

**Department für Pflanzenwissenschaften**

**Fachgebiet für Gemüsebau**

**Wirkung fluktuierender Temperatur auf Gemüse in der  
Nacherntephase**

Claudia Willging

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat., Dr. rer. nat. habil. G. Forkmann  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. agr., Dr. agr. habil. J. Weichmann  
2. Univ.-Prof. Dr. rer. hort., Dr. rer. hort. habil. J. Meyer

Die Dissertation wurde am 28.06.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 17.09.2001 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>3</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>8</b>
<b>1 EINFÜHRUNG.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Die Atmung als enzymatischer Prozess.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Enzyme und Enzymreaktionen .....</b>	<b>10</b>
1.2.1 Enzymkinetik .....	11
1.2.2 Regulationen im Zellstoffwechsel .....	12
<b>1.3 Atmung von gelagertem Gemüse.....</b>	<b>12</b>
1.3.1 Einflussfaktoren auf die Atmungsrate .....	14
1.3.2 Temperatureffekte auf den Stoffwechsel .....	14
<b>1.4 Transpiration von gelagertem Gemüse.....</b>	<b>17</b>
1.4.1 Evaporation einer Wasseroberfläche .....	17
1.4.2 Wasserverlust von Pflanzenmaterial.....	17
1.4.3 Transpirationskoeffizient und Transpirationsrate.....	19
<b>1.5 Beitrag von Atmung und Transpiration zum Schwund von gelagertem Gemüse .....</b>	<b>21</b>
<b>1.6 Beeinflussung des Lagerklimas durch die Kältetechnik.....</b>	<b>24</b>
1.6.1 Wärmeübertragung zwischen gelagertem Gemüse und Umgebungsluft.....	26
1.6.1.1 Physikalische Grundlagen .....	26
<b>1.7 Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>29</b>
<b>2 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Beschreibung der Versuchsanlage.....</b>	<b>31</b>
2.1.1 Aufbau der Küvetten mit speziellem Einsatz .....	31
2.1.2 Klimatisierung in den Küvetten.....	31
2.1.3 Messtechnik in den Küvetten.....	32
2.1.4 Messgasverlauf und Bestimmung der CO <sub>2</sub> - Abgabe des Produktes.....	32
2.1.4.1 Messgasverlauf.....	33
2.1.4.2 Analyse .....	34
<b>2.2 Steuerung der Anlage, Messwerterfassung und Messwertverarbeitung .....</b>	<b>35</b>
2.2.1 Funktionsweise und Aufbau des Schaltplanes.....	35
2.2.2 Temperaturerfassung im Unterschaltplan Pt-100 Messung.....	37
2.2.3 Temperaturregelung im Unterschaltplan PID-Regler.....	37
2.2.4 Massendurchfluss-Regelung im Unterschaltplan MFC.....	39
2.2.5 Messung von Kohlendioxid im Unterschaltplan Analyse .....	40
2.2.6 Übernahme der Messwerte für CO <sub>2</sub> und Umschalten der Magnetventile im Unterschaltplan Magnetventile .....	41
2.2.7 Bestimmung der Atmungsintensität des gelagerten Gemüses.....	43
2.2.8 Technische Umsetzung .....	44
2.2.9 Erfassung der Relativen Luftfeuchte .....	45

2.2.10 Berechnung der Wasserdampf-Nettoabgabe aus der relativen Luftfeuchte .....	45
2.2.11 Temperaturerfassung mit Thermoelementen .....	46
<b>2.3 Vorgehensweise bei rechnerischen Simulationen des Atmungsverlaufs.....</b>	<b>46</b>
<b>2.4 Untersuchungsdurchführung.....</b>	<b>47</b>
<b>2.5 Feldsalat .....</b>	<b>48</b>
2.5.1 Pflanzenmaterial .....	48
2.5.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen.....	48
<b>2.6 Spinat.....</b>	<b>49</b>
2.6.1 Pflanzenmaterial .....	49
2.6.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen.....	50
2.6.3 Auswirkung unterschiedlicher Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden.....	50
2.6.4 Staffelung der Einlagerungsmenge .....	51
<b>2.7 Stangenbohnen .....</b>	<b>51</b>
2.7.1 Pflanzenmaterial .....	51
2.7.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen.....	52
2.7.3 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden .....	52
<b>2.8 Radies .....</b>	<b>53</b>
2.8.1 Pflanzenmaterial .....	53
2.8.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen.....	54
2.8.3 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei drei Schwingungsdauern .....	54
2.8.4 Staffelung der Schwingungsdauer .....	54
2.8.4.1 Temperaturführung.....	54
2.8.5 Anstieg der Temperatur um 1 K pro Stunde.....	55
<b>2.9 Tomaten.....</b>	<b>56</b>
2.9.1 Pflanzenmaterial .....	56
2.9.2 Vergleich der Auswirkungen einer kurzen Schwingungsdauer bei kleiner Hysterese mit denen einer langen Schwingungsdauer bei großer Hysterese.....	56
<b>2.10 Einlegegurken.....</b>	<b>57</b>
2.10.1 Pflanzenmaterial .....	57
2.10.2 Vergleich bei drei Schwingungsdauern und drei unterschiedlichen Hysteresen.....	57
2.10.3 Staffelung der Einlagerungsmenge .....	58
2.10.4 Staffelung der Schwingungsdauer .....	59
2.10.4.1 Pflanzenmaterial .....	59
2.10.4.2 Temperaturführung und Anordnung der Varianten.....	59
2.10.5 Messungen zur Temperaturverteilung in der Küvette .....	60
2.10.5.1 Messungen in Einzelfrüchten .....	60
2.10.5.2 Temperaturmessung im Stapel .....	61
<b>2.11 Zwiebeln .....</b>	<b>62</b>

2.11.1 Pflanzenmaterial .....	62
2.11.2 Staffelung der Schwingungsdauer .....	62
<b>3 ERGEBNISSE .....</b>	<b>63</b>
<b>3.1 Feldsalat .....</b>	<b>63</b>
3.1.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane .....	63
3.1.1.1 Temperaturverlauf in den Küvetten.....	63
3.1.1.2 Atmung .....	63
3.1.1.3 Transpiration.....	66
3.1.1.4 Schwund .....	70
<b>3.2 Spinat.....</b>	<b>72</b>
3.2.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane .....	72
3.2.1.1 Temperaturverlauf in den Küvetten.....	72
3.2.1.2 Temperaturverteilung .....	74
3.2.1.3 Atmung .....	76
3.2.1.4 Transpiration.....	76
3.2.2 Auswirkung unterschiedlicher Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden.....	81
3.2.2.1 Atmung .....	82
3.2.2.2 Transpiration.....	83
3.2.2.3 Schwund .....	87
3.2.3 Staffelung der Einlagerungsmenge .....	88
3.2.3.1 Temperaturführung .....	88
3.2.3.2 Atmung .....	88
3.2.3.3 Transpiration.....	89
3.2.3.4 Schwund .....	91
<b>3.3 Stangenbohnen .....</b>	<b>93</b>
3.3.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane .....	93
3.3.1.1 Temperaturverlauf in den Küvetten.....	93
3.3.1.2 Temperaturverteilung in den Küvetten.....	93
3.3.1.3 Atmung .....	98
3.3.1.4 Transpiration.....	98
3.3.1.5 Schwund .....	103
3.3.2 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden .....	104
3.3.2.1 Temperaturverlauf .....	104
3.3.2.2 Atmung .....	106
3.3.2.3 Transpiration.....	109
3.3.2.4 Schwund .....	111

<b>3.4 Radies</b> .....	<b>113</b>
3.4.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane .....	113
3.4.1.1 Temperaturverlauf bei den Schwingungsdauern 1 h, 6 h, 12 h .....	113
3.4.1.2 Atmung .....	115
3.4.1.3 Transpiration .....	119
3.4.1.4 Schwund .....	121
3.4.2 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration der gelagerten Pflanzenorgane .....	125
3.4.2.1 Temperaturverlauf .....	125
3.4.2.2 Atmung .....	126
3.4.2.3 Transpiration .....	128
3.4.2.4 Schwund .....	131
3.4.3 Auswirkung einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde auf Atmung und Transpiration .....	132
3.4.3.1 Temperaturverlauf und Atmung .....	132
3.4.3.2 Transpiration .....	132
<b>3.5 Tomaten</b> .....	<b>135</b>
3.5.1 Vergleich der Auswirkungen einer kurzen Schwingungsdauer bei kleiner Hysterese mit denen einer langen Schwingungsdauer bei großer Hysterese auf die physiologische Reaktion von Tomaten .....	135
3.5.1.1 Atmung .....	135
3.5.1.2 Transpiration .....	135
<b>3.6 Einlegegurken</b> .....	<b>138</b>
3.6.1.1 Temperaturverlauf .....	138
3.6.1.2 Atmung .....	140
3.6.1.3 Transpiration .....	142
3.6.2 Staffelung der Einlagerungsmenge .....	146
3.6.2.1 Atmung und Transpiration bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C .....	146
3.6.2.2 Atmung und Transpiration bei einer Kühlraumtemperatur von 10 °C .....	149
3.6.3 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration .....	152
3.6.3.1 Temperaturverlauf .....	152
3.6.3.2 Atmung .....	152
3.6.3.3 Transpiration .....	154
3.6.3.4 Schwund .....	157
3.6.4 Messungen zur Temperaturverteilung in der Küvette .....	158
3.6.4.1 Messungen in Einzelfrüchten .....	158
3.6.4.2 Temperaturmessungen im Stapel .....	160
<b>3.7 Zwiebeln</b> .....	<b>164</b>
3.7.1 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration .....	164
3.7.1.1 Temperaturverlauf .....	164
3.7.1.2 Atmung .....	166
3.7.1.3 Transpiration .....	168

---

<b>4 DISKUSSION .....</b>	<b>172</b>
<b>4.1 Atmung und Temperatur .....</b>	<b>172</b>
4.1.1 Vergleich der gemessenen Atmungsintensitäten mit berechneten Werten.....	177
4.1.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse von RUBIN (1953) .....	184
4.1.3 Regulation der Stoffwechselintensität .....	187
4.1.3.1 Regulationsmechanismen bei der Glykolyse.....	187
4.1.3.2 Regulation der Bildung von Acetyl-CoA .....	190
4.1.3.3 Regulationsmechanismen bei Citratzyklus und Atmungskette .....	191
4.1.4 Einfluss der Temperatur auf abzubauenende Substanzen .....	191
<b>4.2 Einfluss der Temperaturschwankungen auf die Transpiration .....</b>	<b>192</b>
4.2.1 Theorie der Transpiration .....	192
4.2.2 Vergleich eigener Messungen mit der Literatur sowie kritische Betrachtung .....	197
4.2.3 Feuchtigkeitsmessung und exakte Bestimmung der Transpiration des Versuchsgutes .....	200
4.2.4 Probleme und Grenzen bei der Versuchsanordnung.....	200
<b>4.3 Die ideale Versuchsanordnung .....</b>	<b>201</b>
4.3.1 Temperatursteuerung .....	201
4.3.2 Messeinrichtungen .....	202
4.3.2.1 Feuchte .....	202
4.3.2.2 Messhäufigkeit und Datenauswertung .....	202
4.3.2.3 Zusammensetzung der Lagerluft .....	203
4.3.3 Zusätzliche Untersuchungen im Bereich der Molekularbiologie .....	203
<b>4.4 Kritische Betrachtung der Ergebnisse von SEISENBERGER (1996) .....</b>	<b>204</b>
<b>4.5 Wärmeübertragung bei fluktuierenden Temperaturen .....</b>	<b>209</b>
4.5.1 Optimierung der Wärmeübertragung.....	210
<b>5 KONSEQUENZEN FÜR DIE LAGERPRAXIS .....</b>	<b>211</b>
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>216</b>
<b>7 SUMMARY .....</b>	<b>221</b>
<b>8 LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>225</b>
<b>9 ANHANG .....</b>	<b>233</b>
9.1 Steuerdatei .....	233
9.2 Abbildungsverzeichnis .....	238
9.3 Tabellenverzeichnis .....	244

## Abkürzungsverzeichnis

Acetyl-CoA	Acetyl-Coenzym A
AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
ADP	Adenosindiphosphat
AMP	Adenosinmonophosphat
ATP	Adenosintriphosphat
CA	Controlled Atmosphere
FAD	Flavin-adenin-dinucleotid
K	Kelvin
LF	Luftfeuchte
MFC	Strömungsmesser (Mass-flow-controller)
NAD	Nicotinamid-adenin-dinucleotid
NADH	reduziertes Nicotinamid-adenin-dinucleotid
PE	Polyethylen
PEP	Phosphoenolpyruvat
P <sub>i</sub>	Phosphat
PID-Regler	Proportional-Integral-Differentialregler
Pt-100	Widerstandsthermometer
PVC	Polyvinylchlorid
Q <sub>10</sub>	Temperaturquotient
RQ	Respirationsquotient
TKS	Torfkultursubstrat
Transpirationskoeff. zit.	Transpirationskoeffizient zitiert

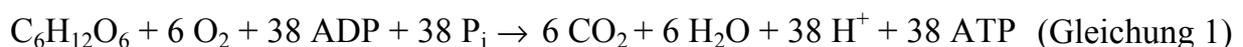
# 1 Einführung

Oberstes Ziel bei der Lagerung von Gemüse muss sein, das Lagergut bis zum Verbrauch frisch und ohne wesentliche Qualitätsminderung zu erhalten. Das Lagerklima muss demnach so gesteuert werden, dass gelagertes Gemüse möglichst wenig von seiner Frische und Qualität durch Atmung und Transpiration verliert. Diese beiden physiologischen Reaktionen werden unter anderem durch den Temperaturverlauf und die Luftfeuchte im Lager beeinflusst (RYALL und LIPTON 1979, HENZE und HANSEN 1988, WEICHMANN 1991, BÖTTCHER 1991). Die Lagertechnik ist bestrebt, diese beiden Faktoren in Lagerräumen auf einen optimalen Wert einzustellen und möglichst konstant zu halten (WEICHMANN 1991, ZAUSSINGER 1979). Laut RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) erhöhen schnelle Temperaturschwankungen bei der Lagerung die Atmungsintensität von Obst und Gemüse überproportional. Nach Untersuchungen von SEISENBERGER (1996) zeichnet sich jedoch ab, dass sich ein langsames Oszillieren der Raumtemperatur um ihren Mittelwert mit größerer Abweichung positiver auf das Lagerergebnis auswirkt als sehr schnelles Oszillieren mit kleiner Abweichung.

Die beiden letzteren Ergebnisse sind das klassische Beispiel dafür, dass bislang große Unklarheit besteht, wie stabil die Lagertemperatur in einem Gemüsekühlraum gehalten werden muss. Es ist deshalb unerlässlich, zunächst einmal die physiologischen und physikalischen Grundlagen der Stoffumsetzungen im Lagergut und der Stoffübergänge zwischen Produkt und Lageratmosphäre zu betrachten.

## 1.1 Die Atmung als enzymatischer Prozess

Die Atmung ist der oxidative Abbau von höhermolekularen Substanzen in der Zelle in einfachere Moleküle wie  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Durch die Atmung gewinnt die Zelle Energie, indem ATP (Adenosintriphosphat) synthetisiert wird. Solche Reaktionen sind notwendig, um die Zellorganisation und die Funktionsfähigkeit der Membran aufrecht zu erhalten. Wird Glucose abgebaut, sieht die Atmungsgleichung folgendermaßen aus (KADER 1987):



Bei der aeroben Atmung sind drei Metabolismen beteiligt:

- Abbau von Glucose zu Pyruvat bei der Glykolyse, die im Cytoplasma stattfindet
- Umwandlung von Pyruvat in  $\text{CO}_2$  durch den Tricarbonsäurezyklus oder Citratzyklus in der Mitochondrienmatrix
- Reduktion von energiearmem NAD zu energiereichem  $\text{NADH} + \text{H}^+$  durch das Elektronentransportsystem der Atmungskette an der Mitochondrienmembran

Da es sich bei der Atmung um eine Reaktionskette handelt, an der zahlreiche Enzyme beteiligt sind, soll zunächst deren Aufbau und Wirkungsweise kurz besprochen werden.

## ***1.2 Enzyme und Enzymreaktionen***

Enzyme sind Biokatalysatoren, die die Aktivierungsenergie eines Substrates herabsetzen, so dass chemische Prozesse innerhalb der Pflanzenzelle bei gewöhnlichen Temperaturen mit messbarer Geschwindigkeit kontrolliert ablaufen können. Hydrolysierende Enzyme sind an der Gestaltung von Form und Struktur der Zelle beteiligt. Dazu gehören z.B. die Bildung von Peptiden aus Aminosäuren oder die Kondensation von Glucose zu Stärke und Zellulose. Oxidierende und reduzierende Enzyme katalysieren Vorgänge, die mit erheblichen Energieübertragungen verbunden sind und stellen so die Versorgung des Baustoffwechsels der Zelle mit Energie sicher. Ein Enzymmolekül besteht aus einem größeren Protein, dem Apoenzym und einer kleineren prosthetischen Gruppe, dem Coenzym, das als Aktivator des Enzyms fungiert. Eine prosthetische Gruppe kann Aktivator für unterschiedliche Apoenzyme sein (LUNDEGÄRDH 1960). Die Bildung von Proteinen wird vom genetischen Apparat der Zelle unmittelbar gesteuert. Die Moleküle sind höchst spezifisch und es besteht eine nahezu unbegrenzte Vielfalt. Durch die genetisch gesteuerte Produktion eines Enzyms wird demnach nicht der gesamte Zellstoffwechsel beschleunigt, sondern nur eine oder wenige Reaktionen. Biokatalysatoren als Proteine unterliegen einem dauernden Umsatz, das heißt sie werden im Zellstoffwechsel auf- und abgebaut. Dies ermöglicht eine ständige Anpassung an sich verändernde Erfordernisse, die durch die Funktion der Zelle im Gesamtorganismus oder durch äußere Einflüsse bedingt sein können (STRASBURGER 1983). Für die Enzymsynthese benötigt die Zelle ständig Energie. Die Enzymaktivität wird maßgeblich durch den pH-Wert, das Redoxpotential und den Ionengehalt des Mediums bestimmt, aber auch durch die Temperatur, was besonders für die vorliegende Arbeit von Interesse ist.

### 1.2.1 Enzymkinetik

In der chemischen Kinetik wird die Konzentrationsänderung pro Zeiteinheit als Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit benutzt (KARLSON 1984) Nach dem Massenwirkungsgesetz ist die Geschwindigkeit einer Reaktion von der Konzentration der reagierenden Komponenten abhängig. Dies geschieht nach folgender Gleichung (LUNDEGÅRDH 1960):



$$K_{\text{äq}} = \frac{[C] \cdot [D]}{[A] \cdot [B]}$$

Liegt eine der reagierenden Komponenten, z.B. A im Überschuss vor, so wird die Reaktionsgeschwindigkeit durch die Konzentration der Komponente B bestimmt. Es besteht ein lineares Verhältnis zwischen der Konzentration der Komponente B und der Reaktionsgeschwindigkeit. Folglich handelt es sich um eine Reaktion nullter Ordnung. Sind aber die an einer Reaktion beteiligten Komponenten in begrenzter Menge vorhanden, die während der Reaktion abnimmt, so ändert sich die Reaktionsgeschwindigkeit in jedem Augenblick proportional zur abnehmenden Konzentration der Reaktionskomponente. Man spricht dann von einer Reaktion erster Ordnung:

$$\frac{dx}{dt} = K(a - x) \quad (\text{Gleichung 3})$$

die Integration ergibt folgende Formel:

$$K \cdot t = \ln \frac{a}{a-x}$$

$a$  = Konzentration der reagierenden Komponente

$x$  = Konzentration der Reaktionsresultante

$K$  = Reaktionskonstante

$t$  = Zeit

Ist die Substratkonzentration am Anfang sehr hoch, so fängt die Reaktion als eine nullter Ordnung an und geht allmählich in eine Reaktion erster Ordnung über. Sind mehrere Komponenten an einer Reaktion beteiligt, verläuft diese nach zweiter oder höherer Ordnung (LUNDEGÅRDH 1960). Die Anwendung von Kinetiken bei der Vorhersage über den Qualitätsverlust von Nahrungsmitteln machen genaue Studien

darüber erforderlich, um welche Art von Reaktion es sich handelt. Viele Reaktionen, die zum Verderb von Nahrungsmitteln führen, wie z.B. der Abbau der Vitamine A, B und C, Lipidoxidation sowie Geschmacksveränderungen folgen einer Reaktion erster Ordnung (LABUZA 1979). Auch HERTOOG et al. (1997) gehen bei der Modellierung der Anreicherung reduzierender Zucker während der Lagerung von Kartoffeln von Reaktionen erster Ordnung aus. TIJSKENS et al. (1999) sprechen beim Verderb pflanzlicher Produkte generell von einem exponentiellen Abbauprozess erster Ordnung.

### 1.2.2 Regulationen im Zellstoffwechsel

Regulationen im Zellstoffwechsel erfolgen einerseits über die qualitative und quantitative Zusammensetzung des Enzymbestandes, welche genetisch gesteuert wird. Diese Kontrollen der Enzymsynthese wirken relativ langsam. Schnelle Kontrollen über bestimmte Reaktionen übt die Zelle durch Aktivierung oder Hemmung der Enzymaktivität aus. Weiterhin können enzymatische Reaktionen durch Konzentrationsänderungen beteiligter Substanzen reguliert werden. Bei Verzweigungen des Stoffwechsels kann es von der Konzentration des gemeinsamen Substrates konkurrierender Enzyme abhängen, welche Richtung bevorzugt wird. Oft wird die aktive Form eines Enzyms aus einer inaktiven Vorstufe gebildet. Eine wesentliche Grundlage für den kontrollierten Ablauf des Zellstoffwechsels ist die Zusammenfassung bestimmter Enzyme in Multienzymkomplexen oder in Kompartimenten. Bei der Atmung dienen ATP (Adenosintriphosphat) und AMP (Adenosinmonophosphat) sowie anorganisches Phosphat zur Regulation der Intensität. Hoher ATP-Gehalt signalisiert Energieüberschuss und hat eine Drosselung von Pyruvatbildung (Glykolyse) und Citratzyklus zur Folge. Hohe Konzentrationen an AMP oder anorganischem Phosphat deuten auf Energiemangel hin und fördern Abbauprozesse (STRASBURGER 1983). Chemische Veränderungen am Enzymprotein durch Phosphorylierung oder Dephosphorylierung können hemmend oder fördernd auf die Enzymaktivität wirken (RICHTER 1996).

## ***1.3 Atmung von gelagertem Gemüse***

Während der Lagerung muss der Atmungsprozess voll berücksichtigt und zugleich beschränkt werden, denn die Lagerfähigkeit von Pflanzenorganen ist immer an die Lebensfähigkeit des Gewebes gebunden (BÖTTCHER 1991). Die Atmung spielt deshalb in der Nacherntephysiologie eine bedeutende Rolle mit mehreren Konsequenzen. Der Verlust an Reservestoffen führt zu Abbau von Inhaltsstoffen ganz allgemein und damit zu Qualitätsverlust für den Verbraucher durch Geschmackseinbußen und Verringerung des Ernährungswertes (KADER 1987 BÖTTCHER 1991). Außerdem verliert das

Lagergut durch die Atmung an Trockenmasse, was besonders bei Langzeitlagerung ins Gewicht fällt. Dies stellt insbesondere für den Lagerhalter ein ökonomisches Problem dar. Werden verfügbare Kohlenhydrat-Reserven vollständig in den Primärstoffwechsel eingebracht, bedeutet dies Substratverfügbarkeit für Sekundärstoffwechselfvorgänge, wie z.B. Veränderung von Pigmenten bei der Reife, Synthese geschmacksgebender Substanzen und an Reifungs- und Seneszenzprozessen beteiligter Enzyme (WEICHMANN 2000).

Die Atmung darf deshalb nie ganz blockiert werden, denn dadurch käme es zu schweren Stoffwechselstörungen im Lagergut. Bei Sauerstoffmangel im Lager kann das aus der Glykolyse entstehende Pyruvat nicht mehr oxidiert werden und wird stattdessen decarboxyliert. Es entstehen Acetaldehyd und  $\text{CO}_2$  und schließlich Ethanol, die zu erheblichen Geschmacksbeeinträchtigungen führen (WEICHMANN 1987). Auch bei normaler Atmung kommt es in der Lageratmosphäre zu einer Anreicherung von  $\text{CO}_2$  und einer Verringerung des  $\text{O}_2$ -Gehaltes. Dieser Effekt kann bei der CA-Lagerung (controlled atmosphere) positiv genutzt werden. Ein erhöhter  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der kontrollierten oder modifizierten Lageratmosphäre setzt die Atmungsintensität herab (HERNER 1987) und verzögert Seneszenz sowie bei bestimmten Arten und  $\text{CO}_2$ -Gehalten Pilzwachstum (KADER 1987). Jedoch kann eine unkontrollierte  $\text{CO}_2$ -Anreicherung manche Arten innerhalb kürzester Zeit verderben (RYALL und LIPTON 1979). Ein zu hoher  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Lagerluft äußert sich z.B. bei Apfelsorten in einer Verfärbung des Fruchtfleisches in der Nähe des Kernhauses (HENZE und HANSEN 1988). Bei Sellerie bewirkt ein auf 7,5 % erhöhter  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Lagerluft eine Erhöhung der Faulmasse sowie der Atmungsrate (WEICHMANN 1977). Meerrettich sowie Speisezwiebeln reagieren mit erhöhter Atmungsintensität auf zu hohe  $\text{CO}_2$ -Gehalte (WEICHMANN 1981, ADAMICKI 1977). Eine Steigerung der Atmungsintensität lässt auf eine Stressreaktion schließen, die weitere Schäden nach sich zieht und die Haltbarkeit verkürzt (HERNER 1987).

Aus der Atmungsgleichung ist ersichtlich, dass zur Aufrechterhaltung der aeroben Atmung Sauerstoff notwendig ist. Deshalb muss im Lager für eine ausreichende Belüftung gesorgt werden. 42 % der durch die Atmung produzierten Energie ist für die Pflanze biologisch nutzbar, der Rest wird als Atmungswärme abgegeben (KADER 1987), die im Gemüselager abgeführt werden muss. Bei Pflanzenmaterial, welches im Ruhezustand geerntet wurde und sich nicht mehr im Wachstum befindet, kann die respiratorische Umwandlung von Energie in eine für die Pflanze nutzbare Form (zum Stoffaufbau) vernachlässigt werden (BURTON 1982).

### 1.3.1 Einflussfaktoren auf die Atmungsrate

Die CO<sub>2</sub>-Abgabe pro kg Einlagerungsgewicht und Zeit wird Atmungsrate genannt. Die initiale Atmungsrate gelagerter Pflanzenorgane ist direkt nach der Ernte und einige darauffolgende Stunden maßgebend. Sie ist abhängig von der Art und der Temperatur. Die Atmungsdrift beschreibt die ansteigende oder fallende Tendenz der Atmungsrate während der Lagerdauer. Die durchschnittliche Atmungsrate wird über die gesamte Lagerdauer ermittelt (RYALL und LIPTON 1979).

Die Atmungsrate wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Diese sind z.B. die Gemüseart und Sorte (Genotyp) und das Reifestadium des Lagergutes, besonders bei klimakterischen Arten. Die chemische Zusammensetzung des Pflanzenmaterials und die Substratkonzentrationen spielen ebenfalls eine Rolle. Äußerliche Faktoren vor, während und nach der Ernte wie Bodenart, Sonneneinstrahlung, Trockenstress oder Stress durch Beschädigung, die Zusammensetzung der Lageratmosphäre usw. beeinflussen die Atmung zusätzlich (KADER 1987). Maschinell geerntete Möhren weisen z.B. gegenüber handgeernteten eine um bis zu 55 % erhöhte Atmungsrate auf (MEMPEL 2000). Bei Einlegegurken wird die Atmungsintensität durch Maschinenernte bis zu 18,5 % gesteigert (WEICHMANN et al. 1975). Der Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst die Atmung nur bei trockenem Material wie z.B. Getreide (BURTON 1982). Den größten Einfluss auf die Atmung hat die Lagertemperatur (ROBINSON et al. 1975, OSTERLOH und GRÖSCHNER 1975, BÖTTCHER 1986, 1988a, 1988b, 1988c, 1991; KADER 1987).

### 1.3.2 Temperatureffekte auf den Stoffwechsel

Der Stoffwechsel ist die Gesamtheit aller enzymatischen Reaktionen, die im lebenden Organismus stattfinden, so auch bei Pflanzen. Da eine enzymatische Reaktion in erster Linie eine chemische Reaktion ist, wird deren Geschwindigkeit durch die Temperatur gemäß der Arrhenius-Gleichung beeinflusst (PHAN 1987):



$$V = k \times [A] \times [B]$$

$$k = A e^{\frac{-\mu}{RT}} \quad \text{(Arrhenius - Gleichung)}$$

$$k' = \frac{k}{A}$$

$$\ln k' = \frac{-\mu}{R} \times \frac{1}{T}$$

$V$  = Reaktionsgeschwindigkeit

$k$  = Geschwindigkeitskonstante

$A$  = Konstante

$\mu$  = Aktivierungsenergie

$R$  = ideale Gaskonstante

$T$  = absolute Temperatur

Die enzymatische Aktivität wird jedoch durch Temperaturen begrenzt, die unter Umständen nur ein einziges Enzym der gesamten Reaktionskette inaktivieren bzw. denaturieren. Bei zu niedrigen Temperaturen werden die Membranen zerstört, was die Aufhebung der Zellkompartimentierung und damit eine Störung des Metabolismus zur Folge hat. Die Lagertemperatur für ein bestimmtes Produkt muss also höher sein als die Temperatur, die den Metabolismus stoppen würde. Bei zu hohen Temperaturen werden Proteine denaturiert und folglich können Enzyme, die ja aus Proteinen aufgebaut sind, ihre Funktion nicht mehr ausüben. Also ist biologische Aktivität nur innerhalb eines Temperaturbereiches von 1 °C bis 40 °C möglich. Für diesen Bereich ist die Arrhenius-Gleichung für Untersuchungen an lebenden Pflanzen relevant (PHAN 1987). Die Van't Hoff'sche Gleichung oder  $Q_{10}$ -Regel, die aus der Arrhenius-Gleichung abgeleitet wurde, besagt, dass die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen durch eine Temperaturerhöhung um 10 K in etwa verdoppelt wird:

$$Q_{10} = \frac{V_{t+10}}{V_t} \approx 2,3 \quad \text{(Gleichung 5)}$$

Also kann der  $Q_{10}$ -Wert für Gemüse nach folgender Gleichung berechnet werden (KADER 1987):

$$Q_{10} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \quad (\text{Gleichung 6})$$

$R_2$  = Atmungsrate bei  $T_2$

$R_1$  = Atmungsrate bei  $T_1$

$T_2$  und  $T_1$  = Temperaturen [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Der Quotient  $Q_{10}$  bleibt nur für einen definierten Temperaturbereich konstant. Er liegt im Bereich von  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $10^{\circ}\text{C}$  am höchsten zwischen 1 und 5. Von  $10^{\circ}\text{C}$  bis  $32^{\circ}\text{C}$  liegt er in der Regel zwischen 2 und 3. Die  $Q_{10}$ -Werte sind außerdem von der Gemüseart abhängig. Eine hohe Atmungsrate ist nicht gleichbedeutend mit einem hohen  $Q_{10}$ -Wert und umgekehrt (SALUNKHE und DESAI 1984).

