung kürzer als die Mindestzeit sind. Da die Entwicklung von Schimmelsporen in kurzen Zeitabschnitten bei mehreren Temperatur-Feuchte-Bereichen nacheinander einsetzt, müßte die Aufteilung der Mindestzeit entsprechend der verschiedenen Zeitanteile erfolgen. Im Hinblick auf die beschränkte Genauigkeit bei der Abschätzung von Konstanten für biologisches Material kann mit guter Annäherung die Mindestlagerzeit bis zum Schimmelbeginn auf die Zeitabschnitte auch linear aufgeteilt werden.

Dadurch wird eine einfachere mathematische Form der empirischen Gleichung möglich, die in ihrer allgemeinen Form geschrieben werden kann:

$$\frac{b}{c} \sum_1^n [(\vartheta_i - \vartheta_0) (t_i - \frac{t_0}{n})] \varphi_i^a = \text{konstant} \quad (3)$$

wobei  $i$  die Zahl der Zeitabschnitte von 1 bis  $n$  ist.

Nach Einführung der Konstanten ( $\vartheta_0 = 5$  °C;  $t_0 = 30$  h; konst. = 1000) ergibt sich dann:

$$\frac{b}{c} \sum_1^n [(\vartheta_i - 5) (t_i - \frac{30}{n})] \varphi_i^a = 1000.$$

## 6. Ausblick auf eine Prozeßführung unter Ausschluß des Verderbs

Eine Prozeßführung bei Satztrocknungsanlagen im Hinblick auf minimalen Energieaufwand und Ausschluß von Verderb muß auf die weitgehende Ausnutzung des Trocknungspotentials der Außenluft ausgelegt sein, aber auch die Möglichkeit einer Anwärmung der Trocknungsluft einschließen, um während Zeiten schlechter Witterung die Trocknung fortführen zu können.

Ein Programm für eine Regelung, **Bild 14**, sollte grundsätzlich drei Teile enthalten:

1. den ersten Trocknungsabschnitt (Trocknung mit gleichbleibender hoher relativer Abluftfeuchte und konstanter Trocknungsgeschwindigkeit),
2. den Beginn des zweiten Trocknungsabschnittes bis zu einer Abluftfeuchte von 70 % (Trocknung mit fallender relativer Abluftfeuchte und Trocknungsgeschwindigkeit) und
3. die Resttrocknung des Ernteguts auf Lagerfeuchte ab einer relativen Abluftfeuchte von 70 %.

Die Resttrocknung kann, da das Auftreten von Verderb bereits ausgeschlossen ist, während Zeiten mit ausreichendem Sättigungsdefizit der Luft fortgeführt und anderenfalls ausgesetzt werden.

