Gartenbauwissenschaft, 66 (4). S. 172–181, 2001, ISSN 0016–478X. © Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

Physiologisches Nacherntеverhalten von Thymian (*Thymus vulgaris* L.)

Physiological Postharvest Response of Thyme (*Thymus vulgaris* L.) Herbs

H. Böttcher, Ingeborg Günther und L. Kabelitz
(Institut für Ernährungswissenschaften der Landwirtschaftlichen Fakultät Halle und PhytoLab GmbH u. Co. KG Vestenbergsgreuth

Zusammenfassung

Frisch geerntete Thymian-Pflanzen (*Thymus vulgaris* L.), Sorte 'Deutscher Winter', sind durch eine relativ hohe Atmungsintensität gekennzeichnet und erreichen im Mittel von 7 Versuchen bei 10 °C 576 ± 126 W t^{-1} [Watt · Tonne^{-1}], bei 20 °C 1281 ± 338 W t^{-1} und bei 30 °C 2366 ± 637 W t^{-1}. Diese Intensität bleibt auch während eines 80-stündigen Nacherntelagerns erhalten, denn die Werte nehmen in diesem Zeitraum bei 10 °C nur um 60 %, bei 20 °C um 59 % und bei 30 °C um 63 % ab. Der Verlauf der Atmungsrate von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit (x in Stunden) wird durch die Regressionsfunktion $\hat{y} = \alpha + \beta \cdot e^{c(x-z)}$ ($c < 0$) zutreffend beschrieben, wobei ß den alterungsabhängigen Rückgang kennzeichnet. Die ausgeprägte Atmungs- und Transpirationsaktivität führt zu einem Frischmasseverlust von 1,50 % in 24 h (10 °C). Die äußeren Qualitätsmerkmale, die für die Verwendung als Gewürz und Tee auch entscheidend sind, werden bei 10 °C am besten erhalten, bei höheren Temperaturen werden sie zunehmend schneller abgebaut. Bei Bedingungen zwischen 10 und 30 °C treten in Thymian-Pflanzen im Verlauf von 80 h Nachlagerung praktisch keine Verluste an ätherischen Ölen und ihrer Hauptkomponente Thymol ein, wenn die auftretenden Atmungs- und Transpirationsverluste berücksichtigt werden. In einem Versuch ist sogar eine prämortale Neubildung von ätherischen Ölen (+ 20,8 %) und von Thymol (+12,6 %) bei 10 °C ermittelt worden. Die Flavonoide, bestimmt als Rutosid, zeigten mit Erhöhung der Lagertemperatur zunehmend Verluste, die bei 10 °C 3,3%, bei 20 °C 8,4 % und bei 30 °C 11,2 % bezogen auf den Erntetag erreichten. Die erhaltenen Atmungswerte können zur energetischen Kalkulation von nacherntetechnologischen Maßnahmen (Belüften, Kühlen, Trocknen u.a.) herangezogen werden.

Summary

Freshly harvested thyme herbs (*Thymus vulgaris* L.), variety „Deutscher Winter", have a relatively high respiration rate. On the average of 7 trials 576 ± 126 W t^{-1}, 1281 ± 338 W t^{-1} and 2366 ± 637 W t^{-1} [Watt · ton^{-1}] were recorded at 10 °C, 20 °C and 30 °C respectively. These levels were maintained throughout 80 h postharvest storage, as the values declined during this period by only 60 % at 10 °C, 59 % at 20 °C and 63 % at 30 °C. The pattern of the respiration rate of thyme herbs during the postharvest period (x in hours) can be clearly described by the regression function $\hat{y} = a + ß \cdot e^{c(x-z)}$ ($c < 0$), where ß is the senescence-depending decrease. The vivid respiration and transpiration activity results in a fresh weight loss of 1.50 % in 24 h (10 °C). The external quality traits demanded also for culinary herb and tea products are best preserved at 10 °C. With increasing temperature the decline is progressive, too. Between 10 °C and 30 °C 80 h postharvest storage thyme plants showed no marked loss of essential oils and the main component thymol, if the involved respiration and transpiration losses were considererd. In one test even a premortal syntheses of essential oils (+20.8 %) and thymol (+12,6 %) was observed at 10 °C. The flavonoids determined in form of rutoside, showed increasing losses with rising storage temperature, which amounted to 3,3 % at 10 °C, 8.4 % at 20 °C and 11,2 % at 30 °C, compared with the samples collected on the day of harvest. The resulting respiration values may be used for the energetic calculation of postharvest treatments (ventilating, cooling, drying a.o.)

Einleitung

Eine anspruchsvolle Speisenbereitung ist auch mit einem vermehrten Einsatz von in der Natur vorkommenden Gewürzen verbunden, wobei nicht nur die Menge, sondern vorrangig auch die Qualität der verwendeten Gewürze steigenden Anforderungen unterliegen. Durch Züchtung neuer Sorten und Optimierung der Anbauverfahren wurden schon beträchtliche Fortschritte erreicht. Zunehmend rücken nun die Ernte- und Nacherntebehandlung aus Sicht der Qualität in das Blickfeld der Untersuchungen. Thymian wird für pharmazeutische Zwecke und als Gewürz für Fleisch- und Salatspeisen genutzt, wobei sowohl die äußeren als auch die inneren Qualitätseigenschaften von großer Bedeutung sind.

Die wichtigsten ablaufenden physiologischen Prozesse in den geernteten Pflanzen unmittelbar nach dem Schnitt auf dem Felde sind die Atmung, Transpiration, Alterung, Reifung und Veränderung der äußeren Qualitätseigenschaften (KAYS 1991, CANTWELL und REID, 1993 und AHARONI et al. 1993). Eine Schlüsselposition nimmt dabei der Atmungsablauf ein, denn er setzt

Tab. 1. Charakterisierung des Erntegutes Thymian und seiner anfänglichen Atmungsintensität bei Meßbedingung von 10 °C
Characterization of plant crops and their initial respiration heat release at measurement conditions of 10 °C

Versuchs-Nr.	Standjahr	Schnitt	Erntedatum	Entwicklungszustand	Standort	genutzte Sproßlänge in cm	Trockenmasse %	Temperatur Luft °C	Temperatur Produkt °C	Klima während der Ernte	Atmungsintensität W t^{-1}
1	1	1	30.08.93	Blühbeginn 1–2%	Halle	18	25,0	17	15	trüb, regnerisch	606 … 652
2	2	1	25.05.94	10% Blüte	Halle	12–15	23,0	23	21	nach Gewitter	640 … 679
3	1	1	10.09.94	1% Blüte	Calbe	14–22	22,0	14	20	trüb, kühl, regenfeucht	290 … 306
4	1	1	28.08.95	0% Blüte	Calbe	13–17	34,0	17	20,6	kühl, nach Regenschauer, vorher Hitzeperiode	481 … 513
5	1	1	31.08.95	ohne Blüten	Halle	12–16	30,7	16	15	trüb, regnerisch	647 … 656
6	2	1	12.06.96	15% Blüten	Halle	15–20	28,8	26	25	hochsommerlich, schwül	584 … 594
7	1	1	19.08.96	ohne Blüten	Calbe	15–20	25,6	28	25	sonnig, warm	444 … 521

einerseits die Atmungsenergie frei, welche als Produkttemperatur wahrgenommen wird, zum anderen liefert er die notwendige Energie für die im Pflanzenmaterial ablaufenden biologischen Reaktionen und damit auch für den sekundären Stoffwechsel, der für das Auftreten der geschätzten Wirkstoffe in den Pflanzenorganen verantwortlich ist. Er führt aber auch zu einem Verlust an organischer Substanz.

