

Verlustvorgänge und Schimmelbildung bei der Trocknung und Lagerung von Halmfutter

Dietrich Lehmann

Institut für Landtechnik, Universität Göttingen

1. Einleitung

Betrachtet man die Satz-trocknung landwirtschaftlicher Produkte, insbesondere die von Halmfutter, mit kalter und angewärmter Luft, so stellt man häufig den Verlust von Nährstoffen innerhalb des Stapels während des Trocknungsprozesses bis hin zur Schimmelbildung und damit zum Verderb des Gutes fest. Zu diesen Erscheinungen sind die enzymatischen und nicht enzymatischen Umsetzungen im Futter selbst sowie der mikrobielle Abbau der organischen Substanz zu rechnen [1; 2; 3; 4].

Durch die spezifischen Verhältnisse im trocknenden Haufwerk, vor allem bei der Behandlung mit Warmluft, entstehen günstigste Voraussetzungen für die Entwicklung und das rasche Wachstum von Mikroorganismen. So bieten besonders die Zonen, in denen warme, feuchte Luft auf noch feuchtes Gut trifft, ideale Bedingungen für alle Arten von Verlustvorgängen. Die schematische Darstellung im Bild 1 verdeutlicht die angesprochenen Vorgänge bei der Satz-trocknung. Um genauere Kenntnisse dieser Abbau- und Verderberscheinungen zu erhalten, wurden die Verhältnisse innerhalb der Rekondensationszone beziehungsweise der feuchten Zone eines Halmgutstapels in einem Klimaschrank simuliert. Mehrere Versuchsreihen, die im Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen durchgeführt wurden, sollten die zeitliche Grenze bis zum Auftreten von Schimmel und die Verlustvorgänge bis zum Verderb in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte der das Futter umströmenden Luft deutlich machen.

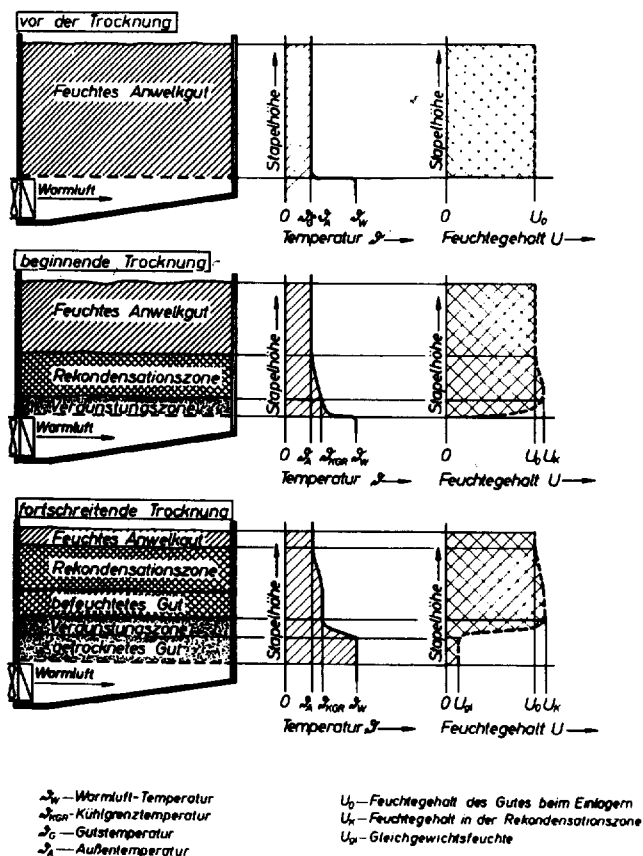


Bild 1: Trocknung von Halmgutstapeln mit angewärmter Luft [5]

Bevor die Versuche und ihre Ergebnisse im einzelnen besprochen werden, seien an dieser Stelle einige allgemeine Bemerkungen über den Trockenmasse-Abbau bei der Trocknung und Lagerung biologischer Produkte und über das Auftreten von Mikroorganismen gemacht.

2. Trockenmasse-Abbau und Wasserverfügbarkeit

Wenn es um die Lagerfähigkeit biologischer Produkte oder um deren Haltbarkeit gegen Umsetzungsprozesse und Verderb geht, steht im allgemeinen ihr Wassergehalt als charakteristische Größe im Vordergrund, wobei versucht wird, gewisse Grenzwerte anzugeben, die nicht überschritten werden dürfen. Es ist jedoch erwiesen, daß nicht die Masse des im Gut vorhandenen Wassers, sondern die sogenannte „Wasserverfügbarkeit“ ausschlaggebend für die angesprochenen Erscheinungen ist. Darunter versteht man jenen Anteil des im Gut vorhandenen Wasser, der zu biologisch-chemischen Reaktionen zur Verfügung steht und der durch die Kräfte, mit denen Wassermoleküle an das Gut gebunden sind, eingeschränkt wird. Als physikalisches Maß für die Wasserbindung gilt der Teildampfdruck der das Material umgebenden Atmosphäre oder sein Verhältnis zum entsprechenden Satttdampfdruck bei gleicher Temperatur, also die relative Luftfeuchte φ . Der Zusammenhang zwischen der Wasserbindung an das Gut, ausgedrückt durch den Teildampfdruck oder die relative Luftfeuchte, und dem Wassergehalt bei bestimmter Temperatur ist wiederum durch die Sorptionsisotherme gegeben. Ihr charakteristischer Verlauf läßt Aussagen über Art und Stärke der Bindungskräfte zu, die den Feuchtegehalt bestimmen und gleichzeitig Einfluß auf Abbauprozesse und mikrobielles Wachstum haben (Bild 2).

Am Beispiel einer Desorptionsisotherme für Deutsches Weidelgras bei 25°C nach TUNCER [6] werden hier einzelne Bereiche möglicher Umsetzungs- und Verlustvorgänge den dort die Wasserabgabe begrenzenden Kräften gegenüber gestellt.

Natürlich soll das Bild nur einen schematischen Überblick bieten, da einerseits keine exakten Grenzen zwischen den einzelnen Erscheinungen bestehen, andererseits nur der jeweils dominierende Vorgang genannt ist, der bei zunehmen-

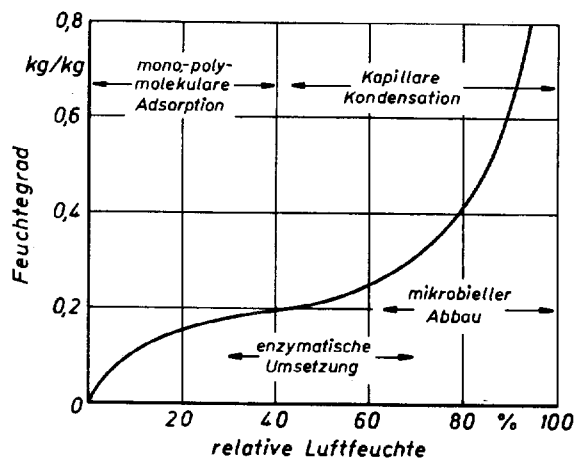


Bild 2: Bereiche unterschiedlicher Wasserbindung und möglicher Abbauvorgänge am Beispiel einer Desorptionsisotherme von Deutschem Weidelgras bei 25°C

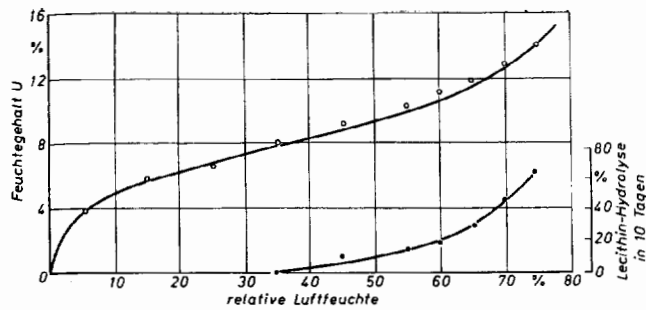


Bild 3: Sorptionsisotherme und Enzymaktivität einer Gerstenmalzschrot-Lecithin-Mischung (n. ACKER)

der Luftfeuchte die anderen überdeckt, was sowohl für die Bindungskräfte als auch für die Abbauprozesse gilt. Außerdem sind nicht alle bei der Sorption von Wasser an biologischem Material auftretenden Bindungsarten [7] wie Osmose und ähnliches erwähnt, da Stärke und Grenzen ihrer Einwirkung zu wenig bekannt sind.