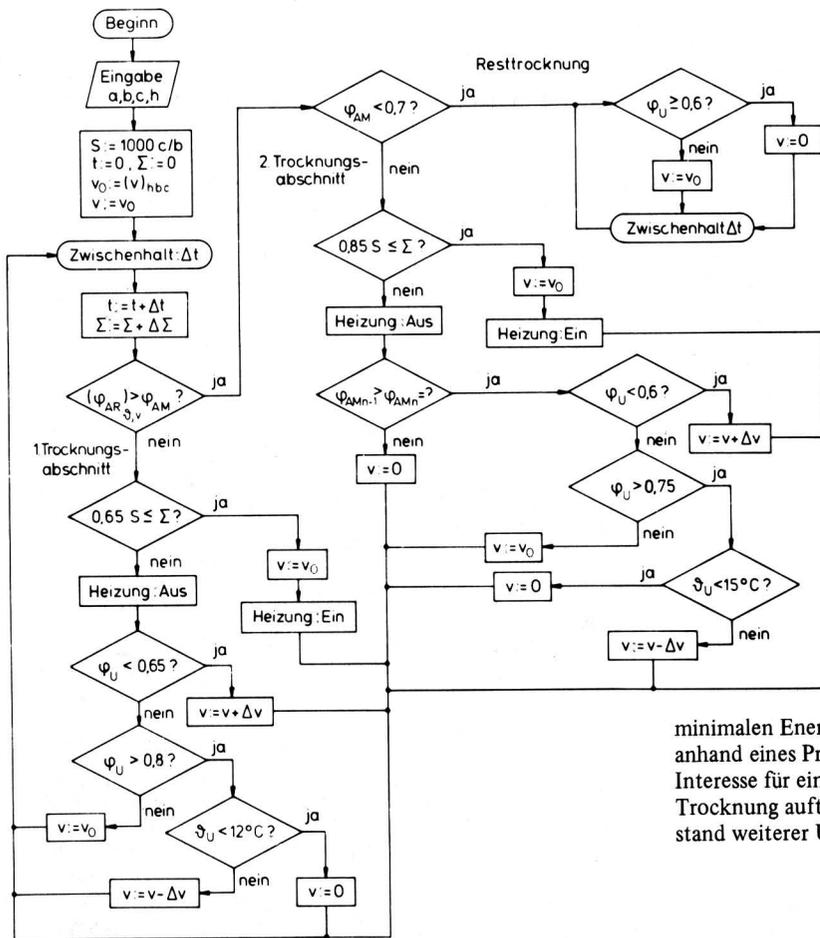
Bei den beiden anderen Programmteilen ist vorab zu entscheiden, ob der Trocknungsvorgang im Hinblick auf den Verderb in den zur Verfügung stehenden Zeitabschnitten erfolgte. Konnte dies nicht erreicht werden, ist mit angewärmter Luft die Trocknung voranzutreiben. Anderenfalls wird bei guter Witterung versucht, mit hoher Belüftungsintensität das kostenlos zur Verfügung stehende hohe Trocknungspotential der Außenluft zu nutzen. Sind die Voraussetzungen nicht so günstig, ist mit mittlerer Luftgeschwindigkeit zu belüften. Sinkt aber das Trocknungsvermögen noch weiter ab, wird es nötig, die Belüftungsintensität mit Rücksicht auf den Energieeinsatz herabzusetzen. Wenn dann auch noch die Außentemperatur unter einen Grenzwert fällt, besitzt die Luft kaum noch ein nutzbares Trocknungspotential; es kann sogar sein, daß wieder Feuchte in den Erntegutstapel eingetragen wird. Dann muß die Belüftung ruhen.

Eine derartige Prozeßführung, die hier nur in grundlegender Konzeption vorgestellt werden kann, erfordert die Messung von Temperatur und relativer Feuchte sowohl der Zu- als auch Abluft. Zusätzliche logische Entscheidungen zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlage, die Einführung weiterer Grenzbedingungen vor allem im Hinblick auf während des Trocknungsvorganges auftretende Verluste sowie Entscheidungshilfen für die Regelung bezüglich des zu erwartenden mittleren Witterungsverlaufs sind einige der zu nennenden Maßnahmen, die sich als dienlich für den Betrieb und auch hilfreich bei Reduzierung des Energieeinsatzes und der Erhöhung der Heuqualität erweisen können.

Mit deutlich geringerem Aufwand ist auch eine manuelle Steuerung denkbar, für welche anzeigende, besser aber registrierende Meßgeräte der Zu- und Abluftzustände, hinreichend häufige Überprüfung der Einstellungen sowie eine Abschätzung der verbleibenden Restsummen bis zum Schimmelbeginn, die mit programmierbaren Taschenrechnern durchgeführt werden können, Voraussetzung sind.

## 7. Zusammenfassung

Ergebnisse aus Lagerversuchen mit Halmgut bei unterschiedlichen Luftzuständen in Glasgefäßen bilden die Grundlage für die Entwicklung einer empirischen Beziehung, mit der der Zeitpunkt beginnenden Verderbs, ermittelt am Auftreten des ersten sichtbaren Schimmels, abgeschätzt werden kann. Mit der aufgestellten Gleichung können für den praktischen Betrieb von Satztrocknungsanlagen schimmelfreie Lagerzeiten des Ernteguts in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte sowie vom Zustand des Gutes bei der Einlagerung als Folge von Vorwelken und Infektion für Gras und Luzerne ermittelt werden. Durch Versuche konnte



**Bild 14.** Programmablaufplan für die Prozeßführung einer Trocknungsanlage.

S Summengrenzwert für den Schimmelbeginn nach Gln. (2) oder (3)  
 Σ Summengrenzwert des Prozesses  
 a, b, c Koeffizienten zur Berechnung der Lagerzeit bis zum Auftreten ersten sichtbaren Schimmels (s.a. Gln. (1) und (2))  
 h Stapelhöhe  
 t Zeit  
 v Luftgeschwindigkeit im Stapel  
 φ Lufttemperatur  
 φ relative Luftfeuchte  
 Indizes:  
 A Abluft R Rechenwert  
 M Meßwert U Umgebung

belegt werden, daß die empirische Gleichung in vertretbaren Grenzen auch auf Intervalle mit wechselnden Luftzuständen, wie sie beispielsweise infolge des Tag-Nacht-Wechsels oder bei Wetteränderungen auftreten, anwendbar ist.