Die meisten Gemüsearten haben direkt nach der Ernte hohe Atmungsraten (initiale Atmungsrate), die erst innerhalb von wenigen Tagen ein niedrigeres Gleichgewicht erreichen. Dieser zeitliche Verlauf der Atmungsraten kann durch folgende Annäherung beschrieben werden (HAYAKAWA 1987):

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_e} = 1 + \frac{(\dot{Q}_0 - \dot{Q}_e)^{(-E_1 T)}}{\dot{Q}_e} \quad (\text{Gleichung 7})$$

Eine Ausnahme bilden Zwiebeln und Knoblauch, deren Atmungsraten mit der Lagerdauer ansteigen, weil sie ihre Dormanz verlieren. Die Atmungsrate kann folgendermaßen beschrieben werden (HAYAKAWA 1987):

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_e} = 1 - \dot{Q}_2^{(-E_2 T)} \quad (\text{Gleichung 8})$$

$\dot{Q}$  = Atmungsrate

$\dot{Q}_e$  = Gleichgewichtsatmungsrate

$\dot{Q}_0$  = initiale Atmungsrate

$\dot{Q}_2$  = empirische Konstante um die zeitabhängige Atmungsrate zu bestimmen

$E_1, E_2$  = empirische Konstanten zum Abschätzen der Zeitabhängigkeit der Atmungsraten

$T$  = Temperatur

## ***1.4 Transpiration von gelagertem Gemüse***

### **1.4.1 Evaporation einer Wasseroberfläche**

Immer, wenn wasserdampfgesättigte Luft und Wasser zusammenkommen, kommt es zur Verdunstung oder Evaporation. Die Evaporationsrate ist direkt proportional zum Konzentrationsgradienten zwischen den Wassermolekülen, die aus der Wasseroberfläche verdampfen und denen, die schon in der Atmosphäre sind. Es entweichen so lange Wassermoleküle aus der Wasseroberfläche, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, das heißt pro Zeiteinheit verlassen genauso viele Moleküle die Wasseroberfläche wie in letztere wieder zurückkehren (kondensieren). Dieses Gleichgewicht wird Sättigungsdampfdruck genannt. Er stellt sich unabhängig vom Luftdruck ein (VON WILLERT et al. 1995). Haben Wasser und Luft die gleiche Temperatur, so ist die Evaporationsrate proportional zum Dampfdruckdefizit der Luft (BURTON 1982, ROBINSON et al. 1975).

### **1.4.2 Wasserverlust von Pflanzenmaterial**

Feuchteverlust ist einer der Hauptgründe für die Qualitätsabnahme gärtnerischer Produkte nach der Ernte (SABUROW und ANTONOW 1953, VAN DEN BERG und LENTZ 1971, FOCKENS und MEFFERT 1972, CHAU et al. 1988, HENTSCHEL 1997). Er bedeutet nicht nur Mindereinnahmen durch einen direkten Gewichtsverlust, sondern manche Gemüsearten, wie z.B. Kopfsalat, sind bereits nach 5 % Gewichtsverlust unverkäuflich und damit beläuft sich der betriebswirtschaftliche Verlust auf 100 % (ROBINSON et al. 1975). Außerdem kann Gemüse ungenießbar werden, wenn es 5 bis 10 % seines Gewichtes durch Transpiration verloren hat. Die Verkaufsfähigkeit leidet durch den Qualitätsverlust der äußeren Erscheinung, der Ernährungswert durch Vitamin- und Geschmackseinbußen. Der Prozentsatz an Gewichtsverlust, bei dem Schrumpfungssymptome äußerlich sichtbar werden, hängt von der Gemüseart ab. Berichte über den prozentualen Gewichtsverlust von Einzel Früchten, der zu offensichtlichen Schrumpfungssymptomen führt, bei denen das Gemüse vom kommerziellen Standpunkt aus nicht mehr als einwandfrei betrachtet werden kann, reichen von sehr niedrig (1 % bei Tomaten) bis zu sehr hoch (68 % in Buschbohnen) (SALUNKHE und DESAI 1984).

Tabelle 1: Durchschnittlicher prozentualer Gewichtsverlust unterschiedlicher Gemüsearten bei Einsatz von Schrumpfungssymptomen (verändert nach SALUNKHE und DESAI 1984).

Schrumpfungssymptome/ Gemüseart	keine	geringe Spuren	leicht	mittel	schwer	Extrem schwer
Tomaten	3,5	4,1	5,0	6,2	7,1	8,2
Kohl	4,0	5,5	7,3	10,9	14,6	18,4
Paprika	6,1	8,1	10,2	12,2	13,7	15,4
Kürbis	15,0	17,6	20,2	23,9	28,0	31,1
Bohnen	27,5	31,9	36,8	41,0	45,0	51,7

Darüber hinaus gibt es Anzeichen dafür, dass das Aufrechterhalten der ursprünglichen Feuchte eines Produktes dessen Wundheilung nach Verletzung unterstützen kann (CHAU et al. 1988). Bei unterschiedlichen Süßkartoffelsorten war die Atmungsintensität nach Verwundung durch Abschaben oder Anritzen in niedriger Luftfeuchte (50 %) höher als in hoher Luftfeuchte (90 %). Dieser Effekt zeigte sich bei Lagerung in 20 °C und in 30 °C, jedoch bei 30 °C deutlicher ausgeprägt (RAVI 1994).

Blattgemüse geben vor der Ernte Wasser durch die Stomata ab. Andere Wege sind Stängelnarben, Lentizellen oder die wachsige Oberfläche des Gemüses (WEICHMANN 1991). Eine wirksame Transpirationsbarriere stellt die Cuticula dar, was hauptsächlich auf ihren Wachsgehalt zurückgeht. Beim intakten Blatt wird die schwere Durchlässigkeit der Cuticula noch durch die Auflagerung weiterer Wachsschichten und durch Cutineinlagerungen in die Epidermisaußenwände verstärkt. Die cuticuläre Transpiration erreicht auch bei zarten Blättern feuchter Standorte weniger als 10 % der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche (STRASBURGER 1983).

Bei Tomaten ist die Haut sehr cuticularisiert und bietet großen Widerstand gegen Wasserabgabe. Die Zwiebel ähnelt einem dicht gepackten Kohl. Die äußerste Schicht trocknet bei der Reife völlig aus. Die verdunstende Oberfläche ist das darunter liegende, lebende sukkulente Blatt. Es hat keine Verbindung mit der Umgebungsluft, sondern mit dem geringen Luftvolumen unter der trockenen äußeren Schale. Luftaustausch ist zwar möglich, der Wasserverlust aber folglich sehr gering (BURTON 1982).

Kleine Risse in der Oberfläche, die durch Wachstum oder mechanische Belastung entstehen, können die Wasserabgabe von Pflanzenorganen fördern (RYALL und LIPTON 1979, SASTRY 1985, MEMPEL 2000). Die Verdunstung einer Pflanzenoberfläche ist abhängig von deren Temperatur und gelösten Substanzen im Zellsaft. Das meiste Pflanzenmaterial ist bei gleicher Temperatur im Gleichgewicht

mit der umgebenden Luft bei einer relativen Luftfeuchte von 99% - 99,5% (BURTON 1982). Bei der Abgabe bzw. Aufnahme von Wasser wird immer ein Gleichgewicht angestrebt. Dieses ist abhängig von strukturellen Faktoren. Dazu gehören das Verhältnis von Oberfläche zur Masse (abhängig von der geometrischen Form, z.B. längliche und runde Möhren, Kompaktheit z.B. von Kohl oder Salat), Oberflächenstruktur und Transpirations- bzw. Evaporationsbarrieren und die Durchlässigkeit der eingelagerten Ladung für die Bewegung des Wassers zu oder von der Oberfläche (BURTON 1982, CHAU et al. 1988, ROBINSON et al. 1975, SASTRY 1985, SALUNKHE und DESAI 1984). Wird bei Möhren der Gewichtsverlust in % des Ausgangsgewichtes angegeben, so verdoppelt er sich bei abnehmendem Rübengewicht von 120 g auf 15 g. Wird der Gewichtsverlust jedoch in  $\text{mg cm}^{-2}$  ausgedrückt, so gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen großen und kleinen Rüben (ÅPELAND und BAUGERØD 1971). Das Reifestadium der gelagerten Pflanzenorgane hat signifikanten Einfluss auf den Feuchtigkeitsverlust. Unreife oder überreife Früchte transpirieren mehr als reife Früchte (SASTRY 1985). Diaz-Perez (1997) vermutet eine Veränderung der Wasserdurchlässigkeit der Früchte während des Reifeprozesses. Tomaten, die im Breaker-Stadium geerntet wurden, hatten eine um 28 % höhere Transpiration als grünreif geerntete Früchte. Paprika und Auberginen zeigten ähnliche Reaktionen.

Die Bewegung des Wassers innerhalb des Pflanzenmaterials erfolgt von Vacuole zu Vacuole und damit von Zelle zu Zelle. Der größte Teil des Wassers wandert durch die interfibrillären Räume der Zellwände. Stomatäre Transpiration trägt nur zu einem geringen Teil zum Wasserverlust in der Nacherntephase bei, da die Stomata bei geerntetem Material in der Regel geschlossen sind (BURTON 1982). Bestimmte Umstände, wie z.B. die schnelle Abkühlung kälteempfindlicher Gewebe, können dazu führen, dass die Stomata geöffnet bleiben (SALUNKHE und DESAI 1984).

ROBINSON et al. (1975) empfehlen für die meisten Gemüsearten eine Kombination von hoher Luftfeuchte mit möglichst niedriger Temperatur. Bei Arten, die gute Barrieren haben (z.B. Zwiebeln), sollte die Luftfeuchte im Lager etwas geringer sein, um Mikroorganismenbefall so gering wie möglich zu halten.

### 1.4.3 Transpirationsrate und Transpirationskoeffizient

Die Transpirationsrate von gärtnerischen und landwirtschaftlichen Produkten wird durch folgende grundlegende Formel ausgedrückt:

$$m = K \times A(p_s - p_a)$$

(Gleichung 9)

 $m$  = Transpirationsrate $K$  = Massentransferkoeffizient $A$  = Produktoberfläche $p_s$  = Dampfdruck der verdampfenden Oberfläche $p_a$  = Dampfdruck der Umgebungsluft

Die treibende Kraft für den Wasserverlust von Pflanzenteilen ist der Gradient des Dampfdrucks zwischen Gewebe und Umgebungsluft (BEN-YEHOSHUA 1987, STRASBURGER 1983, DIAZ-PEREZ 1997). Der Massentransferkoeffizient  $K$  variiert mit dem Produkt und mit den Bedingungen, unter denen die Transpiration gemessen wird und setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_s}$$

(Gleichung 10)

$\frac{1}{K_a}$  = Widerstand der laminaren Grenzschicht (abhängig von Umgebungsfaktoren)

$\frac{1}{K_s}$  = innerer Widerstand des Pflanzengewebes (produktspezifisch)

$K_a$  ist abhängig von Produktdurchmesser, Diffusionseigenschaften von Wasserdampf in Luft, Luftdichte, Luftgeschwindigkeit und Viskosität.  $K_s$  ist produktspezifisch und bleibt bei den meisten Arten über eine Zeit hinweg konstant. CHAU et al. (1988) fanden nur bei Tomaten eine Abnahme des  $K_s$ -Wertes pro Zeit und Prozent Gewichtsverlust.

Der Transpirationskoeffizient ist ein Parameter zur Beschreibung des Wasserdampfstromes. Die Einheit des Koeffizienten gibt die Menge transpirierten Wasserdampfes pro Produktoberfläche, Zeiteinheit und Dampfdruckdefizit an [ $\text{mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ]. Da die Produktoberfläche meistens schwierig zu messen ist, wird der Transpirationskoeffizient auch in Bezug auf die Produktmasse ausgedrückt [ $\text{mg H}_2\text{O kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ] (HAYAKAWA 1987). Nach WALKER (1985) kann der Transpirationskoeffizient bei Pflanzen durch folgende lineare Gleichung beschrieben werden:

$$\dot{M}_T = \frac{z}{R \cdot T} \cdot \frac{1}{R_E + R_I} \quad (\text{Gleichung 11})$$

$\dot{M}_T$  = spezifischer Masseverlust durch Transpiration

$z$  = Anteil der Pflanzenoberfläche, der Transpiration zulässt

$R$  = Gaskonstante

$T$  = absolute Temperatur

$R_E$  = Diffusionswiderstand der laminaren Grenzschicht

$R_I$  = Diffusionswiderstand des Pflanzengewebes

Außer den bisher genannten Faktoren müssen bei der Berechnung von Transpirationskoeffizienten der Wärmeübergang durch Konvektion und die Strahlung an der Produktoberfläche berücksichtigt werden (CHAU et al. 1988). Faktoren wie Temperatur, relative Luftfeuchte und Feuchtigkeitsverlust von Pflanzenmaterial stehen in engem Zusammenhang und werden durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Dazu gehört z.B. die Atmungswärme als temperaturabhängige Variable, die Füllichte und Fülltiefe im Lager sowie die Luftgeschwindigkeit. Variationen im Transpirationskoeffizienten wirken sich am deutlichsten auf die relative Luftfeuchte im Lager und auf den tatsächlichen Feuchtigkeitsverlust des Lagergutes aus. Wasserdampfkonzentrationsunterschiede steigen bei konstanter relativer Luftfeuchte mit der Temperatur an (LENTZ et al. 1971). VAN DEN BERG und LENTZ (1971) fanden heraus, dass sowohl bei Zwiebeln als auch bei Kartoffeln bis zu 50 % Variabilität in Bezug auf die Transpirationskoeffizienten zwischen einzelnen Bulben bzw. Knollen auftrat. Die Transpirationskoeffizienten für einzelne Kartoffeln waren nicht von deren Größe oder Oberfläche abhängig. Als Hauptquelle für die Variabilität nennen VAN DEN BERG und LENTZ (1971) Dicke, Struktur und Eigenschaften der Oberflächenlagen.

### ***1.5 Beitrag von Atmung und Transpiration zum Schwund von gelagertem Gemüse***

Transpiration und CO<sub>2</sub>-Produktion im Atmungsprozess sind die Hauptursachen für den Schwund oder Gewichtsverlust der gelagerten Pflanzenorgane. Transpiration macht ca. 90% des Schwundes aus (BEN-YEHOSHUA 1969). Normalerweise ist der Anteil des Schwundes, der durch Atmung entsteht, sehr gering im Vergleich zu dem Anteil, der durch Transpiration verloren geht (KRAXNER 1981). Laut RYALL und LIPTON (1979) beträgt der Gewichtsverlust durch Respiration auch bei lange

gelagerten Arten wie Kartoffeln, Zwiebeln oder Kohl höchstens 2-3%, da die Atmungsintensität durch Lagerung unter empfohlenen Temperaturbedingungen sehr niedrig gehalten werden kann. Bei bestimmten Arten, die sehr lange gelagert werden, wie z.B. Zwiebeln für die Trocknung, kann der Verlust durch Atmung jedoch signifikant sein (KADER 1987), da der Verlustanteil durch Atmung in Relation zur Transpiration größer ist. Obwohl höhere Luftfeuchte sowohl bei Kurz- als auch bei Langzeitlagerung geringeren Schwund zur Folge hatte, beeinflusste diese den Kohlenhydrat- und Gasstoffwechsel des gelagerten Gemüses nicht. Einzige Ausnahme war Kopfsalat, der nach Lagerung in niedriger Luftfeuchte im Vergleich zur hohen Luftfeuchte eine signifikant höhere CO<sub>2</sub>-Abgabe aufwies (KRAXNER 1981).

Die Atmung ist kein geeigneter Indikator für den Gesamtschwund des Lagergutes. Die Ergebnisse von PICHA (1986) zeigen für unterschiedliche Süßkartoffelsorten, dass CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O getrennt voneinander abgegeben werden. Die Sorten mit der höchsten Atmungsintensität hatten nicht unbedingt den größten Verlust durch Transpiration. BEN-YEHOSHUA (1987) unterstreicht, dass unterschiedliche Gase separate Diffusionswege haben. Atmung und Transpiration beeinflussen sich insofern gegenseitig, dass einerseits einer verdunstenden Oberfläche Energie entzogen wird. Dadurch wird die Temperatur des gelagerten Gemüses und damit seine Atmungsintensität herabgesetzt. Andererseits steigt bei erhöhter Atmungsintensität die Oberflächentemperatur des Lagergutes an und somit wird das Dampfdruckdefizit in der laminaren Grenzschicht erhöht, was eine höhere Transpirationsrate zur Folge hat. Bei mittlerem Dampfdruckdefizit ist dieser Effekt gering, aber bei Luftfeuchten, die nahe an der Sättigungsgrenze liegen, ist der Anteil der Verluste durch CO<sub>2</sub>-Abgabe beträchtlich, da durch mangelnde Verdunstungskälte die entstehende Atmungswärme nicht abgeführt wird (SASTRY 1985).

Wärmeübergang und Feuchtigkeitsverlust eines kugelförmigen Produktes kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden (HAYAKAWA 1987):

Wärmeleitung:

$$c_p(\rho_0 + \rho_1 T) \left( \frac{\delta T}{\delta t} \right) = (k_0 + k_1 T) \left( \frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{\delta T}{\delta r} \right) + k_1 \left( \frac{\delta T}{\delta r} \right)^2 + Q(T, t) \quad (\text{Gleichung 12})$$

Ausgangsbedingung:

$$T = T_0 \text{ für } 0 \leq r \leq R \text{ wenn } t = 0$$

Grenzbedingung:

$$(k_0 + k_1 T) \left( \frac{\delta T}{\delta r} \right) = h_{q0} (|T_a - T|)^{n_q} (T_a - T) - (L_0 + L_1 T) h_{m0} \cdot \left( \left[ p_s \frac{T_a + 273,15}{T + 273,15} - p_a \right] \right)^{n_m} \left( p_s \frac{T_a + 273,15}{T + 273,15} - p_a \right) \quad (\text{Gleichung 13})$$

bei  $r = 0$  und  $t > 0$

$c_p$  = spezifische Produktwärme

$p_a$  = Wasserdampfdruck der Umgebungsluft

$p_s$  = Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der verdampfenden Oberfläche

$Q$  = Atmungswärmeproduktion

$R$  = Radius des kugelförmigen Produktes

$r$  = Koordinate in radialer Richtung

$T$  = Temperatur

$t$  = Zeit

$\rho_0, \rho_1$  = empirische Konstanten zur Schätzung der temperaturabhängigen Dichte des Produktes

Gleichung 13 setzt voraus, dass Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Produktes von der Temperatur linear abhängig sind.

## 1.6 Beeinflussung des Lagerklimas durch die Kältetechnik

Eine Kälteanlage besteht aus den Hauptbauteilen Verdichter (Kompressor), Verflüssiger (Kondensator), Expansionsventil, Verdampfer, Kältemittelleitungen und Kontroll- und Regeleinrichtungen (HENZE und HANSEN 1988). Verdampfer und Expansionsventil befinden sich beim direkt gekühlten Lager im Kühlraum, die anderen Bauteile im Maschinenraum. Das Kältemittel wird im Kompressor gefördert und auf den erforderlichen Druck komprimiert und im Verflüssiger kondensiert. Über das Expansionsventil gelangt das kondensierte, unter hohem Druck stehende Kältemittel zum Verdampfer. Durch den Druckabfall im "Verdampfer" geht das Kältemittel in den gasförmigen Zustand über, dabei nimmt es Wärmeenergie auf, die der Kühlraumluft entzogen wird. Das gasförmige Kältemittel wird vom Verdichter wieder angesaugt, so dass der Kältemittelkreislauf geschlossen ist. Verdampfer bestehen aus Rohrbündeln mit Kühllamellen, die von Ventilatoren angeblasen werden. Es sind thermisch und elektronisch geregelte Expansionsventile im Einsatz. Die direkte Kühlung der Lagerluft wird mit der Formel des Wärmedurchgangs beschrieben (KUCHLING 1987, BREIDENBACH 1990):

(Gleichung 14)

$$Q_g = k \cdot A \cdot V_l \cdot \Delta T$$

$Q_g$  = Wärmeentzugsleistung [ $\text{J s}^{-1}$ ]

$k$  = Wärmedurchgangskoeffizient [ $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$A$  = Größe der Durchgangsfläche [ $\text{m}^2$ ]

$V_l$  = Luftstrom [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] oder [ $\text{kg s}^{-1}$ ]

$\Delta T$  = mittlere thermodynamische Temperaturdifferenz zwischen den Medien [K]

Die Funktionsweise der Kälteanlage muss auf die biologischen Anforderungen von Gemüse an das Lagerklima ausgerichtet sein. Da die Transpiration als wichtigste Verlustursache während der Lagerung gilt, müssen Einflussgrößen auf die Transpiration so eingestellt sein, dass die Wasserabgabe des Lagergutes minimiert wird (HENTSCHEL 1997). Im Kühlbetrieb kondensiert Wasser an den Verdampferlamellen, weil die Luft, die mit den Lamellen in Berührung kommt, dort abgekühlt wird und ihren Taupunkt unterschreitet. Wenn sich die Luft am Lagergut wieder erwärmt, erhöht sich ihr Dampfdruckdefizit und damit vergrößert sich die treibende Kraft für die Transpiration des gelagerten Gemüses. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Lagergut und Oberflächentemperatur des Wärmetauschers (Verdampfungstemperatur) ist, um so extremer wirkt sich dieser Effekt aus (GRAS 1991).

Die Minimierung des Schwundes in einem Kühlraum erfordert Verdampfer-temperaturen, die nahe bei den gewünschten Temperaturen im Lager liegen (SASTRY 1985), damit dem Lagergut möglichst wenig Wasser durch Kondensation entzogen wird. Dazu schreibt HENTSCHEL (1997), dass die Temperaturdifferenz zwischen Lufteintrittstemperatur am Verdampfer und Verdampfungstemperatur des Kältemittels einen beachtlichen Einfluss auf das Dampfdruckdefizit der Lagerluft und damit auf den Schwund des Gemüses ausüben. Sie sollte bei maximal 4.0 K liegen (BELKER 1996, HENTSCHEL 1997). Je kleiner die Temperaturdifferenz ist, desto höher ist die relative Luftfeuchte im Lager und desto geringer der Verlust. Eine Temperaturdifferenz von 4.0 K lässt sich aber nur mit elektronisch gesteuerten Einspritzventilen erreichen (BELKER 1996). Bei großen Einlagerungsmengen müssen also große Wärmemengen mittels möglichst kleiner Temperaturdifferenzen abgeführt werden. Deshalb ist es wichtig, den Kontaktfaktor  $cf$  des Wärmetauschers zu maximieren, der folgendermaßen definiert ist:

$$cf = \frac{Ta_1 - Ta_2}{Ta_1 - Ts} \quad \text{(Gleichung 15)}$$

$cf$  = Kontaktfaktor

$Ta_1$  = Verdampfereintrittstemperatur

$Ta_2$  = Verdampferaustrittstemperatur

$Ts$  = effektive Durchschnittstemperatur der Verdampferoberfläche

Der Kontaktfaktor ist ein Maß dafür, wie nahe die Kühlraumtemperatur am Taupunkt liegt (SASTRY 1985).

Temperaturschwankungen im Lager treten einerseits als Folge des Schaltspieles des verwendeten Temperaturreglers auf und andererseits als Folge des Arbeitstaktes der Verdampfer (ZAUSSINGER 1997). Mit Schaltdifferenz bezeichnet man den Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausschalten der Kälteanlage. Feuchteschwankungen steigen mit Zunahme der Differenz unerwünscht an, der Energieverbrauch wird jedoch geringer (HENZE und HANSEN 1988). Es muss also ein Kompromiss gefunden werden zwischen der möglichen Minimierung der Lagerverluste und damit einhergehenden Gewinnmaximierung für den Lageristen und den Anschaffungs- und Energiekosten einer Kälteanlage, die mehr oder weniger genau geregelt werden kann.

Durch die am Thermostaten eingestellte Temperaturdifferenz wird die Intensität des Luftaustausches im Lager unterstützt, so dass eine zusätzliche Frischluftzufuhr bei der Kühlagerung normalerweise nicht notwendig ist. Je größer die Temperaturdifferenz

ist, desto größer ist die Volumenänderung der Lagerluft. Bei Temperaturerhöhung strömt die Luft über Undichtigkeiten der Kühlrauminnenflächen und Türen von innen nach außen und bei erneuter Abkühlung wieder von außen nach innen. HENZE und HANSEN (1988) sprechen hier von einem Pumpeffekt. Bei einer eingestellten Temperaturdifferenz von 1,2 K kann mit einem fünffachen Luftwechsel pro Tag gerechnet werden.

Hochentwickelte Computersimulationen von Beschaffenheit der Lagerluft und Feuchtigkeitsverlust dienen dazu, Lagereinrichtungen zu konstruieren, die optimale Bedingungen liefern. Dies erfordert jedoch die Kenntnis der optimalen Temperatur und Luftfeuchte und deren zulässige Schwankungsbreite sowie der Transpirationskoeffizienten und der Atmungsraten der zu lagernden Pflanzenorgane (SASTRY 1985).

## 1.6.1 Wärmeübertragung zwischen gelagertem Gemüse und Umgebungsluft

### 1.6.1.1 Physikalische Grundlagen

Beim Wärmetransport gilt der Grundsatz, dass die natürliche Bewegungsrichtung der Wärmeenergie von der höheren zur niedrigeren Temperatur verläuft. Daraus folgt gleichzeitig, dass zur Wärmeübertragung eine Temperaturdifferenz vorhanden sein muss. Die Größe des transportierten Wärmestroms hängt von der Höhe des Temperaturgradienten zwischen umströmendem Medium und umströmtem Körper ab. Weiterhin ist sie von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, seinen stofflichen Eigenschaften sowie der Form und der charakteristischen Länge des Körpers, im vorliegenden Fall des Gemüses, bestimmt. Da gelagertes Gemüse aufgrund der Atmungswärmeproduktion stets eine etwas höhere Temperatur besitzt als die Luft im Kühlraum, wird Wärme vom Gemüse an die Luft abgegeben. Die Wärmeübertragung von flüssigen oder gasförmigen Stoffen auf feste Körper wird Wärmeübergang oder Konvektion genannt und durch folgende Formel beschrieben:

$$Q = \alpha A t \Delta T \quad \text{(Gleichung 16)}$$

$Q$  = Wärmeübergang [J]

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{Wm}^2 \text{K}^{-1}$ ]

$A$  = Größe der Übergangsfläche [ $\text{m}^2$ ]

$t$  = Dauer des Wärmeübergangs [s]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des festen Körpers und des angrenzenden Mediums [K]

Der Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion berücksichtigt die Faktoren der Strömungsgeschwindigkeit, der Eigenschaften des Mediums und der Oberflächenbeschaffenheit des festen Körpers. Die Materialeigenschaften des Körpers spielen bei der Konvektion keine Rolle.

Wie bei der Transpiration bereits besprochen, zeigt die Strömung um einen festen Körper eine Grenzschicht über seiner Oberfläche. Direkt über der Körperoberfläche haben die Teilchen des umströmenden Mediums die Geschwindigkeit  $v = 0$  und die Temperatur des Mediums ist gleich der des Körpers. Deshalb entsteht an der Übergangsstelle zwischen gasförmigem oder flüssigem Medium und festem Körper ein Temperatursprung (KUCHLING 1986).