Deutlich wird, daß bei stationärem Gleichgewichtszustand über weite Bereiche der relativen Luftfeuchte bis zu sehr niedrigen Werten hinab noch Veränderungen in der Substanz auftreten. Mit geringer werdender Wasserverfügbarkeit werden die jeweiligen Vorgänge eingeschränkt und kommen schließlich zum Stillstand. So weist ACKER [8] nach, daß enzymatische Aktivitäten nahezu ausschließlich stattfinden, wenn Wasser in flüssiger Phase, das heißt nur leicht gebunden wie im Bereich der Kapillarkondensation, vorkommt, so daß es bei der Hydrolyse als chemischer Reaktionspartner, bei der Oxydation als Transportmittel zur Verfügung steht. Nur bei flüssigen Substraten, die zum Enzym diffundieren können, finden Umsetzungen auch bei niedrigeren Feuchtwerten noch statt.

Als Grenze für kapillar gebundenes Wasser kann man in erster Näherung den Wendepunkt der Sorptionsisotherme betrachten, so daß die dazugehörige relative Luftfeuchte den unteren Wert für enzymatische Umsetzungen darstellt, wie ACKER [9] an einer Gegenüberstellung von Sorptionsisotherme und Hydrolyse-Aktivität einer Gerstenmalzschrot-Lecithin-Mischung zeigt (Bild 3).

Die Kenntnis dieser Grenzwerte ist besonders für die Lagerung von Dauergemüsen bedeutungsvoll, bei denen es nicht nur auf das Vermeiden mikrobiellen Verderbs, sondern auch auf die Erhaltung der Inhaltsstoffe ankommt.

Der stärkste Abbau und vor allem der Verderb des Gutes entstehen durch die Tätigkeit der Mikroorganismen, die bei der Trocknung und Lagerung landwirtschaftlicher Produkte im Vordergrund stehen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Grenzen der Wasserverfügbarkeit beziehungsweise der relativen Luftfeuchte zu kennen, die für die Existenz, Fortpflanzung und Ausbreitung von mikrobiellem Leben kennzeichnend sind.

3. Mikroorganismen und ihre Lebensbereiche

3.1. Grenzen der Feuchte

Grundsätzlich ist festzustellen, daß Wachstum und Entwicklung aller Mikroorganismen an die Gegenwart von Wasser in schwach oder nicht gebundener Form geknüpft sind, so daß jeder Wasserentzug immer einen gewissen Schutz vor Abbau und Verderb darstellt. Zu beachten ist dabei, daß für viele Spezies, so beispielsweise für Schimmelpilze, die Grenzen für das Wachstum bei niedrigeren Feuchtwerten liegen als für die Fortpflanzung. Man unterteilt allgemein die Mikroorganismen

Bakterien — Hefen — Schimmelpilze

nach ihren Feuchteansprüchen an ihre Umgebung in xerophile, mesophile und hygrophile Arten, wie folgendes

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

Bild 4: Feuchteansprüche von Mikroorganismen an ihre Umgebung

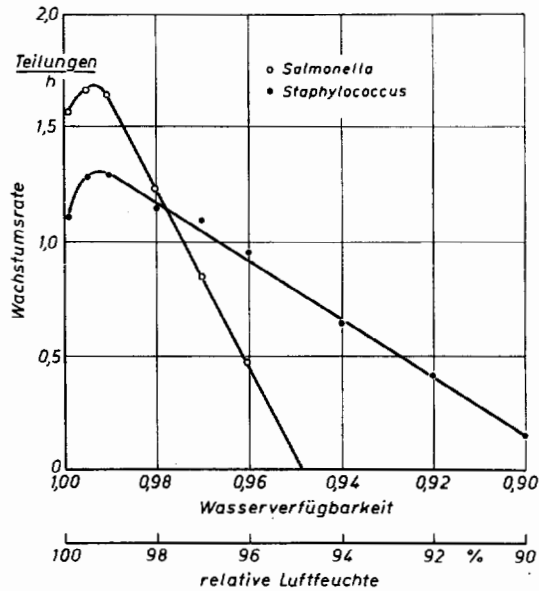


Bild 5: Wachstum von Bakterien bei unterschiedlicher Luftfeuchte (n. CHRISTIAN)

Schema erkennen läßt, das die Lebensbereiche dieser drei Gruppen in der genannten Unterteilung zeigt (Bild 4). Bakterien sind demnach im allgemeinen hygrophil. Bei hohen Luftfeuchten ihrer Umgebung sind ihre Lebensbedingungen optimal, so daß sie die Wirkung anderer Mikroorganismen überdecken können.

Während zum Beispiel Schimmelpilze selbst unter günstigen Umständen eine gewisse Zeit zu ihrer Entwicklung benötigen, kann man annehmen, daß Bakterien bei der Einlagerung landwirtschaftlicher Produkte bei Einhaltung ihrer Existenzgrenzen sofort mit dem Abbau organischer Substanz beginnen. CHRISTIAN [10] zeigt in Bild 5 die Wachstumsrate zweier Bakterienstämme in Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit, woraus die Grenzen günstigster Lebensbedingungen sichtbar werden. Bei Schimmelpilzen findet man sowohl hygrophile als auch ausgesprochen xerophile Arten, so daß man innerhalb eines großen Feuchtebereichs mit dem Auftreten von Schimmel rechnen muß. Oft haben einzelne Stämme ein ausgeprägtes Optimum bei bestimmten Werten der relativen Luftfeuchte, wie HEINTZELER [11] festgestellt hat (Bild 6).

Bei niedrigsten Werten der Luftfeuchte entstehen nur noch kümmerliche Formen und eine Verbreitung ist ausgeschlossen oder vollzieht sich so langsam, daß auch Lagerungsbedingungen mit Luftfeuchten oberhalb der Lebensgrenze für eine gewisse Zeit Schutz vor Verderb bieten können. Im allgemeinen wird von den Verfassern eine Grenze von 70 bis 75 % relativer Luftfeuchte angegeben, wie auch SCHELHORN [12] an Sorptionsisothermen von Trockengemüsen deutlich macht (Bild 7).

Für die Trocknung und Lagerung sind vor allem die xerophilen Arten und ihre minimalen Ansprüche an die relative Luftfeuchte interessant, die anhand der Sorptionsisothermen auf die Gutsfeuchte übertragen werden können. Will man

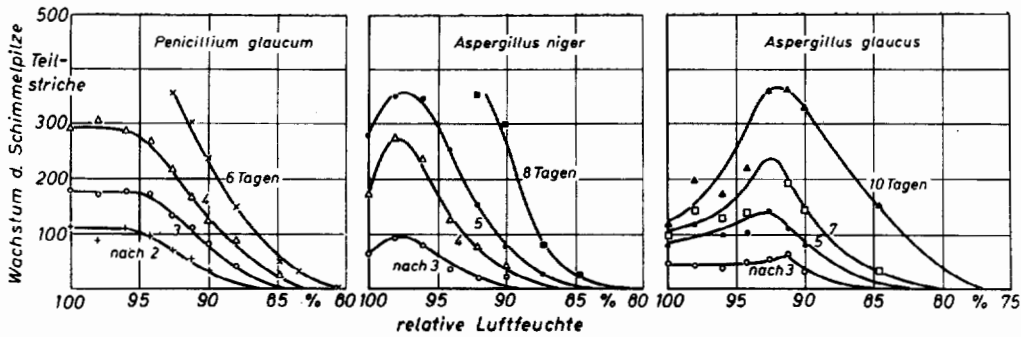


Bild 6: Wachstum von Schimmelpilzen bei unterschiedlicher Luftfeuchte (n. HEINTZELER)

die Entwicklung des Schimmels nur über eine festgelegte Zeitspanne vermeiden, so kann man diese Grenzwerte entsprechend überschreiten, wobei sich gezeigt hat, daß die Höhe der mikrobiologisch zulässigen Luftfeuchte eine Funktion der Zeit ist, und zwar, wie mehrere Verfasser festgestellt haben [10; 13; 14] nach folgendem Zusammenhang:

$$\text{Zeit} \sim \frac{1}{\text{rel. Feuchte}}$$

Untersuchungen von BARTON-WRIGHT [13] an Mehl und Müllerei-Erzeugnissen und von SNOW u. a. [14] an verschiedenen Futtermitteln bestätigen die gefundene Abhängigkeit. Bild 8 zeigt die ermittelten Zeiten bis zum Auftreten von Schimmel und eine daraus abgeleitete charakteristische Größe 10³/Tage in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte für mehrere Temperaturen, die die angegebene Gleichung erfüllen.

