

Schnellere Materialfeuchtebestimmung durch rechnerüberwachte Trocknung mit Mikrowellen

Von Gerhard Jahns, Wolfgang Paul und Hermann Speckmann, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

DK 664.8.047:543.81:543.71:542.47

Obwohl die Materialfeuchtebestimmung durch Trocknen und Wägen bei nahezu allen Gütern und für den gesamten Bereich der vorkommenden Feuchten einsetzbar ist, verhindert die große Meßdauer des Verfahrens ihre breitere Anwendung. Der vorliegende Beitrag schildert, wie durch die Verwendung von Mikrowellen die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht und durch den Einsatz von Rechnern das Ergebnis bereits vor Ende der Trocknung errechnet werden kann, so daß sich Meßzeiten von einigen Minuten statt Stunden ergeben.

1. Einleitung

Die Bestimmung der Materialfeuchte spielt in zahlreichen Bereichen von Industrie, Landwirtschaft und Handel eine wichtige Rolle. Bei der Überwachung, Steuerung und Regelung von Produktionsprozessen dient die Feuchtebestimmung nicht nur der Optimierung des Prozesses im Sinne der Produktqualität, sondern beispielsweise bei Trocknungsprozessen auch der Energieeinsparung und der Verkürzung des Produktionsprozesses. Bei Gütern, die in feuchtem Zustand gehandelt werden, geht vielfach der Feuchtegehalt direkt in die Preisbildung ein.

Die charakteristischen physikalischen Eigenschaften des Wassers bilden die Grundlage für eine Vielzahl verschiedener Meßverfahren zur Materialfeuchtebestimmung, von denen die wichtigsten in **Tafel 1** aufgeführt sind. Ein Überblick wurde von *Lück* [2] und *Ahlgrimm* [3] gegeben, bei denen weiteres vertiefendes Schrifttum aufgeführt ist.

Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Bestimmung der Materialfeuchte durch Trocknen und Wägen. Hierbei wird die im Gut physikalisch gebundene Feuchte durch Trocknen entfernt und ihre Masse durch Wägen des Naßgutes und des Trockengutes bestimmt. Dieses Verfahren eignet sich nahezu uneingeschränkt für alle Güter und erfaßt den gesamten Bereich der vorkommenden Feuchte. Ein entscheidender Nachteil dieses Verfahrens war bisher darin begründet, daß die Zeitspanne zwischen den beiden Wägungen, bedingt durch die notwendige Trocknung, sehr groß war. Im nachfolgenden wird gezeigt, wie durch die Verwendung von Mikrowellen die Trocknungsgeschwindigkeit wesentlich erhöht und mit Hilfe von Mikrocomputern aus dem Trocknungsverlauf bereits vor Abschluß der Trocknung die Masse des Trockengutes errechnet und daraus die Materialfeuchte bestimmt werden kann. So läßt sich z.B. die Meßdauer von bisher 24 h für die Standardmethode auf nur 5–15 min verkürzen.

Absolutverfahren	Trocknungsmethoden Destillationsmethode Trennung durch Absorption
Chemische Verfahren	Calciumcarbid-Methode Karl-Fischer-Methode sonstige Hydrolyse-Methoden
Elektrische Verfahren	Elektr. Leitfähigkeits-Messung Dielektrische Messung Mikrowellenmessung
Spektrometrische Verfahren	Infrarot-Methode Kernresonanz-Methode Optische Brechungsmessung
Isotopenverfahren	Neutronenmessung
Thermometrische Verfahren	Wärmeleitfähigkeits-Messung Hydratationswärme-Messung Trocknungstemperatur-Messung Gefrier- u. Siedepunkt-Messung
Hygrometrische Verfahren	Gleichgew.-Luftfeuchte-Messung Trocknerabluft-Messung
Kohäsions-Verfahren	Messung der Schüttdichte Messung des Schüttwinkels Messung der Verformungsleistung Messung der Siebbarkeit

Tafel 1. Materialfeuchtemeßverfahren für feste und flüssige Stoffe, nach *Lück* [1].

2. Allgemeines

Bei der Materialfeuchtebestimmung soll stets nur das durch physikalische Bindungen wie Absorption und Adhäsion gebundene Wasser meßtechnisch erfaßt werden, nicht aber das chemisch gebundene [4, 5]. Die unscharfe Grenze zwischen chemischer und physikalischer Wasserbindung rechtfertigt den nicht ganz eindeutigen Begriff der Feuchte. Sie erfordert andererseits bei hohen Genauigkeitsanforderungen die Festlegung, welcher in dem Material eingelagerte Wasseranteil mit zur Feuchte gerechnet werden soll. Diese Festlegung ist besonders dann wichtig, wenn die mit unterschiedlichen Meßverfahren gewonnenen Ergebnisse verglichen werden sollen, da nicht alle Meßverfahren die unterschiedlich gebundenen Wasseranteile in gleicher Weise erfassen.

Die Kennzeichnung der Materialfeuchte erfolgt nicht immer einheitlich, so daß im Zweifelsfall angegeben werden sollte, wie die Feuchte errechnet wurde.

Am häufigsten wird die Feuchte als Feuchte- oder Wassergehalt:

$$U = 100 \cdot \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des feuchten Gutes}} = 100 \cdot \frac{m_w}{m_w + m_s} \% \quad (1)$$

definiert. Aber auch die Definition als Feuchtegrad:

*) *Dr.-Ing. G. Jahns, Dr.-Ing. W. Paul und Dipl.-Ing. H. Speckmann sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

$$X = 100 \cdot \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des trockenen Gutes}} = 100 \cdot \frac{m_w}{m_s} \quad \% \quad (2)$$

ist gebräuchlich. Darüber hinaus wird vor allem in der Papierindustrie und der Landwirtschaft oft auch der Trockensubstanzgehalt (TG-Gehalt) oder Trockenmassegehalt (TM-Gehalt) bestimmt.

$$Z = 100 \cdot \frac{\text{Masse des trockenen Gutes}}{\text{Masse des feuchten Gutes}} = 100 \cdot \frac{m_s}{m_w + m_s} = (100 - U) \quad \% \quad (3)$$

Die Werte U und X divergieren mit zunehmender Feuchte; für den Grenzfall, bei dem die Masse des trockenen Gutes m_s gegen Null strebt, d.h. $m_s \ll m_w$, läuft die auf die Gesamtmasse bezogene Feuchte, der Feuchtegehalt U, gegen 100 %, während die auf die Trockenmasse bezogene Feuchte, der Feuchtegrad X, gegen ∞ strebt. Bild 1 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Darüber hinaus sind in Tafel 2 die Beziehungen dargestellt, die die Umrechnung von der einen in eine andere gesuchte Größe erlauben.