Über das spezielle physiologische Verhalten der Arznei- und Gewürzpflanzen nach der Ernte ist noch relativ wenig bekannt, doch neuerdings sind vertiefte Erkenntnisse bereits zu den Gewürzpflanzen Majoran und einjähriges Bohnenkraut vorgelegt worden (BÖTTCHER et al. 1999a und 2000a).

Erste Untersuchungen zeigten eine beträchtliche Variabilität im Verhalten der einzelnen Arten hinsichtlich ihrer Stoffwechselaktivität (BÖTTCHER und GÜNTHER 1995), die einerseits in Beziehung zu den genutzten Pflanzenorganen und andererseits zu den jährlichen Witterungs- und Wachstumsbedingungen steht. Thymian-Pflanzen zeigten in ersten Messungen eine beträchtliche Atmungsintensität, die unmittelbar nach der Ernte bei 10 °C mit 686 bis 732 W t^{-1} (BÖTTCHER und GÜNTHER, 1995) und nach 3 Tagen Lagern bei 10 °C mit 260 und bei 20 °C mit 684 W t^{-1} (CANTWELL und REID 1993) bestimmt wurde. Die visuelle Qualität des Lagergutes ist in den gleichen Versuchen bei 10 °C „sehr gut“ und bei 20 °C „gut“ erhalten geblieben. Der Wasserverlust lag bei 14–18 ml dm^{-2} 24 h^{-1}. Die Ethylenempfindlichkeit wird als „schwach ausgeprägt“ eingeschätzt, denn bei Bedingungen von 22 °C wurde erst bei einer Konzentration von 30 ppm Ethylen in der Lagerluft eine Reaktion der Pflanzen und ihr Vergilben ermittelt (CANTWELL und REID 1993).

Ziel der Arbeit sollte es sein, das Stoffwechselverhalten von Thymian-Pflanzen aus dem Feldanbau während der Nacherntezeit zu quantifizieren und Kenntnisse über die Stabilität der entscheidenden Wirkstoffe und eintretenden möglichen Veränderungen in ihrem Spektrum in Abhängigkeit von der Temperatur, bei der die Pflanzen lagern, und der Länge der Lagerdauer nach der Ernte zu gewinnen. Damit sollten die Voraussetzungen zur optimalen Gestaltung und zur Berechnung der nacherntetechnologischen Behandlungsmaßnahmen, wie Belüften, Kühlen, Trocknen u.a., gewonnen werden.

Ebenso wie für Majoran und einjähriges Bohnenkraut wird unter *Nacherntezeit* in dieser Arbeit der Zeitraum zwischen der unmittelbaren Ernte (dem Schneiden der grünen Pflanzen auf dem Felde) und ihrer weiteren Bearbeitung durch Trocknen und Verarbeiten verstanden, der bis zu 80 Stunden ausgedehnt wurde, um die Veränderungen klarer erfassen zu können, jedoch sollte in der Praxis ein solch langer Zeitraum vermieden werden.

Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Die Thymian-Pflanzen (*Thymus vulgaris* L.), Sorte ‘Deutscher Winter’, die für die Lagerversuche und Qualitätsbestimmung verwendet wurden, stammten aus dem Feldanbau der Agrargenossenschaft e.V. Calbe (Saale), einem bekannten Produzenten für Gewürzpflanzen, und aus dem Feldparzellenanbau der Lehr- und Versuchsstation in Halle. Beide Anbaustandorte liegen im klimatisch und bodenstandortlich günstigen Anbaugebiet für Arznei- und Gewürzpflanzen in Mitteldeutschland. Das Schneiden des Erntegutes für die Versuche erfolgte zum jeweils optimalen Zeitpunkt für die Gewürzgewinnung *gerade zu Blühbeginn* der Pflanzen. Angaben zur Herkunft des Pflanzenmaterials, des physiologischen Entwicklungszustandes und der Witterung sind in Tab. 1 zusammengefaßt.

Vom frisch geschnittenen, technisch nicht behandeltem Erntegut ist aus über 10 zufällig ausgewählten Teilproben eine Mischprobe von 400 g gebildet worden, die unverzüglich in das Meß- und Lagergefäß eingefüllt wurde und darin für 80 Stunden im unbelichteten Zustand verblieb. Sechs separate Anlagen liefen immer gleichzeitig parallel bei vorgegebener Meßtemperatur.

Die Klimaführung konnte durch Kühl- und Heizaggregate mit hoher Konstanz eingehalten werden. Die ausgewählten Temperaturen entsprechen folgenden physiologischen Bedingungen:

– 10 °C (± 0,2 °C) – 98 % relative Luftfeuchtigkeit
verzögertes Altern (Seneszenz) durch die kalten Bedingungen,
– 20 °C (± 0,1 °C) – 95 % relative Luftfeuchtigkeit
normal verlaufender Alterungsvorgang (Seneszenz)
– 30 °C (± 0.2 °C) – 92 – 97 % relative Luftfeuchtigkeit
beschleunigtes Altern durch physiologisch überhöhte Temperaturbedingungen.

Damit sollten die in der Praxis während der Sommermonate auftretenden Bedingungen nachgestellt werden. In jeder Temperaturstufe waren 2 unabhängige Meß- und Lagerboxen im Einsatz, die als unabhängige Wiederholungen im statistischen Sinne zu betrachten sind. Der technische Versuchsaufbau war somit für jeden der 7 Versuche folgender:

– Produkttemperatur (Faktor A): 10, 20 und 30 °C
– Lagerdauer (Faktor B): 4, 10, 20 … 90 h
– Versuche 1 … 7
– Wiederholungen Atmungsmessungen n = 2
Analytische Messungen n = 1.

Atmungsmessung

Zur Ermittlung der Atmungsintensität ist kontinuierlich ein CO_2-freier und temperierter Luftstrom von 50 – 80 L h^{-1} durch die Meßbehälter geleitet worden. Im Ausgangsluftstrom konnte dann die abgegebene Menge von CO_2 unter den gewählten Bedingungen genau bestimmt werden. Die einsetzte Apparatur ist ausführlich bei BÖTTCHER et al (1999b) beschrieben. Mit einem Meßgerät *Siemens Ultramat 21/21 + O_2* sind die Mengen an freigesetztem CO_2 laufend registriert worden, so daß im Verlauf der Nachernteperiode in äquidistantem Abstand die Meßwerte abgegriffen und gleich in W t^{-1} [Watt · Tonne^{-1}] als typische Meßeinheit für die Atmungsintensität auf energetischer Basis umgerechnet werden konnten (1 mg CO_2 kg^{-1} h^{-1} = 3,0287 W t^{-1}) (BÖTTCHER und GÜNTHER 1995, BÖTTCHER et al. 1999a und c, 2000a). Diese Maßeinheit (W t^{-1}) ist zugleich für die Auslegung der Nacherntebehandlungen, wie Belüften, Kühlen und Trocknen u.a., gut geeignet und angepaßt. Der Verbrauch an Sauerstoff konnte zwar nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt werden, aber er verhielt sich in etwa äquimolar, so daß von einem Atmungsquotienten von etwa 1 ausgegangen werden kann. In der praktischen Versuchsdurchführung konnte das Gleichgewicht im Meßsystem für die Angleichung der Temperatur des Produktes und des Gasaustausches einschließlich des notwendigen Transportes des Erntegutes zeitlich stets innerhalb von 4 Stunden nach dem Schneiden des Erntegutes erreicht werden.

Der temperaturabhängige Anstieg der Atmungsintensität wurde jeweils durch den Q_{10} belegt, der nach folgender Formel berechnet wurde:

$$Q_{10} = \frac{AI_{(T+10)}}{AI_T}$$ optimale Werte 2,3 … 2,5,

wobei AI die Atmungsintensität und T die aktuelle Temperatur darstellen.