Eine Zusammenstellung der Kurven, die mehrere Autoren für die Keimung einzelner Arten oder das Auftreten verschiedener Schimmelpilze bei unterschiedlichen Luftfeuchten veröffentlichten, läßt in Bild 9 in auffälliger Übereinstimmung ähnliche Minimalwerte, wie oben angegeben, und eine starke Verkürzung der Schimmelzeit bei hohen Dampfgehalten der Luft erkennen. Die von DAWSON u. a. [15] aufgestellte Kurve, für die ein Trockenmasse-Abbau von 4,5 ‰ als signifikantes Merkmal für Schimmelbefall galt, fügt sich gut in die dargestellte Kurvenschar.

Betrachtet man schließlich die Hefen in bezug auf ihre Lebensbedingungen, so findet man mesophile wie auch deutlich xerophile Arten, die auch unterhalb von 70 % relativer Luftfeuchte noch Abbau und Verderb in Form von Gärung hervorrufen können. Besonders auf Konzentraten mit hohem Zuckeranteil wie zum Beispiel Fruchtsirup sind Hefen auch bei niedrigen Feuchten zu finden, wie man bei SCHELHORN [16] sieht (Bild 10), wo die Entwicklung von Zygosaccharomyces Barkeri auf Topimalz als Beispiel angeführt ist.

3.2. Grenzen der Temperatur

Bisher wurden nur die für die Entwicklung der Mikroorganismen notwendigen Bereiche der Feuchte in ihrer Umgebung betrachtet. Eine andere sehr wichtige Bedingung ist das Einhalten bestimmter Temperaturbereiche, in denen mikrobielles Leben existieren und sich entwickeln kann. Zu niedrigen Temperaturen hin ist die Verträglichkeit ziemlich groß, so daß auch Zustände mit Werten unterhalb des Gefrierpunktes ertragen werden, wengleich die Lebensfunktionen mit sinkender Temperatur zunehmend eingeschränkt und verlangsamt werden. In wärmerer Umgebung stellt sich

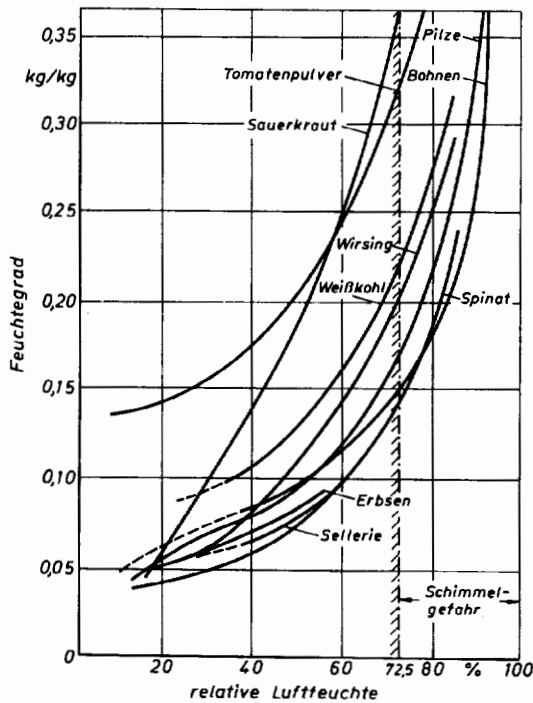
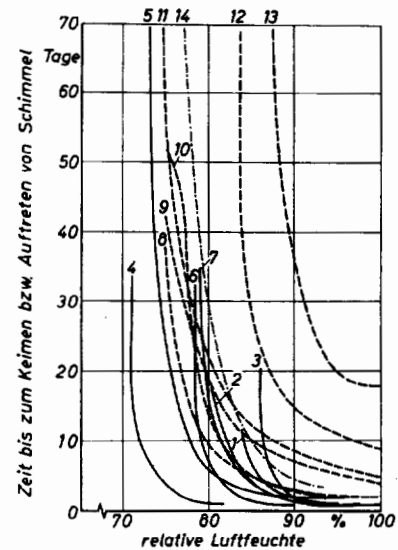


Bild 7: Sorptionsisothermen von Trockengemüsen bei 20° C mit Grenze für Schimmelgefahr (n. SCHELHORN)



- 1: n. Acker: Keimung v. *Aspergillus niger* auf Nährb. b. 25 °C
- 2: n. Acker: Keimung v. *Penicillium sartoryi* auf Nährb. b. 25 °C
- 3: n. Heintzeler: Keimung v. *Phycomyces* auf Nährb. b. 20 °C
- 4: n. Heintzeler: Keimung v. *Aspergillus glaucus* auf Nährb. b. 30 °C
- 5: n. Heintzeler: Keimung v. *Aspergillus glaucus* auf Nährb. b. 20 °C
- 6: n. Heintzeler: Keimung v. *Penicillium glaucum* auf Nährb. b. 20 °C
- 7: n. Heintzeler: Keimung v. *Aspergillus niger* auf Nährb. b. 20 °C
- 8: n. Snow u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Bohnen b. 10 °C
- 9: n. Snow u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Bohnen b. 22 °C
- 10: n. Snow u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Knochenmehl b. 10 °C
- 11: n. Snow u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Bohnen b. 15,5 °C
- 12: n. Barton-Wright u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Mehl b. 20 °C
- 13: n. Barton-Wright u.a. Auftreten verschied. Pilzart. auf Mehl b. 10 °C
- 14: n. Dawson u.a. TM-Abbau ~4,5% durch verschied. Pilzart. auf Luzerne b. 25 °C

Bild 8: Bereiche der Luftfeuchte für das Keimen beziehungsweise Auftreten von Schimmel

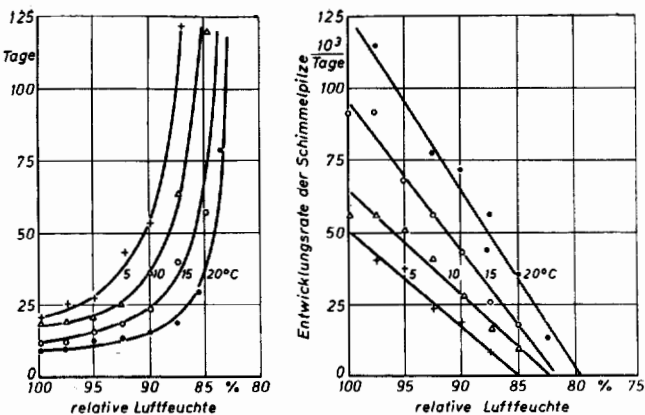


Bild 9: Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Zeit bis zum Auftreten von Schimmel
(n. BARTON-WRIGHT u. a.)

für Wachstum und Vermehrung der Mikroorganismen ein für jede Art spezifisches Optimum ein, das in einiger Entfernung unter der für die Lebensfunktionen höchst zulässigen Temperatur liegt. Je nach Temperaturverträglichkeit unterscheidet man die Mikroorganismen auch hier nach mesophilen Arten, die in Bereichen bis zu 35 bis 45 °C leben können, und thermophilen Arten, die besonders zwischen 30 und 55 bis 65 °C in den Vordergrund treten. Thermophile Bakterien sind sogar bis ca. 75 °C lebensfähig.

