

Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünland und Futterbau
Freising-Weihenstephan

Zur Ermittlung und statistischen Prüfung der Wasserabgabegeschwindigkeit von Futterpflanzen

Rita Kammerl, R. Ross und U. Simon

1. Einleitung

Die Trocknungsgeschwindigkeit des Erntegutes ist bei der Herstellung von Heu oder Anweilensilage von erheblicher Bedeutung. Je schneller das Pflanzenmaterial Wasser abgibt, umso mehr verringert sich die notwendige Trocknungszeit und damit das Risiko witterungsbedingter Futterwertminderungen, die bei langen Trocknungszeiträumen ein beträchtliches Ausmaß annehmen können (HONIG, 1980).

Die Wasserabgabe ist ein dynamischer Vorgang, dessen statistische Prüfung sich schwieriger gestaltet als die einer statischen Größe wie sie zum Beispiel der erreichte Endwassergehalt nach Ablauf einer Trocknungsperiode darstellt. Um verschiedene Pflanzen bezüglich dieser dynamischen Eigenschaften beurteilen zu können, ist eine statistische Analyse der Trocknungsverläufe erforderlich. Ein für solche Problemstellungen gut geeignetes Prüfungsverfahren ist die Kovarianzanalyse.

Obwohl dieses Verfahren schon 1935 von FISHER entwickelt wurde, wurde es bei der Auswertung von Trocknungsversuchen noch nicht angewendet. Es fehlten geeignete EDV-Programme, die die Verrechnung umfangreicher Datensätze in einem vertretbaren Zeitraum erlaubten. Daher wurden Verfahren eingesetzt, die einen paarweisen Vergleich von Trocknungsverläufen ermöglichten (HÜBNER und WAGNER, 1975; SCHMITT, 1983).

Ziel unserer Untersuchungen war die vergleichende Beurteilung des Wasserabgabevermögens von Futterpflanzenarten/-sorten mit Hilfe der Kovarianzanalyse, was durch moderne Statistikprogramme mit einem arbeitstechnisch vertretbaren Rechenaufwand ermöglicht werden kann. Dazu ist es erforderlich, die Trocknungsverläufe durch eine einheitliche Regressionsgleichung zu beschreiben.

2. Material und Methoden

2.1 Pflanzenmaterial und Durchführung der Trocknungsversuche

Von 19 Futterpflanzenarten und -sorten (Tabelle 1) wurden 1989 und 1990 in vier Entwicklungsstadien des ersten Aufwuchses (Tabelle 2) das Wasserabgabevermögen untersucht.

Tabelle 1: Untersuchte Pflanzenarten und -sorten

Pflanzenart	-sorte
Lolium multiflorum gaudini, diploid	Liwelo
Lolium multiflorum gaudini, tetraploid	Aubade
Lolium multiflorum italicum, diploid	Lema
Lolium multiflorum italicum, tetraploid	Tetraflorum
Lolium perenne, früh, diploid	Liprior
Lolium perenne, früh, tetraploid	Bastion
Lolium perenne, spät, diploid	Vigor
Lolium perenne, spät, tetraploid	Condesa ¹⁾
Dactylis glomerata, früh	Oberweihst
Dactylis glomerata, spät	Baraula
Poa pratensis	Union ³⁾
Phleum pratense	Lirocco
Festuca pratensis	Cosmos 11
Trifolium resupinatum	HS Iran ³⁾
Trifolium alexandrinum	Sacromonte ³⁾
Trifolium pratense, diploid	Lucrum ²⁾
Trifolium pratense, tetraploid	Tapiopoly ²⁾
Trifolium repens	Milkanova ³⁾
Medicago sativa	Luna ³⁾

1) keine Untersuchung 1989 2) keine Untersuchung 1990 3) keine Untersuchung im 1. Entwicklungsabschnitt 1990

In Feldbeständen der zu vergleichenden Arten/Sorten wurden um 7 Uhr MESZ 5 cm über der Bodenoberfläche Pflanzen abgeschnitten, in 10 cm lange Stücke zerkleinert und hiervon jeweils acht Proben von je 350 g auf Aluminiumrahmen mit Drahtgeflechtboden (560 x 450 x 50 mm) verteilt. Die Proben von jeweils 2 Arten/Sorten wurden gleichzeitig in 8 Wiederholungen in Memmert-Trockenschränken bei 45° C (1989) bzw. 50° C (1990) 10 Stunden lang getrocknet. Zu Beginn der Trocknung wurde der Wassergehalt bestimmt. Durch stündliches Wiegen der Proben wurde der Verlauf der Wasserabgabe festgestellt.