Herrschen innerhalb des Gemüses unterschiedliche Temperaturniveaus, so wird die Wärme durch Wärmeleitung transportiert:

(Gleichung 17)

$$Q = \frac{\lambda A t \Delta T}{l}$$

$Q$  = transportierte Wärmemenge [J]

$A$  = Querschnittsfläche des Leiters [ $\text{m}^2$ ]

$t$  = Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Wärmeleiters [K]

$l$  = Länge des Wärmeleiters, auf der die Temperaturdifferenz herrscht [m]

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit des Materials [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

Die Wärmestromdichte  $Q/At$  ist dem Temperaturgefälle proportional. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Temperaturdifferenz während der Wärmeleitung gleich bleibt. Bei der Wärmeübertragung zwischen Gemüse und Luft haben wir es mit einer Kombination aus diesen beiden Vorgängen zu tun, dem Wärmedurchgang. Geht man davon aus, dass die Atmungswärme im Innern des Gemüses produziert wird, so wird diese erst durch Wärmeleitung an die Gemüseoberfläche transportiert, worauf dann ein konvektiver Wärmeübergang an die Luft folgt. Eine schematische Zeichnung soll den Vorgang verdeutlichen:

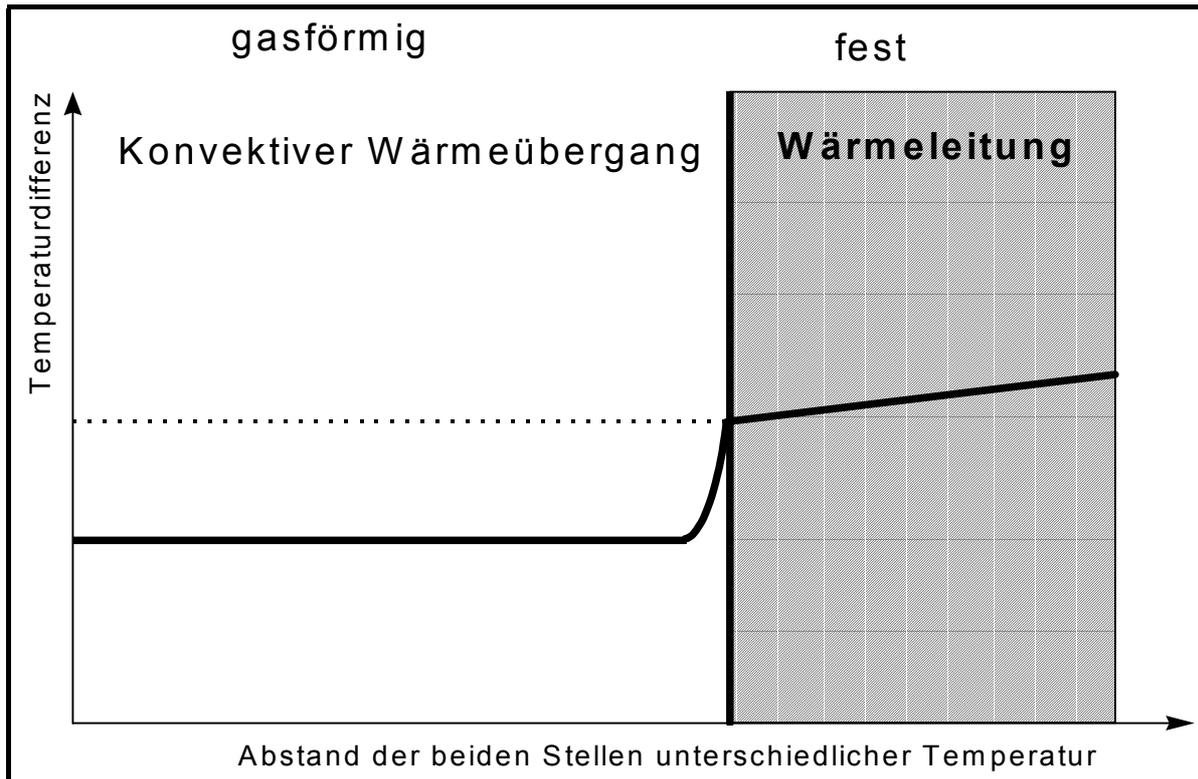


Abbildung 1: Wärmeübertragung zwischen gasförmigen und festen Stoffen (Wärmedurchgang).

Der Wärmedurchgang wird durch die Geschwindigkeit des umströmenden Mediums beeinflusst. Strömungen mit innerer Reibung, aber ohne Wirbelbildung, bezeichnet man als laminar (KUCHLING 1986). Die innere Reibung ist eine Folge von Kraftwirkungen zwischen den Molekülen, die sogenannte Viskosität. Treten in einer Strömung große Strömungswiderstände auf, so bilden sich Wirbel und die Strömung wird turbulent. Die Kräfte wirken entgegen der Bewegungsrichtung und bremsen die Bewegung. Der Strömungswiderstand ist unter anderem abhängig vom größten der Strömung entgegenstehenden Körperquerschnitt und kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$F_w = cA \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\text{Gleichung 18})$$

$F_w$  = Strömungswiderstand [N]

$c$  = Widerstandsbeiwert [dimensionslos]

$A$  = größter der Strömung entgegenstehender Körperquerschnitt [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  = Dichte des strömenden Mediums [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$v$  = Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium [ $\text{m s}^{-1}$ ]

Anhand der Formel kann man erkennen, dass der Strömungswiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt (KUCHLING 1986). Der für die Berechnung des Strömungswiderstandes erforderliche Widerstandsbeiwert ist eine Funktion der Reynolds'schen Zahl  $Re$ , die folgendermaßen berechnet wird:

$$Re = \frac{l\rho v}{\eta} = \frac{l v}{\nu} \quad (\text{Gleichung 19})$$

$Re$  = Reynoldssche Zahl [dimensionslos]

$l$  = eine für den jeweiligen Körper charakteristische Länge [m]

$\rho$  = Dichte des strömenden Mediums [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$v$  = Relativgeschwindigkeit zwischen Medium und Körper [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$\eta$  = dynamische Viskosität [Pa s]

$\nu$  = kinematische Viskosität [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]

Die Reynolds-Zahl  $Re$  kann als Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft angesehen werden (BERTRAM 1996). Erreicht die Reynolds'sche Zahl bestimmte Grenzwerte, so schlägt eine laminare Strömung in eine turbulente um. Geometrisch ähnliche Körper besitzen gleiche Widerstandsbeiwerte, wenn sie in der Reynolds'schen Zahl übereinstimmen. Dann sind auch die beiden Strömungen einander ähnlich. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Strömungsversuche mit Modellen auszuführen (KUCHLING 1986).

## ***1.7 Zielsetzung der Arbeit***

Die widersprüchlichen Angaben in der Literatur über die Wirkung unterschiedlicher Temperaturschwankungen bei vergleichbarer Durchschnittstemperatur der Lagerluft auf das Produkt Gemüse ganz generell erfordern eine gezielte und möglichst genaue Überprüfung der Zusammenhänge. Dabei ist insbesondere zu klären, ob es eine physiologische "Überreaktion" von Gemüse auf Temperaturschwankungen gibt (vgl. RUBIN zit. in SABUROW und ANTONOW 1953), oder ob es sich bei den Ergebnissen von SEISENBERGER (1996) um einen physikalischen Effekt im Zusammenspiel von Kühltechnik und Produkt handelt, also um ein technisches Problem. Die Erste zu klärende Frage ist also, wie die Auswirkung von Temperaturschwankungen auf gelagertes Gemüse untersucht werden kann. Dazu war die Entwicklung einer Methodik erforderlich, mit Hilfe derer die Wirkung unterschiedlicher, fluktuierender

Klimabedingungen auf gelagertes Gemüse einwandfrei erfasst werden kann. Dies erfordert den Aufbau einer Versuchsanlage, mit der sich definierte fluktuierende Klimabedingungen erzeugen lassen und zwar so, dass sich die Lagertemperatur nach einem vorgegebenen Schema ändert. Die zweite Frage ist dann die Überprüfung der physiologischen Reaktion des gelagerten Gemüses auf unterschiedliche, fluktuierende Klimabedingungen. Hierbei ist vor allem wichtig, Atmungs- und Transpirationsintensität des Lagergutes als dynamische Größen im zeitlichen Verlauf als direkte Reaktion auf unterschiedliche Temperaturen zu betrachten und zu beurteilen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Zur Durchführung der Versuche wurde in Anlehnung an WEICHMANN (1972) und ENGELHARDT (1996) eine automatisierte, computergesteuerte Küvettenanlage entwickelt, die es ermöglicht, unterschiedliche, fluktuierende Temperatur- und Klimabedingungen zu erzeugen. Die Anlage befindet sich in einem Kühlraum, dessen Temperatur konstant auf 0,5 °C gehalten wird. Sinusförmige Temperaturschwankungen in den Küvetten simulieren den Temperaturverlauf in einem Kühllager. Atmung und Transpiration des gelagerten Gemüses werden durch Infrarotabsorption bzw. durch kapazitive Feuchtefühler bestimmt.

#### 2.1.1 Aufbau der Küvetten mit speziellem Einsatz

Die Versuchsanlage umfaßt 12 luftdicht verschließbare, zylinderförmige Acrylglas-küvetten mit einem Volumen von je 26 Litern. Jede Küvette enthält einen Küvetten-einsatz aus PVC, der aus drei Etagen besteht. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass das gelagerte Gemüse von der Küvettenluft gut umströmt werden kann (Abbildung 2).

#### 2.1.2 Klimatisierung in den Küvetten

In der obersten Etage ist ein Ventilator (12-V-Axial-Lüfter, 70,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) und unmittelbar darüber ein leistungsgeregeltes Keramik-Heizelement (12 V, 150 W) montiert. Die beiden mittleren Etagen sind für das zu untersuchende Lagergut vorgesehen. In der untersten Etage ist ebenfalls ein Ventilator montiert, der die Luftrückführung zur obersten Etage gewährleistet. Die Küvettenluft wird vom Ventilator der obersten Etage angesaugt, durch das Heizelement hindurch geblasen und dort gegebenenfalls erwärmt. Sie streicht am Deckel entlang, wird vom zweiten Ventilator durch den Luftschaft nach unten gesaugt, streicht langsam über die Gemüseoberfläche wieder nach oben und kühlt sich dabei ab. In Produktnähe wurden mit Hitzdrahtanemometern (Airflow Temperature Monitor ATM-24, Cambridge AccuSense, Inc.) Windgeschwindigkeiten von 0,1 m s<sup>-1</sup> bis 0,5 m s<sup>-1</sup> gemessen.

Die Hysterese, das heißt die Abweichung der Temperatur von ihrem Mittelwert und die Schwingungsdauer des sinusförmigen Temperaturverlaufs in der Küvette wird einerseits durch das Heizelement erzeugt und über die Software gesteuert. Andererseits erfolgt eine Abkühlung der Küvettenluft über die Küvettenaußenwand.

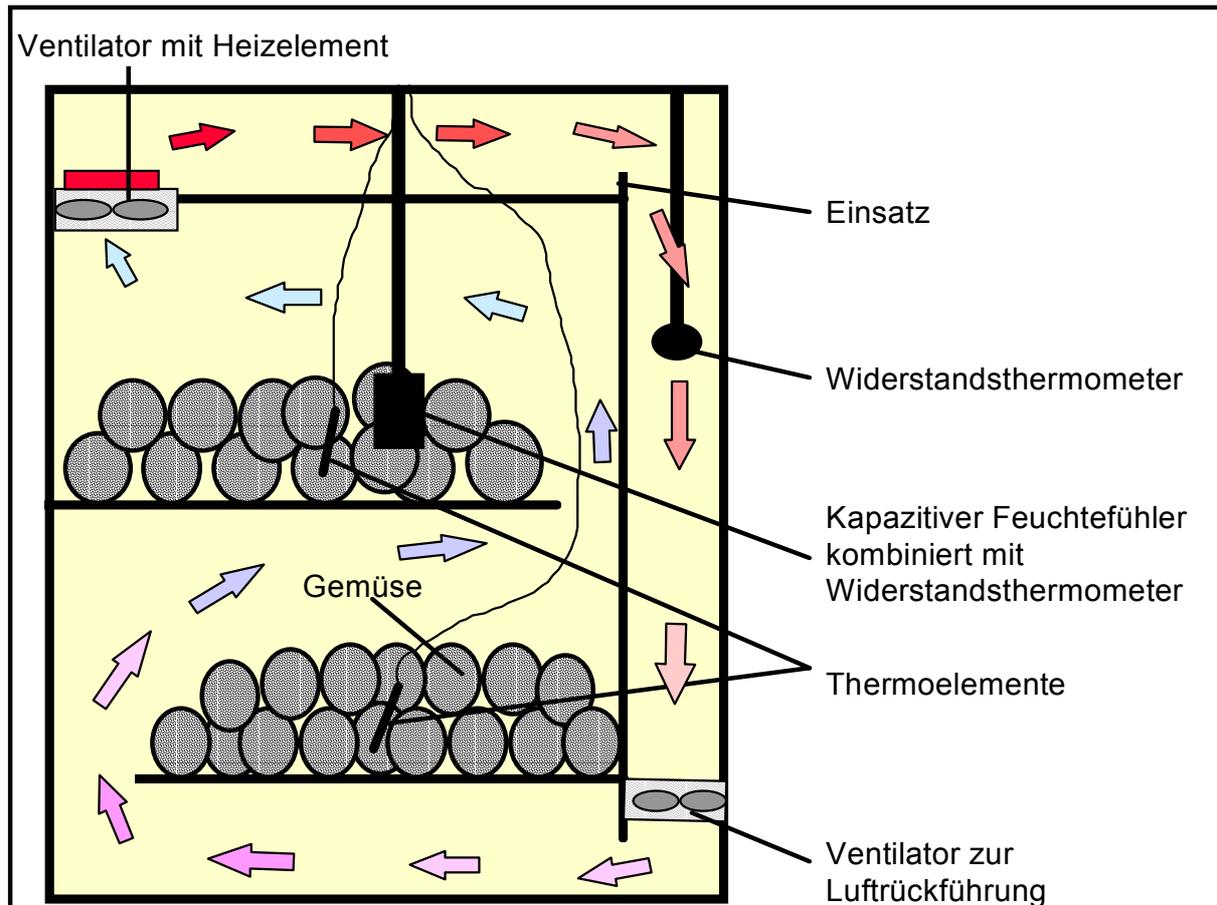


Abbildung 2: Küvette mit Einsatz und Messtechnik.

### 2.1.3 Messtechnik in den Küvetten

Die Lufttemperatur in den Küvetten wird über Pt-100 Widerstandsthermometer, die sich im Luftschacht befinden, gemessen. Außerdem werden Temperatur und relative Luftfeuchte in Produktnähe durch kapazitive Feuchtefühler (HMP 133Y, Hunicap 0062 Feuchtesensor kombiniert mit Pt-100 Widerstandsthermometer, Vaisala) bestimmt. Die Temperatur im Gemüse oder an der Gemüseoberfläche wird mit Mikrothermoelementen (Eisen-Konstantan, Kupfer-Konstantan) gemessen.

## 2.1.4 Messgasverlauf und Bestimmung der CO<sub>2</sub>- Abgabe des Produktes

### 2.1.4.1 Messgasverlauf

Gearbeitet wird mit einem offenen System, das heißt jedes Gefäß wird von einer definierten Luftmenge ( $1 \text{ l min}^{-1}$ ) durchströmt (Abbildung 3). Der Massendurchfluss wird über thermische Massendurchflussregler (Brooks Massflow Meter/Controller Model 5850 TR) geregelt. Die Durchflussmenge richtet sich nach dem Bedarf des Analysators für CO<sub>2</sub> (Binos 100-4P, Fisher-Rosemount). Ein Drei-Wege-Magnetventil am Ende jeder der 12 Gasleitungen entscheidet darüber, ob das jeweilige Messgas (das heißt die Küvettenluft) durch eine gemeinsame Leitung dem Analysator zugeführt wird oder wieder in den Kühlraum gelangt, da immer nur das Messgas einer Küvette im Analysator gemessen werden kann. Sämtliche Gasleitungen bestehen aus transparenten PE-Schläuchen. Alle Messgasleitungen sind durch selbstregulierende Heizbänder (M & C Products) beheizt, um Kondensation zu vermeiden. Massendurchflussregler und Magnetventile sind in einem Behälter aus Isolierpaneelen untergebracht. Ein Heizlüfter temperiert den Isolierbehälter auf ca. 25 °C, um auch hier jegliche Kondensation von Wasserdampf zu verhindern.

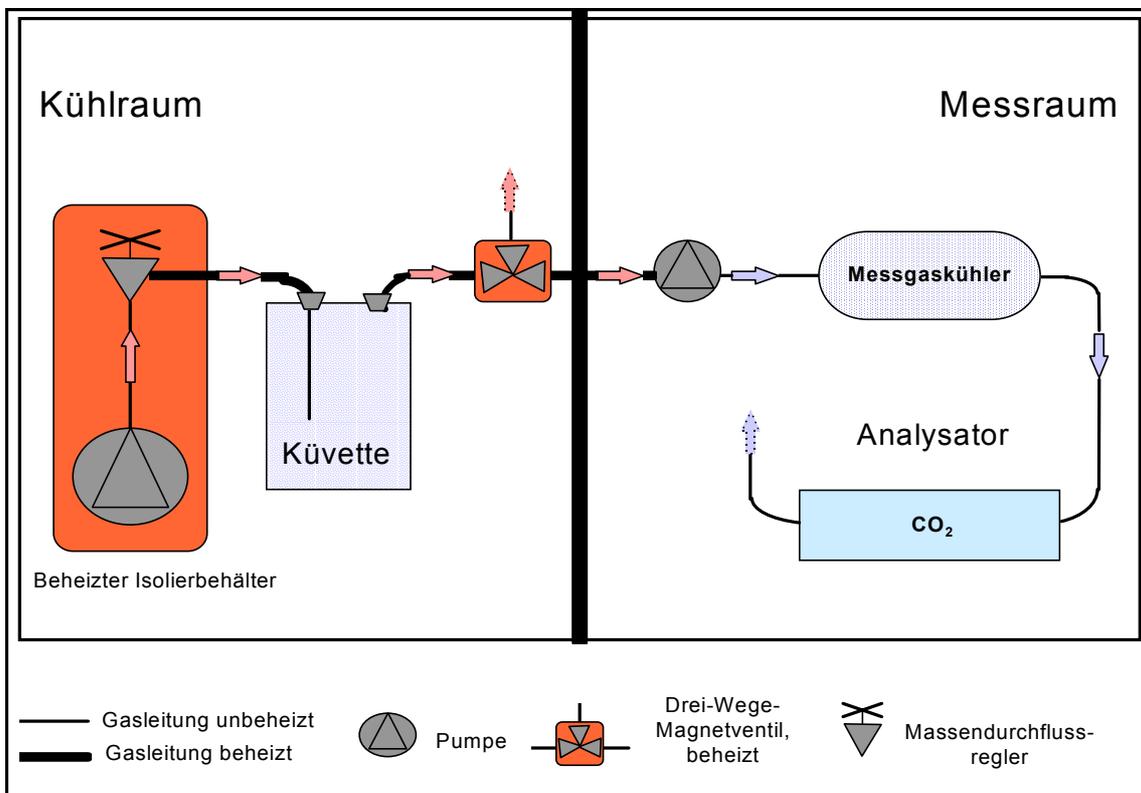


Abbildung 3: Messgasverlauf

### 2.1.4.2 Analyse

Das Messgas wird dem Analysator staubfrei über eine Messgasfördereinheit (CGMF1, Hartmann & Braun) zugeführt. Zunächst gelangt es in einen Kühler (ECP 1000, M & C Products), wo es auf einen niedrigen, stabilen Taupunkt eingestellt wird. Dadurch wird der Wasserdampf aus dem Messgas entfernt, es gelangt trocken in die Messkammer des Analysators. Dort wird durch Infrarotabsorption der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Gases bestimmt. Gemessen wird im Absolutmodus mit Stickstoff als Referenzgas, das heißt es wird immer der jeweilige absolute CO<sub>2</sub>-Gehalt der Küvettenluft bestimmt. Um die tatsächliche CO<sub>2</sub>-Abgabe des gelagerten Gemüses zu ermitteln, müssen in jeder Untersuchung Leergefäße dazwischen geschaltet sein, um den CO<sub>2</sub>-Gehalt der einströmenden Luft zu kennen.

Der Teil der Anlage, der sich im Kühlraum befindet, ist auf einem Versuchstisch aus Eisengitter montiert. Der Schaltschrank für die Messwerterfassung und Steuerung befindet sich direkt außerhalb des Kühlraumes. Abbildung 4 zeigt die Skizze der Versuchsanlage im Kühlraum von oben.

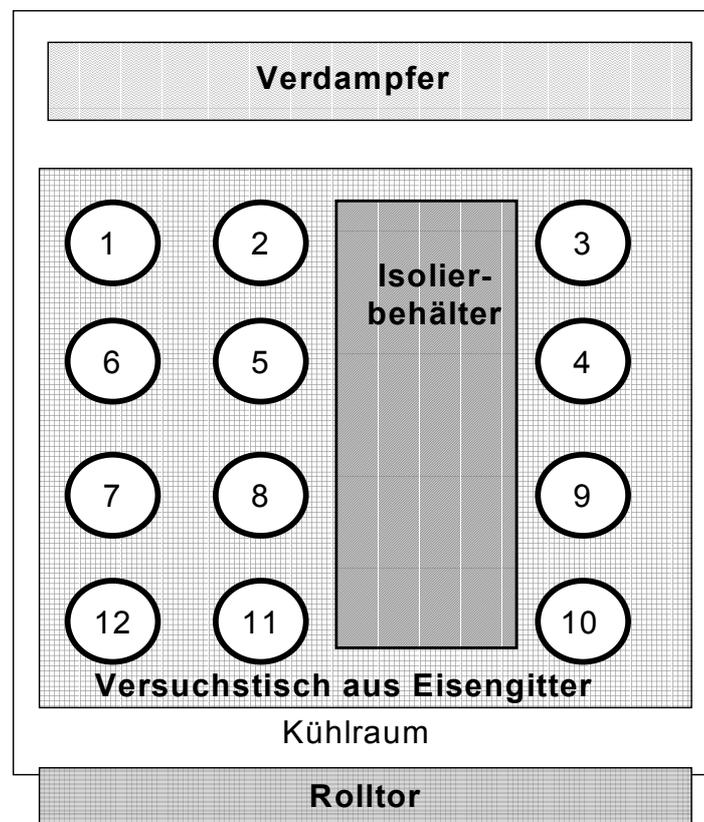


Abbildung 4: Skizze der Versuchsanlage im Kühlraum von oben. 1-12: Reihenfolge der Küvetten.

## ***2.2 Steuerung der Anlage, Messwerterfassung und Messwertverarbeitung***

Messwerterfassung und -auswertung sowie die Steuerung der Anlage erfolgen durch einen Prozessrechner (Pentium I, 133 Mhz, 16 MB RAM) mittels spezieller Software (Diadem Version 2, GFS 1995-1996), mit der Schaltpläne aus einzelnen Baugruppen erstellt werden können.

### **2.2.1 Funktionsweise und Aufbau des Schaltplanes**

Die Bausteine, aus denen Schaltpläne zusammengestellt werden, heißen Blöcke. Sie erfüllen jeweils bestimmte Funktionen und werden durch Leitungen untereinander verbunden. Datenleitungen haben die Anschlüsse an die Blöcke in waagrechter Richtung, System- und Steuerleitungen in senkrechter. Die Eingangs- und Ausgangsblöcke (Control300\_E und Control300\_A in Abbildung 5) sind sogenannte Steuerdateitreiber und bestimmen, welche Signale aufgenommen oder ausgegeben werden (siehe Kapitel 2.2.8 Technische Umsetzung). Stoppuhr und Schieberegler sind Simulationseingänge, deren Werte beliebig eingegeben werden können.

Die Spannungssignale, die die Messinstrumente zum AD-Wandler senden, werden dort in digitale Signale (Bytes) umgewandelt. Der Messbereich des Control 300 geht von 0 bis 10 V, das entspricht 0 bis 4096 Bytes. Diese werden im Programm durch Skalierungsblöcke direkt in physikalische Einheiten umgerechnet. Der Luftdruckmesser (Vaisala) hat z.B. einen Messbereich von 800 hPa bis 1060 hPa. Also entsprechen  $0\text{ V} = 0\text{ Bytes} = 800\text{ hPa}$  und  $10\text{ V} = 4096\text{ Bytes} = 1060\text{ hPa}$ . Eingesetzt wurde die Pt-100-Skalierung für die Temperaturmessung und die 2-Punkt-Skalierung für alle anderen Messungen. Bei Sollwerteingabe im Programm, z.B. beim Durchfluss, muss die physikalische Größe mittels Skalierungsblock in eine digitale umgewandelt werden.

„Diadem“ bietet für Steuerungsaufgaben unterschiedliche Blöcke an. Die Flankenbedingung bewirkt eine Signalausgabe bei Über- oder Unterschreiten eines vorgegebenen Wertes. Die Taste zum Ein- und Ausschalten wurde nur für die Anzeige am Bildschirm und zu Testzwecken verwendet. Des Weiteren wurden Formelbedingungen (nach Eingabe einer Vorschrift) und Boolesche Verknüpfungen (UND, ODER) eingesetzt. Damit eine Bedingung nur einmal ausgelöst wird, muss sie durch einen Mono-Flop Schalter verriegelt werden.

Systemblöcke werden zur Festlegung des Abfragetaktes eines bestimmten Signals eingesetzt, falls dieser vom Systemtakt (100 Hz) verschieden sein soll. Signale, die gemeinsam abgespeichert werden sollen, müssen an denselben Taktblock angeschlossen sein.

Der gesamte Schaltplan wurde zur besseren Übersicht in fünf Unterschaltpläne unterteilt, die unterschiedliche Steuerungs- und Messaufgaben erfüllen (Abbildung 5):

- Analyse
- Magnetventile
- Pt-100 Messung
- PID-Regler
- MFC

Die Anordnung der Unterschaltpläne ist willkürlich und hat keinen Einfluss auf deren Funktionsweise. Die jeweilige Beschreibung erfolgt in sinngemäßer Reihenfolge. Daten-, System- sowie Steuersignale können zwischen den Unterschaltplänen exportiert und importiert werden. In den Abbildungen werden nur die Blöcke für Daten-, System- sowie Steuerimport und -export bezeichnet. Die Zahlen an den Busleitungen zwischen den Blöcken und an den Ein- und Ausgängen der Blöcke geben die Anzahl der weitergeleiteten Signale an.

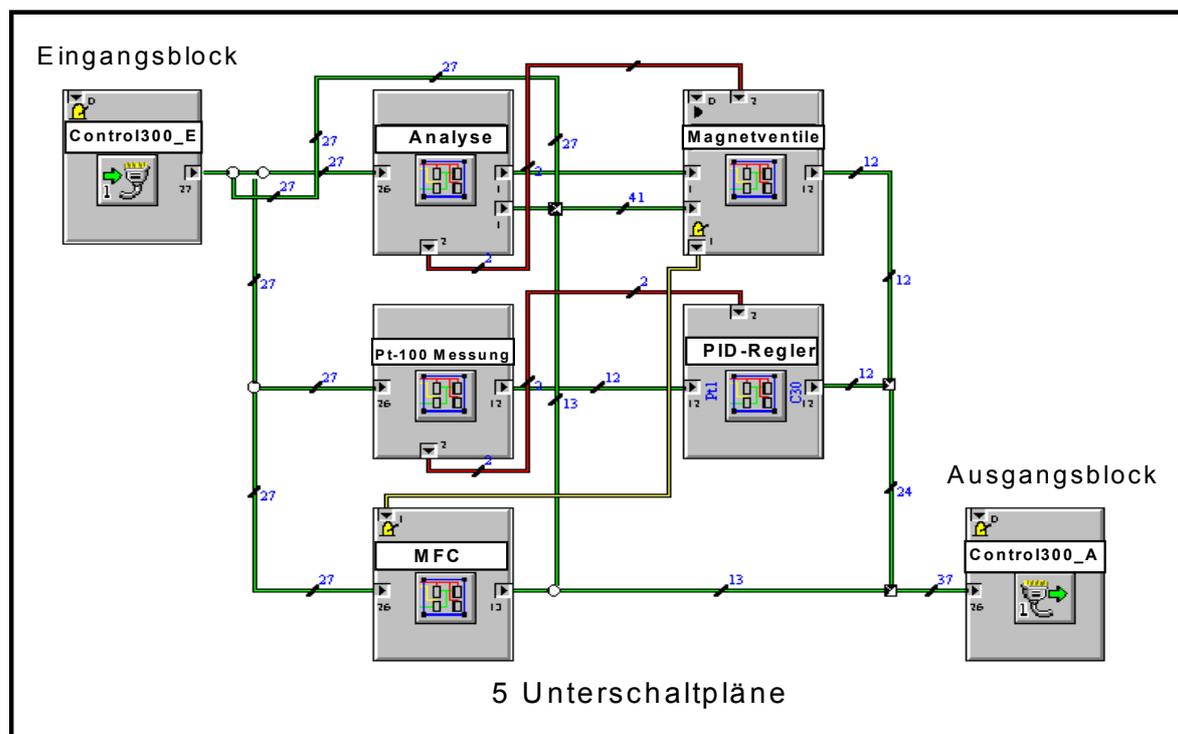


Abbildung 5: Schaltplan mit fünf Unterschaltplänen

## 2.2.2 Temperaturerfassung im Unterschaltplan Pt-100 Messung

Der Unterschaltplan Pt-100 Messung ist für die Messung und Speicherung der Temperatur in den 12 Küvetten verantwortlich (Abbildung 6). Die eingehenden Signale werden mittels einer Pt-100 Linearisierung skaliert. Die Ausgabe auf dem Bildschirm erfolgt als Ziffernanzeige sowie als Kurvendarstellung. Um die Messwertdateien nicht zu groß anwachsen zu lassen und trotzdem eine möglichst genaue Steuerung der Temperatur zu gewährleisten genügt es, die Temperatur in den Küvetten alle 40 s abzufragen und zu speichern.