Innerhalb dieser Grenzen sind die Ansprüche an die relative Feuchte umso geringer, je näher die Temperatur dem günstigsten Wert für den jeweiligen Mikroorganismus kommt. Das bedeutet, daß das Feuchte-Spektrum, in dem eine Entwicklung stattfinden kann, umso breiter ist, je genauer der optimale Temperaturbereich eingehalten wird. STILLE [17] weist diesen Tatbestand für den Schimmelpilz *Aspergillus glaucus* anhand der für die Sporenkeimung erforderlichen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach (Bild 11). Die hier speziell interessierenden Schimmelpilze treten sowohl als mesophile wie als thermophile Arten auf, wie eine Zusammenstellung einiger wichtiger Vertreter durch COONEY [18] zeigt, die in Bild 12 wiedergegeben ist.

Für die Existenz der Mikroorganismen innerhalb ihrer Temperaturgrenzen ist es wichtig zu wissen, daß sie durch exotherme Lebensvorgänge Wärme erzeugen, die, wenn sie

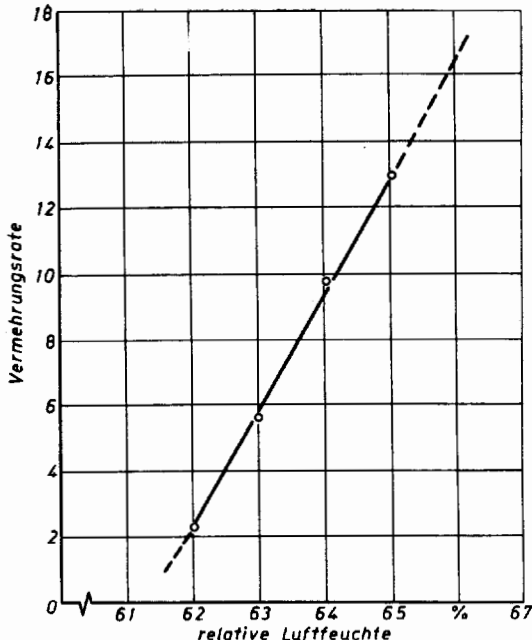


Bild 10: Vermehrung einer Hefezelle bei unterschiedlicher Luftfeuchte
(n. SCHELHORN)

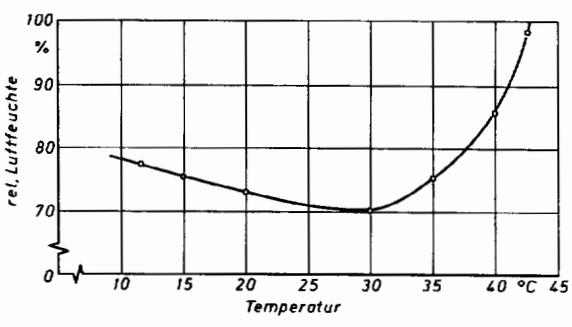


Bild 11: Grenze der Luftfeuchte für die Sporenkeimung von Schimmelpilzen
(n. STILLE)

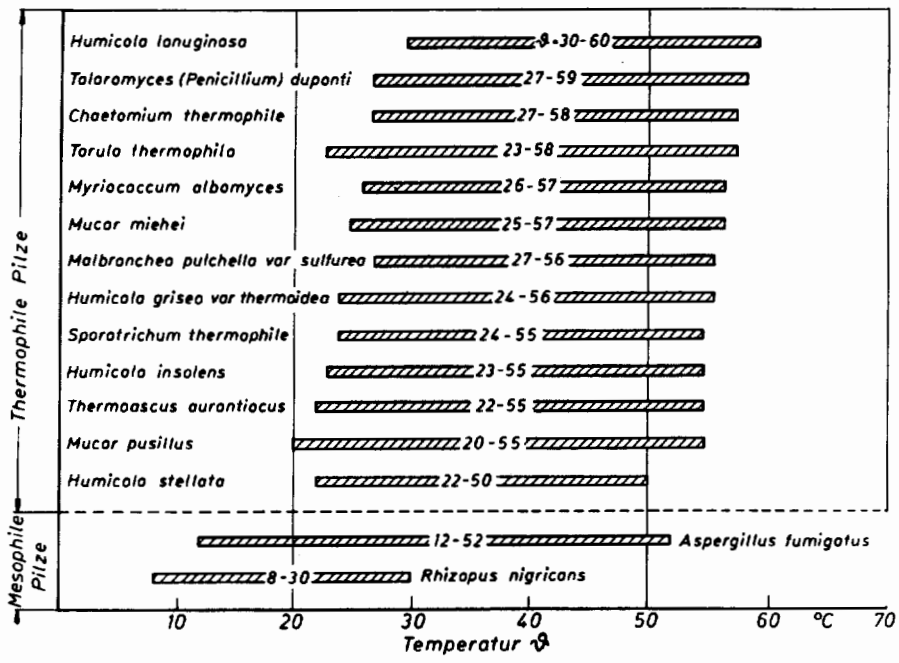


Bild 12: Temperaturbereiche für das Wachstum verschiedener Schimmelpilze
(n. COONEY u. EMERSON)

nicht abgeführt werden kann, zur Aufheizung ihrer Umgebung bis zum optimalen Wert und durch ein damit verbundenes beschleunigtes Wachstum bis zur Grenze ihrer Temperaturverträglichkeit führt.

In schlecht oder überhaupt nicht belüfteten Heustapeln oder Komposthaufen können dadurch mesophile Bakterien und Pilze die Temperatur bis auf Werte von 35 bis 45 °C treiben, thermophile Pilze erreichen 60 bis 65 °C und thermophile Bakterien sogar etwa 70 °C. Die Mikroorganismen erwärmen so ihr Lebensmilieu bis an ihre eigene Existenzgrenzen und sterben dann ab, während andere beständigere Arten weitere Wärme zuführen [19; 20]. NORMAN u. a. [21] zeigen einen solchen Temperaturanstieg und vergleichen den Gradienten mit der von den Mikroorganismen ausgeschiedenen Menge an CO₂, die als Maß für die Umsatzintensität angesehen werden kann. Dabei fällt, wie Bild 13 zeigt, auf, daß bei etwa 50 °C eine Unterbrechung im Temperaturanstieg zu verzeichnen ist, die auf einen Übergang von mesophilen zu thermophilen Populationen schließen läßt.

3.3. Andere lebensbegrenzende Daten

Neben der lebensnotwendigen Feuchtigkeit und der Temperatur haben auch andere Parameter einen Einfluß auf die Entwicklung mikrobiellen Lebens wie zum Beispiel der pH-Wert der umgebenden Substanz. Im allgemeinen begünstigt ein alkalisches bis schwach saures Milieu Wachstum und Verbreitung, jedoch vertragen einige Species auch Bedingungen bei sehr niedrigem pH-Wert. Durch Zugabe von Chemikalien bei der Futterbereitung versucht man, wie bei der chemischen Aufbereitung zum Beispiel mit Propionsäure, das Milieu der Mikroorganismen so zu verändern, daß ihre Lebensfunktionen unterbunden oder stark reduziert und verlangsamt werden [22], oder man selektiert unter den Populationen, indem man wie bei der Silagebereitung einen von gewünschten Species, beispielsweise Milchsäurebakterien, bevorzugten pH-Wert-Bereich einstellt [23; 24].

Die Mikroorganismen ihrerseits verändern ebenfalls ihre Umgebung, in dem sie zum Beispiel durch saure Stoffwechselprodukte den pH-Wert senken. Dabei läuft ein ähnlicher Prozeß wie bei der Erwärmung ab, wobei auch hier die Veränderungen das Maß der Verträglichkeit überschreiten und je nach erreichtem Säuregrad zum Absterben bestimmter Arten führen.

