

Landwirtschaftliche Trocknung

Das Produktionsaufgebot für unsere sozialistische Landwirtschaft gipfelt in dem Ziel, mehr und besser zu ernten bzw. zu produzieren und dabei mit Hilfe der fortschrittlichen Technik nicht nur die Arbeit zu erleichtern und zu beschleunigen, sondern auch die Erträge möglichst verlustfrei einzubringen. Für die Futtermittelherstellung heißt das außerdem noch, auch die im Erntegut vorhandenen Nährstoffe durch Anwendung neuzeitlicher Konservierungsmethoden weitgehend zu erhalten. Der technischen Trocknung kommt dabei außerordentliche Bedeutung zu, weil bei ihrer richtigen Anwendung die Eiweiß- und Karotinverluste am geringsten sind.

In richtiger Erkenntnis der sich hier bietenden Möglichkeiten hat der Arbeitsausschuß „Landwirtschaftliche Trocknung“ im Fachverband „Land- und Forsttechnik“ der KDT schon frühzeitig für die technische Trocknung vor allem des Grünfutters geworben und in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit mit den zuständigen Abteilungen des Ministeriums für Landwirtschaft, Erfassung und Forstwirtschaft sowie den Betrieben der Industrie die breite Einführung der technischen Trocknung in der Landwirtschaft gefördert. Die im Verlauf der letzten fünf Jahre dabei von diesem Gremium veranstalteten Trocknungstagungen und Erfahrungsaustausche haben inzwischen internationalen Ruf erlangt und breite Anerkennung gefunden. Die bahnbrechende Tätigkeit dieses Ausschusses und seines Vorsitzenden, Dr. E. PÖTKE, bei der Vermittlung von Erfahrungen veranlaßte die Ungarische Agrarwissenschaftliche Gesellschaft, Dr. PÖTKE für die den ungarischen Landwirtschaftswissenschaftlern gegebene Unterstützung bei der Einführung der technischen Trocknung in Ungarn mit einer hohen Auszeichnung zu ehren.

Auch die vom 12. bis 14. Januar 1962 in Leipzig veranstaltete 5. Internationale Trocknungstagung brachte wiederum viele Anregungen für die über 400 Teilnehmer. Wir haben darüber bereits in unserem Heft 3/1962 (S. 115) berichtet. Aus den zahlreichen Vorträgen während dieses Erfahrungsaustausches bringen wir nun im vorliegenden und im folgenden Heft Auszüge und Abhandlungen vor allem über die Grünfuttertrocknung und Heubelüftung. An den Beginn dieser Aufsatzreihe stellen wir einen Artikel von Ing. E. HLAWITSCHKA, in dem er die graphische Berechnung von Trocknungsvorgängen mit Hilfe des Mollier- i, x -Diagramms erläutert. Auch für unsere Praktiker ist dieses Verfahren geeignet. Dr. ST. PABIS, Warschau, berichtet über die Grünfuttertrocknung in Polen und den USA und untersucht dabei Probleme, die sich aus der Ungleichartigkeit des zu trocknenden Gutes und aus den verschiedenen Trocknungsvarianten ergeben. Die Anwendung der Heißlufttrocknung in der ungarischen Landwirtschaft ist das Thema von Dipl.-Landw. J. DETRE, Budapest, während Dipl.-Ing. G. REUMSCHÜSSEL einige Hinweise für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der künstlichen Grünfuttertrocknung gibt.

In unserem Mai-Heft wird dieser Aufsatzkomplex mit mehreren Artikeln über Fragen der Heubelüftung fortgesetzt. Wir verbinden damit Beiträge über Grünlandwirtschaft bzw. Heuwerbung. Die Redaktion

Ing. E. HLAWITSCHKA, KDT*)

Die Anwendung des Mollier- i, x -Diagramms in der Trocknungstechnik

Die Trocknungstechnik verlangt von jenen, die sich mit den Grundlagen der Wasserverdampfung bzw. -verdunstung, der Aufstellung von Wärmebilanzen von Trocknern, der Ermittlung der Zustandsänderung des die Trocknung bewirkenden Gemisches von Luft und Wasserdampf usw. befassen, zum Teil einen erheblichen Aufwand an Rechenarbeit, da die zu benutzenden Formeln mitunter recht kompliziert aufgebaut sind. Gerade dann, wenn mehrere Varianten zu untersuchen sind oder der Einfluß der Veränderung einer Zustandsgröße ermittelt werden soll, steigt der Zeitaufwand für die Berechnungen und die Übersichtlichkeit leidet.

Im folgenden soll deshalb die graphische Berechnung von Trocknungsvorgängen mit Hilfe des von Mollier entwickelten i, x -Diagramms für feuchte Luft näher erläutert werden. Mit Hilfe dieses Diagramms lassen sich fast alle in der Trocknungstechnik vorkommenden Berechnungen durchführen. Man kann in anschaulicher Weise den Zustandsverlauf des Trocknungsmediums erkennen und daraus sofort Rückschlüsse auf eventuell notwendige Veränderungen ziehen. Obwohl die Handhabung recht einfach ist, wird dieses Verfahren unverständlicherweise recht wenig benutzt. Auch der interessierte Praktiker kann bei einiger Übung einfache Aufgaben aus der Trocknungstechnik lösen.

1. Aufbau des i, x -Diagramms

Um das Folgende auch für den wenig Vertrauten verständlich zu machen, soll zunächst der Aufbau des i, x -Diagramms kurz beschrieben werden. Dabei wird zum leichteren Verständnis alles Überflüssige und Erschwerende beiseite gelassen. Der

*) Institut für Landtechnik der Universität Rostock (Direktor: Prof. Dipl.-Ing. E. PÖHLIS).

stärker interessierte Leser sei auf die angeführte Literatur verwiesen.

Das als Trockenmittel verwendete Medium ist in den meisten Fällen ein Gemisch aus Luft und Wasserdampf. Die Eigenschaften dieses Gemisches werden insbesondere durch zwei Größen, nämlich die Enthalpie (früher auch Wärmeinhalt genannt) und den Wasserdampfgehalt charakterisiert. Andere