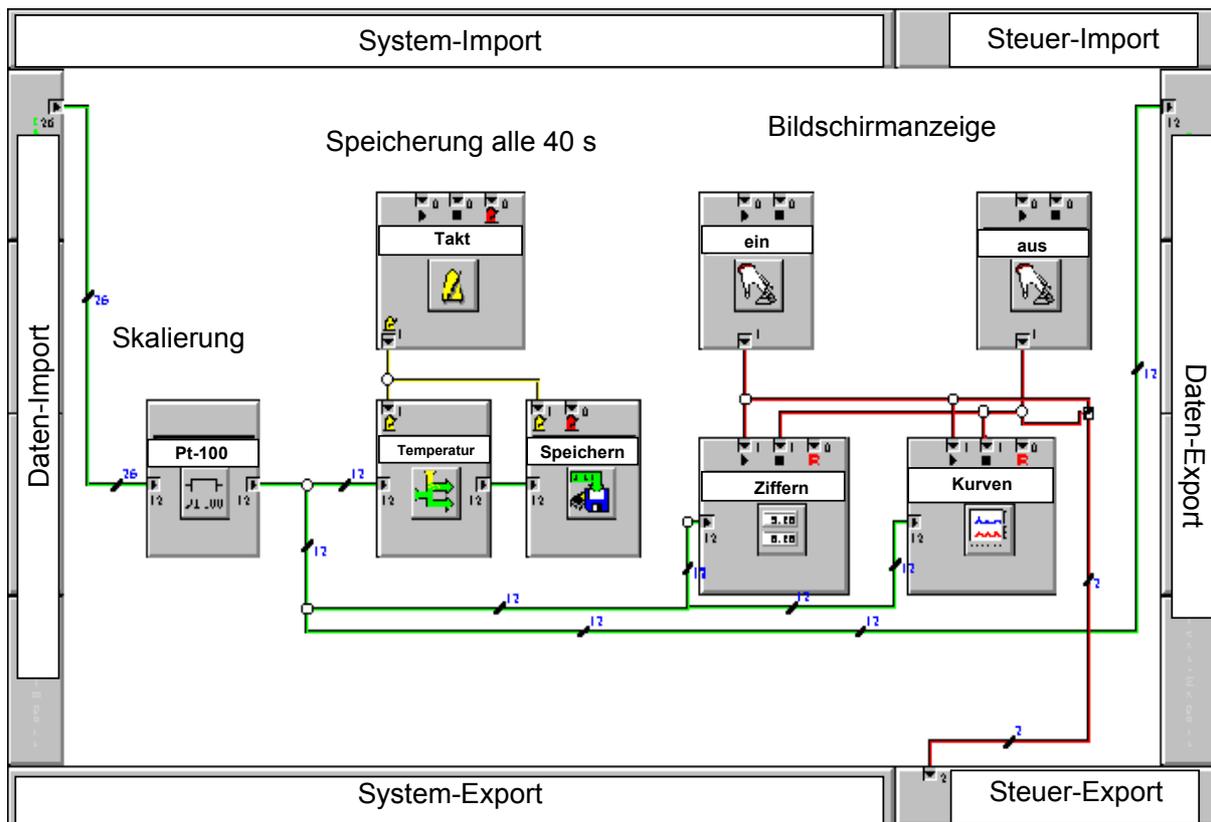


Abbildung 6: Unterschaltplan Pt-100 Messung

## 2.2.3 Temperaturregelung im Unterschaltplan PID-Regler

Der Temperaturverlauf kann für jede Küvette einzeln entweder als (Sinus-)Funktion oder als konstanter Temperaturwert eingegeben werden. Die Regelung erfolgt softwareseitig über einen PID-Regler, der an einen Formelblock und an die Ist-Temperatur angeschlossen ist (Abbildung 7). Der Formelblock enthält die Sinusfunktion:

$$x = H \sin\left(\frac{2\pi}{S(Z - P)}\right) + M \quad (\text{Gleichung 20})$$

$H$  = Hysterese (Abweichung der Temperatur von ihrem Mittelwert)

$S$  = Schwingungsdauer

$Z$  = Zeit in s

$P$  = Phasenverschiebung

$M$  = Temperaturmittelwert

Der Formelblock ist mit einer Stoppuhr verbunden, damit zu jedem Zeitpunkt der entsprechende Temperatursollwert zur Verfügung steht. Der Temperaturistwert wird mit dem Sollwert verglichen. Dementsprechend wird über ein Relais das Heizelement geschaltet.

Die Temperatursteuerung erfolgt in allen Versuchen nach dem Widerstandsthermometer im Luftschacht der Küvetten. Temperaturmittelwert und Hysterese gelten für die Lufttemperatur im Schacht. Bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen ist es schwierig, die Thermometer zwischen dem Gemüse so zu positionieren, dass sie es nicht berühren. Im Luftschacht können die Thermometer alle in einheitlicher Höhe eingesteckt und alle Küvetten vergleichbar gesteuert werden.

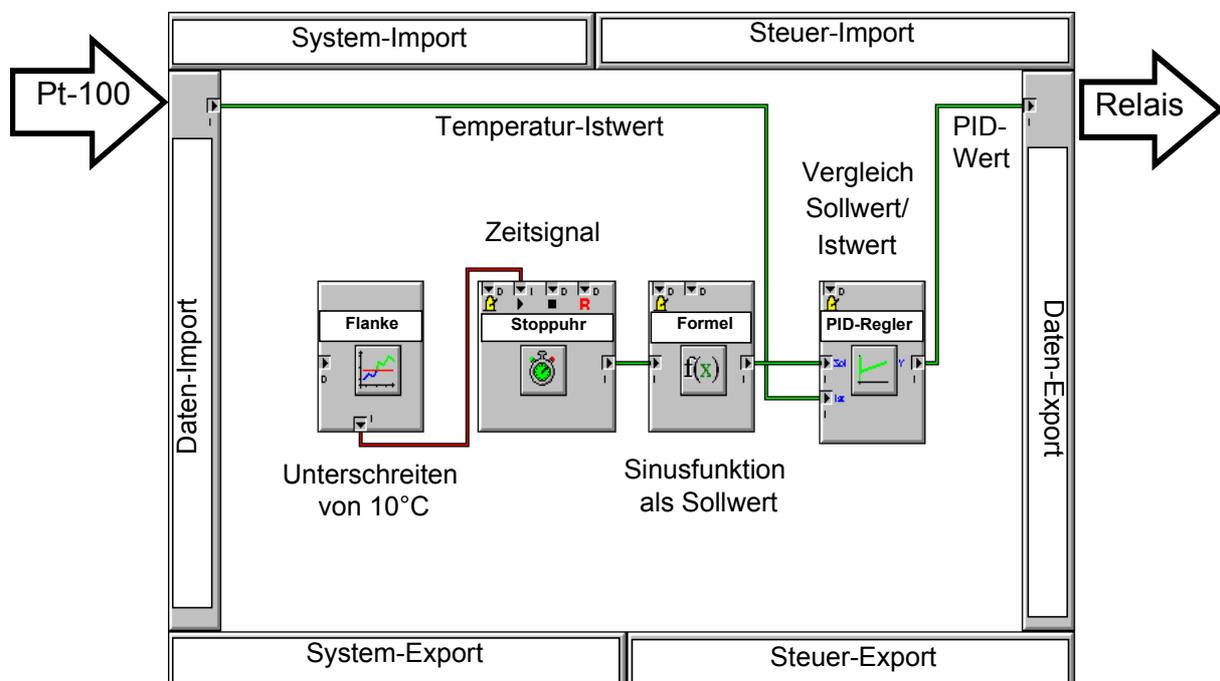


Abbildung 7: Regelung der Temperatur in einer Küvette als Beispiel

Je nach Versuchsanordnung können die einzelnen Parameter im Formelblock verändert werden. Als Temperaturmittelwert wurde  $10\text{ °C}$  (bzw.  $13\text{ °C}$ ) eingegeben, um mit Ergebnissen aus der Literatur vergleichbare Atmungsintensitäten zu erhalten. Ein weiterer Grund war die technische Machbarkeit: die größtmögliche Hysterese richtet sich nach dem Temperaturmittelwert und der Schwingungsdauer, die im Grunde beliebig eingegeben werden kann. Je höher der Mittelwert ist, desto größer kann die Hysterese sein, da sich die Differenz zwischen Kühlraumluft ( $0,5\text{ °C}$ ) und Küvettenluft erhöht und eine schnellere Abkühlung über die Küvettenaußenwand möglich ist. Bei langsamerer Schwingungsdauer kann ebenfalls eine höhere maximale Hysterese eingegeben werden, da die Abkühlphase dann länger dauert. Bei allen Versuchen war ein schnelles Aufheizen der Küvetten kein Problem, aber das rechtzeitige Abkühlen. Die Abkühlfähigkeit hängt auch von der Menge des eingelagerten Gemüses ab.

Durch die Eingabe unterschiedlicher Phasenverschiebungen  $P$  in die Sinusfunktion können die Temperaturkurven der einzelnen Küvetten versetzt gestartet werden. Die Funktionen wurden so eingegeben, dass die Gefäße nacheinander in bestimmten Zeitabständen  $10\text{ °C}$  durchliefen. So konnten Atmung und Transpiration immer bei  $10\text{ °C}$  gemessen werden, um die Varianten besser miteinander vergleichen zu können. Der Nachteil an dieser zusätzlichen Steuermöglichkeit war allerdings die geringe Anzahl der Messwerte bei langen Schwingungsdauern (bei einer Schwingungsdauer von  $12\text{ h}$  werden die  $10\text{ °C}$  in  $24\text{ h}$  nur  $4$  Mal durchlaufen).

Um die Sinuskurven aller Küvetten einheitlich von ihrem Ursprung aus zu starten, wurde die Stoppuhr, die das Zeitsignal  $Z$  für die Sinusfunktionen liefert, von einer Flankenbedingung gestartet, wenn die Küvetten-temperatur nach der anfänglichen Abkühlphase des Kühlraumes eine bestimmte Temperatur ( $10\text{ °C}$ ) unterschritten hat. Diese Weiterentwicklung wurde erst im zweiten Versuchsjahr eingesetzt.

#### 2.2.4 Massendurchflussregelung im Unterschaltplan MFC

Der mit MFC (Mass Flow Controller) bezeichnete Unterschaltplan übernimmt die Durchflussmessung und -regelung (Abbildung 8). Über einen Schieberegler lassen sich im Programm beliebige Durchflusswerte von  $0\text{ l h}^{-1}$  bis  $60\text{ l h}^{-1}$  einstellen. Ein Skalierungsblock wandelt den eingegebenen analogen Wert in einen digitalen um. Hardwareseitig können jeweils sechs Massendurchflussregler gemeinsam gesteuert werden. Bei den durchgeführten Versuchen wurden alle Massendurchflussregler mit einem Durchfluss von  $60\text{ l h}^{-1}$  gleich gesteuert. Das gemessene Eingangssignal wird

linear skaliert und als Ziffernanzeige auf dem Bildschirm ausgegeben. Die Abstrakte entspricht der von CO<sub>2</sub>. Die Speicherung erfolgt im Unterschlupplan Magnetventile.

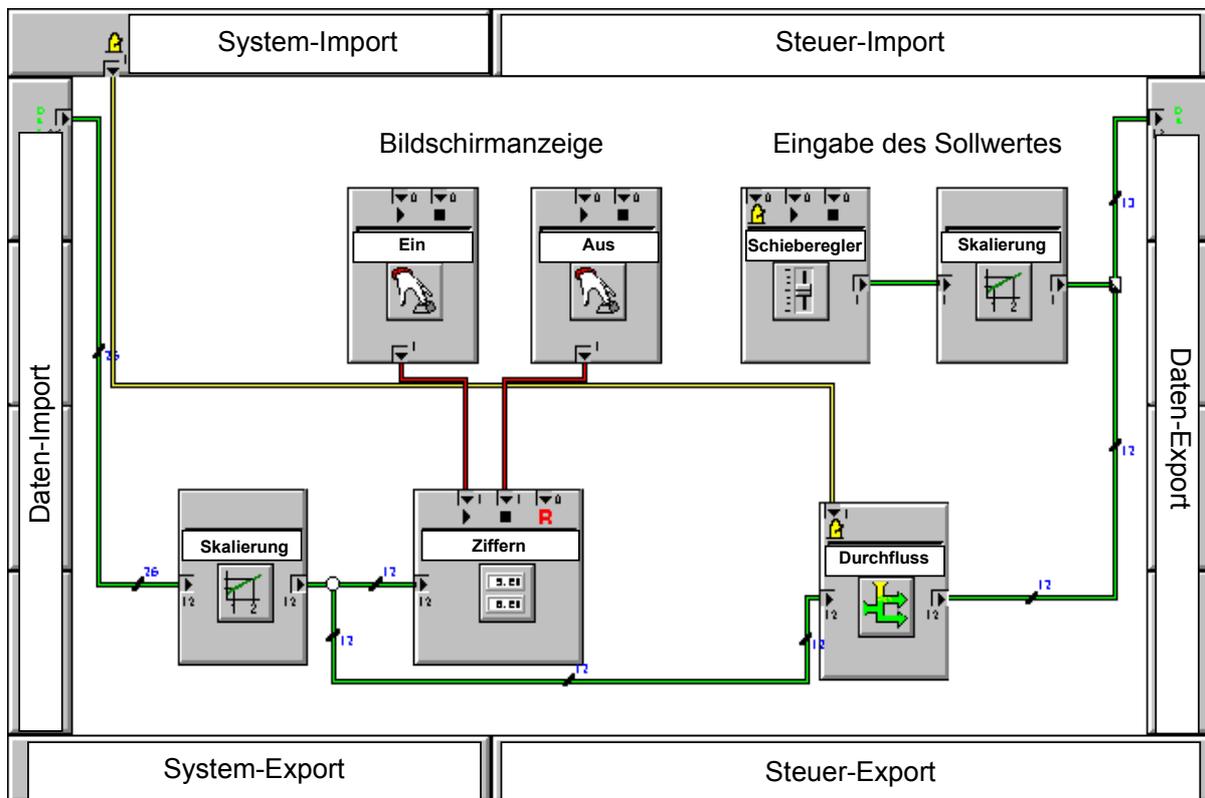


Abbildung 8: Massendurchflussregelung im Unterschlupplan MFC

### 2.2.5 Messung von Kohlendioxid im Unterschlupplan Analyse

Die vom Analysator gesendeten Signale werden linear skaliert und direkt in physikalische Einheiten (ppm) umgewandelt (Abbildung 9). Diese werden als Ziffernanzeige auf dem Bildschirm ausgegeben und zum Unterschlupplan Magnetventile exportiert, wo sie weiter verarbeitet und gespeichert werden.

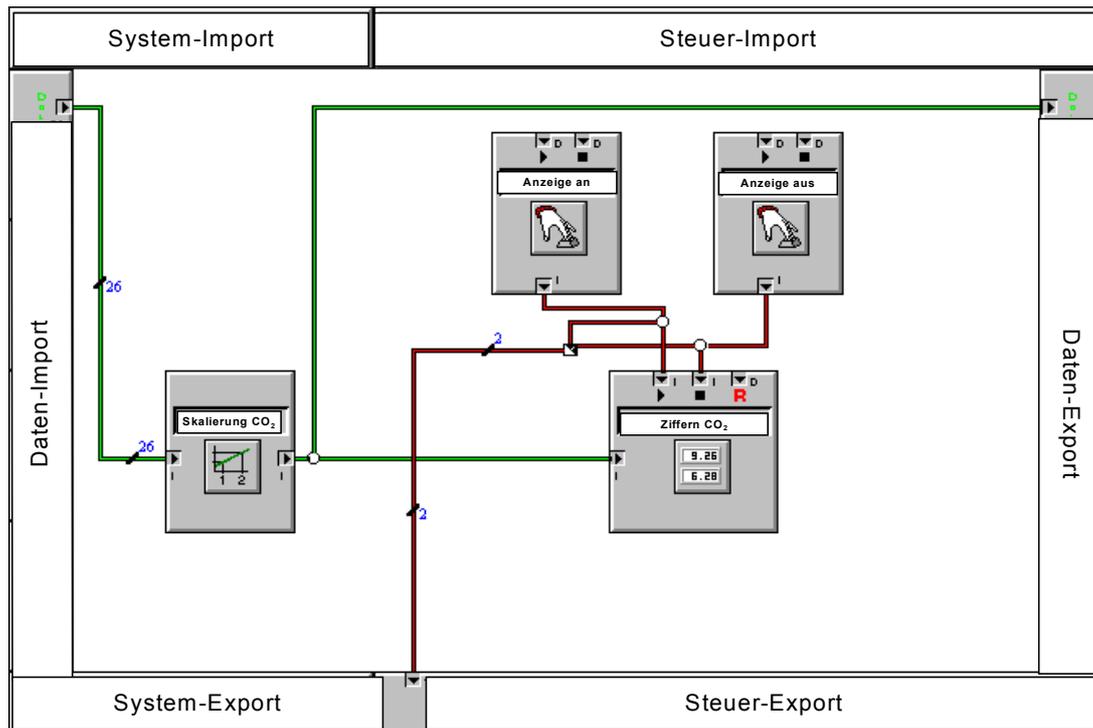


Abbildung 9: Messung von CO<sub>2</sub> im Unterschlupfplan Analyse

### 2.2.6 Übernahme der Messwerte für CO<sub>2</sub> und Umschalten der Magnetventile im Unterschlupfplan Magnetventile

Die Magnetventile werden ebenfalls durch Relais geschaltet, die im Programm über einen Zähler nacheinander angesteuert werden (Abbildung 10). In der Regel wurden die Gefäße 1 bis 12 immer der Reihe nach durchgemessen, außer wenn nicht alle Küvetten belegt waren. Bei den ersten Versuchen wurde die Umschaltung der Magnetventile so programmiert, dass immer erst dann auf das nächste Magnetventil umgeschaltet wurde, wenn sich die Messwerte für CO<sub>2</sub> stabilisiert hatten. Dazu wurden die vom Analysator übertragenen Messwerte für CO<sub>2</sub> mit einer Abtastfrequenz von 0,005 Hz abgefragt und jeweils mit dem vorigen Wert verglichen. Unterschreitet die Differenz der beiden Werte eine Toleranzgrenze von 10 ppm, dann konnte der zuletzt gemessene Wert als stabil betrachtet und abgespeichert werden. Gleichzeitig wurde auf das nächste Magnetventil umgeschaltet, um das nächste Gefäß zu messen.

Wie sich nach einigen Untersuchungsreihen herausstellte, hatte diese Methode den Nachteil, dass die Erfassung der Messwerte in unregelmäßigen Zeitabständen erfolgte und so die Auswertung der Daten erschwert wurde. Anhand der Datensätze konnte davon ausgegangen werden, dass eine Durchströmzeit von 15 Minuten ausreichend ist, um stabile Messwerte zu erhalten, die nicht mehr von den vorigen Küvetten

beeinflusst sind. Deshalb wurde die Steuerung der Magnetventile im Schaltplan an eine Stoppuhr angeschlossen, so dass die Umschaltung und die Übernahme der Messwerte regelmäßig alle 15 Minuten erfolgte.

Da mit zunehmender Verfeinerung des Schaltplanes die Übertragungszeit zwischen Programm und Datenausgabe zu lang wurde, musste die Auslösbedingung für die Umschaltung der Magnetventile mit Hilfe eines Mono-Flop-Schalters verriegelt werden, um wirklich sicher zu gehen, dass nur ein Ventil weiter geschaltet wurde. Es konnten im Schaltplan nicht beliebig viele Bedingungsblöcke zum Einsatz kommen, da die Steuerung der Anlage durch die Software bei zu vielen Bedingungen nicht mehr einwandfrei funktionierte. Es war nicht mehr möglich, für die Speicherung eine Zeitverzögerung dazwischenzuschalten (das Messgas braucht etwa 10 s, bis es durch die Leitungen zum Analysator gelangt).

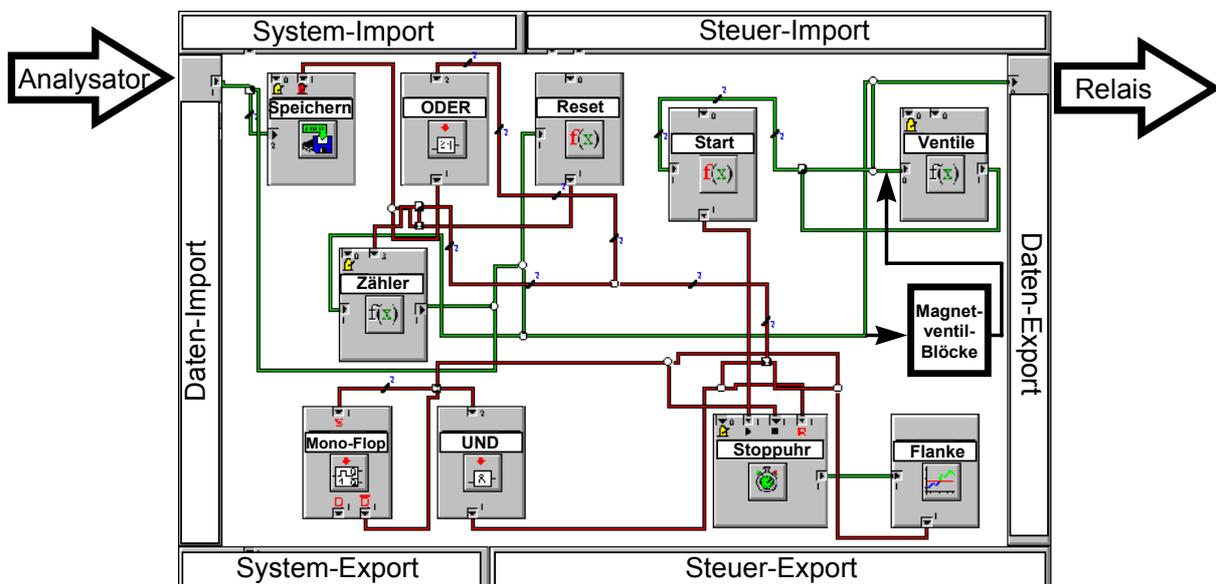


Abbildung 10: Steuerung der Magnetventile im Unterschaltplan Magnetventile. Bildschirmanzeigen, Luftdruckmessung, sowie die Formelblöcke für die 12 Magnetventile sind hier nicht enthalten.

Für die Speicherung der Werte von CO<sub>2</sub> bei Unter- oder Überschreiten von 10 °C wurden im Schaltplan die Temperaturblöcke und die Magnetventil-Ausgänge mit einer Formel verbunden, jeweils miteinander multipliziert und addiert.

$$T = MV_1T_1 + MV_2T_2 + \dots + MV_{12}T_{12} \quad (\text{Gleichung 21})$$

$MV$  = Magnetventilausgang

$T$  = Temperatur

Der Temperaturblock gibt immer die aktuelle Temperatur aus und der Magnetventilausgang entweder 0 (geschlossen) oder 1 (geöffnet). Also ergibt die Formel immer den Wert der Temperatur des Gefäßes, dessen Magnetventil gerade geöffnet ist, weil nur der geöffnete Ventilausgang eine 1 ausgibt und alle anderen 0. Diese Formel wurde an eine positive (Überschreiten von 9,9 °C) und eine negative Flankenbedingung (Unterschreiten von 10 °C) gekoppelt, die durch eine ODER-Bedingung verknüpft waren. Die Flankenblöcke mussten ebenfalls mit einem Mono-Flop-Schalter verriegelt werden, da die Bedingung sonst mehrmals ausgelöst wurde und mehrere Magnetventile durchgeschaltet wurden. Damit die Funktion der Anlage bei diesem Schaltplan bei Ausfall eines Gefäßes (Heizung oder Ventilator) nicht unterbrochen wurde (weil die Flankenbedingung nicht erfüllt wird), musste eine weitere Formelbedingung hinzugefügt werden, die das Weiterschalten der Gefäße bei Temperaturen unter 7 °C gewährleistete.

Gleichzeitig mit den Werten für CO<sub>2</sub> wurden der aktuelle Luftdruck und der zum Speicherzeitpunkt erfasste Durchfluss gespeichert, so dass die CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe genau berechnet werden konnte (siehe unten Formel zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe).

### 2.2.7 Bestimmung der Atmungsintensität des gelagerten Gemüses

Da aufgrund der Messbereiche des Analysators im Absolutmodus mit Stickstoff als Referenzgas gemessen wurde, musste die tatsächliche CO<sub>2</sub>-Abgabe des gelagerten Gemüses rechnerisch bestimmt werden. Dafür wurde von den jeweiligen absolut gemessenen Werten der CO<sub>2</sub>-Gehalt der einströmenden Luft abgezogen. Danach wurden die Werte in CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe [mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>] umgerechnet.

Die Formel für die CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe lautet:

$$\bullet \quad M_{CO_2} = \frac{\{(CO_2[ppm]MFP(MG)) - (CO_2[ppm]MFP(RG))\}1,96 \cdot 1000}{\text{Einlagerungsgewicht}[kg]} \quad (\text{Gleichung 22})$$

$$\bullet \quad M_{CO_2} = CO_2 - \text{Nettoabgabe} \left[ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \right]$$

$$MF = \text{Durchfluss (Massflow)} \left[ \text{l} \cdot \text{h}^{-1} \right]$$

$$RG = \text{Referenzgefäß}$$

$$MG = \text{Messgefäß}$$

$$P = \text{Luftdruck} \left[ \text{hPa} \right]$$

$$1,96 = \text{Faktor aus Molvolumen bei definiertem Luftdruck} \\ \text{und Molgewicht von } CO_2 \left[ \text{mg} \cdot \text{ml}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \right]$$

### 2.2.8 Technische Umsetzung

Der Prozessrechner kommuniziert über die serielle Schnittstelle mit einem AD-Wandler (Control 300 von Delphin). Alle elektrischen Signale, die durch die verschiedenen Sensoren und Analytoren erzeugt werden, werden mit Hilfe entsprechender Elektronik-Einschübe oder Karten (Multiplexer) in digitale Signale umgewandelt und gegebenenfalls verstärkt, je nach Messauflösung.

Für die Kommunikation zwischen AD-Wandler und Prozessrechner musste eine Steuerdatei entwickelt werden. Die Steuerdatei enthält die Einstellungen für die Schnittstelle und die Geräteadressen der Karten. Die wichtigsten Ausschnitte der Steuerdatei sind im Anhang dargestellt. Für jede Karte müssen alle Kanäle konfiguriert werden, auch wenn sie nicht belegt sind (dargestellt sind in der Regel die ersten beiden Kanäle als Beispiel). Bei der Analogmessung (Temperatur,  $CO_2$ , Luftdruck, Durchfluss) müssen für jeden Kanal bestimmte Parameter angegeben werden. Dazu gehören zusätzliche Verstärkung, Filterwert, unipolarer oder bipolarer Messmodus, Einschwingzeit und Mittelwertbildung über eine bestimmte Anzahl Einzelmessungen.

Bei den „Relaiskarten“ genügt die Dimensionierung und die Angabe der Geräteadressen. Hier wird entweder eine 0 (Relais geschlossen) oder eine 1 (Relais offen) ausgegeben. Bei der Ausgabe von Analogwerten für die Durchflussregelung muss ebenfalls die Geräteadresse der Karte und die Dimensionierung angegeben werden.

Alle Karten werden mit spezifischen Befehlen angesteuert, die dem Control 300 Handbuch zu entnehmen sind. Mit dem Befehl „Write“ werden Informationen an Control 300 gesendet, mit dem Befehl „Read“ werden die Messwerte eingelesen. Beschreibungen und Kommentare stehen in Klammern {}.

### 2.2.9 Erfassung der Relativen Luftfeuchte

Um Systemausfälle durch Überbelastung des Prozessrechners zur Steuerung der Anlage zu vermeiden, wurden die Messwerte der kapazitiven Feuchtesensoren über einen zweiten Prozessrechner gesondert erfasst. Als AD-Wandler wurde das Gerät Almemo 5590 von der Firma AMR mit dem zugehörigen Messwerterfassungsprogramm verwendet. Die Uhren der beiden Rechner wurden vor jedem Versuch synchronisiert, so dass die jeweiligen Datensätze einander ergänzen konnten. Da die AMR-Daten problemlos zu exportieren waren, wurden sie zusammen mit den Datensätzen von „Diadem“ ausgewertet.

Die Feuchtefühler wurden in regelmäßigen Abständen mit Salzlösungen (LiCl für niedrige Feuchte und NaCl für hohe Feuchte) im HMK 11 Calibrator (Vaisala) kalibriert. Der Temperaturabgleich wurde mit Prüfwiderständen vorgenommen.

### 2.2.10 Berechnung der Wasserdampf-Nettoabgabe aus der relativen Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte ist definiert als Quotient aus absoluter und maximaler Feuchte bei einer bestimmten Umgebungstemperatur  $T_u$ . Durch sie lässt sich der Sättigungsgrad der Luft ausdrücken (WILLERT et. al. 1995). Angegeben wird sie in Prozent. Die relative Luftfeuchte wird mit folgender Formel in absolute Feuchte umgerechnet:

$$\text{absolute Luftfeuchte} = \frac{\text{relative Luftfeuchte} \times \text{maximale Luftfeuchte}}{100\%} \quad (\text{Gleichung 23})$$

Die maximale Luftfeuchte ist gleich dem Sättigungsdampfdruck der Luft und ist temperaturabhängig. Er lässt sich nach folgender Funktion berechnen (JANSSEN und SCHOEDDER, 1980):

$$e_w = c_1 \times e^{\frac{c_2 \times T_u}{T_u + c_3}} \quad (\text{Gleichung 24})$$

$e_w$  = Sättigungsdampfdruck [hPa]

$c_1$  = 6.107 hPa

$c_2$  = 17.26939

$c_3$  = 237.3 °C

$T_u$  = Umgebungstemperatur

$0^\circ\text{C} \leq T_u \leq 100^\circ\text{C}$

Mittels einer „repeat...until Zählschleife“ wird für jeden Feuchte- und den zugehörigen Temperaturwert der Sättigungsdampfdruck errechnet und daraus nach obiger Formel die absolute Feuchte. Die absolute Wasserabgabe des eingelagerten Gemüses ergibt sich nun aus der Differenz zwischen Eingangsfeuchte der Luft (gemessen im Leergefäß) und der Feuchte der einzelnen Gefäße. Analog zur Formel für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe des Analysators wird auch hier die abgegebene Wassermenge pro Einlagerungsgewicht und durchströmender Luft berechnet mit einem Umrechnungsfaktor von 0,804 mg ml<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup>. Der Durchfluss konnte sehr genau auf 60 l h<sup>-1</sup> geregelt werden. Die Unterschiede der Werte waren so gering, dass sie für die hier beschriebenen Berechnungen pro Gefäß gemittelt wurden. Da der Durchfluss immer nur zusammen mit den Analysatorwerten abgespeichert wurde, lag nicht für jeden Feuchtemesswert ein zugehöriger Durchflusswert vor. Die Werte für den Luftdruck wurden für diese Berechnung ebenfalls gemittelt.