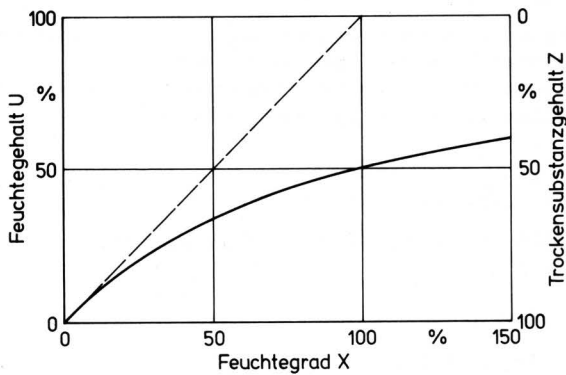


Bild 1. Funktionaler Zusammenhang zwischen den Größen Feuchtegehalt U, Trockensubstanzgehalt Z und Feuchtegrad X.

	U	X	Z
Feuchtegehalt U	$\frac{100 \cdot m_w}{m_w + m_s}$	$\frac{100 \cdot X}{100 + X}$	$100 - Z$
Feuchtegrad X	$\frac{100 \cdot U}{100 - U}$	$\frac{100 \cdot m_w}{m_s}$	$\left(\frac{100}{Z} - 1\right) \cdot 100$
Trockensubstanzgehalt Z	$100 - U$	$\frac{100 \cdot 100}{100 + X}$	$\frac{100 \cdot m_s}{m_w + m_s}$

Tafel 2. Berechnung und Umrechnung der Materialfeuchtegrößen.
 m_w = Masse des Wassers
 m_s = Masse des trockenen Gutes

2.1 Der Trocknungsvorgang

Die Trocknung, d.h. die Entfernung der physikalisch gebundenen Feuchte aus einem Gut, beinhaltet:

- das Überführen des Wassers in den dampfförmigen Zustand und
- das Abführen des Dampfes.

Das Überführen des Wassers in den dampfförmigen Zustand erfordert die Lösung des Wassers aus seiner Bindung und seine Verdampfung. Die dabei zur Lösung des Wassers aus seinen physikalischen Bindungen erforderliche Energie entspricht der beim Bindungsvorgang freigesetzten Wärme und hängt von den Eigenschaften des bindenden Stoffes ab. So liegt beispielsweise, bezogen auf die Masseneinheit des Wassers, die Hydrationsenthalpie bei den meisten organischen und anorganischen Verbindungen zwischen 400 und 2000 kJ/kg und die Benetzungsenthalpie zwischen 100 und 2500 kJ/kg. Die Verdampfungsenthalpie beträgt für Wasser von 0 °C 2500 kJ/kg. Je nach Art, wie die zum Trocknen erforderliche Energie dem Gut zugeführt wird, unterscheidet man zwischen Konvektions-, Kontakt- und Strahlungstrocknung. Der Spezialfall der Strahlungstrocknung, bei dem durch die Absorption elektromagnetischer Wellen Wärme entsteht, wird hier betrachtet.

Während des Trocknungsvorganges treten zwei entgegengerichtete Transportvorgänge auf: der Energiestrom, der von außen in das Innere des Gutes gerichtet ist, und der Stoffstrom der Wasserteilchen, der von innen nach außen an die Oberfläche des Gutes und von dort in die Atmosphäre des Trocknungsraumes gerichtet ist. Diese Transportvorgänge bestimmen in dominierender Weise den zeitlichen Verlauf der Trocknung. Sie werden durch hohe Trocknungstemperaturen, niedrigen Dampfdruck im Trocknungsraum, durch eine große Oberfläche des Gutes und durch kleine Wege im Gut verkürzt. Dies ist u.a. auch der Grund, weshalb das Material vor der Trocknung im allgemeinen zerkleinert und ausgebreitet wird.

Zu Beginn einer Trocknung verdunstet als erstes das an der Oberfläche des Gutes befindliche Wasser. Die Guttemperatur bleibt dabei nach einer Anlaufphase aufgrund der Verdunstungskühlung konstant, die Masse der Probe nimmt ab. Sobald die Verdunstungsstellen in das Innere des Gutes zurückweichen, steigt die Guttemperatur an, die Trocknungsgeschwindigkeit verlangsamt sich, und das Gewicht der Probe nähert sich exponentiell dem Gewicht der Trockenmasse der Probe. Wie noch gezeigt werden wird, stellt diese exponentielle Abnahme der Probenmasse die Grundlage für einen vorzeitigen Abbruch der Trocknung und die Berechnung der Trockenmasse durch den Mikrocomputer dar.

2.2 Fehlerquellen bei der Feuchtebestimmung durch Trocknen

Bei der Materialfeuchtebestimmung durch Trocknen und Wägen können bereits bei der Probenahme und Probevorbereitung Meßfehler entstehen. Sieht man einmal von dem grundsätzlichen Problem der Probenahme aus einer Gesamtheit und den damit verbundenen Fragen der Übertragbarkeit der mittels Probe gewonnenen Meßergebnisse ab, so bleibt die Gefahr der unbeabsichtigten Trocknung vor der ersten Wägung bei der Probenahme und Probebehandlung, beispielsweise während des Zerkleinerns der Probe.

Auch das Wägesystem kann Fehlerquellen beinhalten. Doch dürfen im Normalfall die Meßfehler des benutzten Wägesystems bekannt sein und wenn überhaupt nur bei geringer Feuchte ins Gewicht fallen. Bei einer Integration des Wäge- und Trocknungssystems sollte jedoch darauf geachtet werden, daß weder durch Wärmehauftrieb noch durch die Luftführung im Trocknungssystem Meßfehler verursacht werden können. An dieser Stelle sei angemerkt, daß sich bei integrierten Trocknungs- und Wägesystemen angegebene Meßfehler nicht selten irreführend nur auf das Wägesystem und nicht auf das Gesamtsystem beziehen.