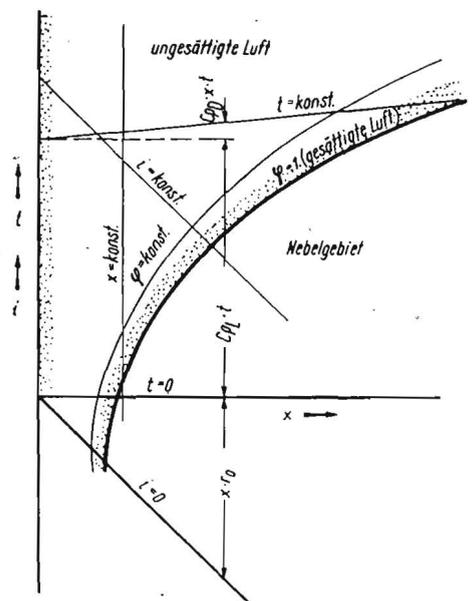


Bild 1. Schematischer Aufbau des i, x -Diagramms für feuchte Luft

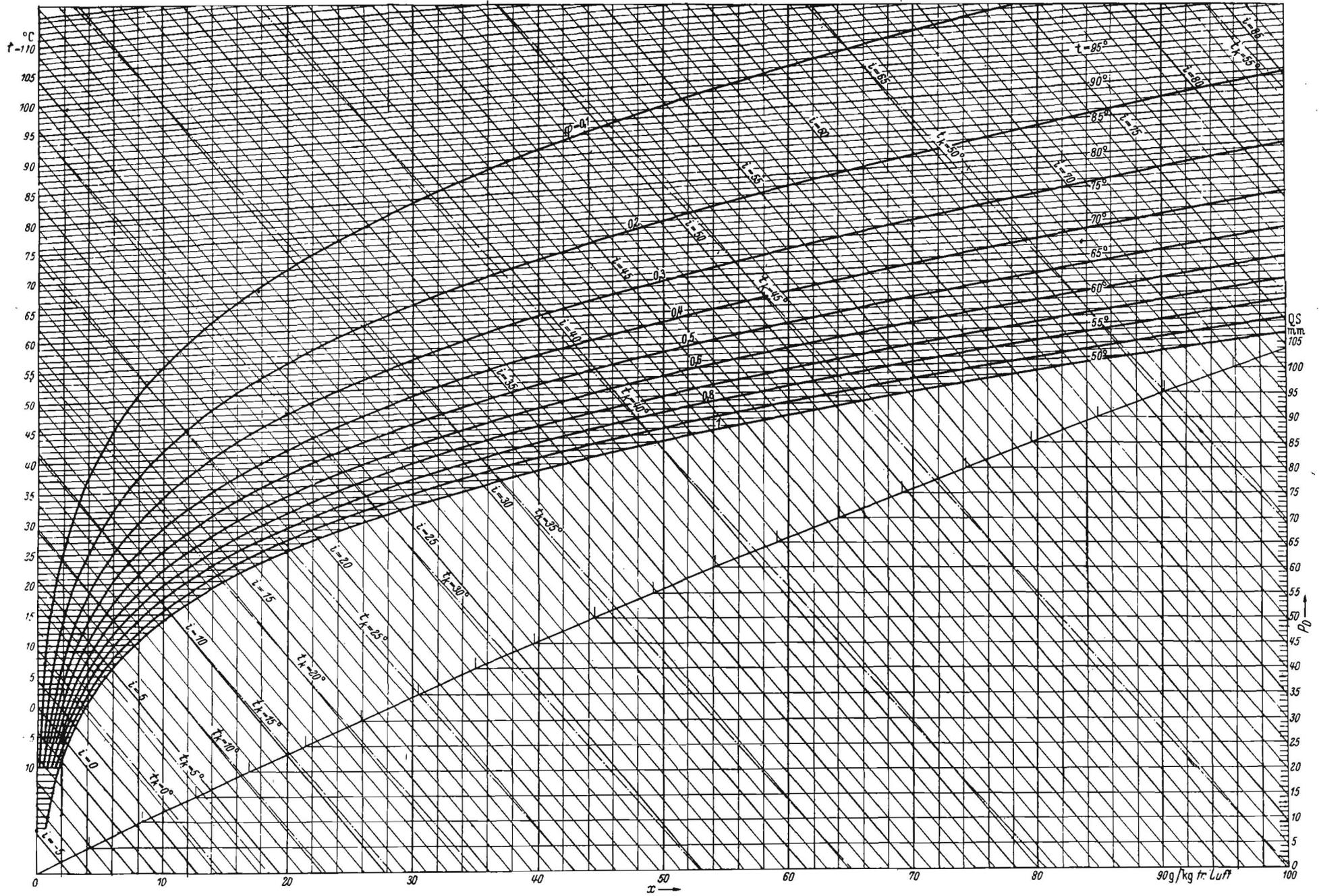


Bild 2. Mollier-i,x-Diagramm für feuchte Luft ($P = 750$ Torr)

Größen, wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wasserdampfdruck, sind bei einem bestimmten Gesamtdruck (das i, x -Diagramm ist meist für 750 Torr aufgestellt) eindeutig den beiden erstgenannten Größen zugeordnet. Daher werden die Enthalpie i [kcal/kg trockene Luft] und der Wassergehalt x [kg Wasser/kg trockene Luft] auch als Koordinaten für das i, x -Diagramm benutzt. Das Koordinatensystem ist von Mollier nicht rechtwinklig gewählt worden, da in diesem Fall das am häufigsten zu betrachtende Gebiet im Diagramm zu klein und das Ablesen zu ungenau wird.

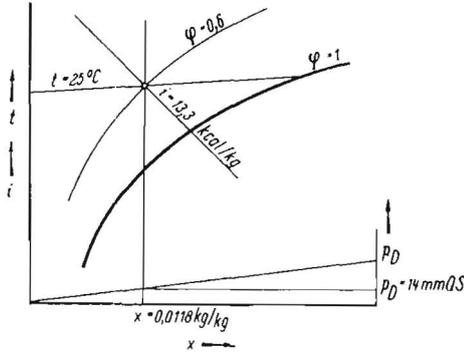


Bild 3. Zustandspunkt im i, x -Diagramm

Das Diagramm (Bild 1) läßt sich nach der für ungesättigte Luft geltenden Formel

$$i = x \cdot r_0 + c_{pL} \cdot t + c_{pD} \cdot x \cdot t = c_{pL} \cdot t + x(r_0 + c_{pD} \cdot t) \quad [\text{kcal/kg}] \quad (1)$$

- mit r_0 Verdampfungswärme [kcal/kg]
- c_{pL} mittl. spez. Wärme der Luft bei konstantem Druck [kcal/kg °C]
- c_{pD} mittl. spez. Wärme des Wasserdampfes bei konst. Druck [kcal/kg °C]
- t Temperatur [°C]

aufbauen, wobei sich der Wasserdampf im überhitzten Zustand befinden muß. Die Temperatur wird hier als Parameter benutzt. Man stellt in Bild 1 und 2 folgende Merkmale fest:

- a) Die Linien konstanten Wassergehalts ($x = \text{konst.}$) sind Senkrechte.
- b) Die Linien konstanter Enthalpie ($i = \text{konst.}$) sind nach rechts abfallende gerade Linien, die einander parallel sind.
- c) Die Linie $t = 0$ ist eine Waagerechte. Für $t > 0$ ergeben sich Geraden ($t = \text{konst.}$), die mit zunehmender Temperatur eine Vergrößerung des Neigungswinkels der Isothermen gegenüber der Waagerechten aufweisen.
- d) Das Gebiet der ungesättigten Luft (rel. Luftfeuchtigkeit $\varphi < 1$) wird gegenüber dem Nebelgebiet durch die Linie $\varphi = 1$ (gesättigte Luft) abgegrenzt. Die Linien konstanter rel. Luftfeuchtigkeit ($\varphi = \text{konst.}$) lassen sich mit Hilfe der Formel

$$x = 0,622 \frac{P_s}{P - \varphi \cdot P_s} \quad [\text{kg/kg}] \quad (2)$$

- φ rel. Luftfeuchtigkeit
- P Gesamtdruck [Torr]
- P_s Druck des gesättigten Wasserdampfes [Torr] einzeichnen.