### 2.2.11 Temperaturerfassung mit Thermoelementen

Die Thermoelemente waren an eine weitere Messwerterfassungsanlage (Control 300 von Delphin) mit Vergleichsmessstelle angeschlossen und wurden von einem dritten Rechner alle 40 s erfasst. Die Uhrzeit wurde auf die der beiden anderen Rechner abgestimmt. Als Messwerterfassungsprogramm diente „Medana“. Die gewonnenen Daten konnten von dort aus problemlos direkt in „Diadem“-Format (binär) konvertiert werden.

## ***2.3 Vorgehensweise bei rechnerischen Simulationen des Atmungsverlaufs***

Da die Messhäufigkeit für CO<sub>2</sub> in der Versuchsanlage sehr gering ist, wurden rechnerische Simulationen mit Hilfe der van't Hoff'schen Gleichung (Q<sub>10</sub>-Regel) vorgenommen. Diese besagt, dass sich bei einer Temperaturerhöhung um 10 K die Atmungsrate etwa verdoppelt ((Gleichung 6), S. 16). Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen:

Für die CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe der Variante unter konstanten Temperaturverhältnissen wurde nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Regressionsfunktion ermittelt. „Diadem“ kann dazu Wertepaare in beliebig vielen Teilschritten berechnen. Es wurden immer so viele Wertepaare berechnet, wie Temperaturmesswerte vorhanden waren, so, als ob CO<sub>2</sub> ebenfalls alle 40 s gemessen worden wäre. Diese Werte wurden dann zusammen mit der dazugehörigen Temperatur in die Q<sub>10</sub>-Gleichung eingesetzt und die entsprechende CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe für die auszuwertenden Temperaturkanäle berechnet. Die simulierten CO<sub>2</sub>-Kurven dienen als Vergleich und Diskussionsgrundlage für die tatsächlich gemessenen Werte.

## ***2.4 Untersuchungsdurchführung***

Bei allen Untersuchungen wurde die eingelagerte Menge gleichmäßig auf die obere und die untere Etage des Küvetteneinsatzes verteilt. Die Küvetten wurden vor jeder Einlagerung ohne Gemüse und mit Küvetteneinsatz gewogen, da einerseits die Materialien geringfügige Mengen an Wasser aufnehmen, andererseits Wasser an den Küvettenteilen auskondensierte. Bei der Auslagerung wurde zunächst das Gefäß mit Einsatz mit Gemüse gewogen. Dann wurde das Auslagerungsgewicht des Gemüses bestimmt. Das gesamte an den Küvettenwänden auskondensierte Wasser ergab sich aus dem Auslagerungsgesamtgewicht abzüglich Auslagerungsgewicht des Gemüses und Leergewicht der Küvetten. Der Feuchtigkeitsentzug aufgrund von Kondensation in % berechnete sich aus der Wassermenge bezogen auf das Einlagerungsgewicht. Bei allen Untersuchungen wurde außer dem Schwund die Atmungsintensität und Transpiration des Lagergutes als Kriterium zur Beurteilung der Lagermethode herangezogen. Wenn nicht anders erwähnt, dann betrug der Temperaturmittelwert bei allen Gefäßen 10 °C.

Die Versuchsanlage (Verteilung der Küvetten im Kühlraum) wurde als lateinisches Quadrat angeordnet, andernfalls ist die Anordnung für den betreffenden Untersuchung gesondert beschrieben (Untersuchungen zur Staffelung der Schwingungsdauer mit Radies, Einlegegurken und Speisezwiebeln). Es wurden Untersuchungen mit folgenden Gemüsearten durchgeführt:

- Blattgemüse: Feldsalat, Spinat
- Hülsenfrüchte: Stangenbohnen
- Wurzelgemüse: Radies
- Fruchtgemüse: Tomaten, Einlegegurken
- Zwiebelgemüse: Speisezwiebeln

Zum Teil stammten die Gemüse aus dem Versuchsbetrieb Dürnast, z.T. aus der Großproduktion. Die Kulturführung und Pflege erfolgte so, dass einwandfreies Gemüse geerntet werden konnte.

## **2.5 Feldsalat**

### 2.5.1 Pflanzenmaterial

Feldsalat der Sorte 'Jade' (Clause) wurde in drei Sätzen im Versuchsbetrieb Dürnast im Freiland angebaut:

1998

Anbauort: Feld 7e

Anbauform: Beetanbau, Reihenabstand 20 cm

Bodenanalyse: Juli; pH: 6,8; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 31 mg; K<sub>2</sub>O: 41 mg;

N<sub>min</sub>: 113 kg N ha<sup>-1</sup>

Aussaat: 29.07.1998, 04.08.1998

Unkrautbekämpfung: thermisch, 03.08.1998, mechanisch 18.08.1998, 07.09.1998, 09.09.1998, 23.09.1998

Pflanzenschutz: 24.09.1998 Bioblatt Mehltaumittel, 900 ml ha<sup>-1</sup> (600 l ha<sup>-1</sup>)

Die Blätter für je zwei Untersuchungsdurchläufe wurden von einem Satz geerntet und direkt nach der Ernte eingelagert.

### 2.5.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen

Pro Küvette wurden 600 g Feldsalat eingelagert. Bei jedem Untersuchungsdurchlauf wurde dieselbe Schwingungsdauer als Sollwert für alle Gefäße eingegeben und mit drei unterschiedlichen Hysteresen kombiniert. Die untersuchten Schwingungsdauern betragen 40, 50 sowie 60 Minuten, die Hysteresen für je drei Gefäße 0 K (konstanter Sollwert), 1 K (Schwankung zwischen 9 °C und 11 °C) und 2 K (Schwankung zwischen 8 °C und 12 °C). Jede Schwingungsdauer wurde einmal wiederholt, so dass insgesamt 6 Untersuchungsdurchläufe (F1a - F1e) gemacht wurden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Erntetermine und Temperaturführung bei Untersuchungen mit Feldsalat. Der Temperaturmittelwert lag bei 10 °C.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Erntetermin	Schwingungs- dauer [min]	Hysterese [K]
Feldsalat F1a	06.10.1998	40	0; 1; 2
Feldsalat F1b	09.10.1998	50	0; 1; 2
Feldsalat F1c	13.10.1998	60	0; 1; 2
Feldsalat F1d	16.10.1998	40	0; 1; 2
Feldsalat F1e	20.10.1998	50	0; 1; 2
Feldsalat F1f	23.10.1998	60	0; 1; 2

Bei der Auswertung wurden die Atmungs- und Transpirationsraten, Gesamtschwund und Gewichtsverlust durch Feuchteentzug aufgrund von Kondensation an den Küvettenwänden bei einer Schwingungsdauer pro Hysterese für beide Untersuchungsdurchläufe gemittelt.

## 2.6 Spinat

### 2.6.1 Pflanzenmaterial

Spinat der Sorte 'Chica F1' (Royal Sluis) wurde jeweils in drei Sätzen im Versuchsbetrieb Dürnast im Freiland angebaut:

Anbauform: Beetanbau, Reihenabstand 20 cm, Abdeckung mit Vlies

Unkrautbekämpfung: mechanisch

1998

Anbauort: Feld 7e

Aussaat: 30.03.1998, 07.04.1998, 20.04.1998

1999

Anbauort: Feld 7c

Aussaat: 15.04.1999, 27.04.1999, 04.05.1999

Grunddüngung: 120 kg N/ha

Die Blätter für je zwei Untersuchungsdurchläufe wurden von einem Satz geerntet, so dass sie die gleiche Größe hatten. Sie wurden direkt nach der Ernte eingelagert.

### 2.6.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen

Pro Küvette wurden 600 g Spinat eingelagert. Bei jedem Untersuchungsdurchlauf wurde eine Schwingungsdauer als Sollwert für alle Gefäße eingegeben und mit drei unterschiedlichen Hysteresen kombiniert. Die Schwingungsdauern betragen 40, 50 und 60 Minuten, die Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 1 K und 2 K. Jede Schwingungsdauer wurde einmal wiederholt, so dass insgesamt 6 Durchläufe gemacht wurden (Untersuchungsdurchläufe S1a bis S1f, Tabelle 3).

### 2.6.3 Auswirkung unterschiedlicher Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden

Es wurden pro Gefäß 400 g Spinat eingelagert. Die getesteten Hysteresen betragen 0 K (konstante Temperatur), 1,5 K (Schwankung zwischen 8,5 °C und 11,5 °C) und 3 K (Schwankung zwischen 7 °C und 13 °C) bei einer Schwingungsdauer von 6 h. Die Temperatursollwerte wurden mit Phasenverschiebungen von je 15 min von einem Gefäß zum folgenden eingegeben und die Werte für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O immer bei Unter- oder Überschreiten von 10 °C gespeichert (Untersuchung S2, Tabelle 3). So konnte alle 15 min ein Messwert für CO<sub>2</sub> gespeichert und zum nächsten Gefäß weitergeschaltet werden. Für die grafische Darstellung der Temperaturverläufe im Luftschacht wurden die Messwertkurven nach dem Prinzip der gleitenden Mittelwerte geglättet. Eine Übersicht über Erntetermine sowie Temperaturführung der durchgeführten Untersuchungen mit Spinat (S1 bis S4) ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Erntetermine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Untersuchungen mit Spinat (S1 bis S4). Der Temperaturmittelwert war 10 °C.

Gemüseart/ Unter- suchungs-Nr.	Erntetermin	Schwingungs- dauer [min]	Hysterese [K]	eingelagerte Menge pro Küvette[g]
Spinat S1a	26.05.1998	40 min	0; 1; 2	600
Spinat S1b	29.05.1998	50 min	0; 1; 2	600
Spinat S1c	02.06.1998	60 min	0; 1; 2	600
Spinat S1d	05.06.1998	40 min	0; 1; 2	600
Spinat S1e	09.06.1998	50 min	0; 1; 2	600
Spinat S1f	12.06.1998	60 min	0; 1; 2	600
Spinat S2	14.05.1999	6 h	0; 1,5; 3	600
Spinat S3	18.05.1999	10 °C konstant		300; 150; 75; 37,5; 19; 10

#### 2.6.4 Staffelung der Einlagerungsmenge

Um Informationen über das Transpirationsverhalten zu bekommen und gleichzeitig die Messmethodik zu verbessern, wurden bei Spinat die Einlagerungsmengen gestaffelt in 300 g, 150 g, 75 g, 37,5 g, 19 g, 10 g (Untersuchung S3, Tabelle 3). Die Temperatur war bei allen Gefäßen konstant 10 °C. Die Speicherung der Messwerte für CO<sub>2</sub> erfolgte nach einer Durchströmzeit von 15 Minuten pro Gefäß.

## 2.7 Stangenbohnen

### 2.7.1 Pflanzenmaterial

Stangenbohnen der Sorte 'Eva' (Hild) wurden im Gewächshaus des Versuchsbetriebes Dürnast angebaut und laufend geerntet. Die Einlagerung erfolgte direkt nach der Ernte.

Aussaat in TKS1 in 10er Töpfe, 3 Korn pro Topf, 300 Töpfe

Anbauform: Beetanbau, Reihenabstand 80×40 cm = 9 Pflanzen m<sup>-2</sup>, 2 Doppelreihen

1998

Anbauort: Haus 5

Aussaat: 03.02.1998

Pflanzung: 24.02.1998

Aufbinden: 25.02.1998

Pflanzenschutz: 03.03.1998 Pirimor 0,05 % (5 l)

1999

Anbauort: Haus 7

Aussaat: 02.02.1999

Aufbinden: 25.02.1999

Pflanzung: 02.03.1999

### 2.7.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen

Pro Küvette wurden 2,5 kg Stangenbohnen eingelagert. Bei jedem Untersuchungsdurchlauf wurde eine Schwingungsdauer als Sollwert für alle Gefäße eingegeben und mit drei unterschiedlichen Hysteresen kombiniert (Untersuchungsdurchläufe B1a bis B1f, Tabelle 4). Die Schwingungsdauern betragen 40, 50 und 60 Minuten, die Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 1 K und 2 K. Jede Schwingungsdauer wurde einmal wiederholt, so dass insgesamt 6 Durchläufe gemacht wurden. Bei jedem Durchlauf wurde pro Hysterese in einem Gefäß die Temperatur an der Gemüseoberfläche in der oberen und unteren Etage an drei Stellen (unten im Stapel, in der Mitte und an der Stapeloberfläche) mit Mikro-Thermoelementen (Kupfer-Konstantan, Hypo-33-1-T-G-60 SMP-M, Omega) gemessen. Dazu wurde mit einer Nadel ein Kanal unter die Haut der Stangenbohnen „vorgestochen“ und das Thermoelement vorsichtig hineingeschoben.

### 2.7.3 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden

Pro Gefäß wurde 1 kg Stangenbohnen eingelagert. Der Temperatursollwert wurde mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden eingegeben. Die Hysteresen wurden von 0 K bis 5 K in 0,5-K-Schritten gestaffelt (Untersuchung B2, Tabelle 4). Die Temperatur schwankte also zwischen 9,5 °C und 10,5 °C bei der kleinsten Hysterese und zwischen 5 °C und 15 °C bei der größten Hysterese. Angaben über Erntetermine und Temperaturführung der durchgeführten Untersuchungen mit Stangenbohnen sind in Tabelle 4 notiert.

Tabelle 4: Erntetermine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Stangenbohnen. Der Temperaturmittelwert war 10 °C.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Erntetermin	Schwingungs- dauer [min]	Hysterese [K]	eingelagerte Menge [kg]
Stangenbohnen B1a	27.04.1998	40 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B1b	30.04.1998	50 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B1c	05.05.1998	60 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B1d	08.05.1998	40 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B1e	12.05.1998	50 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B1f	15.05.1998	60 min	0; 1; 2	2,5
Stangenbohnen B2	21.04.1999	6 h	0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	1

## 2.8 Radies

### 2.8.1 Pflanzenmaterial

Radies der Sorte ‘Trespa’ (Juliwa) wurden in mehreren Sätzen im Versuchsbetrieb Dürnast im Gewächshaus angebaut, so dass die Knollen für die Untersuchungen immer im gleichen Stadium geerntet werden konnten. Die Knollen wurden direkt nach der Ernte von Erdresten befreit und mit Laub eingelagert.

Anbauort: Haus 5 und Haus 7

Anbauform: Anbau im Grundbeet

Bestandesdichte: 200 St. m<sup>-3</sup>

Unkrautbekämpfung: mechanisch

1998

Aussaat: 26.01.1998, 02.02.1998, 10.02.1998

1999

Aussaat: 25.01.1999, 01.02.1998, 08.02.1999

## 2.8.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen

Pro Küvette wurden 500 g Radies eingelagert. Bei jedem Untersuchungsdurchlauf wurde eine Schwingungsdauer als Sollwert für alle Gefäße eingegeben und mit drei unterschiedlichen Hysteresen kombiniert. Die Schwingungsdauern betragen 1 h, 6 h und 12 h, die Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 2 K (Temperaturschwankung von 8 °C bis 12 °C) und 3 K (Temperaturschwankungen von 7 °C bis 13 °C).

## 2.8.3 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei drei Schwingungsdauern

Eingelagert wurden 500 g. Die Schwingungsdauer eines Durchlaufs war für alle Gefäße gleich und wurde mit in 0,5-K-Schritten gestaffelten Hysteresen von 0 K bis 5 K kombiniert. Die Schwingungsdauern betragen 1 h, 6 und 12 h (Untersuchung R1, Tabelle 5).

Tabelle 5: Erntetermine und Temperaturführung bei Radies (Untersuchungen R1 bis R6). Temperaturmittelwert war immer 10 °C.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Erntetermin	Schwingungs- dauer	Hysterese [K]
Radies R1a	02.04.1999	1 h	0; 2; 3;
Radies R1b	09.04.1999	6 h	0; 2; 3;
Radies R1c	12.04.1999	12 h	0; 2; 3;
Radies R2a	15.03.2000	0; 3; 6; 8; 12 [h]	0; 3
Radies R2b	27.03.2000	0; 3; 6; 8; 12 [h]	0; 3
Radies R2c	30.03.2000	0; 3; 6; 8; 12 [h]	0; 3
Radies R2d	04.04.2000	0; 3; 6; 8; 12 [h]	0; 3
Radies R2e	11.04.2000	0; 3; 6; 8; 12 [h]	0;3
Radies R3	17.04.2000	Temperaturerhöhung bzw. -absenkung um 1 K pro Stunde von 3,1 °C bis 21 °C	

## 2.8.4 Staffelung der Schwingungsdauer

### 2.8.4.1 Temperaturführung

Der konstante Temperatursollwert betrug 10 °C. Die Hysterese der „schwingenden“ Varianten in der Lufttemperatur wurde auf 3 K eingestellt. Außer der Variante mit konstanter Temperatur wurden 4 Schwingungsdauern untersucht: 3 h, 6 h, 8 h, 12 h.

Die Schwingungsdauern wurden so gewählt, dass in allen Varianten nach 24 h Laufzeit ein vollständiger Zyklus beendet wird. Pro Durchlauf wurden immer zwei Gefäße mit dem gleichen Temperatursollwert gesteuert. Insgesamt wurden die Varianten so verteilt, dass jede Variante ein Mal an jedem Messplatz war, das heißt wenn z.B. im ersten Durchlauf Gefäß 2 den konstanten Temperatursollwert hatte und Gefäß 3 eine Schwingungsdauer von drei Stunden, dann wurden die Varianten im nächsten Durchlauf um eine Stelle „vorgerückt“, so dass Gefäß 2 die Schwingungsdauer von drei Stunden hatte und Gefäß 3 sechs Stunden und so weiter (Abbildung 4 in Kapitel Nr. 2.1 Beschreibung der Versuchsanlage, 2.1.4.2 Analyse).

Um den Temperaturverlauf im Gemüse zu ermitteln wurde pro Etage eine Knolle mit einer Schublehre ausgemessen und je ein Thermoelement (Eisen-Konstantan) genau in deren Zentrum gestochen. Die Knollen mit dem Thermoelement wurden beim Einlagern ins Innere der Stapel platziert, so dass sie nicht direkt an der Oberfläche lagen. Bei der Auswertung wurden die Temperaturen der oberen und der unteren Etage gemittelt und als Bezugswert für die Umrechnung der Atmungsintensitäten bei unterschiedlichen Temperaturen auf 10 °C mit der  $Q_{10}$ -Regel genommen. Der  $CO_2$ -Gehalt der Küvettenluft wurde alle 15 Minuten abgespeichert und dann zum nächsten Gefäß geschaltet, das heißt es wurde pro Gefäß alle drei Stunden ein Messwert erfasst. Die Steuerung des sinusförmigen Temperaturverlaufs wurde erst zu dem Zeitpunkt in Gang gesetzt, als die Luft innerhalb der Gefäße auf 10 °C abgekühlt war, so dass die Temperaturkurven der unterschiedlichen Varianten einheitlich beginnen (Untersuchungen R2a bis R2e, Tabelle 5).

### 2.8.5 Anstieg der Temperatur um 1 K pro Stunde

Um den Verlauf von Atmung und Transpiration in Abhängigkeit von der Temperatur möglichst genau zu erfassen, wurde nur ein Gefäß mit 1 kg Radies bestückt und über Nacht abgekühlt (Untersuchung R3, Tabelle 5). Atmungsintensität und Transpiration wurden alle 30 min gemessen. Als Sollwert für die tiefste Temperatur wurde 0 °C eingegeben, es wurden aber nicht weniger als 3,1 °C erreicht. Dann wurde die Temperatur der Luft in der Küvette schrittweise um 1 K pro Stunde erhöht und nach Erreichen von 21 °C wieder schrittweise auf 3,2 °C abgesenkt. Die Temperatur in den Radiesknollen wurde mit Thermoelementen erfasst. Aus den Messergebnissen für  $CO_2$  und den zugehörigen Temperaturen wurden schrittweise  $Q_{10}$ -Werte berechnet, und zwar mit der Atmungsintensität bei der niedrigsten, der höchsten und einer mittleren Temperatur als Bezugspunkt.

## **2.9 Tomaten**

### 2.9.1 Pflanzenmaterial

Die Tomaten der Sorte ‘Solairo’ (De Ruiter) stammen aus der Gewächshausproduktion des Versuchsbetriebes Dürnast.

1999

Anbauort: Haus 4

Aussaat: 13.01.1999

Topfen: 27.01.1999, Toresa spezial, 9er Töpfe

Pflanzung: 23.02.1999

### 2.9.2 Vergleich der Auswirkungen einer kurzen Schwingungsdauer bei kleiner Hysterese mit denen einer langen Schwingungsdauer bei großer Hysterese

Da Tomaten kälteempfindlich sind, wurde der Temperaturmittelwert in den Küvetten auf 13 °C eingestellt. Zunächst wurden 3 kg Tomaten im rotreifen Stadium eingelagert. Bei Variante 1 betrug die Schwingungsdauer 15 Minuten und die Hysterese 0,2 K (Simulation der Temperaturbedingungen aus SEISENBERGER 1996). Bei Variante 2 verlief die Temperatur mit einer Schwingungsdauer von 24 h und einer Hysterese von 3 K (Simulation der Temperaturbedingungen aus RUBIN zit. in SABUROW und ANTONOW 1953). Bei Variante 3 wurde die Temperatur konstant auf 13 °C gehalten. Die Messwerte für CO<sub>2</sub> der Variante mit der kurzen Schwingungsdauer (Variante 1) wurden beim Durchlaufen der Temperatur von 13 °C gespeichert und die der Variante mit der langen Schwingungsdauer (Variante 2) sowie der konstanten Variante (Variante 3) nach 15 Minuten Durchströmzeit pro Küvette (Untersuchung T1, Tabelle 6). Bei Variante 2 wurden die Temperaturkurven so versetzt, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt der zu untersuchenden Küvetten pro Messzyklus immer auf demselben Temperaturniveau gemessen werden konnte.

Tabelle 6: Einlagerungstermine, Temperaturführung und gelagerte Mengen bei Tomaten. Verglichen wurden Auswirkungen von kleinen schnellen Temperaturschwankungen (SEISENBERGER 1996) mit denen von großen langsamen (RUBIN zit. in SABUROW und ANTONOW 1953). Temperaturmittelwert war 13 °C.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Erntetermin	Schwingungs- dauer	Hysterese [K]	eingelagerte Menge [g]
Tomaten T1 Variante 1	15.07.1999	15 min	0,2	3000
Tomaten T1 Variante 2		24 h	3	3000
Tomaten T1 Variante 3		13 °C konstant		3000

## 2.10 Einlegegurken

### 2.10.1 Pflanzenmaterial

Die Einlegegurken der Sorten ‘Crispina’ (Nunhems) und ‘Melody’ (Rijk Zwaan) kamen aus dem Anbaugebiet in Niederbayern. Sie wurden nachmittags angeliefert und bis zur Einlagerung am darauffolgenden Tag bei 13 °C gelagert. Einlegegurken der Sorte ‘Mathilde’ (Royal Sluis) stammten vom Versuchsbetrieb Dürnast und wurden in Gefäßen angebaut.

### 2.10.2 Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen

Verwendet wurde die Sorte ‘Crispina’ in der Sortierung 3 - 6. Bei jedem Untersuchungsdurchlauf wurde dieselbe Schwingungsdauer als Sollwert für alle Gefäße eingegeben und mit drei unterschiedlichen Hysteresen kombiniert. Die Schwingungsdauern betragen 40, 50 und 60 min, die Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 1 K und 2 K. Jede Schwingungsdauer wurde einmal wiederholt, so dass insgesamt sechs Durchläufe gemacht wurden (Tabelle 7). Bei den ersten beiden Durchläufen wurden 5 kg eingelagert. Da die abgegebene Menge an CO<sub>2</sub> zumindest direkt nach der Einlagerung den Messbereich des Analysators überschritt, wurde die eingelagerte Menge an Einlegegurken auf 4 kg reduziert. Der Temperaturmittelwert wurde bei dieser Untersuchungsreihe auf 13 °C eingestellt.

Tabelle 7: Termine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Untersuchungen mit Einlegegurken der Sorte 'Crispina'. Temperaturmittelwert war 13 °C.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Einlagerungs- termin	Schwingungs- dauer [min]	Hysterese [K]	eingelagerte Menge [kg]
'Crispina' E1a	24.06.1998	40	0; 1; 2	5
'Crispina' E1b	30.06.1998	50	0; 1; 2	5
'Crispina' E1c	06.07.1998	60	0; 1; 2	4
'Crispina' E1d	13.07.1998	40	0; 1; 2	4
'Crispina' E1e	20.07.1998	50	0; 1; 2	4
'Crispina' E1f	27.07.1998	60	0; 1; 2	4

### 2.10.3 Staffelung der Einlagerungsmenge

Die Mengestaffelung der eingelagerten Früchte erfolgte in 250-g-Schritten von 0,25 kg bis 2,5 kg und 3 kg (Untersuchung E2, Tabelle 8). Die Kühlraumtemperatur wurde auf 0,5 °C (E2a) eingestellt, die Küvettentemperatur wurde auf konstanten 10 °C gehalten. Bei dieser Untersuchung war einer der 12 kapazitiven Feuchtefühler defekt, deshalb konnte bei den folgenden Untersuchungen mit Einlegegurken im Untersuchungsjahr 1999 im Referenzgefäß die relative Luftfeuchte nicht bestimmt werden. Erst ab dem 08.09.1999 waren alle Feuchtefühler wieder funktionstüchtig.

Bei der Wiederholung der Untersuchung (E2b, Tabelle 8) wurden die Temperaturen sowohl des Kühlraumes als auch der Küvetten auf 10 °C eingestellt. Die Werte für CO<sub>2</sub> wurden nach 15-minütiger Durchströmzeit pro Küvette gespeichert.

Tabelle 8: Termine und Bedingungen bei den Untersuchungen E2 und E3 mit Einlegegurken.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Einlagerungs- termin	Untersuchungsbedingungen
Staffelung der Einlagerungsmenge		Küvettentemperatur 10 °C Einlagerungsmengen [kg]: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,25; 2,5; 3
Einlegegurken E2a	21.07.1999	Kühlraumtemperatur: 0,5 °C
Einlegegurken E2b	22.07.1999	Kühlraumtemperatur: 0,5 °C
Einlegegurken E3	27.07.1999	Kühlraumtemperatur: 10 °C

## 2.10.4 Staffelung der Schwingungsdauer

### 2.10.4.1 Pflanzenmaterial

Es wurden jeweils 3 kg Gurken der Sorte ‘Melody’ (Rijk Zwaan) eingelagert. Es konnte nicht immer die gleiche Sortierung geliefert werden. In Tabelle 9 sind Termine, Temperaturführung sowie eingelagerte Stückzahlen zusammengefasst.

Tabelle 9: Einlagerungstermine, Temperaturführung sowie eingelagerte Stückzahlen bei Untersuchungen zur Staffelung der Schwingungsdauer mit Einlegegurken (Untersuchungen E4a bis E4e). Temperaturmittelwert war 10 °C.

Gemüseart/ Unter- suchungs-Nr.	Einlagerungs- termin	Schwingungs- dauer [h]	Hysterese [K]	Stückzahl bei 3 kg Einlagerungsmenge
Gurken E4a	23.08.1999	0, 3, 6, 9, 12	0, 3	59 - 60
Gurken E4b	26.08.1999	0, 3, 6, 9, 12	0, 3	56
Gurken E4c	02.09.1999	0, 3, 6, 9, 12	0, 3	106
Gurken E4d	08.09.1999	0, 3, 6, 9, 12	0, 3	115 - 120
Gurken E4e	15.09.1999	0, 3, 6, 9, 12	0, 3	120

### 2.10.4.2 Temperaturführung und Anordnung der Varianten

Der konstante Temperatursollwert betrug 10 °C. Die Hysterese der „schwingenden“ Varianten in der Lufttemperatur wurde auf 3 K eingestellt. Außer der Variante mit konstanter Temperatur wurden Temperaturverläufe mit 4 Schwingungsdauern untersucht: 3 h, 6 h, 9 h, 12 h. Pro Durchlauf wurden immer zwei Gefäße mit dem gleichen Temperatursollwert gesteuert. Insgesamt wurden die Varianten so verteilt, dass jede Variante ein Mal an jedem Messplatz war, das heißt wenn z.B. im ersten Durchlauf Gefäß 2 den konstanten Temperatursollwert hatte und Gefäß 3 eine Schwingungsdauer von drei Stunden, dann wurden die Varianten im nächsten Durchlauf um eine Stelle „vorgerückt“, so dass Gefäß 2 die Schwingungsdauer von drei Stunden hatte und Gefäß 3 sechs Stunden und so weiter. Es wurden fünf Durchläufe gestartet. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Küvettenluft wurde alle 15 Minuten abgespeichert und dann zum nächsten Gefäß geschaltet, das heißt es gibt pro Gefäß alle drei Stunden einen Messwert. Die Steuerung des sinusförmigen Temperaturverlaufs wurde erst zu dem Zeitpunkt in Gang gesetzt, als die Luft in den Gefäßen auf 10 °C abgekühlt waren, so dass die Temperaturkurven einheitlich beginnen.

Bei dieser Untersuchungsserie konnte die Temperatur im Innern der Einlegegurkenfrüchte nicht bestimmt werden. Da Einlegegurken ähnlich intensiv transpirieren wie Radies und auch die Fruchtgröße eher der von Radiesknollen entspricht als der von Speisezwiebeln (vgl. Untersuchung Z1), wurde davon ausgegangen, dass der Temperaturverlauf im Innern der Früchte dem der Radiesknollen gleicht. Für die Umrechnung der Atmungsintensitäten von Einlegegurken bei unterschiedlichen Temperaturen auf 10 °C mittels der  $Q_{10}$ -Regel wurden die Temperaturverläufe in Radies als Annahme zugrunde gelegt. Die Untersuchung wurde auch mit Speisezwiebeln durchgeführt (Untersuchung Z1, Kapitel 2.11). In diesen herrschte aber aufgrund der geringeren Transpirationsintensität (und damit weniger Verdunstungskälte) und des größeren Bulbendurchmessers höhere Temperaturen als in Radies, deshalb schien der Temperaturverlauf in den Speisezwiebeln als Annahme für die Berechnung der Atmungsintensitäten von Einlegegurken weniger geeignet. Die Berechnung der simulierten Atmungsabgaben mittels  $Q_{10}$ -Regel bei unterschiedlichen Temperaturverläufen erfolgte mit einem  $Q_{10}$ -Wert von 3,5, der aus der Literatur entnommen wurde (BÖTTCHER 1996).