Tabelle 2: Der für den jeweiligen Schnitzeitpunkt im 1. Aufwuchs maßgebliche Entwicklungsabschnitt

Schnitt	Gräser	Leguminosen
I	Halmstreckung	Blattstadium
II	Beginn Ähren-/Rispschieben	Vorknospenstadium
III	Ende Ähren-/Rispschieben	Knospenstadium
IV	Blüte	Blüte

2.2 Beschreibung der Trocknungsverläufe durch die Regressionsanalyse

Die während der 10stündigen Trocknungszeit festgestellte Wasserabgabe kann mit Hilfe der einfachen linearen Regressionsgleichung in ihrer allgemeinen Formel $y = a + bx$ beschrieben werden. Im vorliegenden Fall verwenden wir $y = a - bt$, wobei

y = der Wassergehalt zum Zeitpunkt t

a = Intercept; errechneter Wassergehalt zu Beginn der Trocknung

b = Regressionskoeffizient; hier negativ

t = Trocknungszeit in Stunden.

Tatsächlich verläuft die Abnahme des Wassergehaltes bei der Trocknung von Futterpflanzen in vielen Fällen nicht linear. Da aber für den Vergleich von Trocknungsverläufen mit Hilfe der Kovarianzanalyse die Linearität der Regressionen Voraussetzung ist, muß versucht werden, die Grunddaten so umzuformen, daß sich lineare Regressionen ergeben. Dies kann einmal dadurch angestrebt werden, daß der Gehalt an Wasser nicht in der üblichen Weise als

$$\text{relativer Wassergehalt } F_N = \frac{\text{Wassermasse}}{\text{Gesamtmasse}} \times 100$$

ausgedrückt wird, sondern als

$$\text{prozentualer Feuchtegrad } F_T = \frac{\text{Wassermasse}}{\text{Trockenmasse}} \times 100$$

[vgl. SPATZ et al. (1970)]. Eine weitere Möglichkeit stellt die Transformation der Daten in den natürlichen Logarithmus \ln dar (RIEDWYL, 1980; WEBER, 1986).

Somit ergeben sich die vier Datensätze

- relativer Wassergehalt F_N
- logarithmierter relativer Wassergehalt $\ln F_N$
- prozentualer Feuchtegrad F_T
- logarithmierter prozentualer Feuchtegrad $\ln F_T$.

Für diese Datensätze wurden die linearen Regressionen nach der Formel $y = a - bt$ errechnet. Vor der Anwendung der Kovarianzanalyse war jedoch die Linearität der

Regressionen zu prüfen. Dies geschah nach den von RIEDWYL (1980) und WEBER (1986) beschriebenen Verfahren.

2.3 Statistische Prüfung des Wasserabgabevermögens mit Hilfe der Kovarianzanalyse

Nach der von RIEDWYL (1980) beschriebenen Prüfung der Parallelität von zwei Regressionsgeraden hat ROSS (1990) dieses Verfahren für den Vergleich beliebig vieler Regressionsgeraden erweitert. Mit diesem von ROSS (1990) entwickelten Verfahren wurden die Regressionsparameter a und b getestet, ob entsprechend der dreifaktoriellen Versuchsanlage signifikante Unterschiede zwischen Pflanzenart/-sorte, Entwicklungsabschnitt und Versuchsjahr vorhanden sind. Beide Regressionsparameter können des weiteren mit einem üblichen multiple-range-Test auf signifikante Unterschiede der Einzelwerte getestet werden.