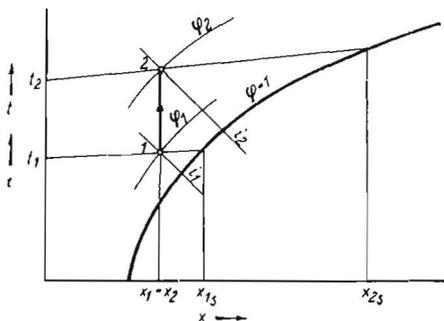


Bild 4 Darstellung der Lufterwärmung im i, x -Diagramm

Bild 5 Darstellung der Mischung zweier Luftmengen im i, x -Diagramm

An einem Beispiel soll nun das Ablesen der einzelnen Zustandsgrößen im i, x -Diagramm erläutert werden: Luft von 25 °C habe eine rel. Luftfeuchtigkeit von 60%. Nach dem im Bild 3 gekennzeichneten Schema liest man aus Bild 2 für $t = 25$ °C und $\varphi = 0,60$ ab:

- $x = 0,0118$ [kg/kg trock. Luft]
- $i = 13,3$ [kcal/kg trock. Luft]
- $p_D = 14,0$ [mm QS] Teildruck des Wasserdampfes

2. Darstellung der Zustandsänderungen der Luft im i, x -Diagramm

Die Zustandsänderungen der Luft, die diese während des Trocknungsprozesses bzw. auch vor und nach diesem erfährt, lassen sich im i, x -Diagramm einfach und übersichtlich verfolgen. Eine Vielzahl wichtiger Vorgänge der Trocknungstechnik kann man durch geradlinige Verbindung zweier gegebener Zustandspunkte darstellen. Hier sollen nur die Zustandsänderungen erläutert werden, die in der Trocknungstechnik große praktische Bedeutung besitzen und des öfteren vorkommen.

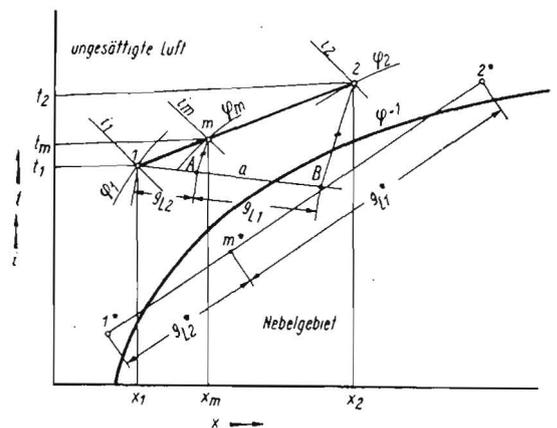
2.1. Erwärmung der Luft in Wärmeaustauschern zum Zwecke der Verbesserung ihrer Trocknungseigenschaften (indirekte Lufterwärmung)

In vielen Fällen wird die Luft, bevor sie in den Trockner gelangt, in einem Wärmeaustauscher vorgewärmt. Dieser Vorgang läßt sich im i, x -Diagramm einfach darstellen (Bild 4). Die dem Wärmeaustauscher mit der Temperatur t_1 zugeführte Luft erwärmt sich auf t_2 , wobei der Wasserdampfgehalt x konstant bleibt ($x_1 = x_2$). Der Zustandspunkt 2 liegt senkrecht über 1. Dabei ist die rel. Luftfeuchtigkeit gesunken ($\varphi_2 < \varphi_1$), d. h., das Wasseraufnahmevermögen der Luft hat sich verbessert, denn die Strecke $\overline{x_1 x_{2s}}$ ist größer als $\overline{x_1 x_{1s}}$.

Ein Beispiel aus der Praxis soll wieder angeführt werden: Bei der Belüftungstrocknung von Getreide mit Warmluft soll in vielen Fällen eine Untertrocknung, d. h. Absenkung der Kornfeuchtigkeit unter 12% vermieden werden. Aus den Sorptionsisothermen (siehe [1] [3] [8] [11]) entnimmt man, daß dann die rel. Luftfeuchtigkeit nicht unter 50% absinken darf. Zu klären ist also die Frage, um wieviel °C Luft von z. B. $t_1 = 15$ °C und $\varphi_1 = 0,80$ höchstens vorgewärmt werden darf. Aus dem i, x -Diagramm (Bild 2) entnimmt man sofort, nachdem der Zustandspunkt 1 für t_1 und φ_1 aufgesucht wurde, auf der Senkrechten über 1 für $\varphi_2 = 0,50$ $t_2 = 22$ °C. Die Luft darf also um 7 °C vorgewärmt werden. Des weiteren kann man ablesen (Vergleich der Strecken $\overline{x_1 x_{1s}}$ und $\overline{x_1 x_{2s}}$), daß sich durch die Lufterwärmung das Wasseraufnahmevermögen theoretisch etwa verdreifacht hat. Hieraus erkennt man die große Bedeutung der Lufterwärmung für den vorliegenden Fall.

2.2. Mischung zweier Luftmengen

In der Trocknungstechnik treten Fälle auf (Getreidetrocknung, Kartoffeltrocknung usw.), wo noch nicht völlig verbrauchte Abluft im sogenannten Umluftbetrieb der Frischluft zugemischt wird. Auch hier kann man die Verhältnisse mit Hilfe des i, x -Diagramms schnell übersehen.



Es sollen zwei Luftmengen g_{L1} und g_{L2} mit den Temperaturen t_1 und t_2 und den Wasserdampfgehalten x_1 und x_2 unter der Voraussetzung miteinander gemischt werden, daß Wärmeverluste nach außen nicht auftreten. Mit Hilfe der Stoff- und Energiebilanz, deren mathematische Auswertung hier übergangen werden soll, erhält man folgende Beziehung:

$$\frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1} = \frac{g_{L1}}{g_{L2}} = \frac{\text{Strecke } \overline{m2}}{\text{Strecke } \overline{m1}} \quad (3)$$

Der Index m kennzeichnet den Zustand der Mischung

In Worte gefaßt besagt diese Beziehung, daß die gerade Verbindungslinie zwischen den Zustandspunkten 1 und 2 im umgekehrten Verhältnis der beiden Luftmengen geteilt wird. Der Zustandspunkt m der Mischung liegt auf einer Geraden und läßt sich somit leicht bestimmen (Bild 5). Man zieht zu diesem Zwecke eine beliebige Gerade a z. B. durch den Punkt 1, trägt auf dieser g_{L2} und g_{L1} in einem beliebigen Maßstab ab und verbindet B mit 2. Eine Parallele zu $\overline{B2}$ durch A ergibt sofort den Zustandspunkt m der Mischung auf der Geraden $\overline{12}$, womit auch t_m , φ_m , x_m und i_m ermittelt sind.

Bei der Mischung zweier Luftmengen lassen sich noch folgende Besonderheiten herausstellen:

- Liegen die Zustandspunkte 1 und 2 auf einer Linie $t = \text{konst.}$ bzw. $x = \text{konst.}$ bzw. $i = \text{konst.}$, so liegt auch der Punkt m nach der Mischung auf dieser.
- Haben die Mischungsanteile vor der Mischung gleiche rel. Luftfeuchtigkeit, jedoch unterschiedliche Temperaturen, so ist die rel. Luftfeuchtigkeit nach der Mischung stets größer als vorher.
- Schneidet die geradlinige Verbindung der Punkte 1* und 2* (Bild 5) unter gegebenen Umständen die Sättigungslinie ($\varphi = 1$), so stellt sich bei entsprechenden Masseverhältnissen g_{L1}^* und g_{L2}^* Nebelbildung ein, was aus Bild 5 sofort zu erkennen ist. Nebelbildung tritt immer auf, wenn gesättigte Luftmengen ($\varphi_1 = 1$, $\varphi_2 = 1$) von beliebiger Temperatur miteinander gemischt werden.