Die Hauptfehler sind jedoch durch den Trocknungsvorgang selbst gegeben. Hier sind vor allem zu nennen:

- Die unvollständige Trocknung, weil die Trocknungsenergie zu gering bzw. die Trocknungszeit zu kurz ist oder die

Feuchtigkeit im Trocknungsraum zu hoch ist.

- Die thermische Wirkung auf die Probe, z.B. das Verdunsten von anderen Bestandteilen als Wasser, das Zersetzen von Probenbestandteilen oder die Oxidation der Probe oder ihrer Bestandteile.

Daß eine zu geringe Trocknungsenergie oder eine zu kurze Trocknungszeit zu einer unvollständigen Trocknung führt, d.h. nicht alles Wasser in dampfförmigen Zustand überführt wird, ergibt sich aus dem zum Trocknungsvorgang Gesagten.

Aber auch dann, wenn der Dampfdruck der Trocknungsraum-atmosphäre zu hoch ist, kann sich eine unvollständige Trocknung ergeben, da für das Abführen des Dampfes aus dem Gut in die Trocknungsraum-atmosphäre die Partialdruckdifferenz bestimmend ist.

Meßfehler aufgrund thermischer Wirkungen auf die Probe lassen sich aus der Darstellung des Trocknungsverlaufes über der Zeit erkennen. So deuten vor allem Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Probemasse wie auch im Temperaturverlauf der Probe stets darauf hin, daß andere Bestandteile als Wasser flüchtig werden, daß Bestandteile der Probe zersetzt oder oxidiert werden. Das Bild 2 zeigt derartige Beispiele. Bei der Auswahl und Auslegung eines Trocknungsverfahrens, vor allem aber bei der Wahl der Trocknungstemperatur kann deshalb die Darstellung des Trocknungsverlaufes ein wertvolles Hilfsmittel sein, und zwar unabhängig davon, ob es sich um die Trocknung eines Stoffes zur Bestimmung der Gutsfeuchte oder um die Trocknung im Rahmen eines Produktions- oder Veredelungsprozesses handelt. Durch den Einsatz eines Mikrocomputers in der nachfolgend beschriebenen Form sind derartige Trocknungsverläufe zusätzlich ohne Zeitaufwand und weitere Personalkosten während eines Trocknungsvorganges aufzunehmen.

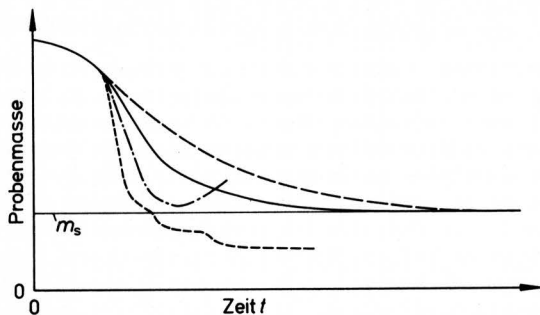


Bild 2. Schematische Trocknungsverläufe einer Probe.

- normaler Trocknungsverlauf
- - - langsamer Trocknungsverlauf
- · - · - · Meßfehler durch Oxidation der Probe
- - - - - Meßfehler durch Verdampfen anderer Bestandteile als Wasser

3. Einsatz von Mikrocomputern und Mikrowellen

3.1 Ziele und Strategie bei dem Einsatz von Mikrocomputern

Ziel des Einsatzes von Mikrocomputern ist nicht nur eine wesentliche Verkürzung der Meßdauer und eine beschleunigte irrtumsfreie und vielseitige Auswertung der Meßergebnisse, sondern vor allem die Vermeidung von Einwiegefehlern und eine Minimierung der Fehler durch Veränderungen der Probe. Dieser letzte entscheidende Vorteil wird dadurch erreicht, daß gestützt auf Hochrechnungen der Trocknungsprozeß u.U. lange vor Beendigung der endgültigen Trocknung abgebrochen werden kann und somit die Gefahr, daß andere Stoffe als Wasser flüchtig werden oder daß eine Zersetzung oder Oxidation der Probe stattfindet, weitgehend vermieden wird.

Grundlage dieser Hochrechnungen ist die Tatsache, daß sich Trocknungsverläufe nach einer Anlaufphase und einer Phase der Verdunstung des Oberflächenwassers in ihrem weiteren Verlauf durch Exponentialfunktionen beschreiben lassen. Wie Versuche bestätigt haben, stellt die Beziehung:

$$y = A + B e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

einen geeigneten Ansatz für die Berechnung der Gewichtsverläufe dar. Hierin steht y für die Masse der Probe zur Zeit t , A stellt die Masse des Trockengutes ($y = A$ für $t \rightarrow \infty$) und B die Masse der Feuchte dar. In die Zeitkonstante T gehen stoffspezifische Eigenschaften und physikalische Parameter (Energiezufuhr, Teildampfdruckgradient etc.) der Trocknung ein.

Gelingt es, während des exponentiellen Trocknungsverlaufes durch Messung der Probemasse in bestimmten Zeitabständen die Parameter A , B und T hinreichend genau zu bestimmen, so kann die Trocknung abgebrochen werden, und alle interessierenden Größen wie Materialfeuchte, Trockenmassegehalt, aber auch Trocknungsdauer bis zu einer gewünschten Restfeuchte oder die Wasserabgabe sind zu berechnen.

Für die Bestimmung der in Gl. (4) enthaltenen unbekannt Parameter A , B und T bieten sich zwei Extrapolationsmöglichkeiten an, die sich im praktischen Einsatz als gleichwertig erwiesen haben.

3.1.1 Differenzalgorithmus mit konstanten Abfrageintervallen

Durch Differentiation des Ansatzes (4) nach der Zeit erhält man

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{B}{T} e^{-\frac{t}{T}} \text{ bzw. } \Delta y = -\frac{\Delta t}{T} B e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

worin Δt das konstante Abfrageintervall und Δy die Massenänderung zwischen zwei Messungen darstellt, Bild 3.

Durch die Addition des Ansatzes und seiner Ableitung erhält man nach kurzer Umformung für das n -te Zeitintervall:

$$k = \frac{T}{\Delta t} = \frac{y_{n-1} - y_n}{y_n + y_{n-2} - 2y_{n-1}} \quad (6)$$

Mit Hilfe des Quotienten k lassen sich alle gesuchten Parameter errechnen:

$$T = k \Delta t \quad (7)$$

$$A = y_n + k \Delta y_n = m_s \quad (8)$$

$$B = m_{\text{ges}} - A = m_w \quad (9)$$

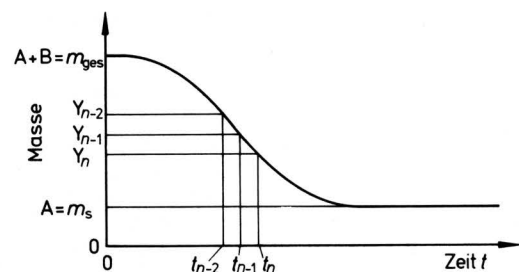


Bild 3. Trocknungsverlauf über der Zeit.