Frischmasseverlust und Masse lufttrockener Droge

Der Verlust an Frischmasse konnte durch Wägung zu Beginn des Versuches und nach unterschiedlichem Zeitpunkt der Lagerdauer ermittelt und in Masse-% zur Einlagerungsmasse ausgewiesen werden. Die Bestimmung der Masse an lufttrockener Droge ist durch Trocknen in einem Luftstrom von 40 °C bis zur Massekonstanz vorgenommen worden, um einem Entweichen der ätherischen Öle vorzubeugen (BÖTTCHER, 1999a). Die Restfeuchte belief sich auf 6,2 – 6,5 %. Eine genaue Ausweisung der aufgetretenen Trockenmasseverluste war bei der vorliegenden Versuchsanlage nicht möglich.

Äußere Qualität und Farbmerkmale

Sie sind durch den visuellen Vergleich mit täglich frisch geernteten Proben gewonnen worden.

Bestimmung von Inhaltsstoffen

In der handgerebelten Blattware sind die für Thymian qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe bestimmt worden:
– *Ätherische Öle* durch Wasserdampfdestillation nach Pharmakopea Europea 2. Edition V.4.5.8.: Destillation für 2 h mit einer Geschwindigkeit von 2,5 ml · min^{-1} und anschließend volumetrischer Bestimmung, ausgedrückt in % (V/M) bezogen auf getrocknete Droge
– *Phenole*, berechnet als *Thymol* (Leitsubstanz), nach Pharmakopea Europea 2. Edition (Thymian): Umsetzung der Phenole im ätherischen Öl mit Aminopyrazolon in Gegenwart des Oxidationsmittels Kaliumhexacyanoferrat III, ausgedrückt in % (M/M) bezogen auf getrocknete Droge
– *Flavonoide*, berechnet als *Rutosid*:
HPLC-Methode: 30 Minuten Extraktion mit Acetonitril im Ultraschallbad. Bedingungen des binären Hochdruckgradientensystems: A = Wasser mit o-H_3PO_4, B = Acetonitril.
Stahlsäule 250 x 4 mm ID, 5 µm GromSIL. Injektion 20 µl / Detektion 356 nm / 23 °C / Fließgeschwindigkeit 0,80 ml · min^{-1} , berechnet als Masse-% (M/M) bezogen auf getrocknete Droge.

Das Wirkstoffspektrum der einzelnen Lagervarianten ist durch den Anteil des Thymol am Gesamtgehalt der ätherischen Öle charakterisiert worden.

Die Inhaltsstoffe sind primär als „*Gehalt in der wasserfreien Trockenmasse*“ ausgewiesen, ein für den Handel wichtiger Qualitätsparameter. Da es auf Grund der sehr intensiven und langanhaltenden Atmung zu einem beträchtlichen Verlust an Trockensubstanz kommt, andererseits aber erhöhte Transpiration auch zur Konzentrierung der Inhaltsstoffe führt, können die eintretende „*Veränderungen*“ an Inhaltsstoffen aus biologischer Sicht, nur auf der Basis entsprechender Bilanzberechnungen – unter Berücksichtigung von Atmungs- und Wasserverlust – als lagerbedingten Verschiebungen klar

ausgewiesen werden (BÖTTCHER, 1986). In den zugehörigen graphischen Darstellungen 6–8 sind beide Parameter aufgezeichnet worden.

Statistische Auswertung

Der Einfluß der Prüffaktoren (Lagertemperatur, Lagerdauer) sowie der jährlichen Witterungs- und Wachstumsbedingungen auf die Atmungsintensität ist mit Hilfe der mehrfaktoriellen Varianzanalyse geschätzt worden. Das Signifikanzniveau p wird ausgewiesen. In den graphischen Darstellungen sind signifikante Differenzen auf der Basis einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0{,}05$ mit dem Zeichen + gekennzeichnet.
Die Veränderungen der Atmungsintensität im Verlauf der Lagerzeit ist als nichtlineare Regressionsfunktionen geschätzt worden (WARNSTORFF und DÖRFEL, 1998). Auch für Thymian-Pflanzen eignete sich der gleiche Typ der Regressionsfunktion, wie er für Majoran, einjähriges Bohnenkraut und Salbei (BÖTTCHER et al, 1999a und c, 2000a) verwendet worden ist.

$$\hat{y} = \alpha + ß \cdot e^{c\,(x - z)} \quad (c < 0).$$

Dabei bedeuten:
$\hat{y}$ – Atmungsintensität in [W t^{-1}]
x – Nacherntezeit [h]
α – mittlere seneszenzunbeeinflußte Atmungsintensität bei relativ langer Lagerdauer [W t^{-1}]
ß – seneszenzbeeinflußte Abnahme der Atmungsintensität während der Nacherntezeit [W t^{-1}]
c – Maß für die Veränderung der relativen Abnahmerate im Verlauf der Nacherntezeit; c ist temperaturabhängig [h^{-1}].
z – Zeitdauer von der Ernte bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes im Meßsystem (Beginn des Auswertungszeitraumes) [h]
$\alpha + ß$ – mittlere Atmungsintensität zu Beginn des Auswertungszeitraumes [W t^{-1}].

Dieses Modell erlaubt die Auslegung des natürlichen Verlaufes der Atmung sowohl für jeden einzelnen als auch für die Versuchsserien insgesamt.

Die Bewertung der Regressionen mit ihrem Anteil an der Gesamtvariabilität ist in diesem Fall notwendiger Weise durch das versuchsbezogene Bestimmtheitsmaß $B_{korr.}$ vorgenommen worden (BÄTZ et al. 1987):

$$B_{korr.} = \frac{SQ_{\text{Regression}}}{SQ_{\text{Behandlung (Lagerdauer)}}}$$

Ergebnisse

Atmungsintensität zum Erntezeitpunkt

Frisch geerntete Thymian-Pflanzen lassen unter Bedingungen von 10 °C eine relativ hohe Atmungsintensität erkennen. In den einzelnen Messungen schwankte sie zwischen 290 und 679 W t^{-1} und wies im Mittel der 7 Versuche eine Intensität von $575{,}6 \pm 126{,}1$ W t^{-1} auf. Die Variabilität der Atmungsintensität zum Erntezeitpunkt wurde in hohem Maße von den jährlichen Witterungs- und Anbaubedingungen ($p = 0{,}063$) (Tab. 2) geprägt: 1993 629 W t^{-1}, 1994 479 W t^{-1}, 1995 575 W t^{-1} und 1996 647 W t^{-1}. Jedoch läßt sich kein unmittelbarer Einfluß der Witterungsbedingungen zum Erntezeitpunkt nachweisen ($p = 0{,}13$), sondern es ist vielmehr das Ergebnis der Umwelteinwirkung über die Gesamtentwicklungsdauer des Pflanzenbestandes.

Tab. 2. Varianztabelle für die Atmungsintensität von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit
Analysis variance for the respiration rate in thyme-herbs during postharvest period

Streuungsursache	FG	p-level
Gesamt	377	–
Nacherntetemperatur (A)	2	0,0000
Lagerdauer (B)	8	0,0006
Witterungs- und Anbaubedingungen	6	0,0063
A x B	16	0,040
Rest	345	

Es konnten ebenso keine gesicherten Beziehungen der Höhe der Atmungsintensität zum Erntetermin, zum Entwicklungszustand und zur genutzten Triebläge gefunden werden (Tab. 1).

Einfluß der Temperatur auf die Atmungsintensität zum Erntezeitpunkt

Mit dem Ansteigen der Temperatur erhöht sich die mittlere Atmungsintensität in jedem Versuch beträchtlich (Abb. 1). Als mittlere Intensität sind bei der Temperaturstufe von 10 °C $575{,}6 \pm 126{,}1$ W t^{-1}; von 20 °C $1281{,}1 \pm 337{,}5$ W t^{-1} ; und von 30 °C $2366 \pm 637{,}0$ W t^{-1} bestimmt worden. Als Einzelmeßwert konnte für Thymian eine Wärmefreisetzung von 3 086 W t^{-1} ermittelt werden.