Eine andere Voraussetzung für das Auftreten und die Entwicklung mikrobieller Aktivität in Haufwerken landwirtschaftlicher Produkte ist die Sauerstoffzufuhr. Der überwiegende Teil der Mikroorganismen verhält sich aerob, nur unter bestimmten Bedingungen treten fakultativ anaerobe Stämme auf. Auch hier bieten sich Möglichkeiten der Beeinflussung an, wie sie bei der gasdichten Lagerung in Silos angewendet werden.

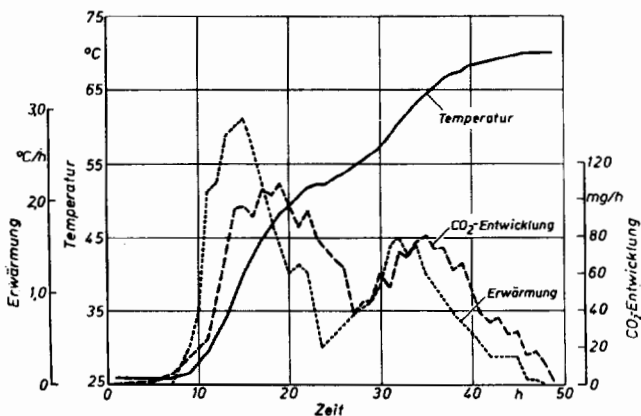


Bild 13: Zusammenhang zwischen Erwärmung und CO₂-Entwicklung bei adiabatischer Selbsterhitzung von Haferstroh (n. NORMAN u. a.)

4. Mikrobielle Aktivitäten im Halmgutstapel

Bei den mikrobiellen Umsetzungsprozessen organischer Bestandteile der gelagerten Produkte werden zum einen hauptsächlich Zucker und Stärke, zum anderen Proteine abgebaut. Sie dienen den Mikroorganismen als Bau- und Betriebsstoffe. Zellulose wird nicht oder nur in geringstem Umfang aufgespalten und zersetzt. Einige der möglichen Reaktionen seien hier angeführt:

Stärke → Zucker → organ. Säuren → H₂O und CO₂ (aerob),
Zucker → Fettsäuren oder Alkohol (anaerob),
Proteine → Ammoniak.

Man findet unter den Mikroben, soweit sie für die Trocknung und Lagerung landwirtschaftlicher Produkte von Bedeutung sind, keine sogenannten N-Bildner, das heißt Arten, die fähig sind, den Stickstoff der Luft zum Aufbau eigener Substanz zu verwerten, da dieser Stickstoff viel einfacher dem befallenen Gut entnommen werden kann.

Überträgt man die bisher zusammengefaßten Daten auf die Tätigkeit der Mikroorganismen in einem Halmgutstapel, so kann man einerseits darstellen, welche Umstände einer raschen Entwicklung förderlich sind, und andererseits die Umsetzungsvorgänge in etwa voraussagen. Wachstum und Verbreitung mikrobiellen Lebens und damit beschleunigte Zersetzung der organischen Substanz werden begünstigt durch

- hohe relative Luftfeuchte und eine nach der Sorptionsisotherme entsprechende hohe Gutsfeuchte,
- günstige Temperaturverhältnisse im Stapel durch Zufuhr temperierter Luft oder durch schlechte Wärmeabfuhr,
- leichte Erreichbarkeit der abzubauenen Stoffe wie z. B. bei freiem Saft, jungem oder aufbereitetem Halmgut, ausreichende Verfügbarkeit von Sauerstoff.

An den Stellen im Haufwerk, an denen die genannten Voraussetzungen herrschen, wie zum Beispiel in sogenannten „Feuchte-Nestern“, das heißt in schlecht belüfteten, meist örtlich verdichteten Bereichen, entwickelt sich dann folgender Prozeß:

Es setzt das Wachstum und die Vermehrung mesophiler Mikroorganismen ein, wobei bei hoher Feuchte stärker die Bakterien, bei geringerer Feuchte stärker die Schimmelpilze in den Vordergrund treten. Sie schaffen sich durch ihre Umsetzungstätigkeit ein für ihre Ansprüche günstiges Lebensmilieu in bezug auf Temperatur und pH-Wert. Durch Wärmerfreisetzung erhöht sich die Temperatur schließlich so weit, daß die Lebensgrenze erreicht wird, und die einzelnen mesophilen Arten absterben, was ein Verweilen im Temperaturanstieg bewirkt. Es entwickeln sich nun thermophile Pilze und Bakterien, die weitere Temperatursteigerungen bis auf 70 bis 75 °C auslösen können. In diesem Stadium, wenn auch diese Arten ihre Grenze erreicht haben, sind die Voraussetzungen für den Beginn exothermer chemischer Reaktionen gegeben, die eine weitere Temperaturerhöhung mit sich bringen und die, durch das Entstehen leicht brennbarer Gase mit niedrigem Flammpunkt unterstützt, die Gefahr der Selbstentzündung des Haufwerks aufkommen lassen [19]. Durch die Zerfallprodukte und die Ausbreitung der Mikroorganismen, zum Beispiel in Form von Pilzmycelen, werden die betroffenen Halmgutbereiche immer dichter und luftundurchlässiger, die Wärmeabfuhr verschlechtert sich zunehmend. Wenn man davon ausgeht, daß in diesen Stapelschichten, in denen das Material noch nicht auf Lagerfähigkeit abgetrocknet ist, Luftfeuchten herrschen, die die Entwicklung mikrobiellen Lebens begünstigen, so ist es interessant, die Ausbreitung in Abhängigkeit von der dort geltenden Temperatur zu untersuchen.

TERRY [3] hat versucht, die Grenze für das Auftreten sichtbaren Schimmels in trocknenden Futterstößen abhängig von der Temperatur an der Stelle des Schimmelbefalls darzustellen, wie Bild 14 zeigt. Er beobachtete die Schichten, in denen hohe Gut- und Luftfeuchten herrschten und in denen

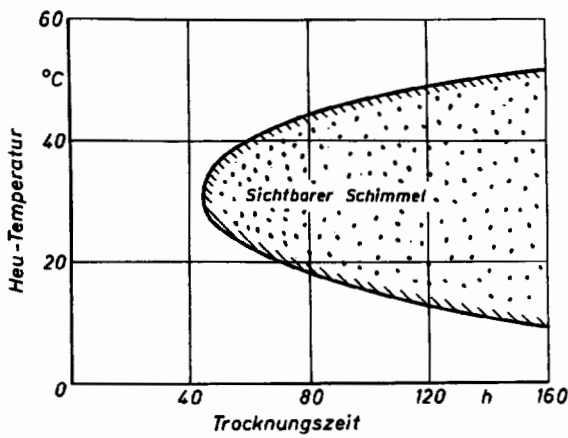


Bild 14: Schimmelgrenze für Anwelkgut im trocknenden Stapel (n. TERRY)

sich die zugeführte Warmluft bis auf ihre Sättigungstemperatur durch Aufnahme von Wasserdampf abgekühlt hatte.

Während das Gut bei Temperaturen um 30 °C binnen kürzester Zeit von Schimmel befallen wurde, verlängerten sich die für eine Trocknung zur Verfügung stehenden Zeitspannen unter 20 °C und über 40 °C zunehmend; für Werte über 50 °C blieb sogar sichtbarer Verderb aus, was allerdings Eingangstemperaturen der zugeführten Warmluft von etwa 145 °C erforderlich machte.

5. Eigene Versuche

5.1. Bestimmung einer Schimmelgrenze

Die eigenen Versuche¹⁾ gingen nicht von Messungen im trocknenden Stapel aus, sondern simulierten die Verhältnisse in den feuchten Zonen des Haufwerkes mit Hilfe eines Klimaschranks, in dem angewelktes Halmgut mit unterschiedlichen Ausgangsfeuchtegehalten einem Klima von 90 oder 95 % relativer Luftfeuchte und Temperaturen von 15 bis 45 °C ausgesetzt wurde. Dabei sollten sowohl die Grenze bis zum Auftreten sichtbaren Schimmels für Wiesengras festgestellt werden als auch Aussagen über Art und Ausmaß der während der Lagerung in feuchter Umgebung auftretenden Trockenmasseverluste bis zum Verderb ermöglicht werden. Zum letztgenannten Zweck lagerten mehrere Parallelproben im Klimaschrank, die in bestimmten Zeitintervallen entnommen und entsprechend untersucht wurden.