Die Berechnung des Feuchtegehaltes

$$U = 100 \cdot \frac{B}{A + B} = 100 \cdot \frac{m_w}{m_s + m_w} \quad (1)$$

oder anderer Größen sowie des Trocknungsverlaufes selbst kann dann mit den bekannten Ansätzen ebenfalls vom Rechner durchgeführt werden.

Da die in Ansatz gebrachte Exponentialfunktion (4) nicht für den ersten Trocknungsabschnitt (s. Bild 2) gilt, muß der Mikrocomputer selbständig prüfen, ob die Trocknung soweit fortgeschritten

ist, daß eine Berechnung der gesuchten Größen mit der angestrebten Genauigkeit erfolgen kann. Erst dann kann er den Trocknungsvorgang abbrechen und das Meßergebnis ausgeben. In der Praxis erfolgt die Abfrage der Waage nach Übernahme des Startgewichtes in festen Zeitintervallen von beispielsweise 1 s oder einem ganzzahligen Vielfachen davon.

Nach jeder Messung wird aus dem aktuellen Meßwert eine Fehler-toleranz Δm_s zur anschließenden Konvergenzüberprüfung errechnet, Bild 4. Das Toleranzfeld wird mit fortschreitender Trocknung wegen der Verringerung des aktuellen Gewichtes immer enger. Die aktuelle Masse wird in einem Feld y_1, \dots, y_n zu den bisherigen Meßwerten gespeichert. Aus diesen gespeicherten Daten erfolgt nach der n-ten Abfrage die Berechnung von Extrapolationswerten für die Trockensubstanz gemäß Gl. (10), die sich aus den Gln. (6) und (8) ableitet.

$$A_{n,j} = m_{s,j} = \frac{y_n \cdot y_{n-2j} - y_{n-j}^2}{y_n + y_{n-2j} - 2y_{n-j}} \quad (10).$$

Die errechneten Werte werden in einem weiteren Feld unter dem Index j für die folgende Mittelwertberechnung und Konvergenzüberprüfung abgelegt. In der Praxis hat sich gezeigt, daß zur Kontrolle der Konvergenz maximal 19 Werte von $m_{s,j}$ ausreichen, so daß für den Laufindex j die Grenzen $1 \leq j \leq n/2 \leq 19$ gelten. Daraus resultiert auch die Begrenzung des Feldes y_1, \dots, y_n auf 40 Werte, so daß die jeweils weiter zurückliegenden Daten gelöscht werden können. Der Speicherplatz des Mikrorechners kann somit relativ gering sein.

An die Bestimmung der Extrapolationswerte schließt sich die Mittelwertberechnung der Masse der Trockensubstanz und die Überprüfung der Konvergenz an. Sind die Konvergenzbedingungen erfüllt, wird die Trocknung abgebrochen, die Endergebnisse werden berechnet und ausgegeben. Konnte keine ausreichende Anzahl konvergierender Werte gefunden werden, so wird die Trocknung fortgesetzt und weitere Meßwerte werden aufgenommen. Nach Ablauf des vorgewählten Extrapolationsintervalles wird eine erneute Verrechnung vorgenommen.

3.1.2 Algorithmus mit nichtlinearer Optimierungsroutine und variablen Abfrageintervallen

Soll die Bestimmung der Materialfeuchte durch einen Prozeßrechner erfolgen, der gleichzeitig auch für andere Aufgaben eingesetzt ist, so läßt sich die Einhaltung exakt gleicher Abfrageintervalle nicht mehr gewährleisten, und das zuvor geschilderte Verfahren versagt. Mit Hilfe einer nichtlinearen Optimierungsstrategie lassen sich aber auch in diesem Fall die drei unbekannt Parameter des Trocknungsverlaufes A, B und T aus Gl. (4) bestimmen.

Bei der nichtlinearen Optimierung wird eine in ihrer Struktur gegebene Funktion y

$$y = f(t, k_1, \dots, k_s) \quad (11)$$

mit der unabhängigen Variablen t und ihren s unbekannt Parametern k_1, \dots, k_s so bestimmt, daß die Funktion $y(t)$ möglichst wenig von den Meßpunkten (y_n, t_n) abweicht. Als Kriterium wird üblicherweise das Quadrat der Abstände zwischen theoretischer Kurve und Meßpunkten gewählt:

$$K = \sum_{n=1}^m [f(t_n, k_1, \dots, k_s) - y_n]^2 \Rightarrow \min \quad (12).$$

Als nichtlineares Optimierungsverfahren zur Lösung des geschilderten Problems kann z.B. eine Strategie der direkten Suche verwendet werden. Sie hat gegenüber anderen Algorithmen den Vorteil, in überschaubaren kleinen Programmen realisierbar zu sein.

Das Verfahren läuft etwa wie folgt ab: Von einem Startpunkt ausgehend, wird der Einfluß aller freien Parameter auf das Kriterium in ersten kleinen Suchschritten getestet. Der einflußreichste Parameter wird, solange das Kriterium kleiner wird, in die vorgegebene Richtung verändert. Lohnt die Änderung des bisherigen Parameters nicht mehr, so wird erneut um die bisher erreichte Parameterkombination eine günstige Richtung zur Veränderung eines Parameters gesucht und diese ausgeführt. Der Vorgang wiederholt sich so oft, bis ein Optimalpunkt erreicht wird. Dieser Punkt im s-dimensionalen Parameterraum bezeichnet dann die Parameterwerte, bei denen das Kriterium ein Minimum annimmt [6].

Bei der Anwendung dieses Algorithmus erfolgt der Start der Rechenroutine nach der Anlaufphase. Es werden laufend Meßpaare (y_n, t_n) ermittelt und in geschilterter Weise die optimale Ausgleichskurve bestimmt. Praktische Versuche zeigten, daß sich das Ergebnis, die Abschätzung der Parameter und des Endwertes $A = m_s$, schnell stabilisiert, so daß bereits nach wenigen Rechenzyklen eine gute Vorausschätzung des Endwertes gegeben werden kann [7].