Ob die niedrigen Meßwerte für den Versuch 3 mit dem späten Erntetermin am 10.09. (Tab. 1) im direkten Zusammenhang stehen, kann nicht entschieden werden.

Bei einer Erhöhung der Temperatur von 10 auf 20 °C schwankt der Anstieg der Atmungsintensität in den Einzelversuchen zwischen 1,75 und 2,58 bei einem Mittelwert des Q_{10} von 2,22 (Tab. 3), der als optimal nach der van't Hoff'schen Regel anzusehen ist. Bei einer Erhöhung von 20 auf 30 °C war er schon deutlich als Folge des Wärmeeinflusses verzögert (Q_{10}: $\bar{x} = 1{,}85$). Allerdings muß auch die bei Meßbedingungen von 30 °C verstärkte Transpiration des Pflanzenmaterials und die damit eintretende Absenkung der vorgegebenen Solltemperatur um 1 bis 2 K berücksichtigt werden (BÖTTCHER u.a. 2000a). Auf dieser Basis erhöht sich der Q_{10} auf $\bar{x} = 1{,}91$ (Tab. 3).

Einfluß der Alterung auf die äußeren Qualitätsmerkmale

Die typischen Veränderungen von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit sind für Versuch 7 in Tabelle 4 festgehalten. Sie treffen auch für alle anderen Versuche zu. Zuerst machen sich eine zunehmende Welke und gleichzeitig auch ein Verlust der grünen ansprechenden Farbe bemerkbar. Der Chlorophyllabbau ist an fortschreitender Hellgrün-/Gelbfärbung besonders der kleinen zarten Blätter zu erkennen. Alle Veränderungen der äußeren Qualitätsmerkmale sind aber in hohem Maße von der Lagertemperatur abhängig. Bei Bedingungen von 10 °C sind die Pflanzen sehr stabil,

Tab. 3. Bestimmung des Q_{10} für die Temperaturabhängigkeit der Atmungsintensität von Thymian-Pflanzen
Estimation of the Q_{10} of the temperature influenced respiration rate of thyme-herbs

Jahr	Herkunft	Serie	erntefrisches Stadium		gealtertes Stadium	
	Intervall		10/20 °C	20/30 °C[1]	10/20 °C	20/30 °C[1]
1993	Halle	1	2,04	2,01	2,15	1,85
1994	Halle	2	2,42	1,92	2,92	1,42
1994	Calbe	3	2,00	1,91	2,72	1,83
1995	Calbe	4	2,47	1,68	1,59	1,71
1995	Halle	5	2,58	1,71	1,48	1,57
1996	Halle	6	2,89	2,07	1,70	1,80
1996	Calbe	7	1,75	2,10	3,16	1,23
$\bar{x}$			2,22	1,91	2,24	1,63

[1]) Werte von 30 °C produkttemperaturbereinigt

Tab. 4. Bewertung der äußeren Qualitätseigenschaften von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit (Versuch 7)
Assessment of the external quality traits of thyme-herbs during postharvest period

Lagerdauer	Temperatur		
h	10 °C	20 °C	30 °C
20	vollfrisch, grün	frisch, kaum gewelkt, noch vollgrün	noch frisch, grün
30	vollfrisch, grün keine Welke	kaum gewelkt, sehr grün	deutlich gewelkt, minimal hellgelb
40	frisch, grün keine Welke	minimal gewelkt, noch grün	leicht gewelkt, noch grün
50	frisch, grün minimal gewelkt	leicht gewelkt, Farbe abgeflacht, gute Qualität	stark gewelkt etwas gelbgrün
60	frisch, grün, wenig gewelkt	leicht gewelkt, noch grün	sehr gewelkt, hellgrün
70	frisch, grün, wenig gewelkt	etwas gewelkt, hellgrüner Schimmer	stark gewelkt, Stengel holzig, hellgrün verfärbt
80	leicht gewelkt, noch grün	gewelkt, Farbe gelbstichig	stark gewelkt, deutlich gealtert, Stengel holzig verhärtet, eingetrocknete Blätter, gelbgrün
90	mittelstark gewelkt, leicht hellgrün	stark gewelkt und verfärbt	sehr stark gewelkt, bleichgrün, Stengel verhärtet

eine „gute“ Qualität kann bis zur 80. Stunde bewahrt werden. Bei 20 °C verkürzt sich diese Zeitspanne auf 60 Stunden und bei 30 °C auf 30 bis 40 Stunden. Bei den letztgenannten Bedingungen kommt es sogar bis zur Vertrocknung und Alterung der unteren Laubblätter und zu einer ausgeprägten Verholzung im unteren Stengelbereich (Tab. 4); auch bereits gebildete Infloreszenzen blühen ab und zeigen Fruchtentwicklung.

Einfluß der Alterung auf die Atmungsintensität

Auch bei Thymian-Pflanzen war die Atmungsintensität trotz der hohen Meßwerte zum Erntezeitpunkt während der Nacherntezeit bis 90 Stunden relativ stabil, unabhängig von der vorliegenden Temperatur (Abb. 2–4). In den ersten 20 Stunden nach der Ernte nahm sie noch deutlich ab, um am 3. Tag nur noch minimale Veränderungen zu zeigen. Der Verlauf in Abhängigkeit von der Lagerdauer ist entsprechend der Bewertung von WARNSTORFF und DÖRFEL (1999) als „negativ exponentiell fallend“ einzustufen. Der Einfluß der Lagerdauer auf die Atmungsintensität läßt sich durch folgende Regressionsgleichungen für die einzelnen Temperaturstufen beschreiben, die in Abb. 2–4 graphisch aufgezeichnet sind:

$10\,°C \quad \hat{y} = 187{,}21 + 369{,}21 \cdot e^{-0{,}030734 \cdot (x-4)}$

$B_{korr.} = 0{,}986 \quad s_R = 83{,}09 \quad a + b = 556{,}42$

$20\,°C \quad \hat{y} = 519{,}60 + 765{,}80 \bullet e^{-0{,}063853 \,.\, (x-4)}$

$B_{korr.} = 0{,}991 \quad s_R = 222{,}64 \quad a + b = 1285{,}41$

$30\,°C \quad \hat{y} = 865{,}58 + 1474{,}63 \bullet e^{-0{,}077326 \,.\, (x-4)}$

$B_{korr.} = 0{,}993 \quad s_R = 375{,}53 \quad a + b = 2340{,}20.$

Bei der statistischen Schätzung erweisen sich sowohl der Einfluß der Lagertemperatur als auch der der Lagerdauer als hoch signifikant, wobei auch eine schwach gesicherte Wechselwirkung zwischen beiden Streuungsursachen besteht (Tab. 2), die sich aus dem deutlichen Ansteigen des Faktors c von -0,0307 auf -0,0777 mit Erhöhung der Temperatur ergibt und eine stärkere Degression der Meßwerte in der Zeiteinheit im Kurvenverlauf bei 30 °C im Vergleich zu 10 °C belegt.