## 2.10.5 Messungen zur Temperaturverteilung in der Küvette

### *2.10.5.1 Messungen in Einzelfrüchten*

Die Temperaturführung in den Küvetten war gleich wie die bei der Untersuchung zur Staffelung der Schwingungsdauer. Pro Etage wurde eine Einlegegurkenfrucht eingelagert (Untersuchung E5, Tabelle 10). Der Durchmesser der Gurke wurde in der Mitte (längs) mit einer Schublehre bestimmt. Die Einlegegurken hatten Durchmesser zwischen 25 und 30 mm. Pro Frucht wurden drei Thermoelemente eingestochen, das erste quer genau in die Mitte, das zweite ebenfalls quer auf die Hälfte der Mitte und das dritte wurde direkt längs unter die Gurkenschale geschoben (Abbildung 11).

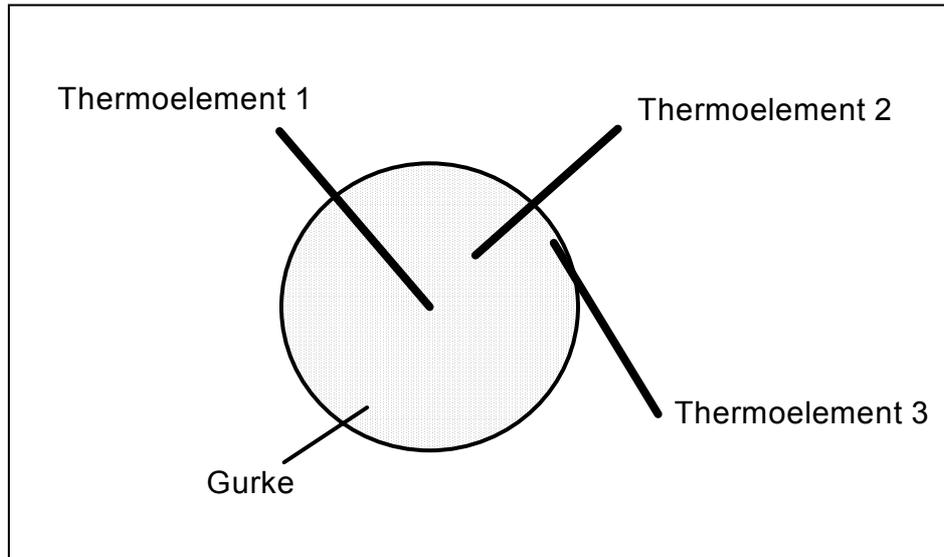


Abbildung 11: Querschnitt-Darstellung der Anordnung der Thermoelemente in den Einlegegurkenfrüchten zur Bestimmung der Temperaturverteilung in den Früchten in der oberen und unteren Etage des Küvetteneinsatzes (Untersuchungen E6 und E7).

#### 2.10.5.2 Temperaturmessung im Stapel

Verwendet wurden Einlegegurken der Sorte 'Mathilde' (Untersuchung E6, Tabelle 10). Verglichen wurde der Temperaturverlauf im Stapel bei 6 h Schwingungsdauer und 3 K Hysterese und der bei einer konstanten Temperatur von 10 °C. Die Anordnung der Thermoelemente in der Frucht war gleich wie bei Untersuchung E5. Beide Etagen von zwei Gefäßen wurden mit 3 kg Einlegegurkenfrüchten gleichmäßig gefüllt. Pro Etage wurde die Temperatur je einer Gurkenfrucht unten im Stapel und einer an der Stapeloberfläche gemessen. Zusätzlich wurde in jeder Etage die Lufttemperatur in Fruchtnähe aufgezeichnet.

Am 02.11.1999 wurden weitere Temperaturmessungen an Einlegegurken im Stapel vorgenommen (Untersuchung E7, Tabelle 10). Pro Etage waren sieben Thermoelemente im Einsatz. Sechs wurden jeweils ins Zentrum einer Frucht gestochen. Ein Thermoelement diente dazu, die Lufttemperatur im Gefäß außerhalb des Stapels zu erfassen. Die Einlegegurkenfrüchte mit Thermoelementen wurden gleichmäßig im Stapel verteilt.

Tabelle 10: Termine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Temperaturmessungen in Einlegegurkenfrüchten. Der Temperaturmittelwert war 10 °C. Es wurden Messungen sowohl in Einzelfrüchten (E5) als auch im Stapel (E6, E7) vorgenommen.

Gemüseart/ Unter- suchungs-Nr.	Einlagerungs- termin	Schwingungs- dauer [h]	Hysterese [K]	Einlagerungsmenge
Gurken E5	21.09.1999	3; 6; 9; 12;	0; 3	1 Frucht pro Etage
Gurken E6	27.09.1999	6	0, 3	3 kg
Gurken E7	02.11.1999	6	0,3	3 kg

## 2.11 Zwiebeln

### 2.11.1 Pflanzenmaterial

Die Speisezwiebeln der Sorte 'Sherpa' (Agri) stammten ebenfalls aus Niederbayern. Sie wurden vor Untersuchungsbeginn 4 bis 5 Monate bei 0,5 °C in Säcken gelagert. Pro Gefäß wurden 1,5 kg Speisezwiebeln eingelagert.

### 2.11.2 Staffelung der Schwingungsdauer

Die Temperaturführung sowie die Verteilung der Varianten und die Speicherung der Messwerte erfolgte wie bei der Untersuchung mit Radies (Kapitel 2.8.4). Der Temperaturverlauf in den Bulben wurde analog zu den Untersuchungen an Radieschen mit Thermoelementen ermittelt. Die Zwiebeln hatten auf der Breitseite einen Durchmesser zwischen 6 cm und 7 cm. Die Untersuchungsdaten sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Termine, Temperaturführung und eingelagerte Stückzahlen bei Untersuchungen zur Staffelung der Schwingungsdauer mit Speisezwiebeln. Der Temperaturmittelwert lag bei 10 °C, es wurden pro Gefäß 1,5 kg eingelagert.

Gemüseart/ Untersuchungs-Nr.	Einlagerungs- termin	Schwingungs- dauer [h]	Hysterese [K]	Stückzahl pro Gefäß
Speisezwiebeln Z1a	27.01.2000	0, 3, 6, 8, 12	0, 3	13 - 18
Speisezwiebeln Z1b	31.01.2000	0, 3, 6, 8, 12	0, 3	13 - 14
Speisezwiebeln Z1c	03.02.2000	0, 3, 6, 8, 12	0, 3	14 - 17
Speisezwiebeln Z1d	07.02.2000	0, 3, 6, 8, 12	0, 3	14 - 15
Speisezwiebeln Z1e	11.02.2000	0, 3, 6, 8, 12	0, 3	12 - 15

## 3 Ergebnisse

### 3.1 *Feldsalat*

3.1.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane

#### 3.1.1.1 *Temperaturverlauf in den Küvetten*

In Abbildung 12 sind Mittelwerte der Temperaturen der jeweils drei Gefäße pro Hysterese im Küvettenschacht und in der obersten Etage direkt über dem eingelagerten Feldsalat gegenübergestellt. Ein Ausschnitt von drei Stunden Messdauer vom ersten Lauf der drei getesteten Schwingungsdauern kombiniert mit jeweils drei Hysteresen ist hier dargestellt. Die Küvettenluft in Gemüsenähe hat die Temperaturschwingung gedämpft und verzögert mitgemacht. Das Temperaturniveau in den Etagen lag unterhalb dessen im Schacht.

#### 3.1.1.2 *Atmung*

Es ließen sich keine signifikanten Unterschiede im Atmungsverlauf zwischen den drei unterschiedlichen Varianten bei den getesteten Schwingungsdauern feststellen (Abbildung 13, Untersuchung F1). Die Mittelwerte bei der Schwingungsdauer 50 min (Untersuchungen F1b und F1e, Abbildung 12b) liegen im Niveau tiefer als bei den beiden weiteren Schwingungsdauern (Untersuchungen F1a und F1d, Abbildung 13a, Untersuchungen F1c und F1f, Abbildung 13c), sowohl bei den Varianten mit schwingender als auch bei der Variante mit konstanter Temperatur. Die Mittelwerte der Atmungsintensitäten von den Untersuchungen F1c und F1f (Abbildung 13c) liegen nach Messbeginn am höchsten, gleichen sich aber nach ca. 15 Stunden im Niveau denen von den Untersuchungen F1a und F1d (Abbildung 13a) an.

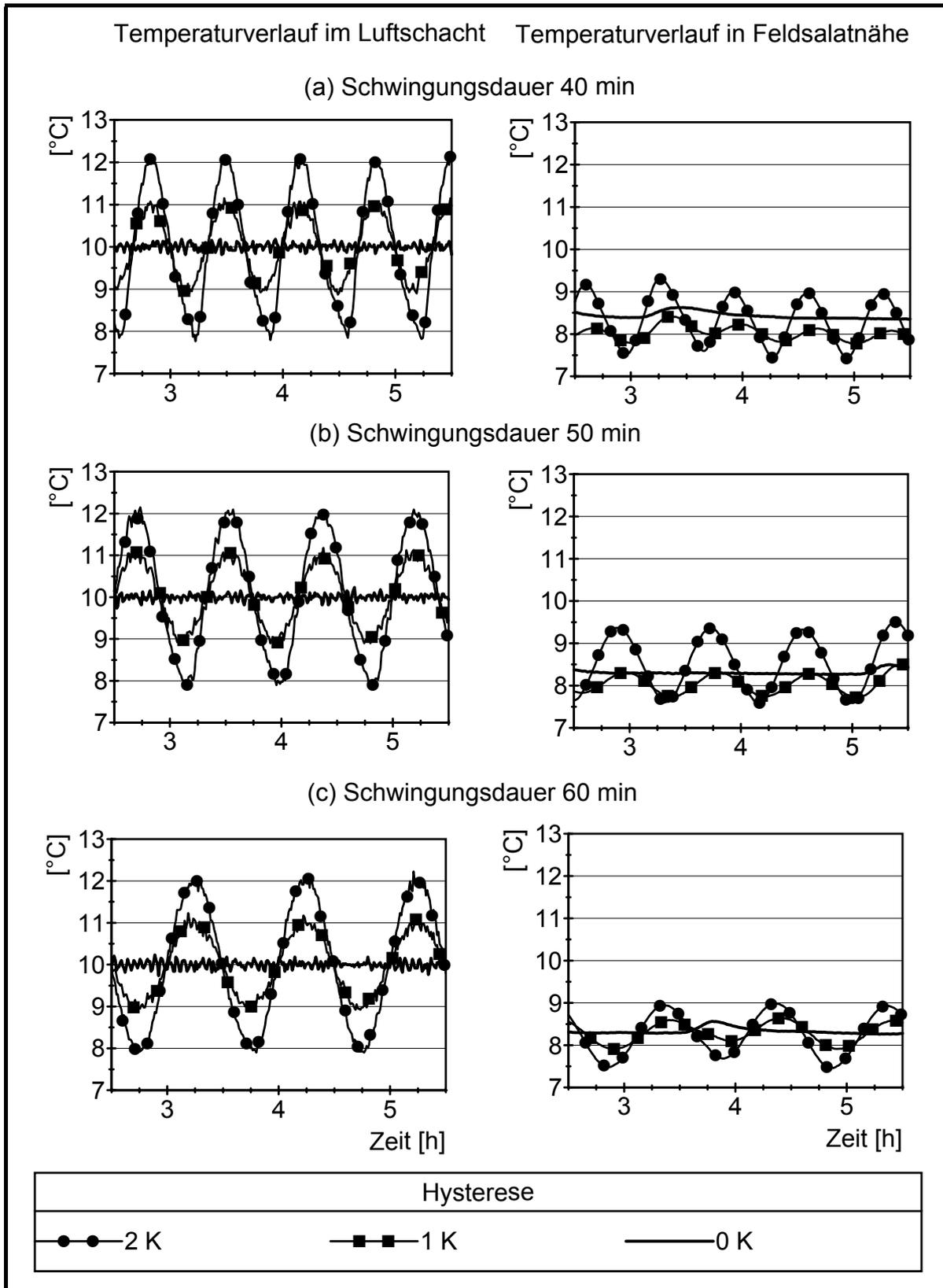


Abbildung 12: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettschacht und in Feldsalatnähe (Untersuchung F1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von drei Stunden Messdauer.

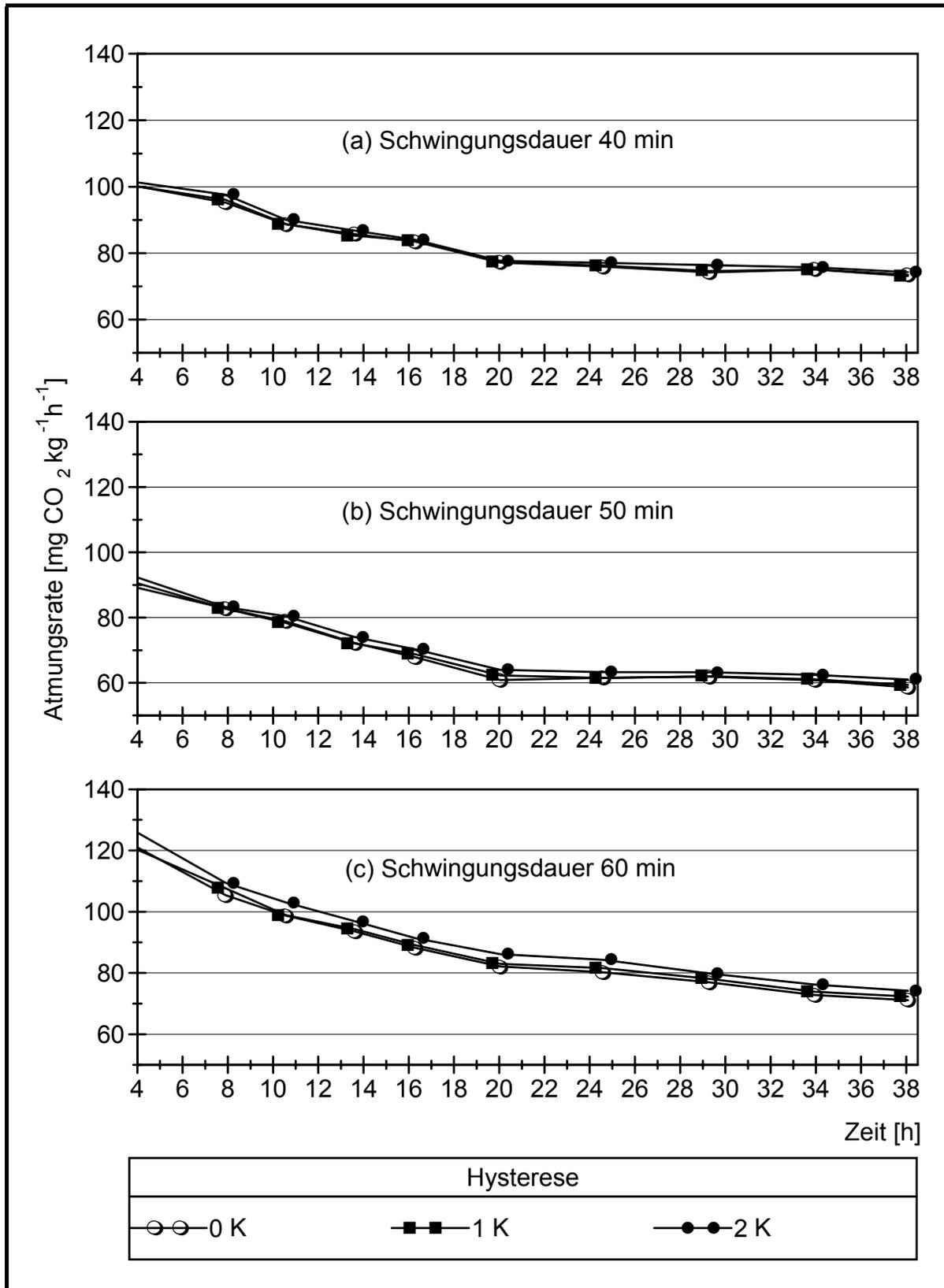


Abbildung 13: Atmungsrate von Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).

### 3.1.1.3 *Transpiration*

Bei einer Schwingungsdauer von 40 min liegt die Wasserdampfabgabe der Varianten, die bei schwingender Temperatur gelagert wurden, im Niveau niedriger als die derjenigen Variante, die bei konstanter Temperatur gelagert wurde (Abbildung 14a, Untersuchung F1a und d). Bei einer Schwingungsdauer von 50 min liegen die Maxima der schwingenden Varianten (Hysterese 1 K und 2 K) auf demselben Niveau wie die der konstanten Variante (Hysterese 0 K) (Abbildung 14b, Untersuchung F1b und e). Bei einer Schwingungsdauer von 60 min liegen die Maxima der Varianten mit Hysterese 1 K und 2 K im Niveau höher als die Variante mit Hysterese 0 K (Abbildung 14c, Untersuchung F1c und f).

Bei allen Untersuchungen (F1) bei Feldsalat war das Dampfdruckdefizit bei der Variante mit 0 K Hysterese (konstante Temperatur) am niedrigsten (Abbildung 15). In den Küvetten der Variante mit 2 K Hysterese herrschte bei allen untersuchten Schwingungsdauern das höchste Dampfdruckdefizit. Bei der untersuchten Schwingungsdauer von 40 min stieg das Dampfdruckdefizit in den Küvetten mit 2 K Hysterese mit der Untersuchungsdauer an und die Schwingung wurde größer, was darauf hindeutet, dass die gelagerten Blätter den Feuchtigkeitsabtransport durch die Messgasleitungen nicht mehr durch Transpiration ausgleichen konnten (Abbildung 14a, Untersuchung F1a und c). Dies wird durch den sinkenden Transpirationskoeffizienten, bezogen auf das Dampfdruckdefizit, in Abbildung 16a deutlich. Bei den Schwingungsdauern 50 min und 60 min stieg das Dampfdruckdefizit in den Küvetten mit konstanter Temperaturführung im Laufe der Untersuchung leicht an (Abbildung 15b und c, Untersuchungen F1b und e, F1c und f), was ebenfalls leicht sinkende Transpirationskoeffizienten zur Folge hatte (Abbildung 16b und c).

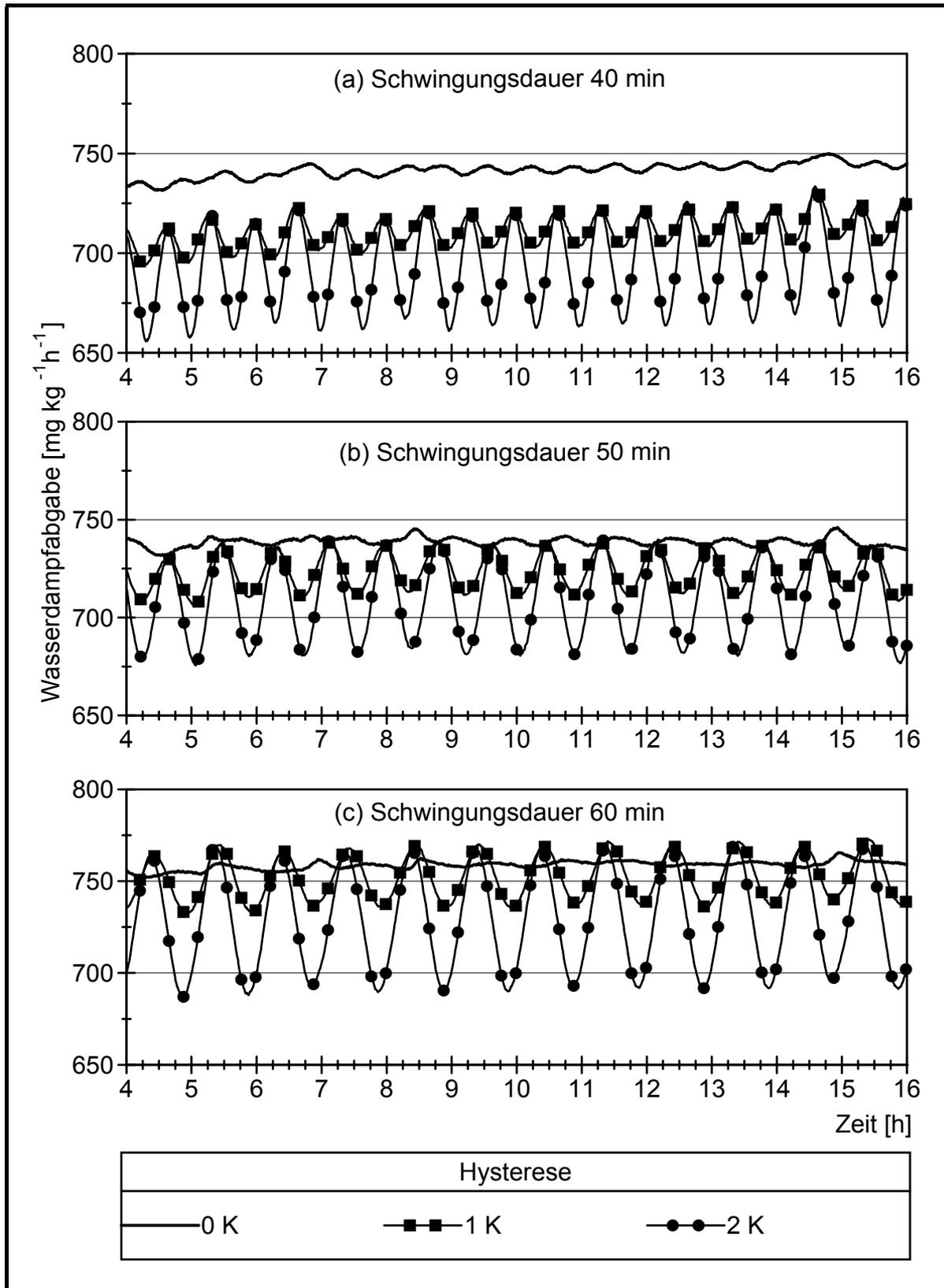


Abbildung 14: Wasserdampfzabgabe von gelagertem Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).

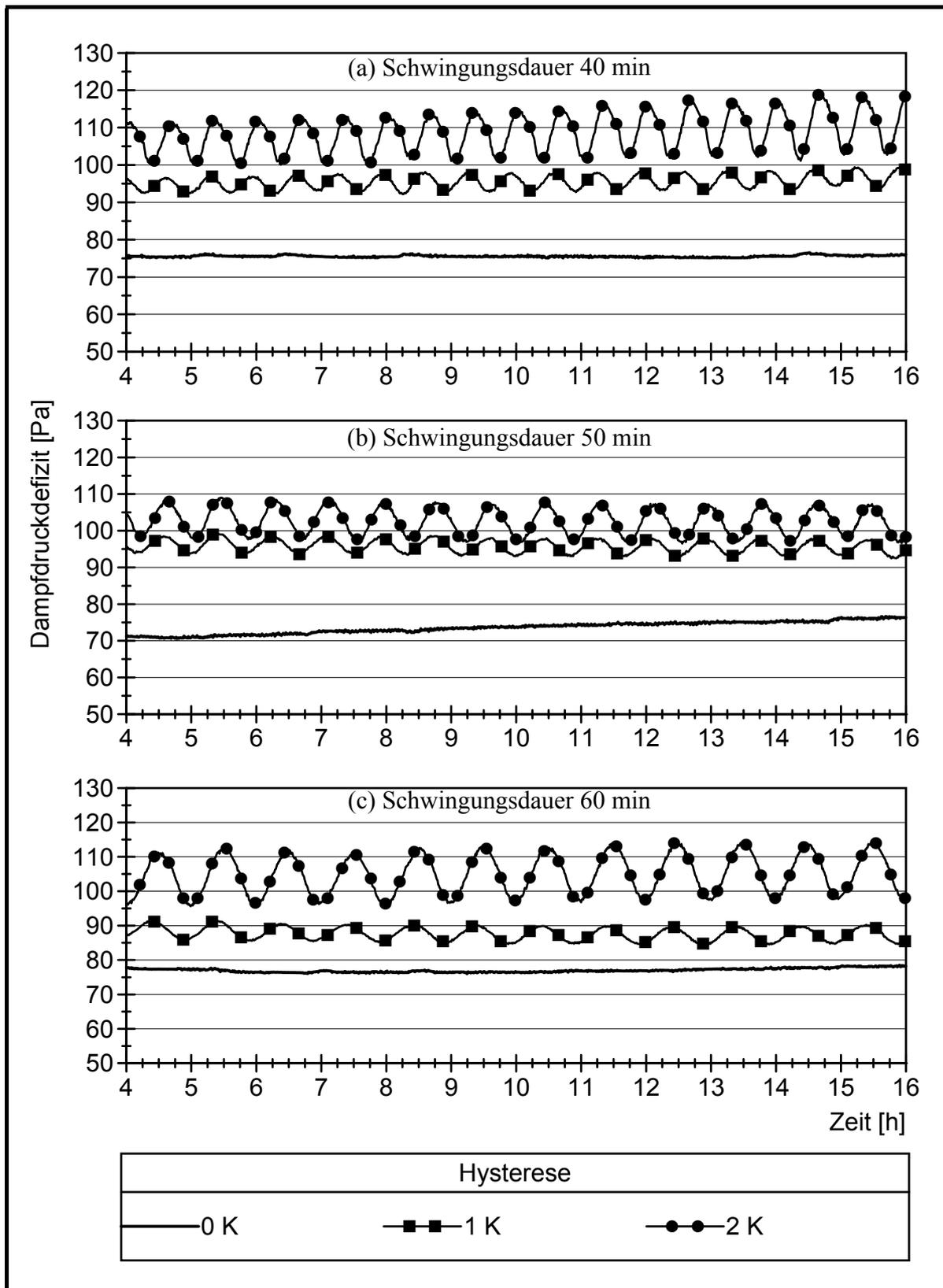


Abbildung 15: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei gelagertem Feldsalat (Untersuchung F1).

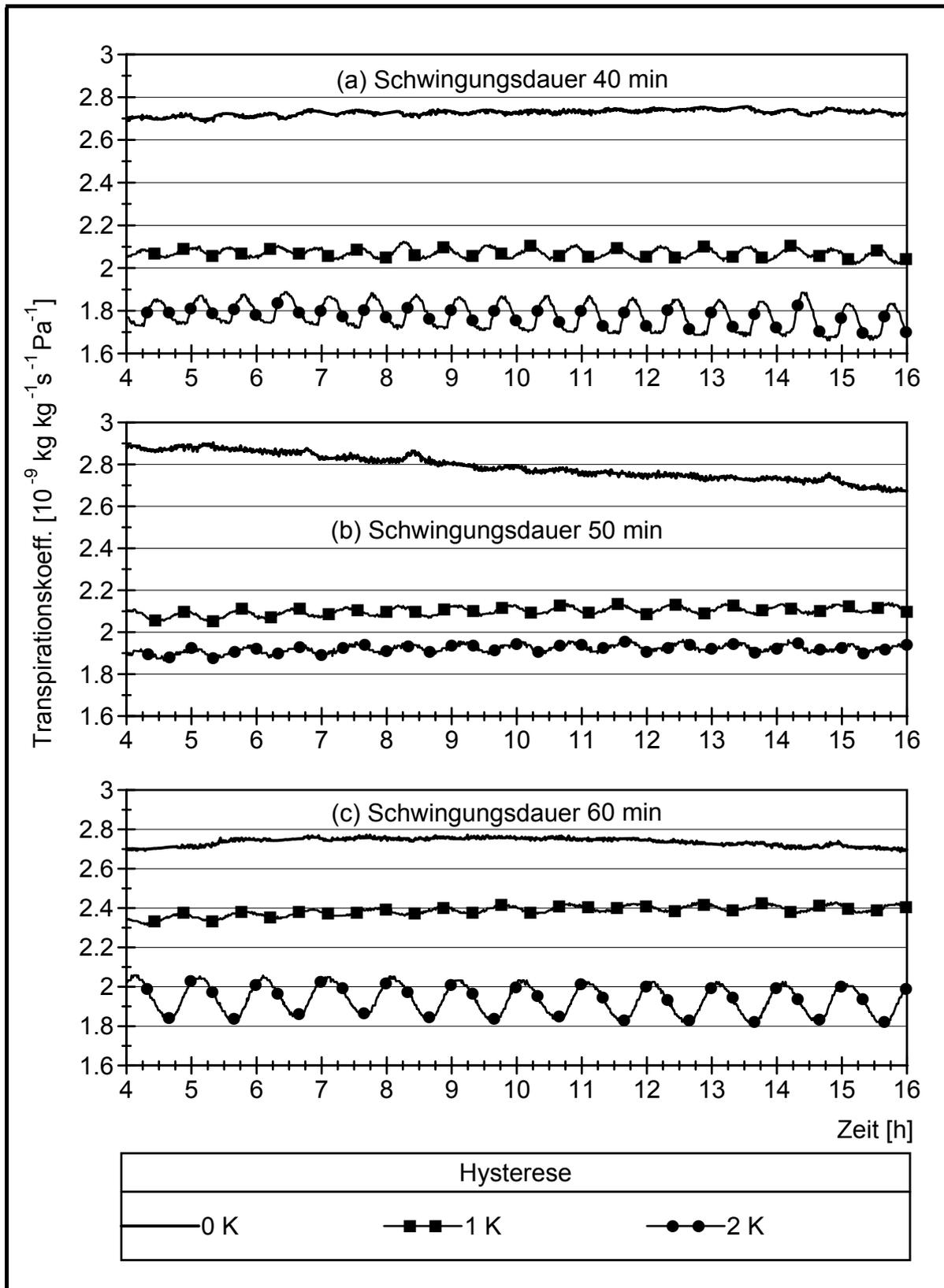


Abbildung 16: Transpirationskoeffizienten von gelagertem Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).

#### *3.1.1.4 Schwund*

Schwund und Kondenswasser des bei schwingenden Temperaturen gelagerten Feldsalates wurden jeweils zum Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur in Bezug gesetzt (d. h. Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur = 100 %, Abbildung 17). Geringe Unterschiede sowohl im Schwund als auch im Kondenswasser, sowie hohe Standardabweichungen deuten darauf hin, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Varianten festgestellt werden konnten.