Die aus diesen Versuchsreihen gewonnenen Werte für die Schimmelgrenze sind in Bild 15 aufgetragen, wo abhängig von der Temperatur der stark wasserdampfhaltigen Abluft und des feuchten Gutes die Zeit bis zur sichtbaren Schimmelbildung aufgetragen ist. Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit wird durch die beiden Kurven $\varphi = 90$ und 95 % relativer Feuchte wiedergegeben; dabei stellt die dünn schraffierte Fläche vor der Kurve $\varphi = 95$ % einen Sicherheitsbereich dar, der zur Vermeidung von Verderb unberührt bleiben sollte. Gleichzeitig kann man in diesem Diagramm von der Temperatur der in einen Stapel eintretenden erwärmten Trocknungsluft je nach Außenluftzustand auf die entsprechende Sättigungstemperatur der Abluft und damit auf die Schimmelgrenze schließen.

Es stellte sich außerdem heraus, daß unterschiedliche Vorwelgrade bei der Einlagerung einen gewissen Einfluß auf diese Grenze haben. Sehr feuchtes Gut gab auch unter den gewählten Bedingungen Wasser ab, während trockeneres wiederbefeuchtet wurde, so daß sich bei Eintritt sichtbaren Verderbs diese Unterschiede weitgehend ausgeglichen hatten und der Feuchtegehalt dann immer bei ungefähr 30 bis 45 % lag. Dennoch fiel den Schimmelpilzen die Entwicklung auf Welkgut mit Feuchtegehalten über 35 % offensichtlich

¹⁾ Die Arbeiten wurden durch die Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglicht.

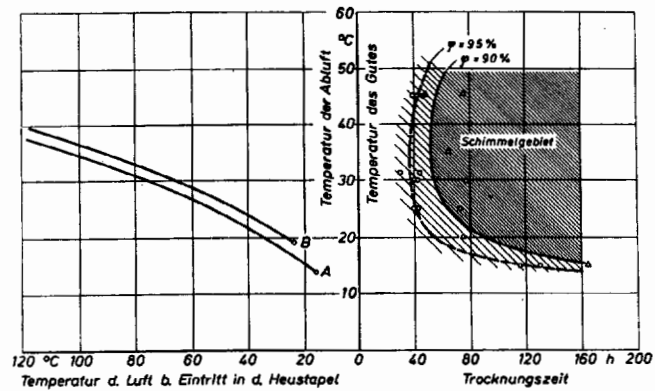


Bild 15: Schimmelgrenze für angewelktes Wiesengras in feuchter Atmosphäre

Umrechnung auf die eintretende Warmluft bei Außenluftzuständen
A: 15° C / 80 % rel. Feuchte
B: 25° C / 60 % rel. Feuchte

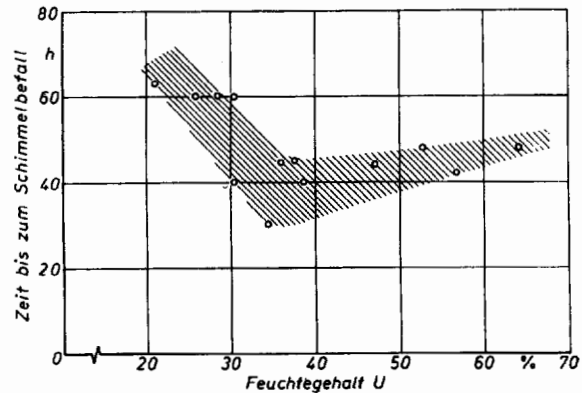


Bild 16: Zeit bis zum Schimmelbefall in feuchter Atmosphäre bei unterschiedlichem Welkgrad

$\vartheta = 25^\circ - 30^\circ \text{ C}$; $\varphi = 95$ % rel. Feuchte

leichter, wie Bild 16 verdeutlicht, als bei starker Vortrocknung auf Werte darunter, bei denen sich erst im Verlauf der Wiederbefeuchtung die Voraussetzungen für Wachstum und Verbreitung ergaben. Diese Feststellung stimmt mit den oben erwähnten Ansprüchen der Pilze an die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit ihrer Umgebung überein; der Gleichgewichtswert der relativen Luftfeuchte liegt für einen Feuchtegehalt von 35 % und darüber nach den Sorptionsisothermen von TUNCER [6; 25] bei $\varphi \geq 80$ %.

Für die Versuche wurde das vorgewelkte Gras unbehandelt eingelagert. Jede Art der Aufbereitung, die es den Mikroorganismen erleichtert, an die verdaulichen Bestandteile des pflanzlichen Materials zu gelangen, wie Fräsen, Kurzhäckseln, Quetschen und ähnliches, und alle Formen der Verdichtung, die ein Durchlüften erschweren und damit die Bildung eines mikrobiologisch günstigen Milieus erleichtern, können die Schimmelgrenze zu noch kürzeren Trocknungszeiten hin verschieben. Entsprechend kann eine Vorbehandlung des zu trocknenden Gutes mit mikrobiziden Stoffen wie Propionsäure die zur Verfügung stehende Behandlungszeit deutlich verlängern.

5.2. Bewertung der Trockenmasseverluste

Die Einlagerung mehrerer Parallelproben von gleichem Ausgangsmaterial in dem Klimaschrank ermöglichte es, zu bestimmten Zeitintervallen Proben dem feuchten Klima zu entnehmen und zu trocknen. Ein Vergleich des festgestellten Feuchtegehaltes mit dem des eingelagerten Welkgutes ließ Rückschlüsse auf den Trockenmasseverlust zu; anschließende Analysen zeigten bei Gegenüberstellung den Anteil der abgebauten Substanzen. Die Versuche wurden im allgemeinen bei Auftreten sichtbaren Schimmels beendet. Bei der Auswertung fallen dabei zwei Ergebnisse auf, nämlich einer-

seits der hohe Anteil an Trockenmasse, der schon abgebaut wird, ehe sichtbarer Verderb eintritt, andererseits der steile Anstieg der Verlustkurve, wie in Bild 17 zu sehen ist. Es muß hierbei auf chemische Umsetzungen in noch lebensfähigen Zellen und auf die rasch einsetzende mikrobielle,

vor allem bakterielle Entwicklung geschlossen werden, die innerhalb der ersten 40 Stunden je nach Wahl der Einflußfaktoren bis zu 10 % der im Gut vorhandenen Trockensubstanz verbrauchen. Damit entsprechen die gefundenen Werte denen, die BANTHIEN [26] für die Bodenheuerwerbung bei ungünstiger, das heißt feuchter Witterung gemessen und zusammengestellt hat, wie Bild 18 zeigt.

Schon in Bild 17 läßt die Schar der Meßpunkte einen Einfluß der Temperatur auf Geschwindigkeit und Ausmaß der Zersetzung erkennen, der durch die thermisch bedingten mikrobiellen Aktivitäten zu erklären ist. Das bedeutet, daß im optimalen Temperaturbereich für mesophile Mikroorganismen zwischen 20 und 35 °C auch maximale Verluste auftreten müssen. Bild 19 läßt erkennen, daß die Versuchsergebnisse diese Annahme bestätigen. Darüber hinaus zeigt es den Temperatureinfluß auf die beiden überwiegend vom Abbau betroffenen wertvollen organischen Bestandteile, nämlich Kohlenhydrate (N-freie Extraktstoffe) und Rohprotein einschließlich seiner Aufbaustoffe. Von der im Ausgangsmaterial enthaltenen Menge werden bei kühlerem Klima höhere Anteile an Kohlenhydraten, vor allem die leicht löslichen Bestandteile wie Zucker, zersetzt, bei wärmeren Verhältnissen steigt der Prozentsatz des abgebauten Rohproteins. Von den übrigen bei einer Weender Analyse feststellbaren Bestandteilen geht oft Rohfett verloren, sein Anteil am gesamten Trockenmasseverlust ist jedoch gering.