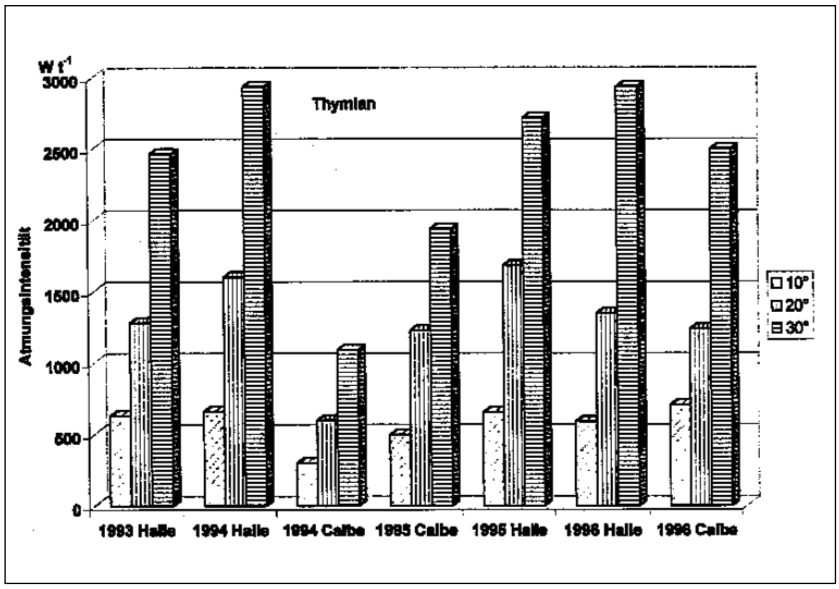


Abb. 1. Einfluß der Temperatur auf die Atmungsintensität von frisch geernteten Thymian-Pflanzen
Influence of temperature on the respiration rate of freshly harvested thyme herbs

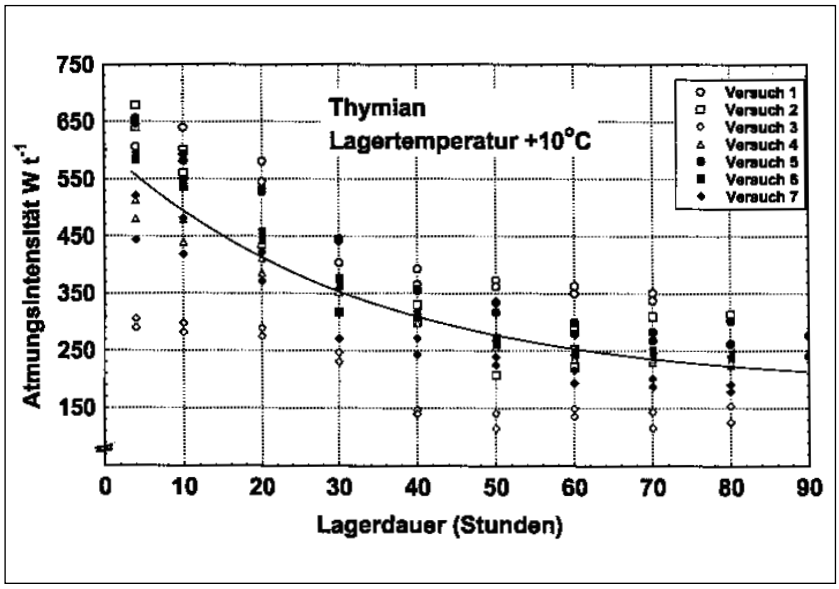


Abb. 2. Einfluß der Lagertemperatur von 10 °C auf die Atmungsintensität von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit
Effect of storage temperature of 10 °C on the postharvest respiration rate of thyme herbs

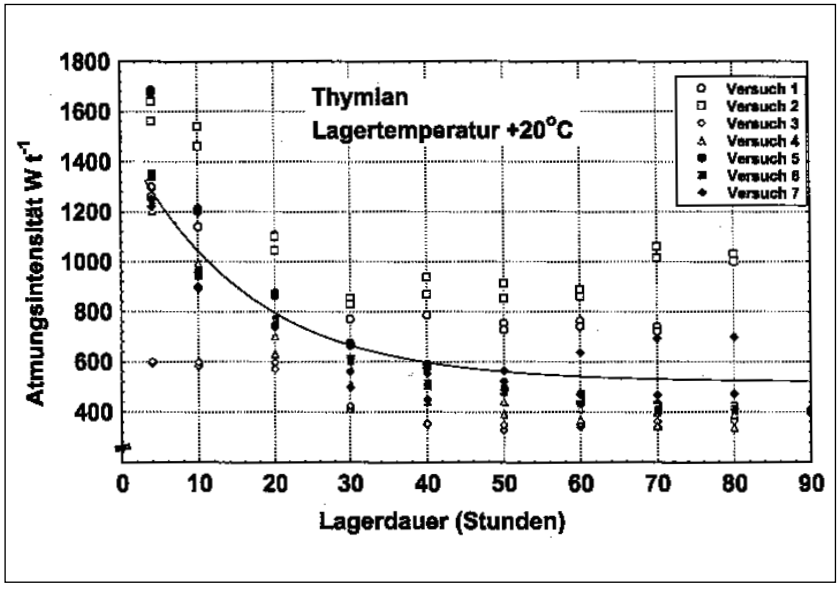


Abb. 3. Einfluß der Lagertemperatur von 20 °C auf die Atmungsintensität von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit
Effect of storage temperature of 20 °C on the postharvest respiration rate of thyme

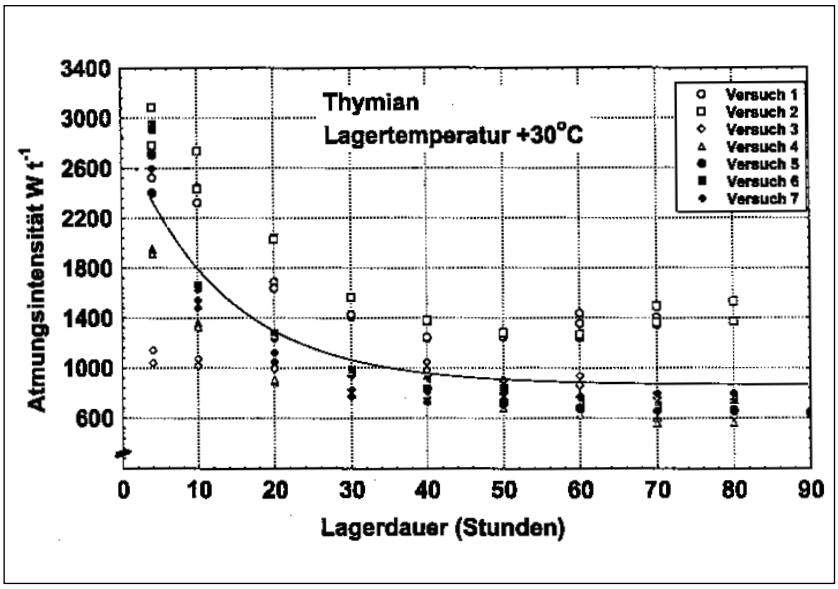


Abb. 4. Einfluß der Lagertemperatur von 30 °C auf die Atmungsintensität von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit
Effect of storage temperature of 30 °C on the postharvest respiration rate of thyme herbs