Die statistischen Verrechnungen wurden mit Hilfe des Programmpaketes "Statistical Analysis System" durchgeführt. Die spezielle Anwendung der Kovarianzanalyse wurde von ROSS (1990) formuliert, da die gebräuchlichen Programmpakete keine dafür vorgefertigten Rechenanweisungen enthalten. Für die Durchführung des multiple-range-Testes fertigte ROSS aus dem gleichen Grund ein PC-Programm an.

3. Ergebnisse

3.1 Regressionen und ihre Linearität

Tabelle 3 enthält den relativen Anfangs- und Endwassergehalt sowie für die gewählten Bezugsgrößen den Intercept a, den Regressionskoeffizienten -b, das Bestimmtheitsmaß B, den Variationskoeffizienten C. V. sowie die Signifikanz ($P < 5\%$) der Linearität nach dem F-Test. Die Ergebnisse der auf der Grundlage des prozentualen Feuchtegrades F_T durchgeführten Regressionsanalysen sind wegen des stark erhöhten Variationskoeffizienten bezogen auf die Gesamtregression (48 %) nicht berücksichtigt.

Ausgehend von einem durchschnittlichen relativen Wassergehalt von 83,6 % wurde während der zehnstündigen Trocknung im Mittel ein relativer Endwassergehalt von 42,0 % erreicht. Das Bestimmtheitsmaß B gibt Aufschluß über die durchschnittliche Entfernung der einzelnen Meßwerte von der Regressionsgeraden. In dieser Hinsicht schneiden die auf der Grundlage des logarithmierten relativen Wassergehalts errechneten Regressionen deutlich schlechter als die beiden anderen Verfahren ab. Entscheidend für die Eignung zur Durchführung der Kovarianzanalyse ist jedoch die Linearität der Regressionen. Bei dem vorliegenden Datensatz erweist sich der logarithmierte prozentuale Feuchtegrad $\ln F_T$ als am besten zur Beschreibung der Trocknungsverläufe geeignet; denn in diesem Fall sind von 19 Pflanzenarten/-sorten 18 Regressionen signifikant linear, bei F_N jedoch nur 11 und bei $\ln F_N$ nur 2 Regressionen.

Tabelle 3: Wassergehalt zu Beginn und am Ende der Trocknung sowie statistische Kenndaten der Regressionsanalysen ($Y = a - bt$)