Die Mischung zweier Luftmengen soll an einem Beispiel im i, x -Diagramm erläutert werden: Beim Betrieb von Belüftungsanlagen für Heu oder Getreide stellt man mitunter fest, daß infolge ungünstiger Anordnung der Abluftluken ein Teil der ausströmenden und zum großen Teil gesättigten Abluft erneut vom Ventilator angesaugt wird. Dadurch verschlechtert sich das Wasseraufnahmevermögen, was nun bewiesen werden soll. Der Zustand der Frischluft sei $t_1 = 25^\circ\text{C}$ und $\varphi_1 = 0,50$. Es wird angenommen, daß 20% der Abluft mit $t_2 = 25^\circ\text{C}$ und $\varphi_2 = 0,95$ vom Ventilator erneut angesaugt, d. h. der Frischluft zugemischt wird. Zur Bestimmung der rel. Luftfeuchtigkeit der Mischluft sucht man im i, x -Diagramm zunächst die durch t und φ festgelegten Zustandspunkte 1 und 2 auf und verbindet sie durch eine Gerade. Durch 1 wird nun eine beliebige Gerade gelegt, auf der von 1 ausgehend, zunächst $1/5$ (20%), dann $4/5$ (80%) einer beliebig gewählten Strecke abgetragen werden. Mit Hilfe der weiter oben beschriebenen Parallelenkonstruktion findet man dann den Punkt m und damit $\varphi_m = 0,59$. Man erkennt, daß sich die rel. Luftfeuchtigkeit um 9% erhöht hat, was zu einer wesentlichen Verschlechterung der Trocknung führt.

2.3. Temperaturveränderung der Luft bei gleichzeitiger Feuchtigkeitsaufnahme beim Durchgang durch das zu trocknende Gut

Während des Durchtritts der Luft durch das zu trocknende Gut nimmt sie infolge ihres Sättigungsdefizits Wasser aus diesem auf. Sie verändert also ihren Zustand, d. h. der Wassergehalt x nimmt zu und die Temperatur t verringert sich infolge des Bedarfs an Wärme für die Verdunstung. Außerdem kann sich der Wärmehalt i der Luft ändern. Im allgemeinen kann man jedoch annehmen – ohne nennenswerte Fehler zu begehen –, daß in dem niedrigen Temperaturbereich $i = \text{konst.}$ bleibt. Die Zustandsänderung bei Wasseraufnahme verläuft dann also in Richtung bzw. parallel zu den Linien $i = \text{konst.}$ (Bild 6).

Unter Anwendung dieser Erkenntnisse läßt sich nun mit Hilfe des i, x -Diagramms die je kg bzw. je m^3 Luft abgeführte Wassermenge leicht bestimmen. Ein Beispiel aus der Heubelüftungstrocknung sei hier angeführt. Luft von $t_1 = 82^\circ\text{C}$ und $\varphi_1 = 0,60$ werde vom Ventilator angesaugt und verlasse mit $\varphi_2 = 0,90$ den Heustapel. Welche Wassermenge wird abgeführt und wie weit kühlt sich die Luft ab? Für den Zustandspunkt 1 (t_1, φ_1) liest man im i, x -Diagramm $x_1 = 0,010 \text{ kg/kg}$ ab. Vom Zustandspunkt 1 ausgehend verfolgt man nun eine Linie $i = \text{konst.}$ bis zum Schnittpunkt 2 mit der Linie $\varphi_2 = 0,90$. Hierfür liest man $x_2 = 0,0117 \text{ kg/kg}$ und $t_2 = 18^\circ\text{C}$ ab. Während sich die Luft also um 4°C abkühlt, werden je kg hindurchgeblasener trockener Luft $\Delta x = x_2 - x_1 = 11,7 - 10,0 = 1,7 \text{ g}$ Wasser aus dem Heu abgeführt. Bei einer Dichte der Luft von $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ nimmt jeder m^3 Luft $1,2 \cdot 1,7 \approx 2,05 \text{ g}$ Wasser auf. Der spezifische Luftbedarf (Luftmenge, die zur Auftrocknung von 1 kg Wasser gebraucht wird) errechnet sich zu

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{0,0017} = 588 \text{ kg Luft/kg Wasser} \quad (4)$$

Das Wasseraufnahmevermögen der Luft ist je nach Witterung und Tageszeit verschieden. Im Mittel erreicht man bei der Belüftung mit Kaltluft an der Küste $\Delta x = 1,5 \text{ g/m}^3$, in

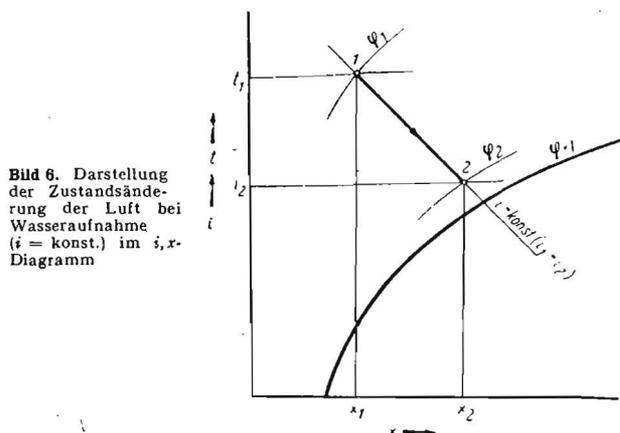


Bild 6. Darstellung der Zustandsänderung der Luft bei Wasseraufnahme ($i = \text{konst.}$) im i, x -Diagramm

Mitteldeutschland $\Delta x = 2$ bis $2,5 \text{ g/m}^3$ und in Gebirgslagen $\Delta x = 1,0 \text{ g/m}^3$. Mit der Fixierung von Δx läßt sich nun die Laufzeit eines Ventilators für die Heubelüftung bei gegebener Heumenge und bekanntem Wassergehalt berechnen. Liegen auf einer Heubelüftungsanlage z. B. $M = 15000 \text{ kg}$ Feuchtheu mit $a = 40\%$ Wassergehalt und soll das trockene Heu nur $e = 20\%$ Wassergehalt aufweisen, dann müssen

$$W = M \cdot \frac{a - e}{100 - e} = 15000 \cdot \frac{40 - 20}{100 - 20} = 3750 \text{ kg} \quad (5)$$

Wasser entfernt werden. Bei der üblichen Fördermenge des Ventilators von $V = 30000 \text{ m}^3$ Luft/h und einem angenommenen Wasseraufnahmevermögen $\Delta x = 2,0 \text{ g/m}^3$ muß der Ventilator

$$\tau = \frac{W}{V \cdot \Delta x} = \frac{3750}{30000 \cdot 0,002} = 62,5 \text{ h} \quad (6)$$

in Betrieb gehalten werden.

Eine Betrachtung der Formeln (5) und (6) zeigt, daß sich die Laufzeit des Ventilators verlängert, wenn der Wassergehalt a des feuchten Heues zunimmt und die Wasseraufnahme Δx sinkt. Um dennoch kürzere Betriebszeiten des Lüfters zu erhalten, kann man zur Verbesserung des Sättigungsdefizits die Luft vorwärmen. Mit Hilfe des i, x -Diagramms soll nun in Ergänzung des vorigen Beispiels untersucht werden, wie sich die Luftvorwärmung z. B. um $\Delta t = 8^\circ\text{C}$ auswirkt. Der Zustandsverlauf ist in Bild 7 schematisch dargestellt. Wird die Luft mit $t_1 = 22^\circ\text{C}$ und $\varphi_1 = 0,60$ um $\Delta t = 8^\circ\text{C}$ auf $t_1' = 30^\circ\text{C}$ vorgewärmt, so sinkt die rel. Luftfeuchtigkeit auf $\varphi_1' = 0,37$. Da $i_1 = 11,3 \text{ kcal/kg}$ und $i_1' = 13,3 \text{ kcal/kg}$ betragen, sind –

bezogen auf den Reinfluftanteil im Gemisch - zur Erreichung der Temperatur t'_1

$$\Delta i = i'_1 - i_1 = 13,3 - 11,3 = 2,0 \text{ kcal/kg}$$

an Wärme aufzuwenden. Erfolgt nun anschließend bei Durchtritt durch das Heu eine Sättigung bis auf $\varphi_2 = 0,90$, so ist $x_2 = 0,0138 \text{ kg/kg}$. Gegenüber der Kaltbelüftung werden nun $\Delta x = x_2 - x_1 = 13,8 - 10,0 = 3,8 \text{ g/kg}$ an Wasser mehr abgeführt; das ist eine Steigerung auf etwa das Doppelte. Damit verkürzt sich die Belüftungszeit auf

$$\tau = \frac{W}{V \cdot \Delta x} = \frac{3750}{30000 \cdot 0,0038} \approx 33 \text{ h}$$