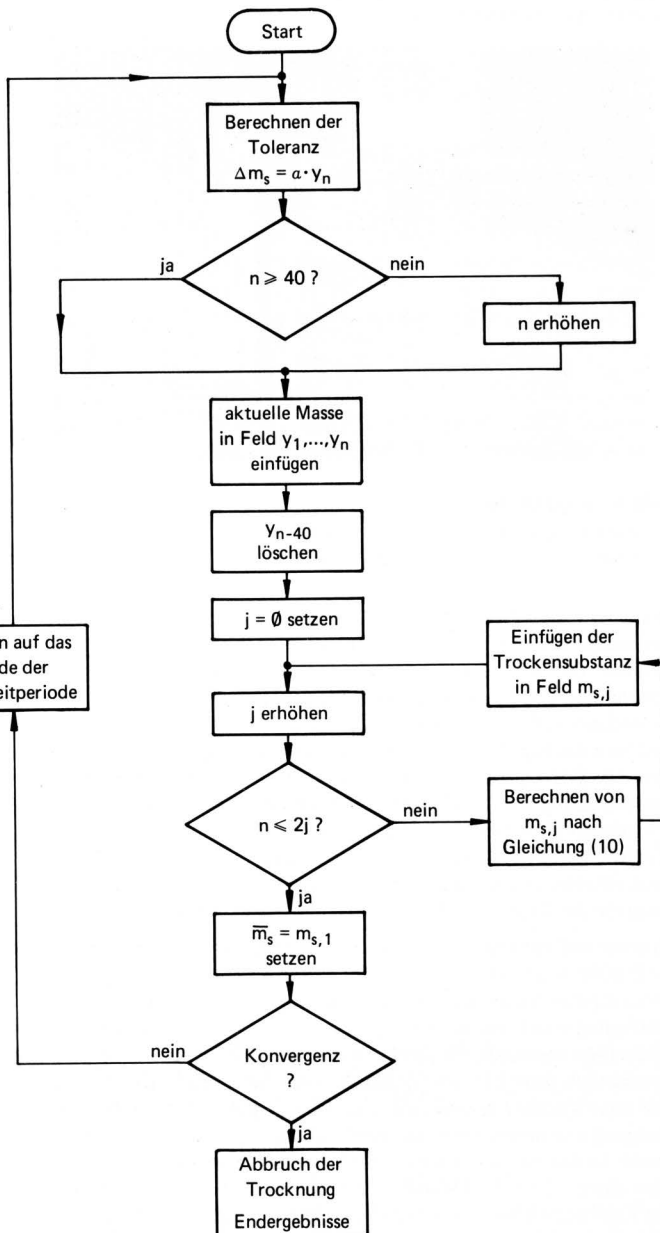


Bild 4. Flußdiagramm der Trockensubstanzberechnung.

3.2 Auswahl des Trocknungsverfahrens

Von Infrarotstrahlen und Mikrowellen ist bekannt, daß sie in das Gut eindringen und dort bevorzugt die Wassermoleküle (und nicht so sehr die Trockensubstanz) erwärmen. Hierauf aufbauende Trocknungsverfahren sind deshalb günstiger als solche mit Kontakt- oder Konvektionsheizung, bei denen der Energietransport von der Oberfläche des Gutes ins Innere durch Wärmeleitung erfolgt. Dies ist ein relativ langsamer Vorgang, nicht zuletzt deshalb, weil in den meisten Fällen die Trocknungstemperatur wegen der Gefahr einer Veränderung oder Zersetzung des Gutes nicht beliebig gesteigert werden kann und die Wärmeleitfähigkeit z.B. bei trockenen organischen Stoffen klein ist.

Die Wirkung der Infrarotstrahlung beruht auf den charakteristischen Resonanzfrequenzen der Wassermoleküle bei einer Wellenlänge von $3 \mu\text{m}$ und der damit verbundenen Energieabsorption des Wassers. Eine Eigenschaft, die auch zur indirekten Feuchtemessung genutzt wird. Der Aufbau eines Trockners mit Infrarotstrahlung ist einfach und grundsätzlich problemlos. Ein Nachteil der Infrarotstrahlung ist aber, daß sie im Normalfall nur wenig mehr als 1 mm in das Gut einzudringen vermag.

Im Gegensatz dazu weisen Mikrowellen, also elektromagnetische Wellen im GHz-Bereich, eine wesentlich größere Eindringtiefe auf. Auch hier erfolgt die Absorption der Energie und damit die Erwärmung primär durch die Wasserteilchen selbst. Die Eindringtiefe kann hier einige Zentimeter betragen, so daß fast gleichmäßig das gesamte Volumen des zu trocknenden Gutes erfaßt wird. Da überwiegend die Wassermoleküle die Energie absorbieren, kann in günstigen Fällen mit fortschreitender Trocknung die Temperatur des Gutes sogar wieder sinken.

Die Erwärmung der Wassermoleküle ist darauf zurückzuführen, daß sie aufgrund ihrer großen Dipolmomente im elektrischen Wechselfeld der Mikrowellen gegen ihre Bindungskräfte bewegt werden. Die dabei auftretende Verlustleistung berechnet sich [8] nach

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 \omega \int \epsilon_i |E|^2 dV \quad (13).$$

Sie ist also, bezogen auf ein bestimmtes Volumen V , proportional der Frequenz ω , dem Quadrat der Feldstärke E und dem Imaginärteil der Dielektrizitätskonstanten ϵ_i , der auch als Verlustfaktor bezeichnet wird. Dieser Verlustfaktor ist sowohl stoffspezifisch als auch abhängig von der Frequenz. Für Wasser weist der Verlustfaktor bei etwa 19 GHz ein Maximum mit einem Wert von $\epsilon_i = 40$ auf. Bei 3 GHz, einer für industrielle Anwendungen zur Verfügung stehenden Frequenz, hat er bei Zimmertemperatur den Wert $\epsilon_i = 12$.

Die aus der Verlustleistung P resultierende Temperaturerhöhung beträgt

$$\Delta\theta = 0,239 \frac{1}{c\rho} \int P dt.$$

Die Temperaturerhöhung ist also der Verlustleistung und der Zeit direkt proportional, der spezifischen Wärme c und der Dichte des Dielektrikums ρ umgekehrt proportional.