Pflanzenart bzw. -sorte	F_N (%)	F_T (%)	Y = F_N				Y = $\ln F_N$				Y = $\ln F_T$				
			a	-b	B	C. V. (%)	a	-b	B	C. V. (%)	a	-b	B	C. V. (%)	
Lotium multiflorum gaud., diploid	86,3	46,4	88,8	4,130	0,74	11,4	2,11	4,5	0,066	0,63	3,8	4,79	6,4	0,78	0,12*
Lotium multiflorum gaud., tetraploid	87,4	54,7	89,4	3,390	0,75	8,7	1,82*	4,5	0,049	0,69	2,5	3,94	6,6	0,78	0,39*
Lotium multiflorum tall., tetraploid	82,0	40,6	83,6	4,314	0,75	12,8	0,69*	4,5	0,108	0,59	7,2	4,63	6,0	0,75	0,15*
Lotium multiflorum tall., diploid	79,0	30,5	80,6	5,053	0,78	15,4	0,74*	4,5	0,077	0,63	4,5	3,20	6,0	0,76	0,17*
Lotium perenne, spät, tetraploid	82,8	41,5	85,3	4,260	0,83	9,0	1,94	4,4	0,072	0,74	3,3	4,68	6,2	0,86	0,18*
Lotium perenne, spät, diploid	80,3	37,5	80,9	4,398	0,83	10,6	2,31*	4,5	0,080	0,72	3,0	3,05	6,0	0,83	0,43*
Lotium perenne, früh, tetraploid	84,1	46,4	86,2	3,891	0,81	9,0	2,38	4,5	0,062	0,72	3,0	5,92	6,3	0,86	0,49
Lotium perenne, früh, diploid	81,9	40,4	83,6	4,258	0,79	11,1	1,07*	4,5	0,075	0,68	4,0	4,68	6,0	0,80	0,02*
Dactylis glomerata, spät	81,3	41,1	82,8	4,191	0,86	8,6	1,42*	4,5	0,072	0,79	2,9	5,36	6,1	0,87	0,71*
Dactylis glomerata, früh	82,3	46,4	83,2	3,711	0,73	11,1	0,34*	4,4	0,061	0,67	3,3	1,60*	6,2	0,75	0,65*
Phleum pratense	78,9	22,3	80,0	5,968	0,87	14,3	1,64*	4,5	0,142	0,65	8,6	4,21	6,0	0,81	0,06*
Festuca pratensis	80,1	41,3	81,2	3,999	0,84	8,9	0,75*	4,4	0,069	0,77	2,9	4,11	6,0	0,79	0,06*
Trifolium respicatum	89,9	50,4	94,2	3,963	0,69	11,2	1,17*	4,6	0,060	0,57	3,8	9,68	6,9	0,77	0,06*
Trifolium alexandrinum	87,5	47,6	91,2	4,030	0,71	11,4	4,89	4,6	0,064	0,55	4,3	6,77	6,7	0,76	0,86*
Trifolium pratense, tetraploid	88,1	52,3	91,1	3,682	0,84	6,9	6,32	4,5	0,054	0,76	2,2	6,96	6,7	0,89	0,38*
Trifolium pratense, diploid	86,9	52,0	89,5	3,573	0,82	7,4	2,90	4,5	0,052	0,78	2,0	6,02	6,6	0,89	0,38*
Medicago sativa	82,6	36,3	85,0	4,800	0,80	12,5	1,33*	4,5	0,087	0,71	4,4	5,23	6,2	0,81	0,10*
Entwicklungsabschnitt I	87,9	45,10	87,9	4,510	0,70	14,4	5,96	4,5	0,079	0,54	5,6	15,34	6,4	0,71	0,25*
Entwicklungsabschnitt II	84,9	46,6	87,0	3,956	0,68	12,8	5,18	4,5	0,069	0,50	5,0	11,08	6,4	0,68	0,46*
Entwicklungsabschnitt III	83,3	43,8	85,3	4,045	0,67	13,8	3,47	4,5	0,069	0,56	4,6	13,38	6,3	0,67	0,27*
Entwicklungsabschnitt IV	80,7	35,5	82,3	4,641	0,73	15,2	2,52	4,5	0,089	0,60	5,7	15,17	6,1	0,212	0,08*
Versuchsjahr 1989	83,6	43,1	85,3	4,176	0,66	14,8	4,74	4,5	0,072	0,53	5,2	19,64	6,3	0,200	0,66
Versuchsjahr 1990	83,3	40,7	85,8	4,394	0,68	15,0	10,92	4,5	0,079	0,53	5,7	31,37	6,3	0,210	0,68
Gesamt	83,5	42,0	85,5	4,279	0,67	14,9	14,57	4,5	0,075	0,53	5,5	50,18	6,3	0,205	0,67

3.2 Test der Parallelität der Regressionsgeraden mit Hilfe der Kovarianzanalyse

Die Kovarianzanalyse wurde wegen der in fast allen Fällen signifikanten Linearität der Regressionen mit den logarithmierten prozentualen Feuchtegraden $\ln F_T$ durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Tabelle 4: Kovarianzanalyse der Regressionsparameter des logarithmierten prozentualen Feuchtegrades $\ln F_T$