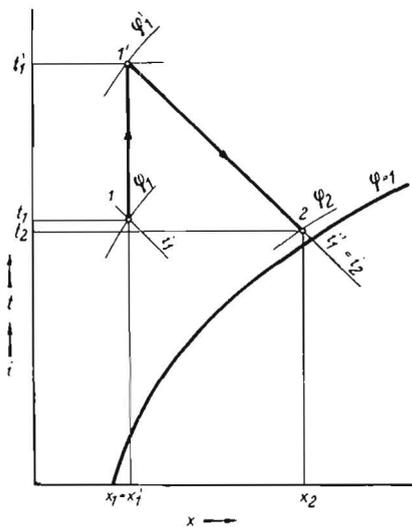


Bild 7. Darstellung der Lufterwärmung mit nachfolgender Wasseraufnahme

Obwohl man durch die Warmbelüftung derartige Vorteile erzielen kann, muß dieses Verfahren jedoch derzeit bei der Heubelüftung (nicht bei der Getreidebelüftungstrocknung) aus ökonomischen Gründen abgelehnt werden.

3. Die direkte Lufterwärmung (Trocknung mit Rauchgas-Luftgemisch)

Viele Trocknungsgüter aus der Landwirtschaft sind relativ unempfindlich gegen Bestandteile, die die Rauchgase enthalten. Durch die Beimischung von Rauchgasen zur Trocknungsluft ergibt sich eine bessere Wärmeausnutzung als bei der indirekten Lufterwärmung, die Anschaffungs- und Betriebskosten des Trockners werden geringer. Deshalb arbeiten Grünfütter-trocknungsanlagen fast ausschließlich mit direkter Lufterwärmung und auch die Getreidetrocknung ist bei Verwendung bestimmter Brennstoffe ohne nachteilige Folgen für das Trocknungsgut auf diese Art möglich.

Obwohl das i, x -Diagramm nur für ein Luft-Wasserdampf-gemisch aufgestellt wurde, läßt es sich für den für die Trocknung in Frage kommenden Bereich der Temperaturen auch für ein Luft-Rauchgas-Wasserdampf-gemisch benutzen, da sich die Enthalpiewerte für Luft i_L und für Rauchgas i_R nur sehr wenig unterscheiden (Tabelle 1). Deshalb lassen sich die Zustandsgrößen und der Zustandsverlauf an Hand von Bild 8 bestimmen.

Da sich durch die Verbrennung sowohl die Enthalpie der Rauchgase als auch deren Wassergehalt ändern, müssen zunächst diese beiden Größen bestimmt werden.

Zunahme der Enthalpie Δi_V : Durch die Verbrennung nimmt die Enthalpie der Rauchgase um den Betrag Δi_V zu. Dieser läßt sich mit Hilfe der Verbrennungsgleichungen berechnen. KRISCHER [10] gibt jedoch für die Trocknungstechnik völlig ausreichende Näherungswerte an, die aus Tabelle 2 entnommen werden können. Die gesamte Enthalpie der Verbrennungsluft erhält man, wenn man zu Δi_V noch die Enthalpie der Verbrennungsluft i_L hinzuzählt, so daß gilt:

$$i_R = \Delta i_V + i_L \text{ [kcal/kg trockene Rauchgase]} \quad (7)$$

Zunahme des Wasserdampfgehaltes Δx_{Vw} : Um den Zustandspunkt der Rauchgase im i, x -Diagramm festlegen zu können, muß man den Wasserdampfgehalt x_R kennen. Die Zunahme des Wasserdampfgehaltes hat drei Ursachen:

- Die zur Verbrennung benötigte Luft besitzt selbst einen Wassergehalt x_L .
- Die meisten Brennstoffe sind feucht, wenn sie zur Verbrennung gelangen. Dieses Wasser verdampft und erhöht den Wasserdampfgehalt um Δx_{Vw} .

Es ist

$$\Delta x_{Vw} = \frac{w}{g_R} \text{ [kg/kg trock. Rauchgas]} \quad (8)$$

w Masseanteil an Wasser (Tabelle 2)

g_R Masse des aus 1 kg Brennstoff entstandenen luftfreien trockenen Rauchgases (Tabelle 2)

- Der im Brennstoff enthaltene Wasserstoff verbrennt. Dabei entstehen aus 1 kg Wasserstoff 9 kg Wasser, so daß gilt:

$$\Delta x_{Vh} = \frac{9 \cdot h}{g_R} \text{ [kg/kg trock. Rauchgas]} \quad (9)$$

h Masseanteil von Wasserstoff (Tabelle 2)

Tabelle 1
Enthalpie i [kcal/kg] verschiedener Gase (nach KRISCHER [10])

°C	N ₂	O ₂	CO ₂	Luft	Rauchgas 79 Vol.-% N ₂ 21 Vol.-% CO ₂
100	24,9	22,05	20,85	24,05	23,7
1000	267	247	269	261	267,6
2000	569	525	593	554	576

Tabelle 2. Charakteristische Werte für verschiedene Brennstoffe und deren Rauchgase (nach KRISCHER [10])

Brennstoff	Heizwert		Analyse des Brennstoffes										Angaben zum Rauchgas			
	H_u [kcal/kg Br.]	H_o [kcal/kg Br.]	a Masse [%]	w [%]	c [%]	h [%]	s [%]	$o+n$ [%]	o [%]	n [%]	CO ₂ [%]	g_{Lmin} [kg/kg Br.]	g_R [kg/kg Br.]	Δx_{Vh} [kg/kg R.]	Δi_V [kcal/kg R.]	
Koks	7,117	7,150	8,0	2,0	87,4	0,4	0,8	1,4				10,15	11,00	0,00326	649	
Steinkohle	6,866	7,110	13,3	3,8	74,6	4,2	1,0	3,1				9,92	10,37	0,0365	687	
Braunkohle	2,868	3,288	8,0	46,1	34,4	2,6	0,6	8,3				4,53	4,75	0,0492	692	
Torf (lufttrocken)	2,972	3,330	10,0	30,0	33,7	3,3	1,0	22,0				4,15	4,45	0,0668	748	
Steinkohlenteeröl	9,000	9,350			89,5	6,5	0,6		3,4			12,37	12,79	0,0457	731	
Braunkohlenteeröl	9,600	10,200			84,0	11,0	0,7		4,3			13,25	13,26	0,0747	770	
Masut (UdSSR)	9,960	10,618			86,6	12,2	0,3		0,9			14,12	14,02	0,0783	757	
Propangas	11,015	12,000			81,8	18,2						15,67	15,03	0,1088	798	
Leuchtgas	8,780	10,970			51,3	22,0				11,4	7,5	7,8	12,97	11,99	0,1652	915

Es bedeuten:

- a Massenanteil Asche
- w Massenanteil Wasser
- c Massenanteil Kohlenstoff
- h Massenanteil Wasserstoff
- s Massenanteil Schwefel
- o Massenanteil Sauerstoff
- n Massenanteil Stickstoff
- CO₂ Massenanteil Kohlendioxyd

g_R Masse des aus 1 kg Brennstoff entstehenden luftfreien trockenen Rauchgases

g_{Lmin} Masse der für die Verbrennung von 1 kg Brennstoff theoretisch mindestens benötigten trockenen Luft

Δx_{Vh} Wasserdampfzunahme je kg trockenen Rauchgases durch die Wasserstoffverbrennung

Δi_V Enthalpie von 1 kg Rauchgas

H_u $H_o - 600(w + 9h)$

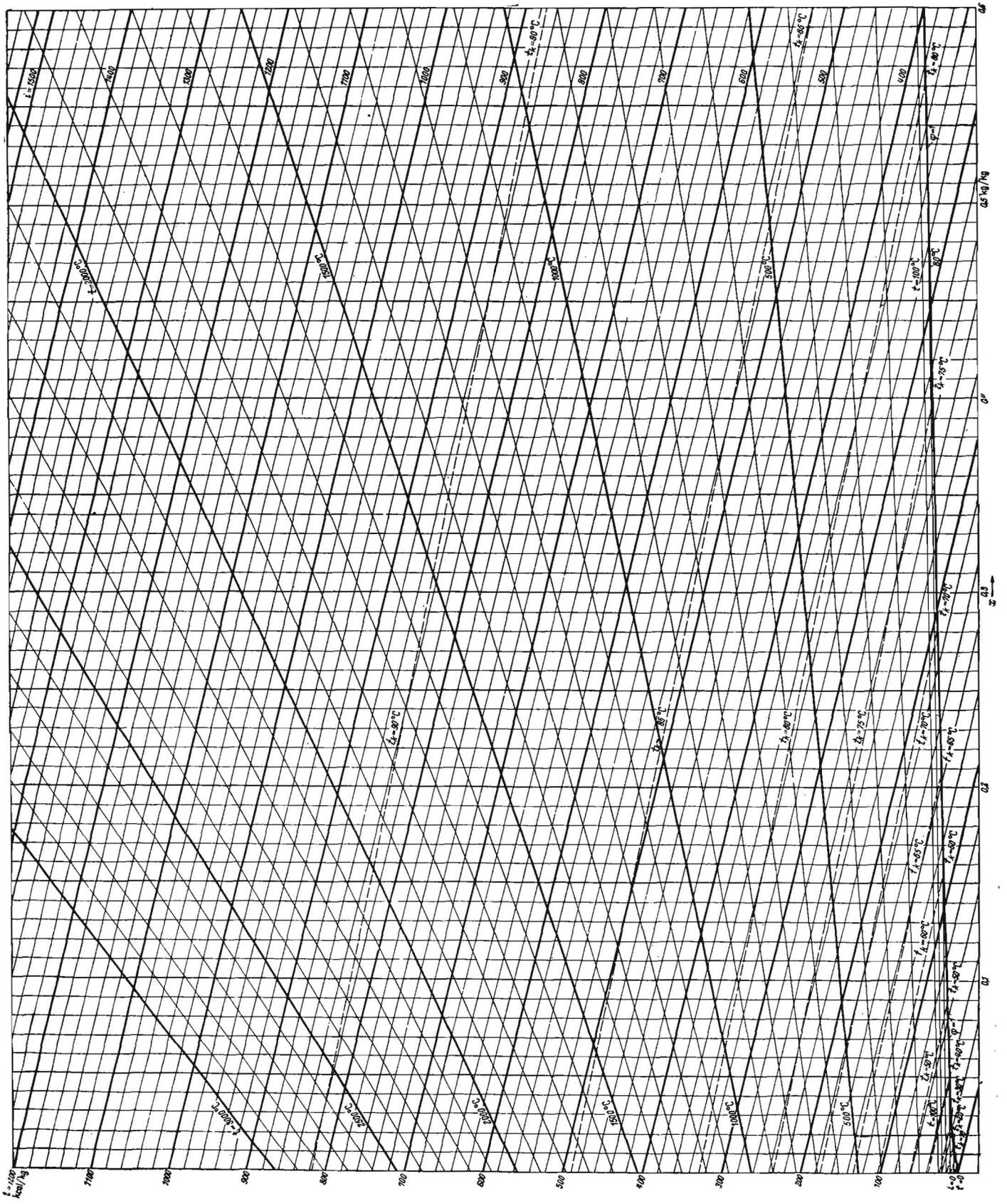


Bild 8. t, x -Diagramm für feuchte Luft bei hohen Temperaturen ($P = 750$ Torr)

Man erhält nun den gesamten Wasserdampfgehalt x_R der Rauchgase als Summe der drei Einzelanteile:

$$x_R = x_L + \Delta x_{VW} + \Delta x_{Vh} \quad [\text{kg/kg trock. Rauchgas}] \quad (10)$$

Mit den ermittelten Werten für i_R und x_R kann man nun den Zustandspunkt der luftfreien Rauchgase im i, x -Diagramm bestimmen und die Temperatur ablesen.

Zur einwandfreien Verbrennung des Brennstoffes ist jedoch ein gewisser Luftüberschuß λ erforderlich.

$$\lambda = \frac{g_{L\min} + g_L}{g_{L\min}} \quad (11)$$

$g_{L\min}$ Masse der für die Verbrennung von 1 kg Brennstoff theoretisch mindestens benötigten trockenen Luft

g_L Masse der zusätzlich zur Verbrennung von 1 kg Brennstoff notwendigen Luft

Die Luftüberschußzahlen betragen nach BUNGARTZ [3]:

für feste Brennstoffe	$\lambda = 1,4$ bis $1,9$
für flüssige Brennstoffe	$\lambda = 1,2$ bis $1,4$
für gasförmige Brennstoffe	$\lambda = 1,1$ bis $1,3$

Der Zustandspunkt des bei der Verbrennung mit Luftüberschuß entstehenden Rauchgases läßt sich nun mit Hilfe des i, x -Diagramms für hohe Temperaturen (Bild 8) bestimmen. Hierbei hat man es mit der Mischung zweier Luftmengen (siehe Bild 5) zu tun. Der Zustandspunkt des luftfreien Rauchgases wird mit dem der Verbrennungsluft geradlinig verbunden und die Verbindungsgerade im umgekehrten Verhältnis der beteiligten Massenanteile geteilt.

Das so erhaltene Rauchgas besitzt für viele Trocknungszwecke noch eine zu hohe Temperatur, die dem Trocknungsgut schaden kann. Deshalb wird meist dem Rauchgas vor Eintritt in den Trockner noch eine bestimmte Luftmenge g'_L zugemischt. Auch dieser Mischvorgang läßt sich in bekannter Weise im i, x -Diagramm verfolgen.

Stellen wir uns nun wiederum die Aufgabe, die Wasseraufnahme Δx je kg trockenen Rauchgas-Luftgemisches zu ermitteln, so muß jetzt entgegen den unter 2. genannten Gesichtspunkten etwas genauer gearbeitet werden. Die Annahme der Zustandsänderung $i = \text{konst.}$ führt bei dem jetzt großen Sättigungsdefizit des Gemisches zu erheblichen Fehlern. Überlegungen, die KRISCHER [10] anstellt, führen zu der Schlußfolgerung, daß der Zustand des Trocknungsmittels, solange die Oberfläche des zu trocknenden Gutes feucht ist, auf einer Linie gleicher Kühlgrenztemperatur t_K verläuft. Die Kühlgrenztemperatur ist jene Temperatur, die das Trocknungsgut nach einer gewissen Anlaufstrecke annimmt, die sich nicht mehr verändert und der sich die Temperatur des Trocknungsmittels mit zunehmender Zeit immer mehr nähert. Wird sie erreicht, ist das Trocknungsmittel mit Wasserdampf gesättigt. Die Linien $t_K = \text{konst.}$ sind in das i, x -Diagramm für hohe Temperaturen (Bild 8) eingetragen worden.