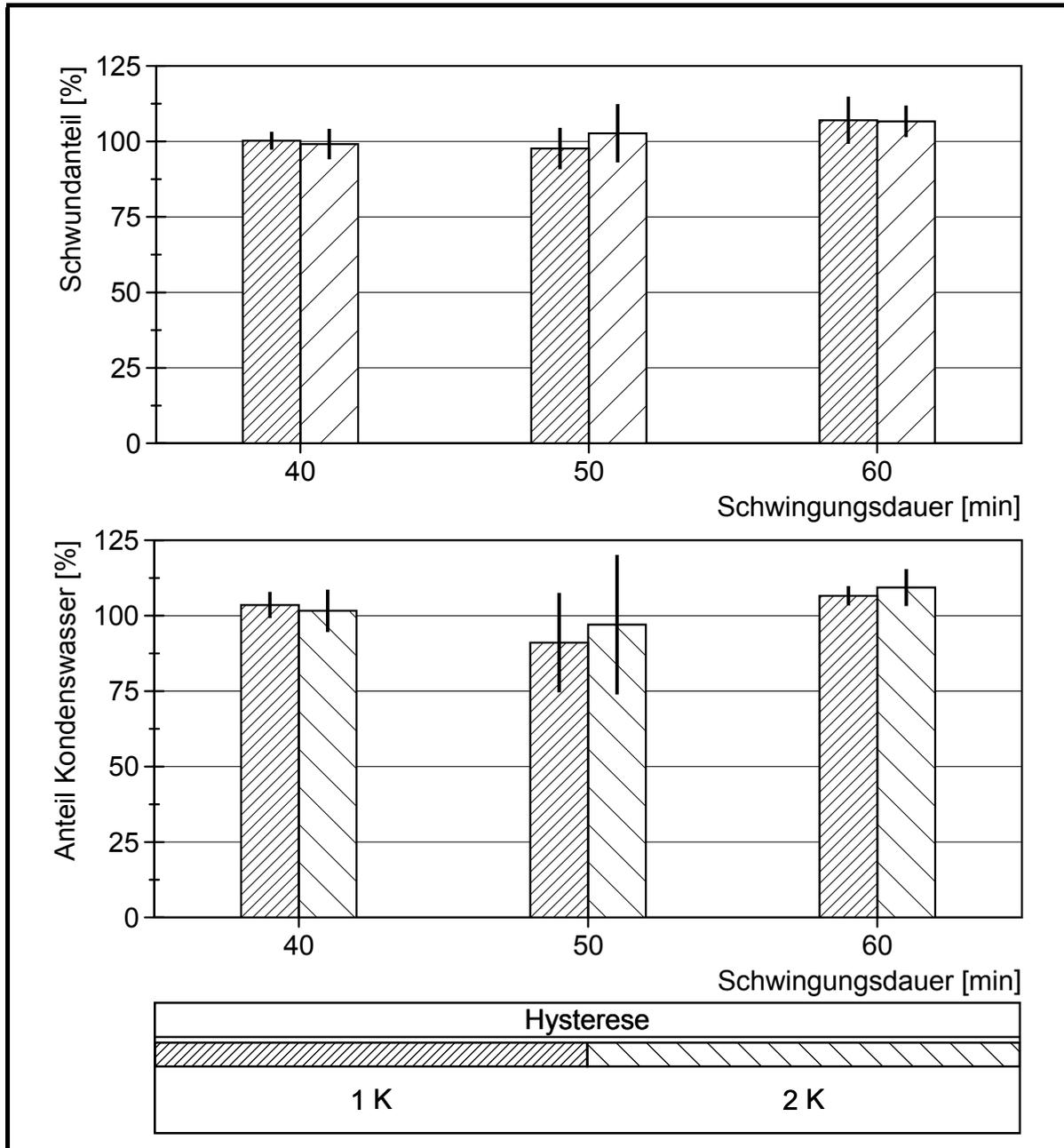


Abbildung 17: Anteile an Gesamtschwund von gelagertem Feldsalat und Kondenswasser an den Küvettenwänden sowie deren Standardabweichung bei schwingenden Temperaturen bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung F1).

## **3.2 Spinat**

3.2.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysterese auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane

### *3.2.1.1 Temperaturverlauf in den Küvetten*

Wie beim Feldsalat hat die Küvettenluft in Spinatnähe die Temperaturschwingung gedämpft und verzögert mitgemacht (Abbildung 18). Das Temperaturniveau in Spinatnähe lag unter dem im Schacht. Die Mittelwerte pro Hysterese sind für einen repräsentativen Ausschnitt von drei Stunden Messdauer des jeweils ersten Laufs dargestellt (Untersuchungen S1a, b und c).

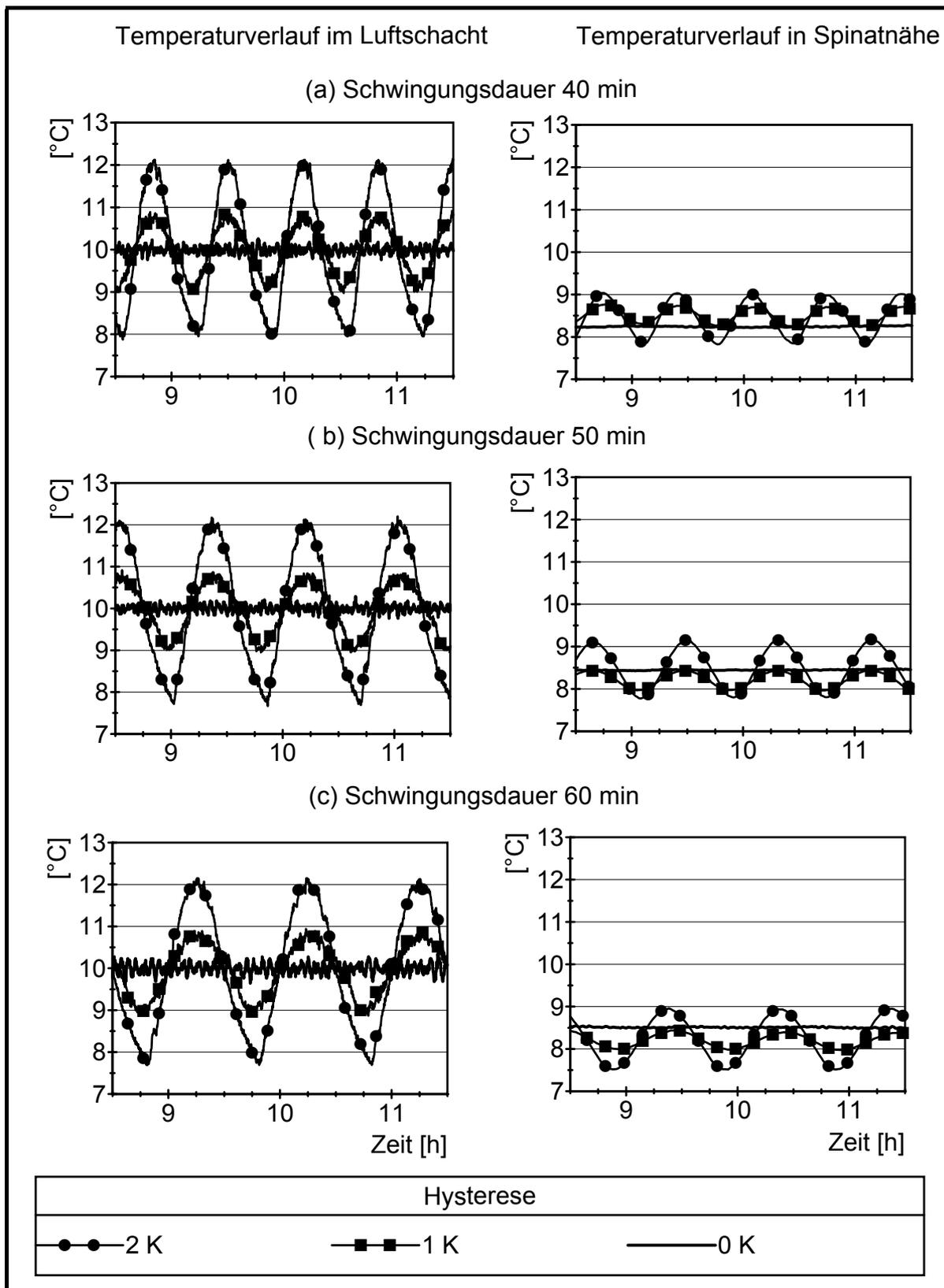


Abbildung 18: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettschacht und in Spinatnähe (Untersuchung S1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von drei Stunden Messdauer.

### 3.2.1.2 Temperaturverteilung

Die Messung der Oberflächentemperatur des gelagerten Spinates mit Miniatur-Thermoelementen hat gezeigt, dass die Temperaturverteilung innerhalb der Küvette gleichmäßig ist. Die Spannweiten der Oberflächentemperaturen (d. h. die Differenzen zwischen dem niedrigsten und dem höchsten gemessenen Wert) von Spinat zeigen, dass die Temperaturen in den beiden Etagen in derselben Größenordnung liegen (Tabelle 12). Innerhalb einer Etage sind die Temperaturunterschiede geringer als zwischen den Etagen. Bei der Berechnung der Spannweiten der gesamten Küvette fiel auf, dass bei allen untersuchten Schwingungsdauern der Unterschied zwischen oberer und unterer Etage bei konstanter Temperatur größer war als bei schwingender Temperatur.

Die Temperaturschwingung ist jedoch lediglich bei einer Hysterese von 2 K und einer Schwingungsdauer ab 50 min erkennbar (Abbildung 19a, Untersuchungen S1b und e, S1c und f)). Selbst bei einer Schwingungsdauer von 60 min sowie einer Hysterese von 1 K schwankt die Temperatur im Spinat nur sehr leicht (Abbildung 19c). Bei einer Schwingungsdauer von 40 min wurden die Hysteresen von 1 K und 2 K vom Spinat kaum mitgemacht (Untersuchung S1a und d).

Tabelle 12: Spannweiten der Oberflächentemperaturen von gelagertem Spinat innerhalb der Küvette bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1). Die Werte wurden für einen repräsentativen Ausschnitt von 2,5 Stunden berechnet.

Schwingungsdauer [min]	Hysterese [K]	Temperatur-Spannweite [K]		
		untere Etage	obere Etage	gesamt
40	0	1,02	0,96	1,85
	1	0,24	0,51	0,69
	2	0,56	0,74	0,84
50	0	0,72	0,92	1,23
	1	0,74	0,42	0,75
	2	0,54	0,77	0,98
60	0	2,05	0,67	2,37
	1	0,28	0,77	0,94
	2	0,94	0,51	0,98

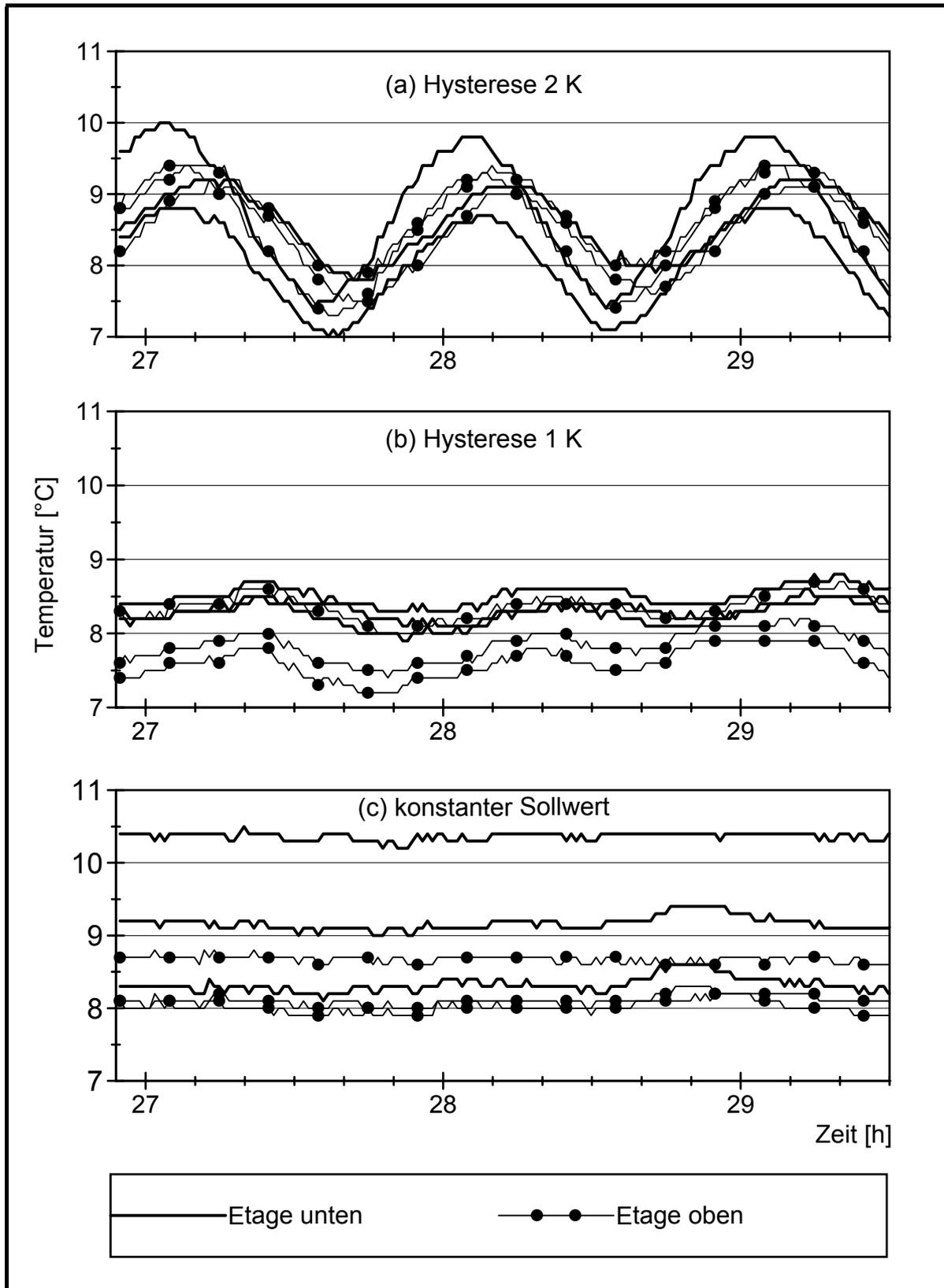


Abbildung 19: Temperaturverteilung des gelagerten Spinates in der oberen und unteren Etage bei einer Schwingungsdauer von 60 min und unterschiedlichen Hysteresen (Untersuchung S1c und e).

### 3.2.1.3 *Atmung*

Signifikante Unterschiede in der Auswirkung der Hysterese auf die Atmung von Spinat waren nur bei einer Schwingungsdauer von 40 min zu erkennen (Abbildung 20a, Untersuchung S1a und d). Hier lag die Atmungsintensität bei konstanter Temperatur am höchsten, gefolgt von derjenigen bei einer Hysterese von 2 K. Die Atmung von Spinat, der bei schwankender Temperatur mit einer Hysterese von 1 K gelagert wurde, lag bei der getesteten Schwingungsdauer von 40 min am niedrigsten. Die Atmungsrate bei 1 K Hysterese unterschied sich signifikant (Tukey Test bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) von den Atmungsraten bei 2 K Hysterese und bei konstanter Temperatur. Bei den Schwingungsdauern 50 min (Abbildung 20b) und 60 min (Abbildung 20c) unterschieden sich die Atmungsraten bei unterschiedlichen Hysteresen und bei konstanter Temperatur nicht signifikant voneinander (Untersuchungen S1b und e, S1c und f).

### 3.2.1.4 *Transpiration*

Bei allen drei Schwingungsdauern lag die Wasserdampfabgabe bei konstanter Temperatur höher als bei schwankender Temperatur (Abbildung 21). Bei den Schwingungsdauern 40 min (Abbildung 21a, Untersuchung S1a und d)) und 60 min (Abbildung 21c, Untersuchung S1c und f) verlief die gemittelte Wasserdampfabgabe der Gefäße mit einer Hysterese von 1 K höher als die der Gefäße mit 2 K Hysterese. Bei einer Schwingungsdauer von 50 min überschneiden sich die beiden Kurven der Varianten mit schwankender Temperatur (Abbildung 21b, Untersuchung S1b und e).

Außer bei der Schwingungsdauer 60 min (Abbildung 22c) war das Dampfdruckdefizit bei konstanter Temperatur niedriger als bei schwankender Temperatur (Abbildung 22). Bei 60 min Schwingungsdauer lag das Dampfdruckdefizit bei einer Hysterese von 1 K am höchsten. Bei 40 min Schwingungsdauer lag das Dampfdruckdefizit bei 2 K Hysterese viel höher als das der Varianten mit Hysterese 1 K und mit konstantem Temperatursollwert (Abbildung 22a).

Wird der Transpirationskoeffizient der untersuchten Varianten bei Spinat betrachtet, dann kann festgestellt werden, dass sich die Transpiration der Spinatblätter dem sich verändernden Dampfdruckdefizit weitestgehend angepasst hat (Abbildung 23).

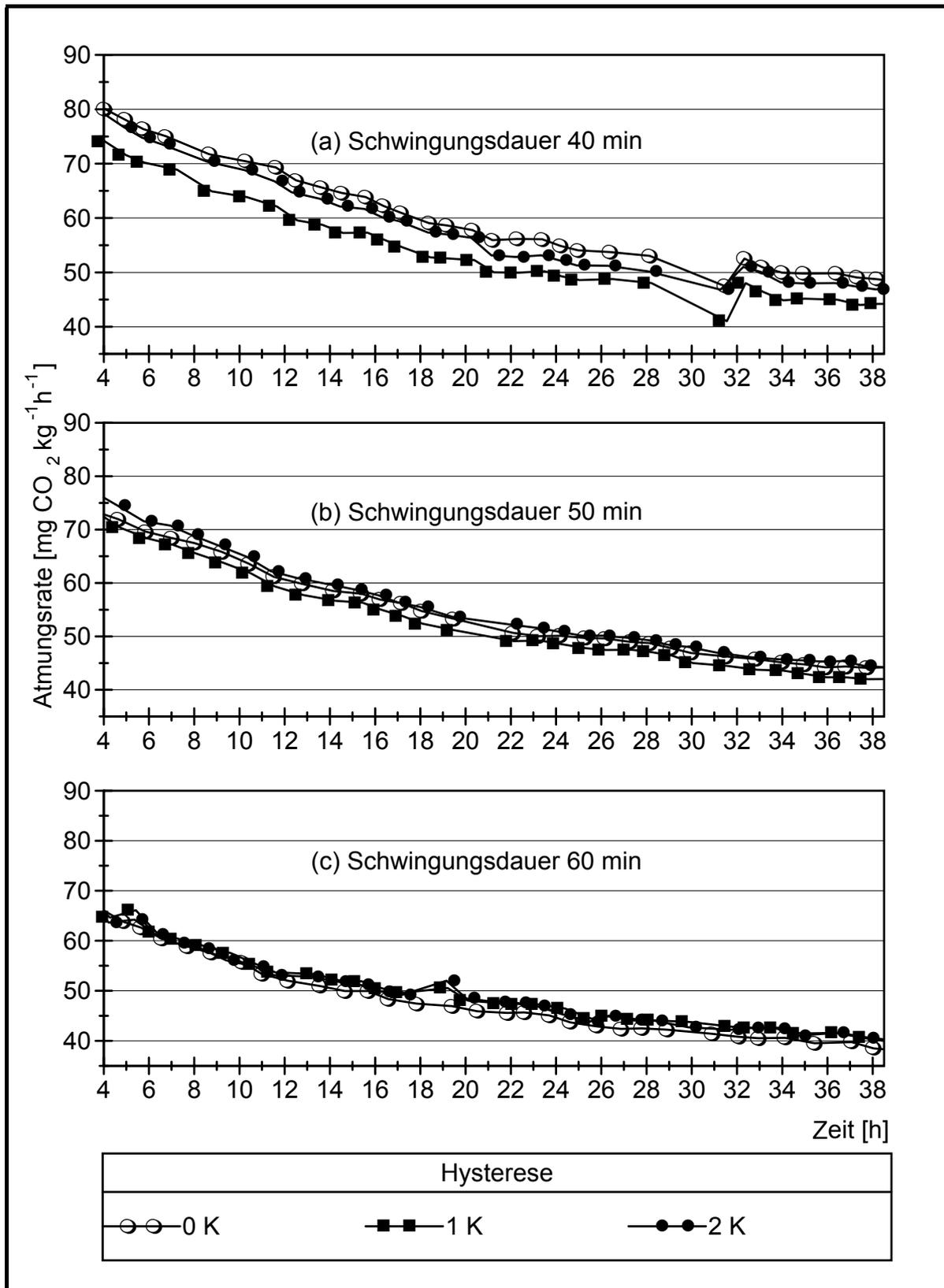


Abbildung 20: Atmungsraten von Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).

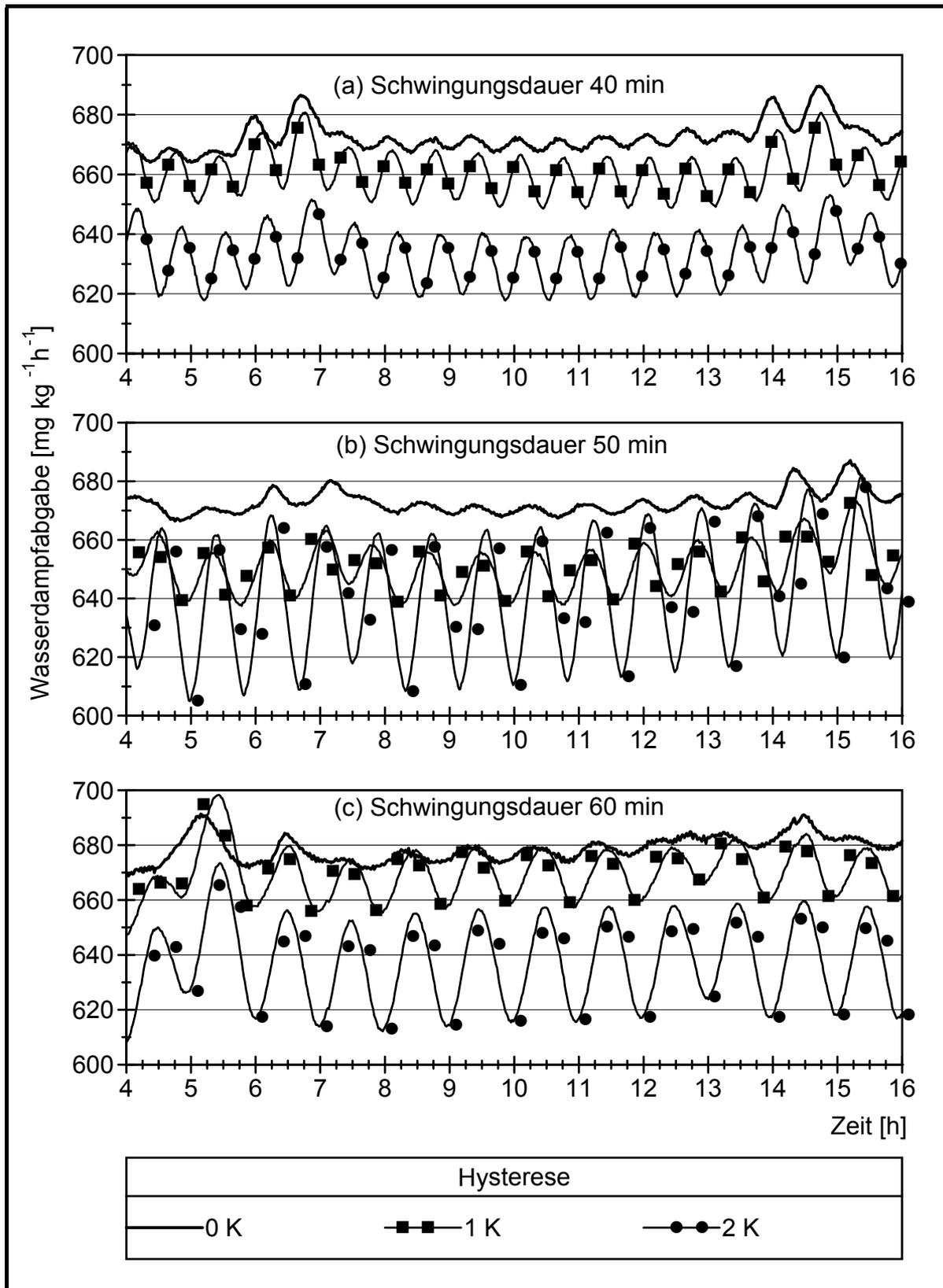


Abbildung 21: Wasserdampfabgabe von gelagertem Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).

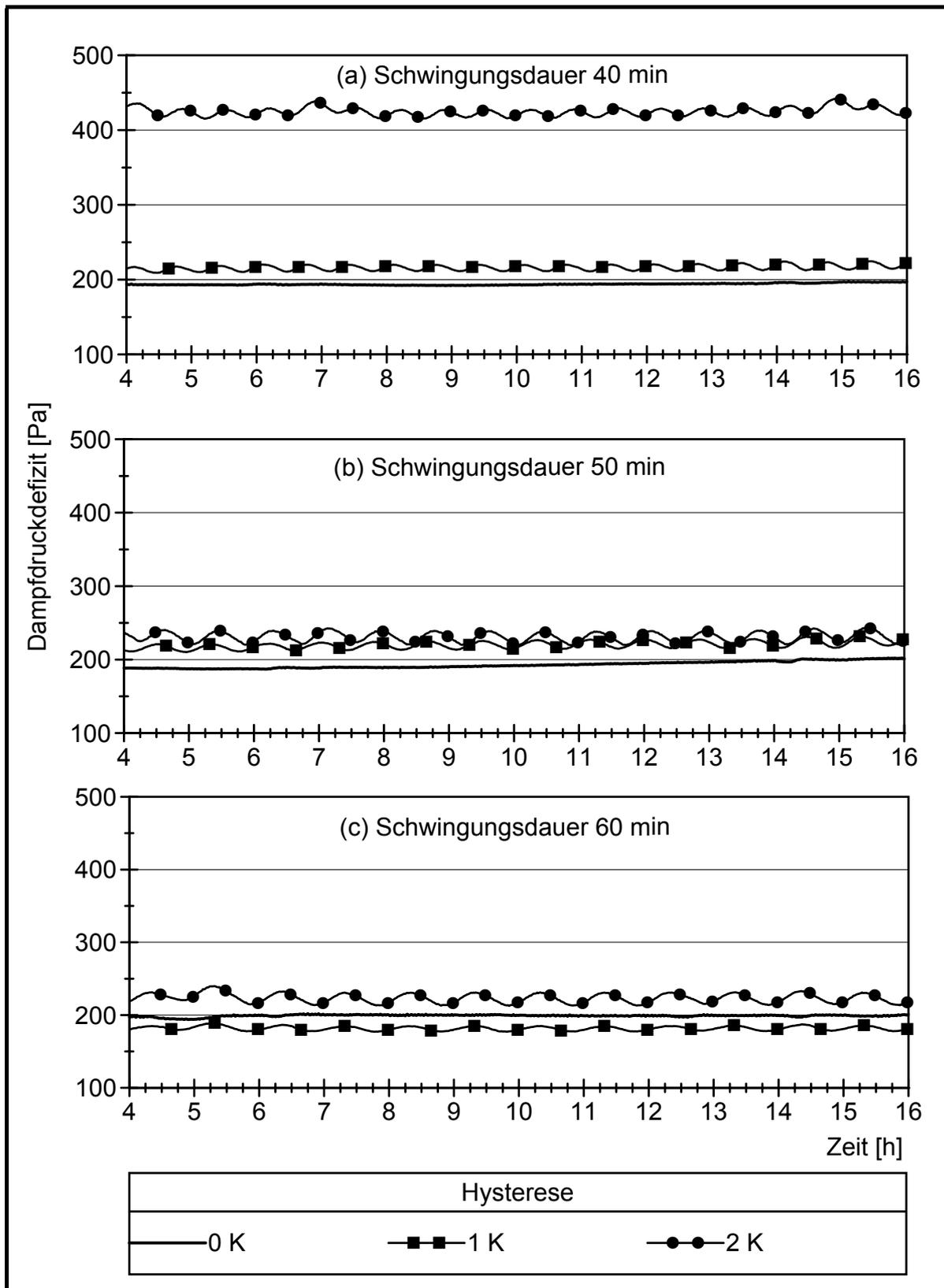


Abbildung 22: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei Spinat (Untersuchung S1).