Varianzursache	SQ	FG	MQ	F-Wert	Signifikanz P < 0,1 %
Gesamt	7309,62	11661	—	—	—
a Pflanze	334,35	18	18,5749	282,76	***
a Entwicklungsabschnitt	63,26	3	21,0877	321,01	***
a Jahr	5,56	1	5,5635	84,69	***
a Pflanze x Entwicklungsabschnitt	39,27	54	0,7272	11,07	***
a Pflanze x Jahr	9,03	15	0,6020	9,16	***
a Entwicklungsabschnitt x Jahr	1,16	3	0,3860	5,87	***
a Pflanze x Entwicklungsabschnitt x Jahr	17,80	40	0,4450	6,77	***
Regression	4806,26	1	4806,2559	110213,56	***
b Pflanze	145,76	18	8,0980	185,70	***
b Entwicklungsabschnitt	22,04	3	7,3451	168,43	***
b Jahr	4,03	1	4,0289	92,39	***
b Pflanze x Entwicklungsabschnitt	34,53	54	0,6394	14,66	***
b Pflanze x Jahr	12,25	15	0,8167	18,73	***
b Entwicklungsabschnitt x Jahr	16,12	3	5,3720	123,19	***
b Pflanze x Entwicklungsabschnitt x Jahr	34,48	40	0,8620	19,77	***
Fehler a	757,17	11526	0,0657	—	—
Fehler b	496,79	11392	0,0436	—	—

Anmerkung: Aufgrund einiger fehlender Daten (siehe Tabelle 1) ist bei den Wechselwirkungen Pflanze x Jahr und Pflanze x Entwicklungsabschnitt x Jahr die Zahl der Freiheitsgrade kleiner als das Produkt der Freiheitsgrade der Hauptwirkungen.

Alle Einflußfaktoren beeinflussen die Regressionsparameter a und b hochsignifikant. Die hochsignifikanten Wechselwirkungen (Pflanze x Entwicklungsabschnitt, Pflanze x Jahr, Pflanze x Entwicklungsabschnitt x Jahr und Entwicklungsabschnitt x Jahr) weisen darauf hin, daß sich die Regressionsparameter bei den einzelnen Pflanzenarten bzw. -sorten im Laufe ihrer Entwicklung nicht gleichsinnig ändern. Gleiches gilt für den Jahreseinfluß auf die einzelnen Pflanzenarten bzw. -sorten sowie auf die Entwicklungsstadien.

Die detaillierte Einzelbeurteilung der Wasserabgabegeschwindigkeit der Pflanzenarten/-sorten in Abhängigkeit vom Entwicklungsabschnitt und Versuchsjahr bleibt einer weiteren Publikation vorbehalten.

4. Diskussion

4.1 Zur Beschreibung von Trocknungsverläufen mit Hilfe von Regressionsgleichungen

Futterpflanzen sind kapillarporöse, hygroskopische Stoffe, die ein Mehrfaches ihrer Trockenmasse an Wasser binden können. Die Wasserabgabe von Futterpflanzen verläuft in drei Phasen (siehe KRISCHER, 1963), für die abnehmende Trocknungsgeschwindigkeiten charakteristisch sind. Denn mit dem während der Trocknung abnehmenden Wassergehalt nimmt die Sorptionskraft des trocknenden Materials zu. Demzufolge nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit, definiert als die pro Trockenmasse- und Zeiteinheit abgegebene Wassermenge, im Verlauf des gesamten Trocknungsabschnittes bis zum Erreichen eines Sorptionsgleichgewichtes ab (WIENEKE, 1972).

Für die Beschreibung des gesamten dreiphasigen Trocknungsverlaufs erscheinen multiple Regressionsgleichungen als besonders geeignet (siehe JONES, 1979). Eine häufig verwendete Zwei-Term-Funktion ist die quadratische Funktion mit einem linearen Glied (JONES, 1979; SPATZ et al., 1970). Bei der Beschreibung von Trocknungsverläufen eines gräserreichen Mähweidebestandes unter Freilandbedingungen bestätigen SPATZ et al. (1970), daß mit einer quadratischen Funktion höhere Bestimmtheitsmaße erreicht werden konnten als mit einer linearen Ein-Term-Funktion. Damit stimmt überein, daß SCHMITT (1983) den gesamten dreiphasigen Trocknungsverlauf (Endwassergehalte im Mittel 16 %) einzelner Gräser mit einer Ein-Term-Funktion nicht in jedem Falle signifikant linear beschreiben konnte. Wird ein Trocknungsverlauf durch eine Mehr-Term-Gleichung beschrieben, läßt sich auch der letzte Trocknungsabschnitt mit stark sinkender Trocknungsgeschwindigkeit sehr genau erfassen. Die vergleichende Beurteilung des Wasserabgabevermögens von Futterpflanzen ist aber erschwert, da der Verlauf der Wasserabgabe in diesem Falle durch mehrere Parameter beschrieben wird, die sich nicht immer gleichsinnig ändern (vgl. SPATZ et al., 1970).