Daraus kann man schließen, daß bei niedrigeren Temperaturen als 25 bis 30 °C die Mikroorganismen bevorzugt Kohlenhydrate als Brennstoff zur Erzeugung von entwicklungsfördernder Wärme verbrauchen, im optimalen Temperaturbereich dagegen durch beschleunigtes Wachstum vermehrt Rohprotein abbauen und in körpereigene Substanzen umwandeln [27].

In den ersten Stunden nach der Einlagerung, in denen die Verluste stark zunehmen, vermindern sich vor allem die leicht löslichen Kohlenhydrate; der Abbau von Rohprotein entwickelt sich dagegen langsamer.

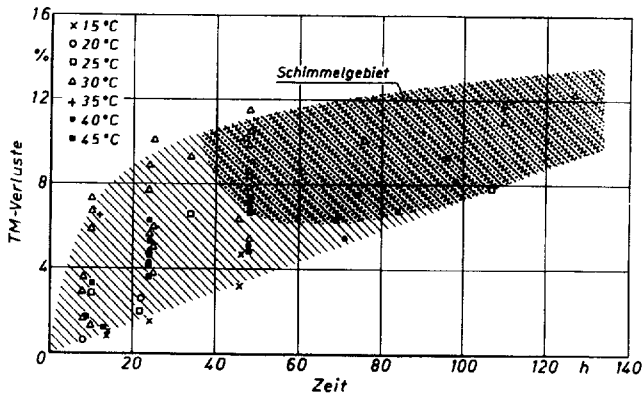


Bild 17: Trockenmasseverluste bei frischem und angewelktem Wiesengras in feuchter Atmosphäre
 $\vartheta = 15 - 45^\circ \text{C}$; $\varphi = 90 - 95\%$ rel. Feuchte

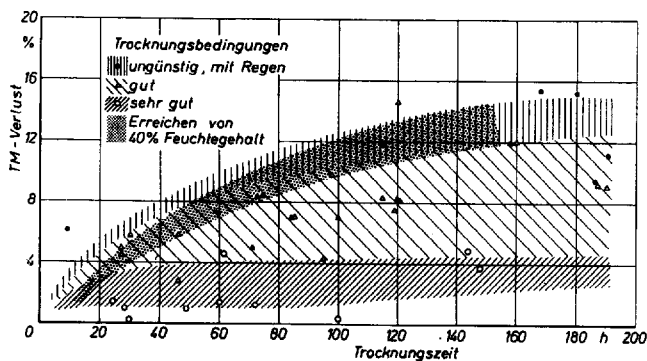


Bild 18: Trockenmasseverluste bei jungem Gras in der Bodenheuerwerbung
 (n. BANTHIEN)

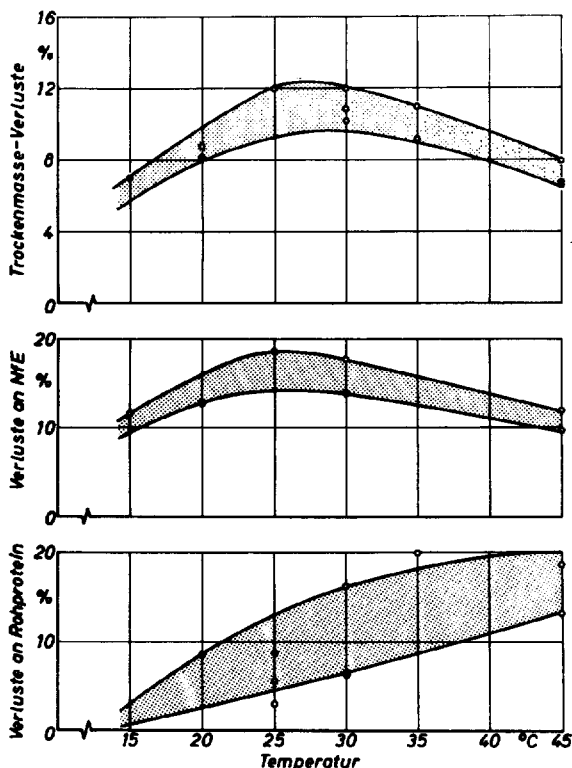


Bild 19: Verluste an Trockenmasse und ihren Bestandteilen bei Lagerung von Wiesengras in feuchter Atmosphäre
 $\tau = 100 \text{ h}$, $\varphi = 90 - 95\%$

6. Zusammenfassung

Faßt man die aus der Literatur ermittelten Erkenntnisse und die hier besprochenen Versuchsergebnisse zusammen, so wird folgendes deutlich:

Bei der Satz- und Lagerung landwirtschaftlicher Produkte wie bei ihrer Lagerung in feuchter Atmosphäre sind Verluste infolge von enzymatischen und nicht enzymatischen Umsetzungen im Gut, sowie von mikrobiellen Aktivitäten nicht zu vermeiden. Sie können vielmehr beträchtliche Ausmaße annehmen und zum totalen Verderb des Gutes führen.

Durch Steuerung der verfahrenstechnischen Einflußgrößen lassen sie sich jedoch einschränken; vor allem kann Verderb, beispielsweise durch Schimmelbildung, vermieden werden. Dabei gilt es, die wichtigsten Parameter wie Wasserverfügbarkeit, Temperatur, Sauerstoffzufuhr und pH-Wert in Bereichen zu halten, die außerhalb der für solche Abbauphenomene günstigen Grenzen liegen. Der Einfluß der einzelnen Größen auf chemische Reaktionen und mikrobiologische Entwicklungen ist besprochen worden.

Ganz allgemein bedeutet das, daß man den Verlusten vorbeugen kann, indem man die Wasserverfügbarkeit durch Trocknung, die Temperatur durch Gefrieren, die Sauerstoffzufuhr durch luftdichten Abschluß oder den pH-Wert durch Einsäuerung wie bei Silierung verringert. Alle diese Verfahren sind einzeln oder kombiniert bei der Behandlung unterschiedlicher biologischer Produkte in der Praxis auch außerhalb der Landwirtschaft anzutreffen.

Die Reduzierung der Wasserverfügbarkeit, das heißt die Verminderung des Feuchtegehaltes der Luft und damit gleichzeitig des Stoffes bei der Trocknung von Halmfutter, muß möglichst schnell erfolgen, um dem rasch ansteigenden Abbau wertvoller Gutsbestandteile entgegenzuwirken und

jeden Verderb auszuschließen. Maßnahmen, die geeignet sind, trocknungsbeschleunigend zu wirken, wie die Erwärmung der den Stapel durchströmenden Luft oder eine Aufbereitung des zu trocknenden Futters, können jedoch gleichzeitig die Entwicklung von Mikroorganismen begünstigen und die Umsetzungsprozesse intensivieren. Weit ungünstiger noch können sich Maßnahmen auswirken, die auch das zügige Fortschreiten der Trocknung beeinträchtigen wie jene modernen Arten der Halmfuttermittelverdichtung und -brikettierung, die es infolge mangelhafter Wärme- und Stoffaustausches in den komprimierten Zonen den Mikroorganismen erleichtern, sich innerhalb kürzester Zeit optimale Lebensbedingungen zu schaffen. Hier ist nach neueren Untersuchungen [28; 29; 30] zu hoffen, daß dieser Nachteil durch eine chemische Aufbereitung verbunden mit einer Verschiebung des pH-Wert-Bereichs ausgeglichen werden kann.

Schließlich gilt es, die Vorteile der einzelnen Maßnahmen und Verfahren gegen die dabei möglichen Nachteile und Verluste, vor allem aus ökonomischer Sicht, abzuwägen.

Die hier zusammengestellten Daten sollen dazu beitragen, diese Entscheidung zu erleichtern.