Ein Ausblick auf eine Regelung des Trocknungsprozesses im Hinblick auf

minimalen Energieeinsatz und den Ausschluß von Verderb wird anhand eines Programmablaufplans gegeben. Von grundsätzlichem Interesse für eine Prozeßführung sind überdies die während der Trocknung auftretenden Verluste an Nährstoffen; sie sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] Honig, H.: Schätzung der Verluste an Trockenmasse und Energie bei verschiedenen Konservierungsverfahren. KTBL-Arbeitsgemeinschaft "Kalkulationsunterlagen" Grunddaten der Futterwirtschaft 1976.
- [ 2 ] Honig, H. u. E. Zimmer: Energieeinsatz bei der Konservierung von Rauhfutter. Landbauforschung Völknerode Sh. 49 (1979) S. 71/82.
- [ 3 ] Lehmann, D. u. D. Hartmann: Schimmelbildung – eine Gefahr bei der Warmlufttrocknung. Mitt. DLG Bd. 85 (1970) H. 26, S. 908/10.
- [ 4 ] Lehmann, D.: Verlustvorgänge und Schimmelbildung bei der Trocknung und Lagerung von Halmfutter. Landtechn. Forschung Bd. 19 (1971) H. 5/6, S. 180/87.
- [ 5 ] ●Schlegel, H.G.: Allgemeine Mikrobiologie. 2. Aufl., Stuttgart: G. Thieme 1972.
- [ 6 ] Fehrmann, H. u. H. Schrödter: Ökologische Abhängigkeit zur Epidemiologie von *Cercospora herpotrichoides*. Teil 1: Die jahreszeitliche Abhängigkeit von Weizeninfektionen im Freiland. Phytopathologische Zeitschrift Bd. 71 (1971) H. 1, S. 66/82.
- [ 7 ] Schrödter, H. u. H. Fehrmann: Ökologische Abhängigkeit zur Epidemiologie von *Cercospora herpotrichoides*. Teil 3: Die relative Bedeutung der meteorologischen Parameter und die komplexe Wirkung ihrer Konstellationen auf den Infektionserfolg. Phytopathologische Zeitschrift Bd. 71 (1971) H. 3, S. 203/22.
- [ 8 ] Stokes, R.H. u. R.A. Robinson: Standard solutions for humidity control at 25 °C. Ind. a. Eng. Chemistry Bd. 41 (1949) Nr. 9, S. 2013.
- [ 9 ] Carr, D.S. u. B.L. Harris: Solutions for maintaining constant relative humidity. Ind. a. Eng. Chemistry Bd. 41 (1949) Nr. 9, S. 2014/15.
- [ 10 ] Wexler, A. u. S. Hasegawa: Relative humidity-temperature relationship of some saturated salt solutions in the temperature range 0 ° to 50 °C. J. Res. Nat. Bur. Standard Bd. 53 (1954) Nr. 1, S. 19/26.
- [ 11 ] ●Hedlin, C.P. u. F.N. Trofimenkoff: Relative humidities over saturated solutions of nine salts in the temperature range from 0 ° to 90 °F. In: Wexler, A.: Humidity and moisture, measurement and control in science and industry. New York: Reinhold Publ. Corp. und London: Chapman & Hall Ltd. 1965.
- [ 12 ] Hubbard, J.E., F.R. Earle u. F.R. Senti: Moisture relationship in wheat and corn. Cereal Chemistry Bd. 34 (1957) Nr. 6, S. 422/33.
- [ 13 ] Nemitz, G.: Die hygroskopischen Eigenschaften getrockneter Lebensmittel. Lebensm.-Unters. und -Forsch. Bd. 123 (1963) H. 1, S. 1/5.
- [ 14 ] Siddappa, G.S. u. A.M. Nanjundaswamy: Equilibrium relative humidity relationship of fruit juice and custard powders. Food Technology Bd. 14 (1960) S. 533/37.
- [ 15 ] Young, J.H. u. G.L. Nelson: Experimental investigations of hysteresis between sorption and desorption isotherms of wheat. Trans. ASAE Bd. 10 (1967) Nr. 6, S. 756/61.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1981

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. – All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. – Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.