3.3 Anforderungen an das Wägevorgang

Die geschilderten Algorithmen erfordern mehrfache Massebestimmungen während des Trockenvorganges. Man wird daher das Wägesystem mit dem Trocknungssystem integrieren. Damit die Abfrage der Probenmasse durch den Mikrocomputer selbsttätig und zu den geforderten Zeitpunkten erfolgen kann, muß die Waage ein elektrisches Ausgangssignal liefern. Waagen mit einem analogen elektrischen Ausgangssignal haben den Vorteil, daß der Trocknungsverlauf mittels eines y,t -Schreibers unmittelbar aufgezeichnet werden kann, ihnen haften aber die allen analogen Bauelementen eigenen Nachteile wie Temperaturgang, Drift, Alterung etc. an. Man wird daher auf eine möglichst frühe Digitalisierung des Meßwertes Wert legen, um derartige Fehlereinflüsse weitgehend zu vermeiden.

3.4 Realisierung des Systems

Bei der praktischen Ausführung verschiedener Anlagen wurden für die Trocknung wegen der geschilderten Eigenschaften Mikrowellenöfen verwendet. Am kostengünstigsten erschien der Einsatz handelsüblicher Haushaltsmikrowellenherde. Diese Geräte verfügen bereits über eine Be- und Entlüftung des Trockenraumes und entsprechen den gültigen Sicherheitsvorschriften. Da Mikrowellenherde aber nicht ohne Last gefahren werden dürfen (eine thermische Überlastung und schließlich Zerstörung der Endstufe des Mikrowellengenerators wäre die Folge), ist der Boden des Trockenraumes mäanderförmig mit einem Kunststoffrohr ausgelegt, durch welches Kühlwasser geleitet wird. Darüber hinaus wurden die Geräte mit einer elektronischen Waage ergänzt, deren Waagschale sich im Trockenraum befindet. Hierzu wurden handelsübliche Analysenwaagen verwendet. Die für die Zuführung des Kühlwassers und für die Befestigung des Probenträgers an der Waage erforderlichen Durchbrüche in den Mikrowellenherden sind konstruktiv derart ausgeführt, daß ein Austreten der Mikrowellen sicher verhindert wird. Für alle Bauteile im Innern des Trockenraumes wird Kunststoff oder Glas verwendet, um ein Erhitzen dieser Teile durch die Mikrowellen zu vermeiden. Bild 5 zeigt einen solchen Mikrowellenherd mit aufgesetzter Waage.

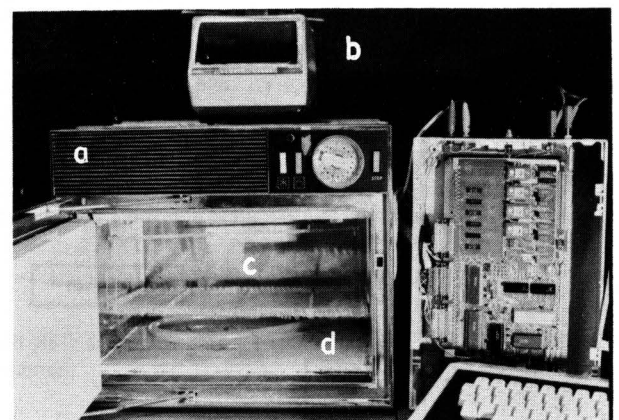


Bild 5. Ausgeführtes System.

- a Mikrowellenherd
- b Waage
- c Waagschale
- d Kühlschlangen

Bei einer ersten Ausführung des Systems wurde der Algorithmus der nichtlinearen Optimierung mit variablen Abfrageintervallen benutzt. Die Berechnung erfolgte auf einem herkömmlichen Prozessor. Für die Ausgabe der Ergebnisse stand ein mit dem Prozessor verbundener Fernschreiber zur Verfügung. Außerdem konnten die Ergebnisse auf einem Datensichtgerät dargestellt werden. Das Datensichtgerät erwies sich als besonders geeignet für die Untersuchung von Trocknungsverläufen, da sich mit ihm die verschiedenen Zwischen- und Meßergebnisse in übersichtlicher Form graphisch und tabellarisch darstellen lassen.

Eine erheblich kostengünstigere Lösung erhält man, wenn für die Ausgabe der Ergebnisse Leuchtziffernanzeigen verwendet werden.

In einer weiteren Ausführung wurde ein mit dem Mikroprozessor SAB 8080 A aufgebauter Mikrocomputer verwendet. Da der Mikrocomputer ausschließlich für die Bestimmung der Feuchte zur Verfügung stand, wurde der Algorithmus mit konstanten Abfrageintervallen verwandt. Es wurden zwei Versionen erprobt, die sich hinsichtlich ihrer Ein- und Ausgabemöglichkeiten unterscheiden. Die erste Variante arbeitet mit einer Waage mit bcd-codiertem Ausgang und einem Datensichtgerät als Dialog- und Ausgabe-Terminal. In der zweiten Variante wurden das Analogsignal der Waage über einen 12 bit-A/D-Wandler dem Mikrocomputer zugeführt und die Ergebnisse über eine vierstellige LED-Anzeige ausgegeben. Um aber dennoch vollständige Trocknungsverläufe darstellen zu können, wurde außer der Leuchtziffernanzeige ein weiterer elektronischer Ausgang vorgesehen, an den ein x,y - oder y,t -Schreiber anzuschließen ist.

Diese Beispiele zeigen die Flexibilität bei der Zusammenstellung der verschiedenen Aus- und Eingabegeräte und bei der Auswahl der zum Einsatz kommenden Rechner. Welche Gerätekombination letztlich gewählt wird, hängt von der Aufgabenstellung, den u.U. schon vorhandenen Möglichkeiten, dem gewünschten Bedienungskomfort und nicht zuletzt von den zulässigen Kosten ab.