In vorliegender Untersuchung wurden die Trocknungsbedingungen (Zerkleinern der Pflanzentriebe, Einwaagemenge, Luftdurchsatz, Trocknungstemperatur und -dauer) so gewählt, daß der für das Vorwelken und die Heubereitung wichtige Trocknungsabschnitt von bis zu ca. 50 bis 30 % Restfeuchte zur Untersuchung kam. Dabei war von Vorteil, daß bei den Trocknungsversuchen auf eine Nachtunterbrechung bzw. auf eine Trocknungszeit ohne kontinuierliche Wägungen verzichtet werden konnte (vgl. HÜBNER und WAGNER, 1968 und 1975). Während dieses Trocknungsabschnittes ließ sich die Wasserabgabe im zeitlichen Verlauf sehr genau mit einer Ein-Term-Funktion beschreiben. Dies steht in Einklang mit den bislang umfangreichsten Ergebnissen von HÜBNER und WAGNER (1975), die ebenfalls am Ende der Trocknungsversuche einen ähnlichen Wassergehalt von 60 bis 45 % erzielten.

4.2 Zur Art der Darstellung des Wassergehaltes in der Regressionsgleichung

Für die Anwendung der Kovarianzanalyse ist die Beschreibung der Trocknungsverläufe mit einer signifikant linearen Regressionsgleichung Voraussetzung. Vorliegender Datensatz ist geeignet, um aufzuzeigen, daß sich je nach Definition des Wassergehal-

tes unterschiedlich gut geeignete Regressionsgeraden ergeben können. Wie zu erwarten war, erwies sich der prozentuale Feuchtegrad, der eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit unterstellt, für die Beschreibung des gesamten Trocknungsverlaufs als nicht geeignet. Der zu erwartende lineare Verlauf konnte in vorliegender Untersuchung signifikant mit Hilfe des logarithmierten prozentualen Feuchtegrades beschrieben werden. Im Vergleich zum relativen Wassergehalt und zum logarithmierten relativen Wassergehalt ließ sich der tatsächliche Trocknungsverlauf während des gesamten Untersuchungszeitraumes genauer erfassen. Der Wassergehalt zu Trocknungsbeginn wurde in diesem Falle nicht mehr oder weniger stark überschätzt. Auch SPATZ et al. (1970) verwendeten den prozentualen Feuchtegrad als Zielgröße und stellten nach Transformation in den natürlichen Logarithmus höhere Bestimmtheitsmaße fest. Generell hängt es von der jeweiligen Versuchsmethodik (z. B. Vorbehandlung des Trockengutes, Trocknungstemperatur und -dauer) und somit von dem festgestellten Trocknungsabschnitt und -verlauf ab, welche Darstellungsform des Wassergehalts sich am besten für die Auswertung eines Datensatzes eignet. Da hierzu keine verallgemeinerungsfähigen Aussagen möglich sind, muß bei jedem Datensatz erneut die am besten geeignete Darstellungsform ermittelt werden. HÜBNER und WAGNER (1975) legten ihrer Auswertung den relativen Trockenmassegehalt und SCHMITT (1983) den logarithmierten relativen Wassergehalt zugrunde. Die Wahl der Darstellungsform kann allerdings von entscheidender Bedeutung sowohl für die Rangordnung in multiplen Vergleichen des Wasserabgabevermögens als auch für die Linearität der Regressionsgeraden und damit für die Zulässigkeit der Kovarianzanalyse sein. In vorliegender Arbeit zeigt sich, daß die getroffene Endaussage zum Wasserabgabevermögen der Pflanzen durch die gewählte Darstellungsform des Wassergehalts beeinflusst sein kann. Im übrigen ist dies schon bei der Wahl der Versuchsanstellung zu bedenken. Denn unterschiedliche Aussagen zur Trocknungsfähigkeit lassen sich insbesondere bei blattreichen Materialien auf unterschiedlich hohe und dichte Schichtungen zurückführen (vgl. HÜBNER und WAGNER, 1968 und 1975; ISSELSTEIN und RIDDER, 1993).