Ein Übungsbeispiel soll die dargelegten Erkenntnisse anwenden helfen: In einem Grünfuttertrockner sollen stündlich 2 t Grünfutter von 78% Wassergehalt auf 12% Wassergehalt herabgetrocknet werden. Die Eintrittstemperatur t_E des Rauchgas-Luftgemisches in den Trockner betrage 550°C , die Austrittstemperatur sei $t_A = 175^\circ\text{C}$. Zur Verbrennung gelangt Braunkohle mit einem unteren Heizwert $H_u = 2860 \text{ kcal/kg}$ und einem Wassergehalt $w = 0,46 \text{ kg/kg}$. Die Temperatur der Verbrennungsluft betrage $t_L = 25^\circ\text{C}$, die rel. Luftfeuchtigkeit $\varphi_L = 0,70$. Die Heizung wird mit einem Luftüberschuß $\lambda = 1,6$ betrieben. Von Wärmeverlusten sei abgesehen.

a) Stündlich zu verdampfende Wassermenge:

$$W = M \frac{a - e}{100 - e} = 2000 \frac{78 - 12}{100 - 12} = 1500 \text{ kg/h}$$

b) Zustand der luftfreien Rauchgase:

Die Enthalpie wird: $i_R = i_L + \Delta i_V$

Aus dem i, x -Diagramm (Bild 2) liest man für $t_L = 25^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 0,7$ ab: $i_L \approx 15 \text{ kcal/kg}$. Aus Tabelle 2:

$$\Delta i_V = 692 \text{ kcal/kg}$$

Somit wird $i_R = 15 + 692 = 707 \text{ kcal/kg}$

Der Wasserdampfgehalt ist zu bestimmen nach

$$x_R = x_L + \Delta x_{VW} + \Delta x_{Vh}$$

Aus Bild 2 entnimmt man $x_L = 0,014 \text{ kg/kg}$.

Aus Tabelle 2 liest man ab: $\Delta x_{Vh} = 0,0492 \text{ kg/kg}$;

$g_R = 4,75 \text{ kg/kg}$. Also wird:

$$\Delta x_{VW} = \frac{w}{g_R} = \frac{0,46}{0,75} = 0,0968 \text{ kg/kg}$$

und

$$x_R = 0,014 + 0,0968 + 0,0496 = 0,16 \text{ kg/kg}$$

Nun kann man den Zustandspunkt R im i, x -Diagramm markieren (schematisch in Bild 9). Man liest gleichzeitig die Temperatur $t_R = 1680^\circ\text{C}$ ab. (Die tatsächliche Verbrennungstemperatur wird etwa 60°C niedriger sein; vergleiche Tabelle 1).

c) Zustand der Gase bei Luftüberschuß:

Aus Tabelle 2: $g_{L\min} = 4,53 \text{ kg/kg}$ Brennstoff

Dem luftfreien Rauchgas sind nun $g_L = (\lambda - 1) g_{L\min} = (1,6 - 1) \cdot 4,53 = 2,72 \text{ kg/kg}$ Brennstoff zuzumischen.

Der Zustand der Mischung RL wird gefunden, indem die Strecke RL im Verhältnis $g_L : g_R = 2,72 : 4,75$ geteilt wird. Die Mischluftmenge vom Zustand RL ist dann $g_{RL} = 2,27 + 4,75 = 7,47 \text{ kg/kg}$ Brennstoff.

Man erhält: $x_{RL} = 0,107 \text{ kg/kg}$; $i_{RL} = 460 \text{ kcal/kg}$;
 $t_{RL} = 1220^\circ\text{C}$.

d) Zustand der Gase am Trocknereintritt:

Im i, x -Diagramm kann man nun den Eintrittszustand E ($t_E = 550^\circ\text{C}$, der auf der Mischgeraden RL, L liegt, ablesen:

$x_E = 0,045 \text{ kg/kg}$; $i_E = 160 \text{ kcal/kg}$. Die Strecke RL, L wird durch den Punkt E im Verhältnis 2:1 geteilt. Folglich müssen dem lufthaltigen Rauchgas vom Zustand RL je kg 2,0 kg Frischluft vom Zustand L zugemischt werden. Damit wird $g_L = 2,0 \cdot g_{RL} = 2,0 \cdot 7,47 = 14,94 \text{ kg/kg}$ Brennstoff. Die gesamte Gemischmenge, die den Zustand E besitzt, beträgt $(1 + 2,0) 7,47 = 22,41 \text{ kg/kg}$ Brennstoff.

e) Zustand der Abgase am Trockneraustritt:

Aus Bild 8 kann man für den Zustandspunkt E die Kühlgrenztemperatur $t_K = 68^\circ\text{C}$ ablesen. Von E ausgehend verfolgt man die Linie $t_K = \text{konst.}$ und liest an deren Schnittpunkt mit $t_A = 175^\circ\text{C}$ (Zustandspunkt A) ab:

$x_A = 0,195 \text{ kg/kg}$; $i_A = \text{kcal/kg}$.

f) Wasseraufnahme:

Je kg trockenen Gemisches werden $\Delta x = x_A - x_E = 0,195 - 0,045 = 0,15 \text{ kg}$ Wasser aufgenommen und abgeführt. Da auf 1 kg Brennstoff ein Rauchgas-Luftgemisch von 22,41 kg entfällt, werden also $22,41 \cdot 0,15 = 3,36 \text{ kg}$ Wasser je kg Brennstoff verdampft.

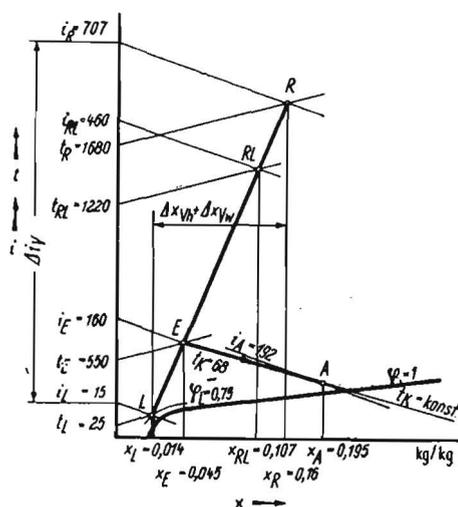


Bild 9. Schematische Darstellung der Trocknung durch Rauchgas-Luftgemische im i, x -Diagramm

g) Brennstoffverbrauch:

Unter a) wurde berechnet, daß stündlich 1500 kg Wasser zu verdampfen sind. Somit erhält man den Brennstoffverbrauch zu

$$B = \frac{1500}{3,36} = 416 \text{ kg Brennstoff/h}$$

h) Wärmeverbrauch:

Um 1 kg Wasser zu verdampfen, werden bei einem unteren Heizwert $H_u = 2860 \text{ kcal/kg}$ ($H_o = 3280 \text{ kcal/kg}$)

$$q = \frac{3280}{3,36} = 975 \text{ kcal/kg Wasser}$$

verbraucht.