4. Ergebnisse

4.1 Bestimmung der Materialfeuchte landwirtschaftlicher Güter

Nachfolgend sind einige Trocknungsverläufe wiedergegeben, die von verschiedenen Anlagen nach den beschriebenen Verfahren stammen. Diese Anlagen zur Bestimmung der Feuchte befinden sich teilweise seit Jahren mit gutem Erfolg im praktischen Einsatz. Die Genauigkeit der Meßergebnisse wurde wiederholt durch Trocknen im Trockenschrank (24 Stunden bei 105 °C) und durch die aufwendige Toluol-Destillation kontrolliert. Zusammenfassend bestätigen sich die schon in [7] wiedergegebenen Erfahrungen. Danach sind besonders in Bereichen hoher Gutsfeuchte die Abweichungen zwischen den drei Trocknungsverfahren sehr gering. Die durchgehend gute Übereinstimmung mit der Toluol-Destillation deutet darauf hin, daß auch bei dem Mikrowellenverfahren andere flüchtige Stoffe als Wasser kaum verdampft werden. Diese Art der Feuchtebestimmung ist deshalb im gesamten Bereich möglicher Feuchtegehalte $0 < U < 100\%$ als gut zu beurteilen.

Die in **Bild 6** angegebenen Trocknungsverläufe entstammen Trockensubstanzbestimmungen von frischem Rindermist, vorgewelktem Gras und Parabraunerde. Die Trockensubstanzgehalte wurden zu 8,8 %, 31,4 % und 83,4 % bestimmt. Im Kurvenverlauf sind deutlich die jeweils relativ kurze Anlaufphase zu erkennen, der Übergang zum exponentiellen Abfall sowie die teilweise sich anschließende Phase des Austriebes des Restwassers. Die Meßzeiten betragen hier ca. 10 bis 15 min. Zur vollständigen Aufnahme des Trocknungsverlaufs wurde der Trocknungsprozeß länger als für den Algorithmus notwendig registriert. Es zeigt sich, daß das besprochene Verfahren zur Bestimmung der Feuchte für die unterschiedlichsten Materialien über den gesamten Bereich vorkommender Feuchtigkeiten geeignet ist. Die Bestimmung geschieht relativ schnell und ohne aufwendige Vorbereitungen. Wegen der Mikrowellen ist sie jedoch nicht geeignet für Materialien mit guter elektrischer Leitfähigkeit (Metalle).

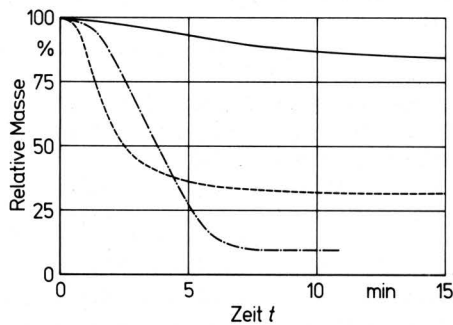


Bild 6. Trocknungsverläufe verschiedener Güter.

—	Parabraunerde	Z = 83,4 % U = 16,6 %
- - - - -	vorgewelktes Gras	Z = 31,4 % U = 68,6 %
- · - · -	frischer Rindermist	Z = 8,8 % U = 91,2 %

4.2 Fehleranalyse

Die hierzu untersuchten Ergebnisse beruhen auf 88 Messungen mit verschiedenen Proben sowie auf Simulationsrechnungen mit gemessenen Verläufen von vier Einzeltrocknungen. Untersucht sind insbesondere die erreichbaren Genauigkeiten, der Einfluß verschiedener Parametereinstellungen des verwendeten Algorithmus auf die Genauigkeit, der Einfluß des Materials sowie die Temperaturentwicklung innerhalb der Probe während der Trockensubstanz-schnellbestimmung. Als Proben wurden Glasfaserfiltermatten, Filterpapier und Kalksandsteinbrocken verwendet, da bei der Trocknung dieser Materialien nicht mit Meßfehlern infolge von Oxidation oder Entweichen flüchtiger Substanzen gerechnet werden muß.

4.2.1 Einfluß von Variablen des Algorithmus

Per Programm einstellbar sind hier insbesondere die Länge der Extrapolationsintervalle sowie die Größe der Fehlertoleranz Δm_s . Unter Länge der Extrapolationsintervalle ist die Zeitspanne zu verstehen, nach der der Rechner erneut eine Verrechnung der Meßergebnisse und Konvergenzkontrolle der Extrapolationswerte durchführt.

Um den Einfluß des Extrapolationsintervalles auf die Gesamtzeit der Feuchtebestimmung und die Größe des Restfehlers zu ermitteln, wurden die Meßwerte eines Trocknungsvorganges im Abstand von 1 s aufgenommen und im Rechner gespeichert. Diese Daten wurden dann mit dem im Bild 4 dargestellten Programm, jedoch mit unterschiedlichen Extrapolationsintervallen ausgewertet. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt **Bild 7**. Man erkennt, daß nach eher zufälligen Ergebnissen bei sehr kleinen Intervallzeiten sich ab einer Intervallzeit von 20 s der extrapolierte Wert immer genauer dem wahren Endwert nähert. Ab einer Intervallzeit von ca. 40 s ist praktisch keine Verbesserung der Genauigkeit mehr möglich, nur der Gesamtaufwand für die Feuchtebestimmung steigt weiter an.

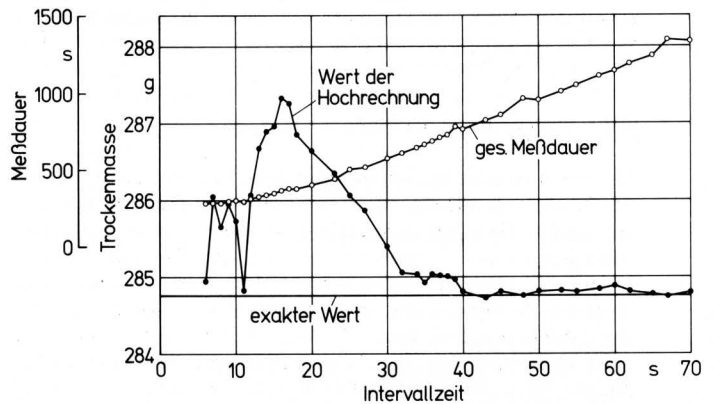


Bild 7. Genauigkeit der Extrapolation und Gesamttrocknungszeit bei Kalksandstein in Abhängigkeit von der Intervallzeit.

Zusätzlich wurde der zur Konvergenzüberprüfung notwendige, die Toleranzgrenzen bestimmende Faktor α , Bild 4 ($\Delta m_s = \alpha y_n$), variiert. Damit ließ sich das in **Bild 8** gezeigte dynamische, d.h. mit fortschreitender Trocknung enger werdende, Toleranzfeld ändern, und es zeigte sich, daß mit kleinerem α die Meßdauer größer wurde. Erwartungsgemäß verringerte sich auch die Fehlertoleranz der untersuchten Trocknungsversuche.