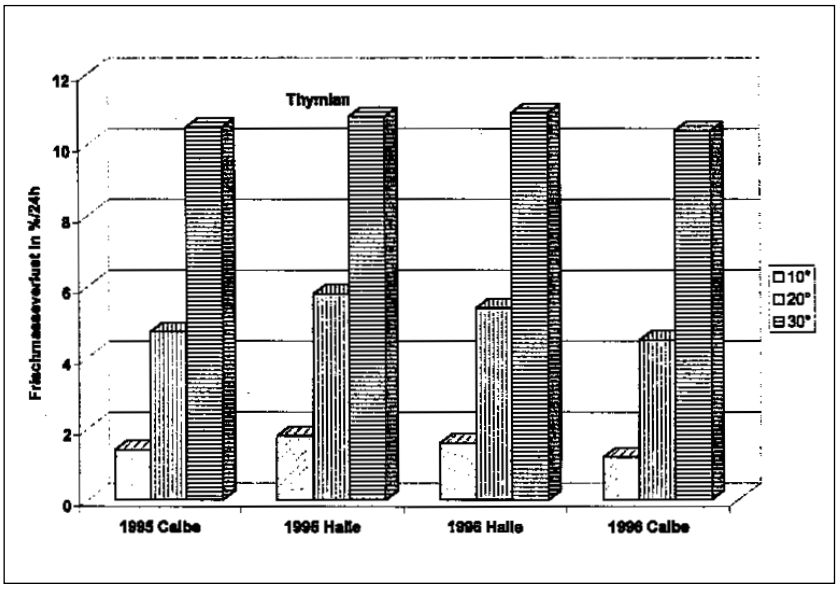


Abb. 5. Einfluß der Lagertemperatur auf die Frischmasseverluste von Thymian-Pflanzen während der Nacherntezeit in vier typischen Versuchen
Influence of temperature on the fresh weight loss rate of thyme herbs during postharvest storage for four typical trials

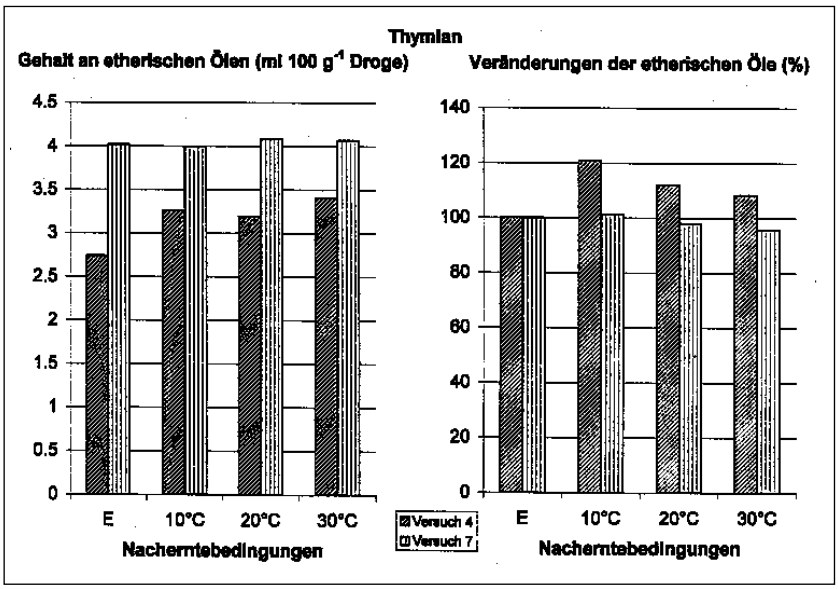


Abb. 6. Gehalt an ätherischen Ölen und Veränderungen in ihrer Quanität (bezogen auf den Erntezeitpunkt in %) in Thymian-Pflanzen während der Nacherntelagerung (80 Stunden) unter Berücksichtigung der eingetretenen Atmungs- und Transpirationsverluste bei verschiedenen Temperaturen (10, 20, 30 °C) (E = Erntezeitpunkt)
Content of essential oils and changes in their quantity (in relation to harvest point in %) in thyme herbs during postharvest storage (80 h) with regard to the real respiration and transpiration losses at different temperatures (10, 20, 30 °C) (E = harvest point)

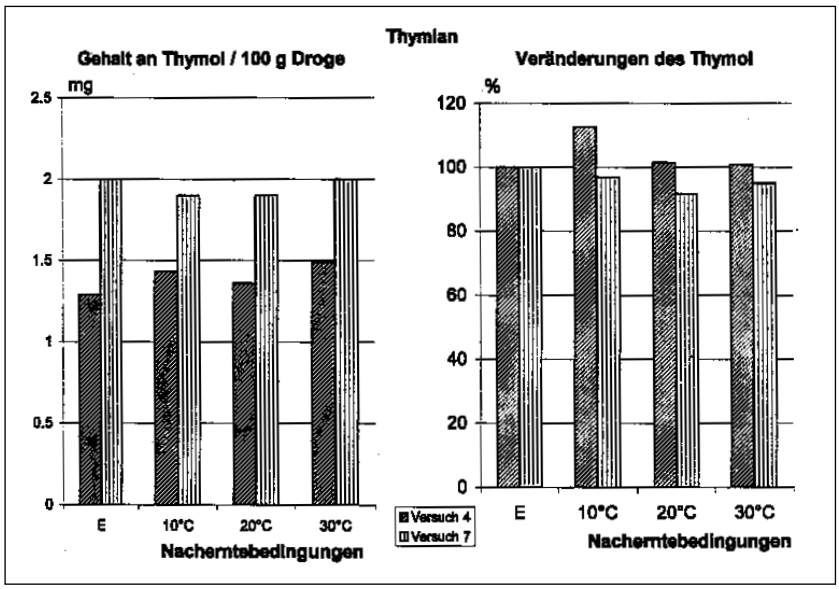


Abb. 7. Gehalt an Thymol und Veränderungen in ihrer Quantität (bezogen auf den Erntezeitpunkt in %) in Thymian-Pflanzen während der Nacherntelagerung (80 Stunden) unter Berücksichtigung der eingetretenen Atmungs- und Transpirationsverluste bei verschiedenen Temperaturen (10, 20, 30 °C) (E = Erntezeitpunkt) *Content of thymol and changes in their quantity (in relation to harvest point in %) in thyme herbs during postharvest storage (80 h) with regard to the real respiration and transpiration losses at different temperatures (10, 20, 30 °C) (E = harvest point)*

Der Anteil der alterungsbedingten Atmungsabnahme im Verlauf von 80 h beträgt bei 10 °C 60 %, bei 20 °C 59,1 % und bei 30 °C 62,8 %.

In gealterten Thymian-Pflanzen war nach 80 h Aufbewahren der Q_{10} für den Temperaturanstieg von 10 auf 20 °C noch unverändert mit $\bar{x}$ = 2,24 optimal entsprechend der van't Hoff'schen Regel (Tab. 3). Dagegen war von 20 auf 30 °C eine deutlichere Wärmedepression gegeben, denn der Q_{10} lag im Mittel bei $\bar{x}$ = 1,63. Auch dies belegt einen stärkeren Rückgang der Atmungsintensität bei der Temperaturstufe von 30 °C und bestätigt auch die schwach signifikante Wechselwirkung zwischen Lagertemperatur und Lagerdauer in der Varianzanalyse (Tab. 2).

Frischmasseverlust und Trockenmassegehalt

Die typischen Meßwerte zum Frischmasseverlust sind in Abb. 5 für 4 Versuche aufgezeichnet. Darin spiegeln sich sowohl die hohe Atmungsintensität als auch die beachtliche Transpirationsrate wider. Bei Bedingungen von 10 °C traten im Mittel 1,50 % Frischmasseverluste in 24 h ein, bei 20 °C war der Mittelwert 5,11 und bei 30 °C 10,65 % in 24 h.

Der Trockenmassegehalt des frischen Erntegutes schwankte entsprechend den jährlichen Witterungs- und Anbaubedingungen zwischen 22,0 und 34,0 % (Tab. 1).