Obwohl man mit der durchgeführten graphischen Rechenmethode infolge der Vernachlässigung der Verluste und Ablesefehler nur theoretisch erreichbare fehlerbehaftete Werte erhält, stellt sie jedoch eine wesentliche Vereinfachung der notwendigen Rechenoperationen dar und führt rasch zum Ziel.

4. Zusammenfassung

Die Anwendung des i, x -Diagramms für feuchte Luft wurde für die verschiedenen in der Trocknungstechnik auftretenden Zustandsänderungen erläutert. An Hand von Beispielen aus

der Praxis der Trocknung landwirtschaftlicher Produkte wurde versucht, das Interesse für die Arbeit mit dem i, x -Diagramm zu wecken.

Literatur

- [1] BEKASSOW/DENISSOW: Handbuch der Körnertrocknung. VEB Verlag Technik, Berlin 1955.
- [2] BOSN JAKOVIĆ: Technische Thermodynamik II. Teil. Verlag von Theodor Steinkopff, Dresden und Leipzig 1961.
- [3] BUNGARTZ: Die Getreidetrocknung im gewerblichen Betrieb. Verlag Neureuter 1958.
- [4] FILONENKO/LEBEDEW: Einführung in die Trockentechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1960.
- [5] FRANKE: Getreidetrocknung durch Feuergase im In- und Ausland Deutsche Agrartechnik (1960) H. 5, S. 220 und 221.
- [6] GARMS: Handbuch der Heizungs- und Lüftungstechnik Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig 1954.
- [7] HÄUSLER: Das Mollier- i, x -Diagramm für feuchte Luft und seine technischen Anwendungen. Verlag von Theodor Steinkopff, Dresden und Leipzig 1960.
- [8] HLAWITSCHKA: Die theoretischen Grundlagen und die praktische Durchführung der Belüftungstrocknung von Heu, Getreide und Hackfrüchten. Deutsche Agrartechnik (1958) H. 5, S. 203 bis 209.
- [9] HLAWITSCHKA: Erfahrungen mit der Heubelüftungstrocknung in Mittelgebirgslagen. Deutsche Agrartechnik (1961) H. 5, S. 222 bis 224.
- [10] KRISCHER: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1956.
- [11] KRÖLL: Trockner und Trocknungsverfahren. Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959. A 4564

Dr.-Ing. St. PABIS, IMER - Warschau

Künstliche Trocknung von Grünfütter

1. Bemerkungen über den Verlauf des Trocknungsprozesses

Die künstliche Trocknung des auf dem Felde je nach dem angewendeten Trocknungsverfahren auf einen Wassergehalt von 35 bis 45% vorgetrockneten Grünfütters ist theoretisch gesehen ein recht komplizierter Prozeß. Einmal ist das Grüngut (Gras, Luzerne oder Klee) ein geometrisch inhomogener Körper, da es aus Blättern und Stengeln besteht. Diese Inhomogenität hat einen entscheidenden Einfluß auf den Trocknungsverlauf. Zum andern ist der Feuchtigkeitsgehalt bei Trocknungsbeginn in den einzelnen Pflanzenteilen sehr verschieden; die Blätter können schon trocken sein, während der Stengel noch feucht bleibt. Schließlich kann das Grünfütter in drei verschiedenen Formen getrocknet werden: als Langgut, als Häcksel, oder in Preßballen. Deshalb haben wir auch bisher keine ausführlich erarbeitete und verallgemeinerte Theorie der Grünfütter-trocknung, die den praktischen Bedingungen entspricht. Die Erarbeitung einer solchen Theorie ist für praktische Zwecke auch nicht unbedingt erforderlich. Sie wird einerseits durch die Kenntnis über wesentlichste Elemente des Trocknungsprozesses, andererseits durch die auf diesem Gebiet im Laufe der Zeit gesammelten reichen Erfahrungen ersetzt.

Wenn es sich um Probleme der künstlichen Trocknung handelt, so lohnt sich zu erwähnen, daß die Trocknungsgeschwindigkeit von Klee- und Luzerneblättern etwa viermal so groß ist wie die Trocknungsgeschwindigkeit von Stengeln mit 3 mm Dmr. und etwa doppelt so groß wie die Trocknungsgeschwindigkeit von Stengeln mit 2 mm Dmr. bei den gleichen Trocknungsbedingungen. Da im Moment des Nachfüllens von vorgetrocknetem Grüngut in die Trockenanlage die Blätter bedeutend trockener sind als die Stengel, besteht der Trocknungsprozeß im wesentlichen aus Wasserentzug aus den Stengeln. Manchmal aber erfolgt im Verlauf der künstlichen Trocknung eine ziemlich bedeutende Wiederaufnahme von Wasser durch die Blätter, was sowohl durch den Trocknungsverlauf auf dem Feld als auch durch die Bedingungen, in denen die Trocknung verläuft, beeinflußt wird. Hierauf ist besonderes Augenmerk zu richten, da die Blätter den Hauptteil von Eiweiß und Karotin enthalten und deshalb Trocknungsbedingungen, bei denen die Blätter Wasser in größeren Mengen neu aufnehmen, eine Qualitätsminderung des Heues verursachen können.

Bild 1 zeigt die Trocknungsgeschwindigkeit von Luzerne-stengeln, bezogen auf 1 grad psychrometrischer Temperatur-differenz der zur Trocknungsschicht zugeführten Luft an folgen-dem Beispiel: Temperatur des Trocknungsmediums 83 °C, psychrometrische Temperaturdifferenz 52 grad, Geschwindigkeit des Trocknungsmediums 0,160 kg Luft auf 1 m² Querschnitts-fläche der Trocknungskammer und 1 s. Diese Trocknungs-geschwindigkeit kann auch durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$\frac{\partial u}{\partial \Theta} = \frac{100 \text{ kg H}_2\text{O}}{D^{1,63} \text{ kg} \cdot \text{min} \cdot \text{grad}} \quad \Theta = \text{Trockenzeit} \quad (1)$$

Aus dem Diagramm und aus der Gleichung ist ersichtlich, daß die Stengeldicke D einen sehr großen Einfluß auf den Verlauf der künstlichen Trocknung hat.

Angestellte Untersuchungen über die Trocknung einzelner Pflanzen ergeben, daß im Fall von Luzerne und Klee die einzelnen Pflanzen mit einer Geschwindigkeit, die dem in den Pflanzen enthaltenen, ungebundenen Wassergehalt ($u - u_r$) proportional ist, austrocknen. Der Koeffizient K der Trocknungsanlage ist das Produkt von Quadratwurzel aus Luft-geschwindigkeit G_p , psychrometrischer Temperaturdifferenz der Luft ($T_s - t_m$) und einer von Pflanzenart und -abmessungen (Dmr.) abhängigen Konstanten C .

Die Trocknungszeit Θ einer einzelnen Pflanze vom Anfangs-wassergehalt u_0 bis zum Endwassergehalt u_r läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\Theta = \frac{1}{C (t_s - t_m) \cdot \sqrt{G_p}} \ln \frac{u - u_r}{u_0 - u_r} \quad (2)$$

Diese Gleichung ist theoretisch gesehen nicht ganz exakt, sie ist jedoch für praktische Zwecke ausreichend genau. Das Grünfütter wird gewöhnlich in hohen Schichten getrocknet. Bis heute kann die Wissenschaft nur wenig über den Verlauf des Stoff- und Wärmeaustauschprozesses in hohen Schichten aussagen. Es ist schwierig, dieses Problem exakt zu lösen, da der komplizierte Trocknungsprozeß von folgenden zusätzlichen Variablen beeinflußt wird: sich verändernder Wassergehalt im Stoff, seine Temperatur sowie Wassergehalt und Temperatur