In der Praxis wird man also einen Kompromiß zwischen der Toleranz der Endergebnisse und dem dafür erforderlichen Zeitaufwand schließen müssen.

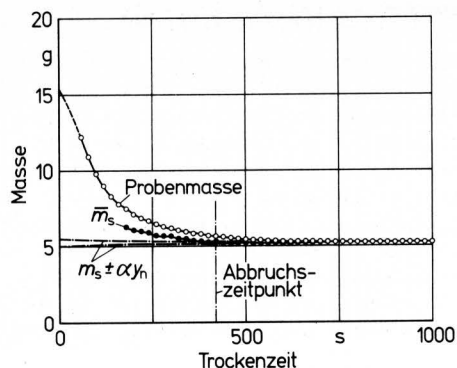


Bild 8. Zeitliche Entwicklung der Probemasse und der Hochrechnung bei gegebenen Fehlergrenzen.

4.2.2 Einfluß von Eigenschaften des Gutes

Wie erwähnt, wirken sich Materialeigenschaften und physikalische Parameter auf die in Gl. (4) enthaltene Zeitkonstante T und damit auf die Trocknungsdauer aus. Zur qualitativen Abschätzung dieser Einflüsse wurden als Proben Kalksandsteinbrocken und Glasfiltermatten verwendet. Da die auftretenden Trocknungsverläufe in ihrer Struktur gleich sind, können durch geeignete, der Trocknungsdauer angepaßte Extrapolationsintervalle Meßergebnisse mit gleichen Fehlertoleranzen erreicht werden. Im Interesse einer möglichst kurzen Meßdauer sollten die Proben möglichst in zerkleinerter und aufgelockerter Form eingegeben werden.

Von Einfluß auf die Fehlertoleranzen kann in geringem Umfang auch der Ausgangsfeuchtegehalt des Materials sein, da bei hohen Feuchtegehalten der exponentielle Verlauf der Trocknung erst nach einer Anlaufphase (s. Bild 6) erreicht wird. Beginnt man mit der Hochrechnung erst nach dieser Anlaufphase, so läßt sich ohne Vergrößerung der Fehlertoleranz die Intervallzeit und damit auch die Gesamtmeßdauer verkürzen. Der Startzeitpunkt der Hochrechnung kann hierbei vom Rechner selbst durch Überwachung des Trocknungsverlaufs bestimmt werden.

4.3 Temperatur in der Probe

Mit einem geschirmten Temperatursensor PT 100 wurden während des Trocknungsvorganges die Temperaturen in den Proben gemessen, Bild 9. Diese Messungen zeigten, daß sich nach einer kurzen Aufheizphase eine Temperatur von etwa 100 °C einstellt. Dies ist besonders im Hinblick auf organische Materialien von Bedeutung, da gerade dort die Gefahr des Verdampfens flüchtiger Stoffe oder der Oxidation anderer Bestandteile der Probe besteht. Eine behinderte Wasserdampfdiffusion, Verunreinigungen der Probe durch Metalle, besonders aber Metalle selbst, können jedoch zu wesentlich höheren Temperaturen als 100 °C führen.

5. Zusammenfassung

Es wird ein Gerätesystem vorgestellt, das es gestattet, die Bestimmung der Materialfeuchte durch Trocknen und Wägen genau und schnell durchzuführen. Die Methode eignet sich für nahezu alle Materialien und ist für den gesamten Bereich vorkommender Feuchten anwendbar. Sie basiert auf der Trocknung der Proben mittels

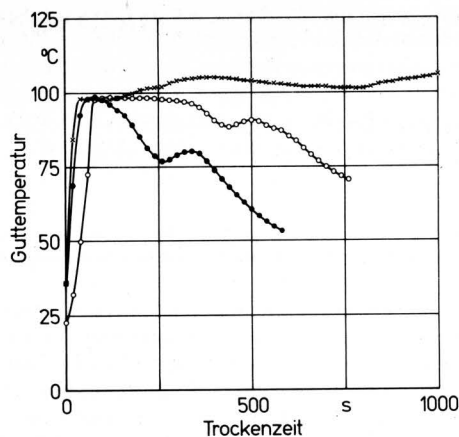


Bild 9. Temperaturverlauf verschiedener Materialien während des Trocknungsvorganges.

xxx Kalksandstein
ooo Glasfaserfilter
ooo Glasfaserfilter

Mikrowellen sowie der kontinuierlichen Überwachung des Trocknungsverlaufes mittels eines Rechners. Dieser ermittelt während der Trocknung kontinuierlich die Masse der Probe, extrapoliert auf den Endwert und schließt den Meßvorgang noch vor Trocknungsende ab, sobald die Trockenmasse mit ausreichender Genauigkeit ermittelt wurde. Zwei hierfür geeignete Algorithmen und deren Vor- und Nachteile werden diskutiert.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Lück, W.: Über die Schwierigkeiten, Materialfeuchte zu messen. Regelungstechnische Praxis und Prozeß-Rechentechnik Bd. 16 (1974) Nr. 3, S. 60/65.
- [2] ●Lück, W.: Feuchtigkeit. München, Wien: R. Oldenbourg 1964.
- [3] Ahlgrimm, H.-J.: Verschiedene Möglichkeiten der Feuchtebestimmung. Landbauforschung Völkenrode Bd. 27 (1977) Nr. 2, S. 97/104.
- [4] ●Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 1. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956.
- [5] VDMA 24 351: Trocknungstechnische Grundbegriffe. Berlin/Köln: Beuth-Vertrieb 1963.
- [6] Paul, W.: Ein direktes numerisches Verfahren zur Bestimmung der Parameter nichtlinearer Ausgleichsfunktionen. Biometrische Zeitschrift Bd. 17 (1975) Nr. 8, S. 487/500.
- [7] Schild, G.-J. u. H. Honig: Methodische Untersuchungen zur Bewertung von Grundfutter. 1. Teil: Schnellbestimmung des Trockenmassegehaltes im Grundfutter. Berichte über Landwirtschaft 191. Sonderheft (1975) S. 393/401.
- [8] Gupta, K.C. u. I.I. Bahl: RF-Applicators find jobs on Farms, in Factories. Journal of Microwave Power Bd. 13 (1978) Juni, S. 52/64.