Qualitätsbestimmende Inhaltsstoffe

Die Inhaltsstoffe sind ausführlich in den Versuchen 4 und 7 untersucht worden (Abb. 6–8). Der *Gehalt an ätherischen Ölen*, der zum Erntezeitpunkt 2,74 bzw. 4,02 ml 100 g^{-1} Droge betrug, blieb im Verlauf von 80 Stunden Lagern entweder unverändert erhalten (Versuch 7) oder zeigte deutliche Anstiege in den Proben bis zu 0,67 ml 100 g^{-1} Droge (Versuch 4; 30 °C) (Abb. 6). Ein Temperatureinfluß war dabei nur schwach ausgeprägt. Der beachtliche Substanzverlust durch die hohe Atmungsintensität und die Substanzkonzentrierung durch die ablaufende Transpiration machen es erforderlich, die eintretenden *Veränderungen in den ätherischen Ölen* in Bilanzversuchen zu ermitteln und als Relativ-Wert auszuweisen. Auch nach diesem Auswertungsverfahren sind während des Lagerns im Versuch 7 keine nennenswerten Verschiebungen eingetreten, welche die 4,3 %-Marke überschritten. Das Erntegut des Versuches 4 zeigte jedoch deutliche Zunahmen, die bei kalten Bedingungen (10 °C) mit +20,8 % am höchsten war, bei 20 °C +12,0 % und bei 30 °C +8,3 % erreichten.

Die Leitsubstanz der ätherischen Öle im Thymian ist *Thymol*, das zum Erntezeitpunkt mit 1,29 bzw. 2,00 mg 100 g^{-1} wasserfreier Droge enthalten war. Sowohl der Gehalt in den Proben nach dem Lagern als auch die Berechnung der Veränderungen zeigten das gleiche Bild (Abb. 7) wie für die ätherischen Öle. Im Versuch 7 gab es im Verlauf des Lagerns keine nennenswerten Verschiebungen im *Gehalt*, im Versuch 4 eine Erhöhung bei 10 °C um 0,14 und bei 30 °C um 0,20 mg 100 g^{-1} wasserfreier Droge. Bei Berechnung der *Veränderungen* bleibt nur noch für die Nacherntebehandlung von 10 °C eine Zunahme um +12,6 % bezogen auf den Erntetermin im Versuch 4 als relevant bestehen (Abb. 7), im Versuch 7 ist dagegen bei den Nachlagervarianten ein unwesentlicher Rückgang von bis zu 8,3 % zu verzeichnen.

Eine therapeutisch wichtige Stoffgruppe sind die *Flavonoide*, die zum Erntezeitpunkt mit 2,67 bzw. 3,40 mg 100 g^{-1} Droge nachgewiesen wurde. 80 Stunden Lagern führte nur im Versuch 4 bei 30 °C zu einem Anstieg im *Gehalt* um 0,21 mg 100 g^{-1} wasserfreier Droge, im Versuch 7 blieben die Werte konstant (Abb. 8). Im Verlauf des Lagerns traten bei Berechnung der *Veränderungen* einheitlich nur Abnahmen auf, die sich mit steigender Temperatur bis maximal 16,2 % vergrößerten.

Eine Verschiebung der Wirkstoffspektren im Verlauf des Lagerns war nicht gegeben, denn der Mittelwert für den quantitativen Anteil des Thymol an den ätherischen Ölen gesamt zeigte für beide Versuchsserien nur eine äußerst geringe statistische Streuung, die in anbetracht des speziellen versuchstechnischen und analytischen Untersuchungsablaufes als äußerst gering an-

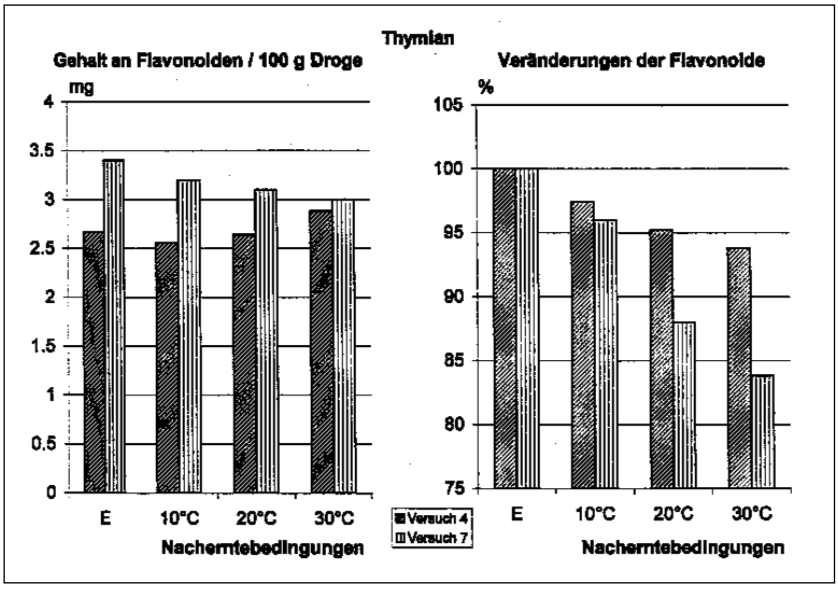


Abb. 8. Gehalt an Flavonoiden und Veränderungen in ihrer Quantität (bezogen auf den Erntezeitpunkt in %) in Thymian-Pflanzen während der Nacherntelagerung (80 Stunden) unter Berücksichtigung der eingetretenen Atmungs- und Transpirationsverluste bei verschiedenen Temperaturen (10, 20, 30 °C) (E = Erntezeitpunkt) *Content of flavonoides and changes in their quantity (in relation to harvest point in %) in thyme herbs during postharvest storage (80 h) with regard to the real respiration and transpiration losses at different temperatures (10, 20, 30 °C) (E = harvest point)*

zusehen ist: Versuch 4: 44,32 ± 1,12 %; Versuch 7: 49,14 ± 1,45 %.

Diskussion

Ebenso wie andere Arznei- und Gewürzpflanzen weisen Thymian-Pflanzen eine hohe Atmungsintensität mit 575,6 ± 126 W t^{-1} auf, die auch während einer 80-stündigen Nacherntelagerung stabil blieb (BÖTTCHER et al. 1999a und c, 2000a bis c). Obwohl das Erntegut im Stadium des Blühbeginns (0 bis 15 % Blütenansatz) geschnitten wurde, erreichten Thymian-Pflanzen nur eine Intensität bezogen auf Kamillenblüten (999 W t^{-1}) von 57,6 %, einjähriges Bohnenkraut (696 W t^{-1}) von 82,7 %, Majoran (632 W t^{-1}) von 91,1 % und sie lagen in gleicher Größenordnung wie Salbei (615 W t^{-1}) und Zitronenmelisse (523 W t^{-1}), jeweils für Bedingungen von 10 °C (BÖTTCHER et al 1999a und c, 2000 a bis c). Dies dürfte durch den physiologischen Charakter des Thymians als eines mehrjährigen Zwerghalbstrauches bedingt sein, der durch eine verstärkte Einlagerung von Lignin u.a. zellwandbildenden Verbindungen in die unteren Triebstengel gekennzeichnet ist. Diese Gewebebereiche weisen nicht mehr die physiologische Aktivität junger Triebe auf. Dies belegt auch der relativ hohe Trockenmassegehalt des Erntegutes mit Werten zwischen 22 und 30,7 % (Tab. 1). Andererseits ist die Atmungsintensität des Thymians aber auch höher als die von intensiv wachsenden Gemüsearten (HANSEN 1967; RYALL and LIPTON 1983; BÖTTCHER 1996) wie Brokkoli (350 W t^{-1}) 1,6-fach, Grünkohl (310 W t^{-1}) 1,9-fach und Chicoree-Sprossen (255 W t^{-1}) 2,3-fach.

Die Stabilität der Atmung während der Nacherntezeit findet ihren Ausdruck auch in der beträchtlichen Höhe des seneszenzunbeeinflußten Anteiles „a“ der Atmung, der bei 10 °C 187,2, bei 20 °C 519,6 und bei 30 °C 865,6 W t^{-1} beträgt.