4.3 Zur Anwendung der Kovarianzanalyse bei der Beurteilung der Wasserabgabegeschwindigkeit

Durch die Regressionsanalyse eines Trocknungsverlaufs wird es möglich, den dynamischen Vorgang der Wasserabgabe unabhängig von dem veränderlichen Wassergehalt zu Beginn der Trocknung zu ermitteln. Bislang wurden Differenzen der Regressionsparameter paarweise mit dem t-Test geprüft (SCHMITT, 1983). Bei HÜBNER und WAGNER (1975) beruhte der paarweise Vergleich auf der Ermittlung von Trockenzeit-Unterschieden bis zum Erreichen eines bestimmten Trockenmassegehaltes. In vorliegender Arbeit wurde die statistische Prüfung nicht nur zweier Trocknungsverläufe, sondern einer mehrfaktoriellen Versuchsanlage beispielhaft aufgezeigt. Dabei lassen sich die Effekte mehrerer Einflußfaktoren (im vorliegenden Fall Pflanzenart/-sorte, Entwicklungsabschnitt, Versuchsjahr) auf die Wasserabgabegeschwindigkeit, aber auch auf den Wassergehalt beim Schnitt in einer gemeinsamen Verrechnung aller Trocknungsdaten testen. Des weiteren können die Ergebnisse mit Hilfe eines multiplen Mittelwertvergleichs einer weiteren Analyse unterzogen werden. Die Auswertung umfangreicher Versuchsserien, wie sie am hiesigen Lehrstuhl durchgeführt

werden, wird durch die aufgezeigte Auswertungsmethodik erleichtert und präzisiert bzw. überhaupt erst ermöglicht.

5. Zusammenfassung

Die Wasserabgabegeschwindigkeit von 19 Arten und Sorten von Futtergräsern und -leguminosen wurde in zwei Versuchsjahren in verschiedenen Entwicklungsabschnitten des ersten Aufwuchses geprüft. Während einer zehnstündigen Trocknung bei 45° C bzw. 50° C wurde von in 10 cm Länge zerschnittenen Pflanzentrieben die Wasserabgabe in stündlichen Intervallen festgestellt. Der relative Wassergehalt betrug zu Beginn der Trocknung im Mittel 83,6 %, am Ende der Trocknung 42,0 %. Um den dynamischen Vorgang der Wasserabgabe unabhängig von dem veränderlichen Wassergehalt zu Beginn der Trocknung ermitteln und statistisch prüfen zu können, wurden die Trocknungsverläufe durch die einfache lineare Regressionsgleichung $y = a - bt$ beschrieben. Dabei wurden verschiedene Darstellungsformen des Wassergehaltes (relativer Wassergehalt F_N , prozentualer Feuchtegrad F_T , logarithmierter relativer Wassergehalt $\ln F_N$ und logarithmierter prozentualer Feuchtegehalt $\ln F_T$) auf ihre Eignung geprüft. Die für die vergleichende statistische Prüfung der Trocknungsverläufe mit Hilfe der Kovarianzanalyse erforderliche Linearität der Regression ließ sich bei den vorliegenden Daten am besten durch $\ln F_T$ erreichen. Für den Vergleich von zahlreichen Trocknungsverläufen wurde die Anwendung der Kovarianzanalyse zur Auswertung einer mehrfaktoriellen Versuchsanlage beispielhaft aufgezeigt. Durch dieses Testverfahren wird die einheitliche Beurteilung des Wasserabgabevermögens von Pflanzen in Abhängigkeit von zahlreichen Einflußfaktoren erleichtert und präzisiert.