Schrifttum

- [1] SCHEUERMANN, A. u. G. ULREICH: Trocknungs- und Verlustvorgänge bei der Belüftung von Heustapeln mit Kaltluft. Landtech. Forschung 16 (1966) S. 100—104
- [2] WILKINSON, R. H. u. C. W. HALL: Respiration Heat of Harvested Forage. Transaction of the ASAE 9 (1966) S. 424—427
- [3] TERRY, C. W.: Relations of Time and Operation Schedule to Hay Quality, Mold Development, and Economy of Operation. Agricultural Engineering 28 (1947) S. 141—144
- [4] WIENEKE, F.: Technologische Grundlagen der Halmfuttermittel-trocknung. In: Berichte des 3. Kongresses der Europ. Grünlandvereinigung, Braunschweig 1969, S. 59—75
- [5] LEHMANN, D. u. D. HARTMANN: Schimmelbildung — eine Gefahr bei der Warmlufttrocknung von Halmfuttermitteln. Mitteilungen der DLG 31 (1970) S. 908/909
- [6] TUNGER, I. K.: Versuche zur Ermittlung des Trocknungsverhaltens einiger deutscher Futtergräser. Dissertation Göttingen 1968
- [7] MALTRY, W. u. E. PÖTKE: Landwirtschaftliche Trocknungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, S. 30—44
- [8] ACKER, L.: Enzyme Activity at Low Water Contents. Recent Advances in Food Science 3 (1963) S. 239—247
- [9] ACKER, L.: Enzymatic Reactions in Foods of Low Moisture Contents. Advances in Food Research 12 (1962) S. 263—330
- [10] CHRISTIAN, J. H. B.: Water Activity and the Growth of Mikroorganismen. Recent Advances in Food Science 3 (1963) S. 248—255
- [11] HEINTZELER, I.: Das Wachstum der Schimmelpilze in Abhängigkeit von den Hydraturverhältnissen unter verschiedenen Außenbedingungen. Archiv für Mikrobiologie 10 (1939) S. 92—132
- [12] v. SCHELHORN, M.: Control of Microorganisms Causing Spoilage in Fruit and Vegetables Products. Advances in Food Research 3 (1951) S. 429—482
- [13] BARTON-WRIGHT, E. C. u. a.: The Moisture Content and Growth of Mould in Flour, Bran and Middlings. Cereal Chemistry 17 (1940) S. 332—342
- [14] SNOW, D. u. a.: Mould Deterioration of Feeding — Stuffs in Relation to Humidity of Storage. Annals of Applied Biology 31 (1944) S. 102—116
- [15] DAWSON, J. E. u. R. B. MUSGRAVE: Effect of Moisture Potential on Occurrence of Mold in Hays. Agronomy Journal 42 (1950) S. 276—281
- [16] v. SCHELHORN, M.: Untersuchungen über den Verderb wasserarmer Lebensmittel durch osmophile Mikroorganismen. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung 91 (1950 a) S. 117—126
- [17] STILLE, B.: Grenzwerte der relativen Feuchtigkeit und des Wassergehaltes getrockneter Lebensmittel für den mikrobiellen Befall. Zeitschrift f. Lebensmittel-Untersuchung u. -Forschung 88 (1948) S. 9—12
- [18] COONEY, D. G. u. R. EMERSON: Thermophilic Fungi. Verlag Freeman & Co., San Francisco u. London 1964, S. 117—163
- [19] GIATHE, H.: Selbsterhitzung und Selbstentzündung von Erntestoffen und ihre Verhütung. Ergebnisse Landwirtschaftlicher Forschung 3 (1960) S. 83—98
- [20] NIESE, G.: Die Selbsterhitzung als mikrobiologisches Problem. In: Berichte des 3. Kongresses der Europäischen Grünlandvereinigung, Braunschweig 1969, S. 237—243
- [21] NORMAN, A. G. u. a.: Microbial Thermogenesis in the Decomposition of Plant Materials. Journal of Bacteriology 41 (1961) S. 689—724
- [22] WIENEKE, F. u. D. HARTMANN: Anwendung von Propionsäure zur chemischen Aufbereitung von Halmfuttermitteln. Landtechnische Forschung 19 (1971) S. 23—25
- [23] DANIEL, P.: Anwendung chemischer Mittel zum Vorwelken. Landtechnik 26 (1971) S. 312—314
- [24] DANIEL, P. u. a.: Wirkung von Propionsäure bei der Gärfutter-sillierung. Das wirtschaftseigene Futter 16 (1970) S. 239—252
- [25] TUNGER, I. K., u. a.: Das Trocknungsverhalten einiger Futtergräser. Grundlagen der Landtechnik 20 (1970) S. 38—44
- [26] BANTHJEN, P.: Versuche mit verschiedenen neuen Halmfuttermittelaufbereitungsmaschinen in der Bodenheutrocknung. Dissertation Göttingen 1969
- [27] GIATHE, H. u. a.: Beiträge zur Biologie des Brikollare-Verfahrens. Städtehygiene 7 (1964) S. x—y
- [28] JEBENS, K.: Kommt der Vollernter auch für Gras? Deutsche Landwirtschaftliche Presse 94 (1971) H. 10, S. 5
- [29] ZIMMER, E.: Neues zur Halmfuttermittelkonservierung. Deutsche Landwirtschaftliche Presse 94 (1971) H. 10, S. 6
- [30] WIENEKE, F. u. H. G. CLAUß: Neuere Verfahren der Halmfuttermittelaufbereitung. Grundlagen der Landtechnik 21 (1971) S. 161—165

Aus dem Schrifttum

Deutsche Agrargeschichte

Vor- und Frühgeschichte vom Neolithikum bis zur Völkerwanderungszeit

(Band I des Werkes „Deutsche Agrargeschichte“. Herausgeber: Professor Dr. GÜNTER FRANZ)

Von Professor Dr. HERBERT JANKUHN, Göttingen, 300 Seiten mit 83 Abb. und 16 Bildtafeln. Ln. DM 50,60, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1969.

Prof. JANKUHN behandelt in seinem Werk „Vor- und Frühgeschichte vom Neolithikum bis zur Völkerwanderungszeit“ die Landwirtschaftsgeschichte und auch die gesamten Lebensaspekte unserer Vorfahren in vor- und frühgeschichtlicher Zeit. Es liegt hier eine systematisch geordnete Darstellung der umfangreichen Fundergebnisse aus den verschiedensten Landschaften Europas vor.

Die seit den zwanziger Jahren in die Wege geleiteten großen Ausgrabungen in Mitteleuropa an Siedlungen und Burgen haben zunehmend das Forschungsinteresse auf eine im weiteren Sinne „historische“ Fragestellung gelenkt. Die Untersuchung an Burgen belebt das Interesse für die politischen und sozialen Zusammenhänge, und die Grabungen auf den großen Handelsplätzen ließen die Erkenntnismög-

lichkeiten für frühen Handel und altes Handwerk deutlich werden; die Erforschung bäuerlicher Ansiedlungen stellten Fragen der vorgeschichtlichen Landwirtschaft und des Siedlungswesens in den Mittelpunkt des archäologischen Forschungsinteresses.

So können jetzt die ersten sicheren Schritte aus dem Bereich der Formenkunde, Typenlehre und kunstgeschichtlicher Zusammenhänge heraus in andere Gebiete, wie Siedlungswesen, Gesellschaftsordnung, Handwerk, Handel, Religion und Landwirtschaft, gewagt werden.

Bei der Lektüre dieses Werkes wird deutlich, wie wenig das frühe Mittelalter einen neuen Anfang bedeutet, wie stark dagegen die Verwurzelung in älteren Zuständen ist. Auf dem Gebiet früher Landwirtschaft hat die Archäologie in Zusammenarbeit mit natur- und geisteswissenschaftlichen Disziplinen mehr als ein „Vorspiel“, nämlich eine wirkliche Grundlegung der Verhältnisse der „historischen Zeit“ enthält.

Es wurde eine Darstellungsform gefunden, die wie die in jüngster Zeit zahlreich erschienenen populären Bücher über vorgeschichtliche Themen für breite Kreise lesbar ist, aber auf einem streng wissenschaftlichen Hintergrund aufgebaut ist.