Der größte Temperatureinfluß ist bei den äußeren Qualitätsmerkmalen zu verzeichnen. Die beste Erhaltung, die für eine Nutzung als Gewürz oder Teekomponente erforderlich ist, wird bei Temperaturen von 10 °C erreicht, bei 30 °C tritt eine schnelle Welke, Vertrocknung, Alterung, Vergilbung und Absterben der Pflanzen ein.

Sehr eindeutig wird mit diesen Ergebnissen belegt, daß bei Temperaturen zwischen 10 und 30 °C im Verlauf von 80 h Aufbewahren keine Verluste oder Verschiebungen bei den ätherischen Ölen und ihrer Hauptkomponente Thymol eintraten. In einem Versuchsjahr war sogar eine relative Zunahme um 12,6 % bei Lagerbedingungen von 10 °C bezogen auf den Erntezeitpunkt gegeben (Versuch 4), im Versuch 7 waren dagegen keine Abweichungen im Gehalt und bei den relativen Veränderungen festzustellen, denn offenbar war in diesem Erntegut keine solche Bereitschaft zu einer Neubildung von ätherischen Ölen nach dem Schnitt vorhanden. Über das Problem der Neubildung von ätherischen Ölen in absterbenden und trocknenden Gewürz- und Arzneipflanzen stritten in der Vergangenheit ESDORN (1950, 1953) und WEGNER (1952, 1954) sehr intensiv, ohne die postmortale Neubildung genau nachweisen zu können. Da in den vorliegenden Versuchen in der 80. Stunde nach dem Schnitt noch eine intakte Atmung mit einer Intensität von 228 W t^{-1} bei 10 °C vorlag, muß davon ausgegangen werden, daß in Thymian-Pflanzen ebenso wie in Majoran-Pflanzen (BÖTTCHER et al 1999a) eine *prämortale Neubildung* ätherischer Öle eintreten kann. Bei der letztgenannten Pflanzenart war es allerdings bei 30 °C beobachtet worden. Aber offenbar ist das Erntegut nicht in jedem Jahr in gleichem Maße dazu befähigt; der erreichte Entwicklungszustand und die jährlichen Wachstumsbedingungen können hierbei involviert sein.

Die Flavonoide, berechnet als Rutosid, nahmen während der Nacherntezeit von 80 Stunden bei 10 °C um durchschnittlich 3,3 %, bei 20 °C um 8,4 und bei 30 °C um 11,2 % ab (Abb. 8).

Erhöhungen im Gehalt an Inhaltsstoffen bei Bedingungen von 30 °C lassen sich zumeist auf die Konzentrierung der Pflanzeninhaltsstoffe als Folge der hohen Transpirations- und Atmungsrate zurückführen. Dies belegen die Bilanzberechnungen.

Die gefundenen Meßergebnisse für die getrockneten Proben (Drogen) erfüllen sowohl in erntefrisch gewonnenen als auch nach 80 h Lagerung erhaltenen Proben die Anforderungen des DAB 10, da 1,2 ml ätherisches Öl und 0,5 % Thymol 100 g^{-1} Probe erforderlich sind.

Für die thermodynamische Berechnung der erforderlichen nacherntetechnologischen Maßnahmen, wie Belüften, Kühlen und Trocknen, kann die zu erwartende Freisetzung von Atmungsenergie im Erntegut unmittelbar aus den Abb. 2 bis 4 entnommen und durch Interpolation präzisiert werden.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der statistischen Auswertung danken wir Frau cand agr. Ines Berger besonders.

Literatur

AHARONI, N., O. DVIR, D. CHALUPOWISZ und Z. AHARON 1993: Coping with postharvest physiology of fresh culinary herbs. Acta Horticulturae 344, 69–78.

BÄTZ, G., H. DÖRFEL, A. FUCHS und E. THOMAS 1987: Einführung in die Methodik des Feldversuchs. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

BÖTTCHER, H.1986: Zur Problematik des Erfassens von Qualitätsveränderungen während der Lagerung von Gemüse. Nahrung 30, 723–729.

BÖTTCHER, H. 1996. Frischhaltung und Lagerung von Gemüse. Ulmer-Verlag, Stuttgart, 14–22

BÖTTCHER, H.und I. GÜNTHER 1995: Nachernteverhalten und Nacherntephysiologie von Arznei- und Gewürzpflanzen. Herba Germanica 3, 47-66.

BÖTTCHER, H., I. GÜNTHER und U. BAUERMANN 1999a: Physiological postharvest responses of marjoram (*Majorana hortensis* Moench). Postharvest Biology and Technology 15, 41–52.

BÖTTCHER, H., I. GÜNTHER und K. WARNSTORFF 1999b: Nicht-destruktive Bestimmung des Gasstoffwechsels zum Erfassen des Seneszenzverlaufes während der Nacherntezit von Arznei- und Gewürzpflanzen. Deutsche Gesellschaft für Qualitätsforschung e.V., 34. Vortragstagung, Freising-Weihenstephan, 1999, 107–118.

BÖTTCHER, H.und I. GÜNTHER 1999c: Physiologisches Nachernteverhalten von Salbei (*Salvia officinalis* L.). Zeitsch. Arzn. Gewürzpflanzen 4, 119–125.

BÖTTCHER, H., I. GÜNTHER und K. WARNSTORFF 2000a: Physiologisches Nachernteverhalten von Bohnenkraut (*Satureja hortensis* L.) Gartenbauwissenschaft 65, 22–29.

BÖTTCHER, H., I. GÜNTHER, R. FRANKE, K. WARNSTORFF 2000b: Physiological postharvest responses of Matricria (*Matricaria recutita* L.) flowers. Postharvest Biology and Technology, 22, 39–51.

BÖTTCHER, H., I. GÜNTHER und R. FRANKE 2000c: Physiologisches Nachernteverhalten von Zitronenmelisse (*Melissa officinalis* L.). Zeitsch. Arzn. Gewürzpflanzen 5, 145–153.

CANTWELL, M.J.and M.S. REID 1993: Postharvest physiology and handling of fresh culinary herbs. Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants 1, 83–127

ESDORN, I.1950: Untersuchungen über den ätherischen Ölgehalt welkender Pflanzen. Die Pharmazie, 5, 481–488.

ESDORN, I. 1953: Methodisches zur Bestimmung des Gehaltes an ätherischem Öl in welkenden Pflanzen. Die Pharmazie, 8, 79–83.

HANSEN, H. 1967: Spezifische Wärme und Atmungswärme von Gemüse. DKV-Arbeitsblatt 8-22, Kältetechnik, Karlsruhe, 19, H. 3

KAYS, St. J. 1991: Postharvest Physiology of Perishable Plant Products. Van Nostrand-Reinhold, New York.

RYALL, A.L. and W. J. LIPTON 1983: Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables. Vol. 1 Vegetables and Melons, 2nd ed. AVI, West port.

WARNSTROFF, K. und DÖRFEL, H. 1998: Anwendung nichtlinearer Wachstumsfunktionen. Journal of Agronomy and Crop Science 183, 259–271.

WEGNER, E. 1952: Zur Frage der aetherischen Ölbildung aromatischer Blattdrogenwährend der Trocknung. Die Pharmazie, 7, 327–331.

WEGNER, E. 1954: Methodisches zur Bstimmung des Gehaltes an ätherischem Öl in welkenden Pflanzen. Die Pharmazie, 9, 429–431.

Eingereicht: 10. 11. 00/09. 01. 01

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. H. Böttcher, Frau Ingeborg Günther, Institut für Ernährungswissenschaften der Landwirtschaftlichen Fakultät Halle, Emil-Abderhalden-Str. 26, D-06108 Halle (Saale), Dr. Lothar Kabelitz, PhytoLab GmbH & Co. KG, D-91487 Vestenbergsgreuth, Dutendorfer Str. 5–7