Summary

On the Determination and Statistical Analysis of the Rate of Water Loss of Forage Plants

The rate of water loss of 19 species and varieties, respectively, of forage grasses and legumes was investigated during two years in the primary growth at four stages of growth. During a period of 10 hours at 45° or 50° C, the drying rate of plant material chopped to pieces of 10 cm length was determined in hourly intervals. The average initial and final water contents were 83,6 % and 42,0 % respectively. In order to investigate the dynamic process of water loss independent of the initial water content, the reduction of the water content was described by the linear regression equation $y = a - bt$. Four different specification were used to express the matter content vs. with different specifications for the water content

(a) water content related to total plant matter; (b) water content related to plant dry matter; (c) a transformed to natural logarithm; (d) b transformed to natural logarithm.

The highest degree of linearity of the regression equations, which is a prerequisite for the valid application of the analysis of covariance, was obtained by the use of water content specification (d). The data of this specification were used for the analysis of covariance which enables the simultaneous test of significance of the rates of water loss within a threefactorial experimental design. This statistical procedure appears to be more precise and easier to perform than previously described procedures.

6. Literatur

ELSÄSSER, M. (1984): Auswirkungen der Heubelüftung mit solarerwärmter Trocknungsluft auf Qualitätseigenschaften von Mähweidefutter. Dissertation Hohenheim.

ELSÄSSER, M. (1990): Trocknungsverhalten von Gräsern in dünnen Schichten in Abhängigkeit vom Wuchsstadium beim Schnitt. Das wirtschaftseig. Futter 36, 158 - 174.

HONIG, H. (1980): Mechanical and respiration losses during pre-wilting of grass. Brit. Grassl. Soc. Occasional Symp. No. 11, Brighton, 201 - 204.

HÜBNER, R. und F. WAGNER (1968): Beitrag zum Anwelke- bzw. Abrocknungsverlauf einiger Futterpflanzen. Das wirtschaftseig. Futter 14, 218 - 230.

HÜBNER, R. und F. WAGNER (1975): Untersuchungen über den Trocknungsverlauf von Gräsern und Kleearten. Das wirtschaftseig. Futter 21, 247 - 263.

ISSELSTEIN, J. und Petra RIDDER (1993): Untersuchungen zum Trocknungsverlauf ausgewählter Grünlandkräuter unter kontrollierten Bedingungen. Das wirtschaftseig. Futter 39, 136 - 145.

JONES, L. (1979): The effect of stage of growth on the rate of drying of cut grass at 20° C. Grass and Forage Sci. 34, 139 - 144.

KRISCHER, O. (1963): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. I, 2. Aufl., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

RIEDWYL, H. (1980): Regressionsgerade und Verwandtes. Verlag Paul Haupt (UTB, 923), Bern und Stuttgart.

ROSS, R. (1990): Untersuchungen zum Wasserabgabevermögen verschiedener Futtergräser und -leguminosen in Abhängigkeit von deren Entwicklungsstadium. Diplomarbeit TU München-Weihenstephan.

SCHMITT, P. (1983): Trocknungsverlauf von verschiedenen Futtergrasarten in Abhängigkeit von deren Entwicklungsstadium im Ablauf der Vegetationsperiode. Diplomarbeit Hohenheim (zit. ELSÄSSER, M. 1984 und 1990).

SPATZ, G., J. VAN EIMERN, R. LAWRYNOWICZ (1970): Der Trocknungsverlauf von Heu im Freiland. Bayer. landwirtschaftl. Jahrbuch 47, 446 - 464.

WEBER, Erna (1986): Grundriß der biologischen Statistik. 9. Aufl., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

WIENEKE, F. (1972): Verfahrenstechnik der Halmfutterproduktion. Eigenverlag Göttingen.

Anschrift der Verfasser:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Grünland und Futterbau
D-85350 Freising-Weihenstephan