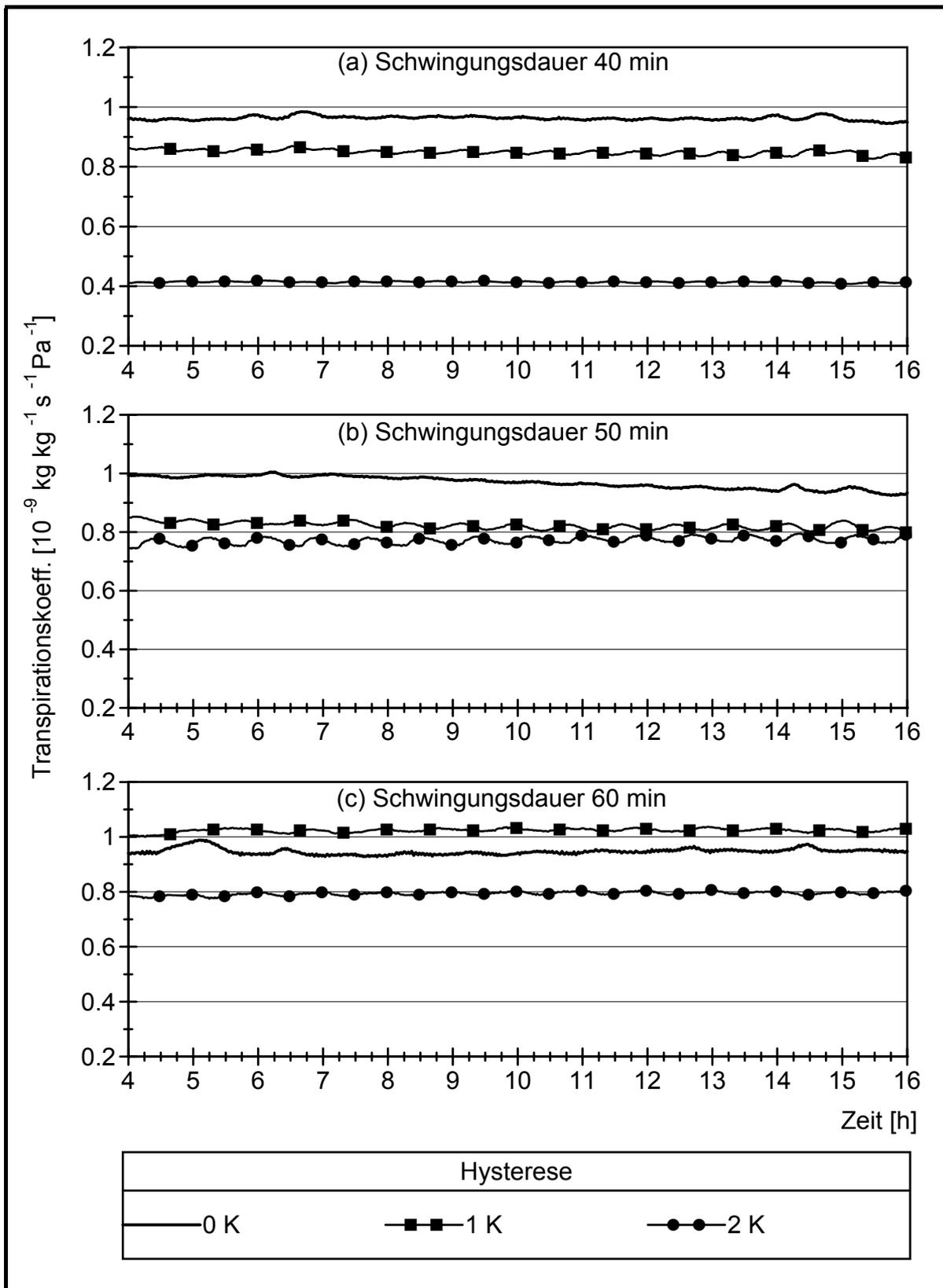


Abbildung 23: Transpirationskoeffizienten von Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).

### 3.2.2 Auswirkung unterschiedlicher Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden

Die Temperaturverläufe bei Spinat mit Phasenverschiebungen von je 15 min gemessen im Luftschacht der Küvetten sind in Abbildung 24 dargestellt (Untersuchung S2). Die Temperaturen in Spinatnähe in der oberen Etage waren im Niveau niedriger als im Luftschacht.

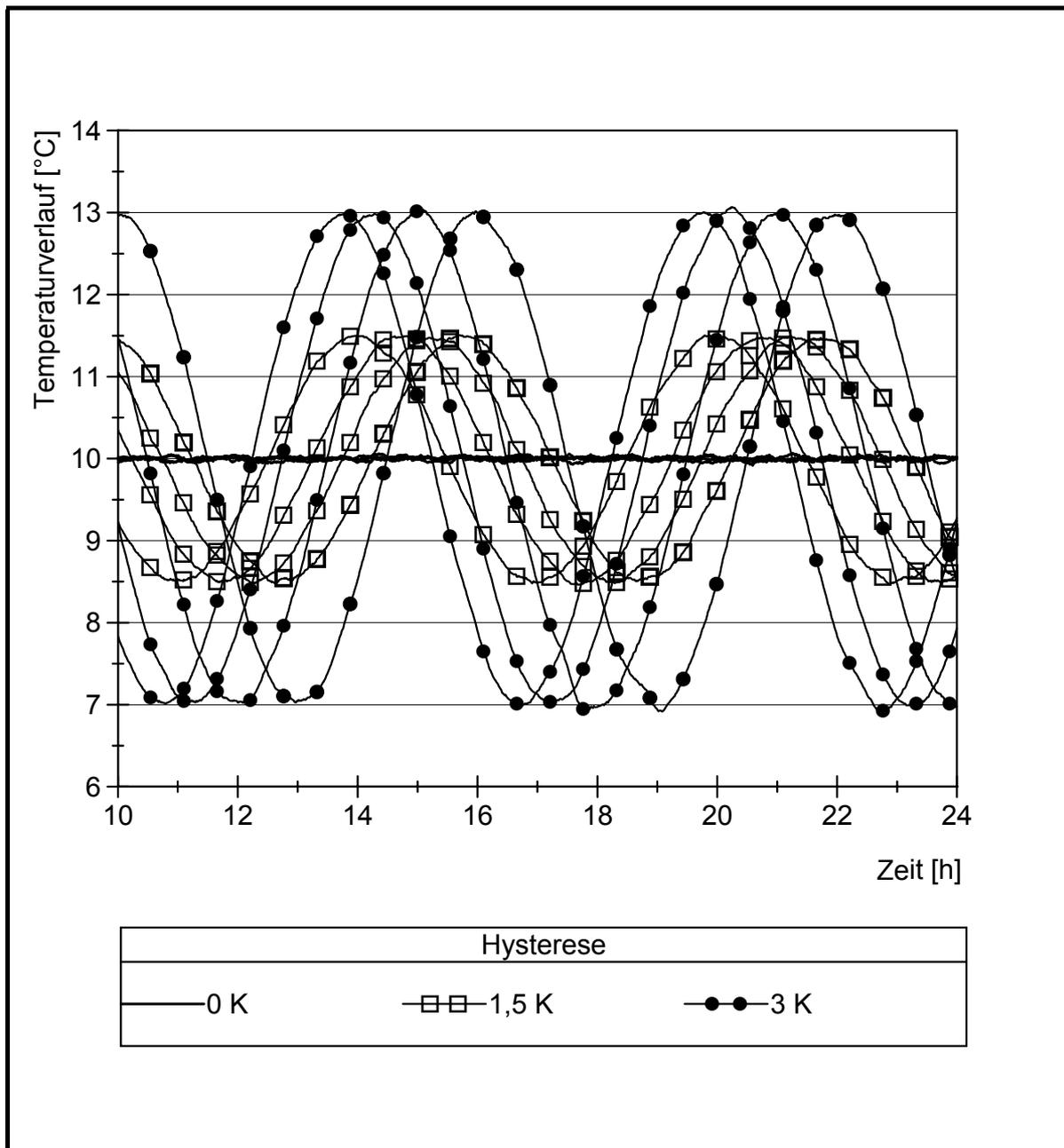


Abbildung 24: Temperaturverläufe im Luftschacht mit Phasenverschiebungen von je 15 min bei Spinat (Untersuchung S2). Die Schwingungsdauer betrug 6 h, die Hysteresen 0 K, 1,5 K und 3 K.

### 3.2.2.1 *Atmung*

Die Werte für CO<sub>2</sub> wurden immer dann gespeichert, wenn die Küvettentemperatur 10 °C über- oder unterschritt. Die Atmungskurven der Varianten mit schwankender Temperatur "schwingen" um die Kurve der konstanten Variante (Abbildung 25). Bei der Hysterese 3 K war die Schwingung größer als bei der Hysterese 1,5 K. Die "oberen" Werte lagen höher als bei 1,5 K, dafür lagen die "unteren" Werte niedriger. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren nicht signifikant. Diese Schwankungen im Atmungsverlauf trotz Speicherung beim Durchlaufen von 10 °C kamen dadurch zustande, dass die Speicherung dann erfolgte, wenn die Temperatur in den Küvetten die Flanke von 10 °C passierte. Die Luft, die sich aber zu dem Zeitpunkt in der Messküvette des Analysators befand, hat die Küvette schon einige Sekunden vorher verlassen, das heißt bei einer Temperatur, die geringfügig höher oder niedriger lag.

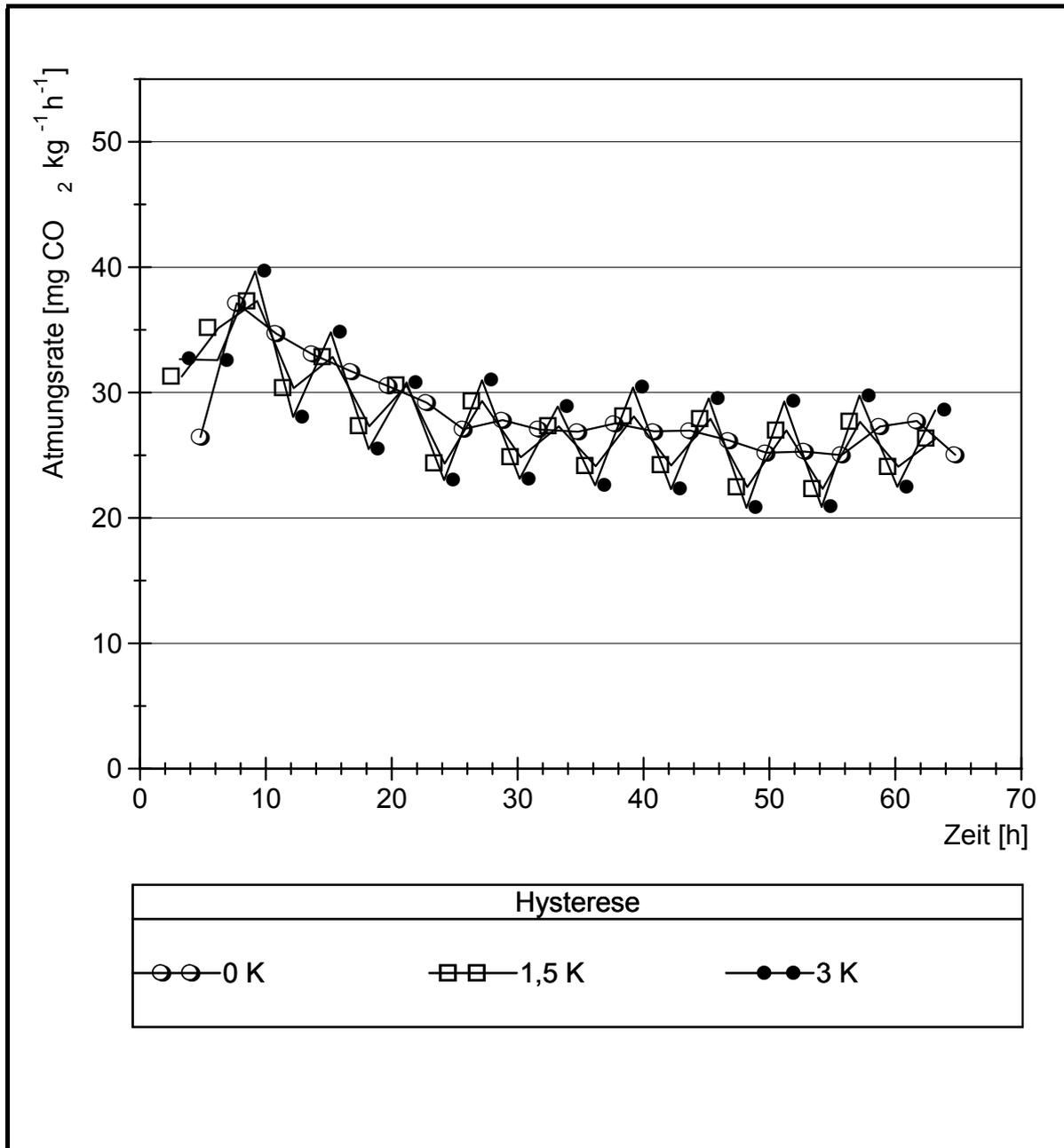


Abbildung 25: Atmungsrate von gelagertem Spinat bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und unterschiedlichen Hysteresen (Untersuchung S2). Gespeichert wurde immer beim Durchlaufen von 10 °C.

### 3.2.2.2 Transpiration

Aufgrund der Phasenverschiebung der Temperaturschwingung wurde die Wasserdampfabgabe der einzelnen Gefäße dargestellt (Abbildung 26). Um bessere Vergleichsmöglichkeiten zu haben, wurde die Wasserdampfabgabe bei 10 °C gemittelt und in beide Grafiken eingezeichnet. Wie bei der Atmung schwang die Wasserdampfabgabe der Varianten, die bei schwingender Temperatur gelagert wurden um die

Kurve der konstanten Variante. Bei größerer Hysterese wurde die Spannweite der Schwingung größer.

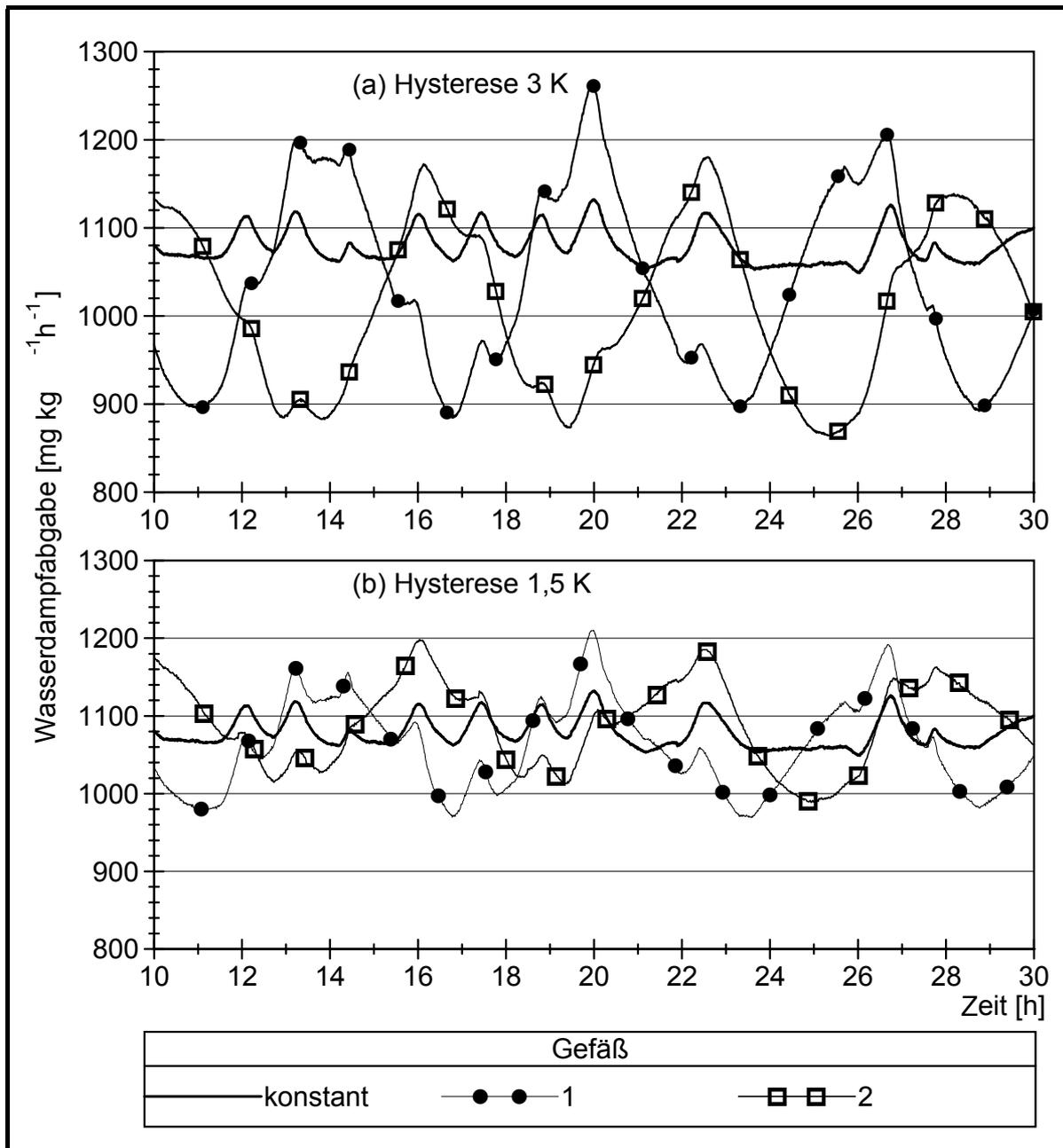


Abbildung 26: Wasserdampfabgabe von gelagertem Spinat bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und Hysterese von 3 K (a), 1,5 K (b) und konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2). Die Abgabe bei konstanten 10 °C wurde gemittelt und zum Vergleich jeweils mit eingezeichnet.

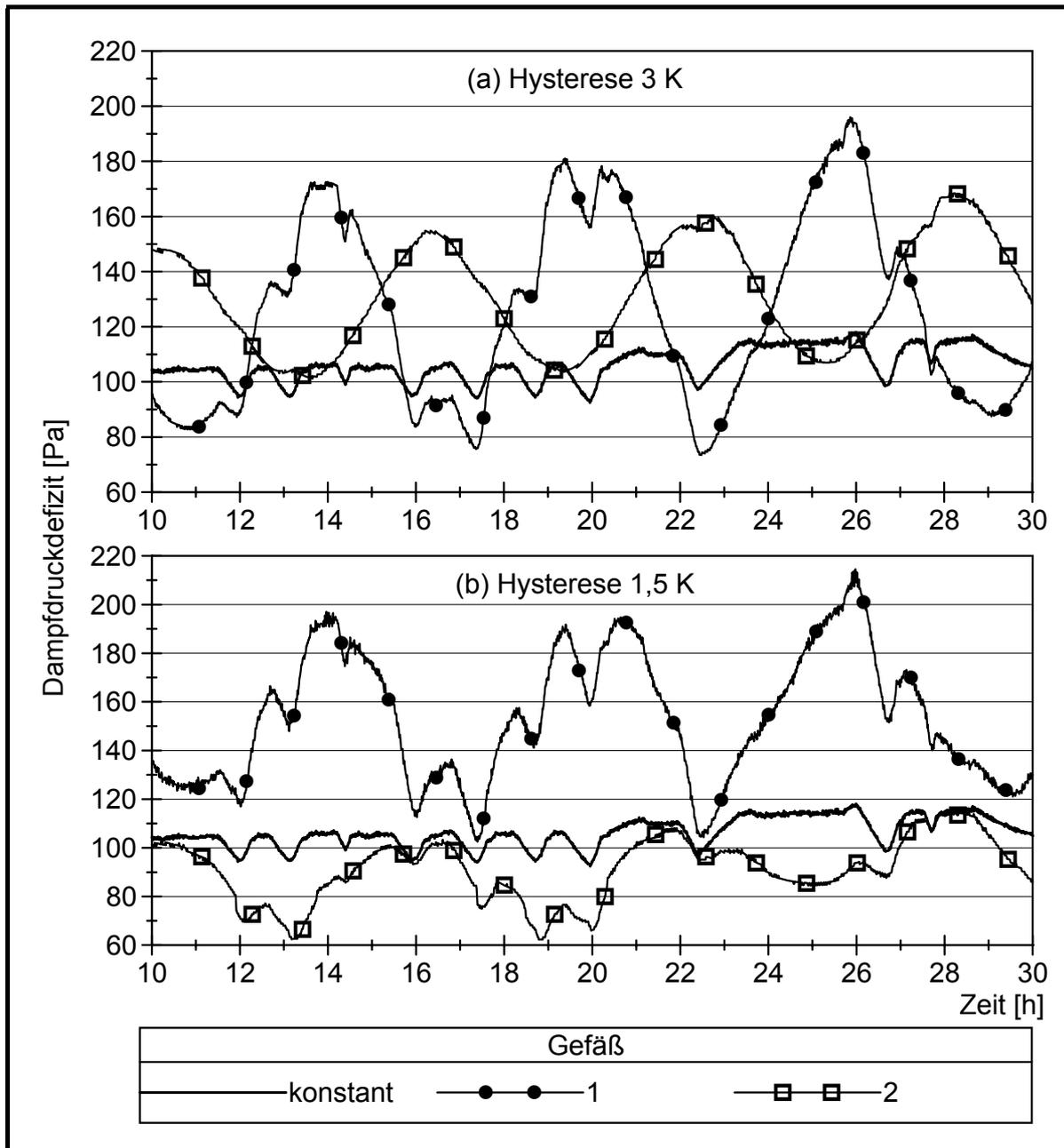


Abbildung 27: Dampfdruckdefizit bei gelagertem Spinat in den Gefäßen bei einer Schwingungsdauer von 6 h und Hysteresen von 3 K (a) und 1,5 K (b) und bei konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2). Das Dampfdruckdefizit bei 10 °C wurde von 2 Gefäßen gemittelt und zum Vergleich in beide Diagramme eingezeichnet.

Zum Teil lag das Dampfdruckdefizit in den einzelnen Küvetten bei schwingenden Temperaturen höher als bei konstanten Temperaturen, zum Teil aber auch niedriger (Abbildung 27). Bei der Hysterese 1,5 K lagen die Dampfdruckdefizite von 2 Gefäßen im Niveau niedriger und von 2 Gefäßen höher als die der Gefäße mit konstanter Temperatur (Abbildung 27b).

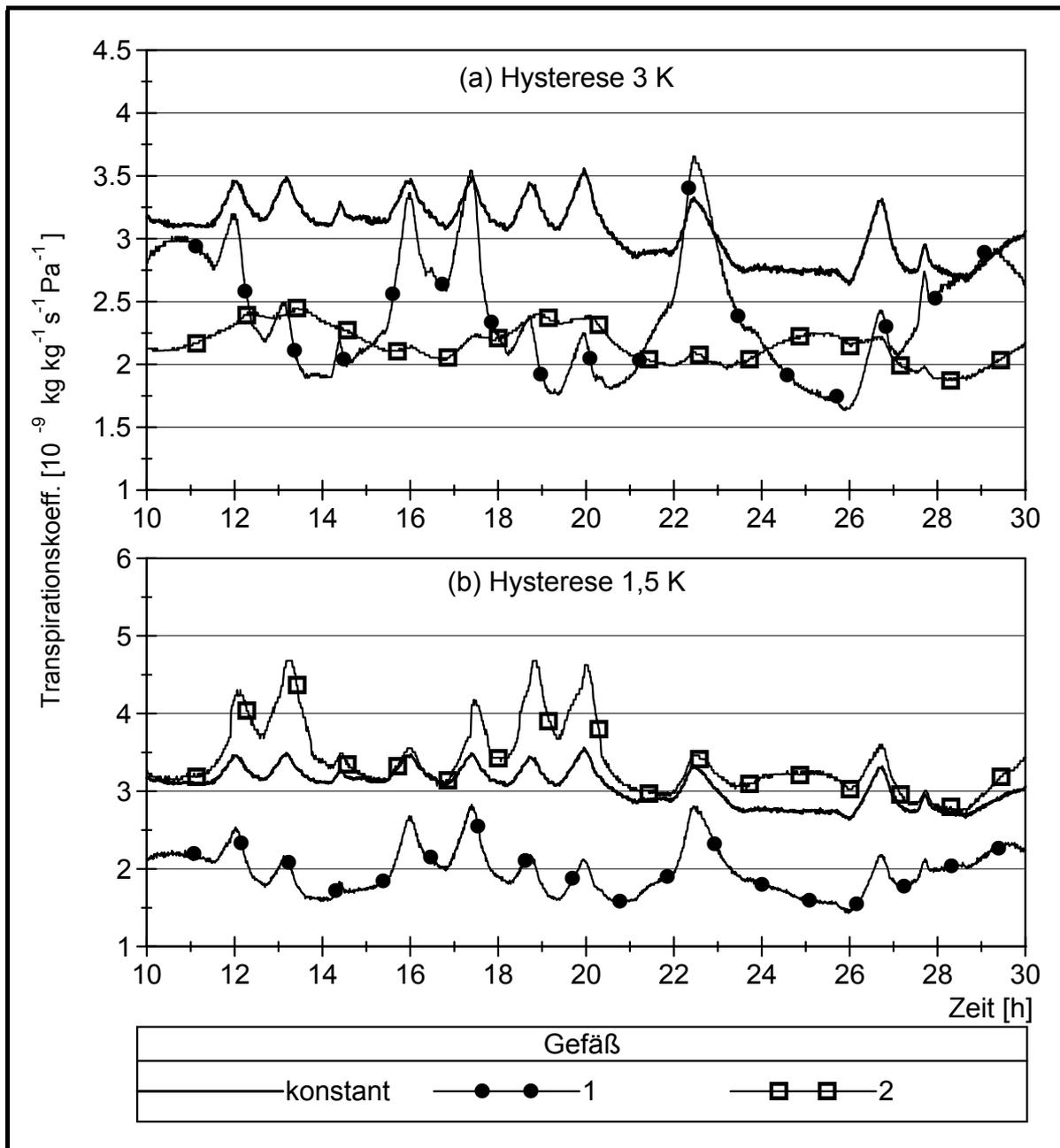


Abbildung 28: Transpirationskoeffizienten von gelagertem Spinat bei einer Schwingungsdauer von 6 h und Hysterese von 3 K (a) und 1,5 K (b) und konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2). Die Transpirationskoeffizienten bei konstanten 10 °C wurden gemittelt und zum Vergleich in beide Diagramme eingezeichnet..

Korrespondierend zu Abbildung 27 zeigt Abbildung 28 die Transpirationskoeffizienten von Spinatblättern in Abhängigkeit vom Dampfdruckdefizit bei schwingenden und konstanten Temperaturen. Insgesamt lag bei den Messungen zwischen den Küvetten der unterschiedlichen Varianten eine hohe Variabilität vor, so dass hier keine definitive Aussage über die Höhe der Transpirationskoeffizienten bei unterschiedlichen Hysterese möglich ist.

### 3.2.2.3 Schwund

Tendenziell hatte die Variante mit 3 K Hysterese den größten Verlust und die geringste Standardabweichung, die Unterschiede waren aber sehr gering (Abbildung 29, Untersuchung S2). Außerdem waren bei der konstanten Variante zwei Gefäße ausgefallen, so dass hier der Mittelwert nur über den Schwund von zwei Gefäßen gebildet werden konnte. Damit lässt sich auch die höhere Standardabweichung erklären.

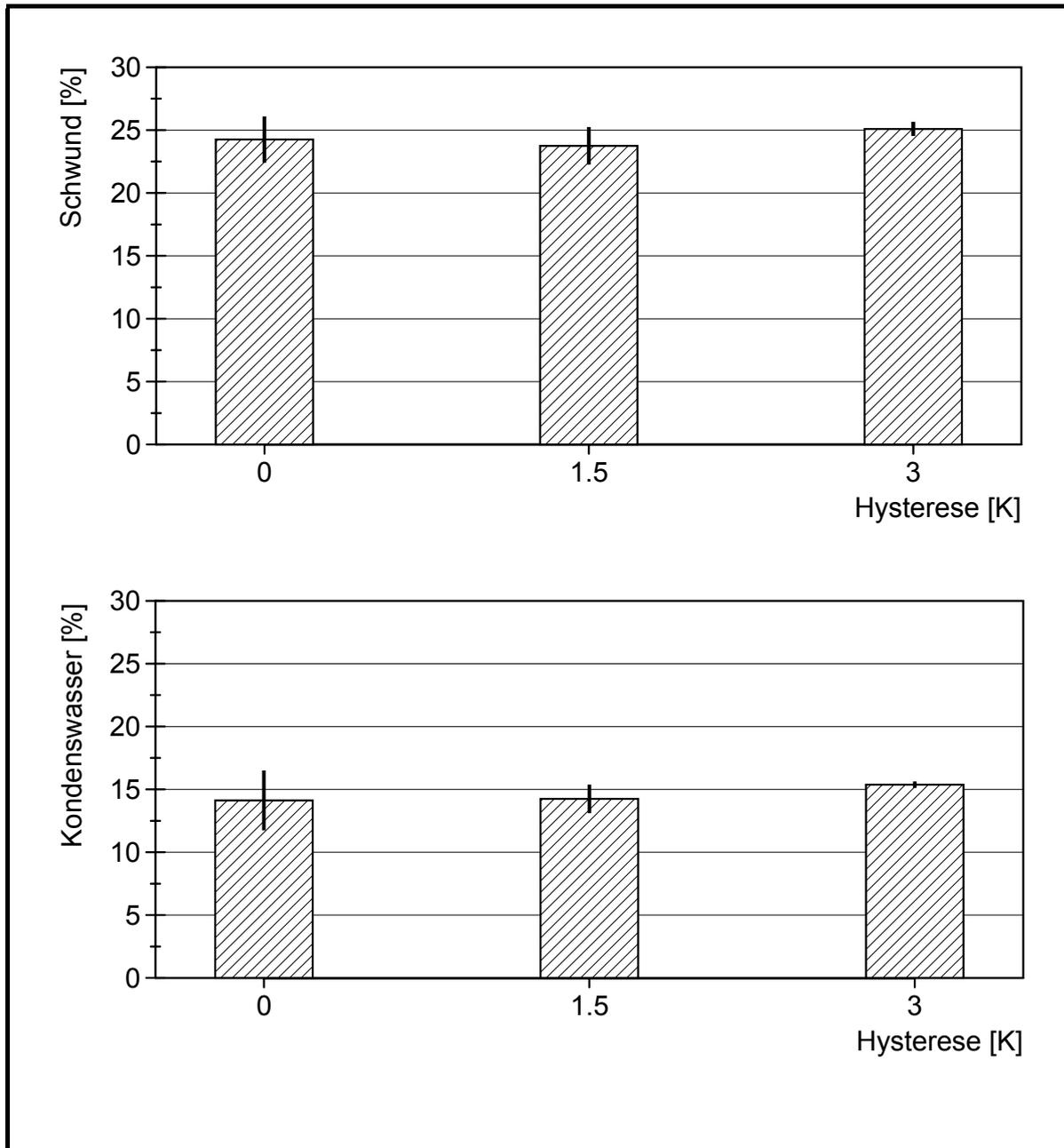


Abbildung 29: Schwund von gelagertem Spinat und Kondenswasser bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von 6 h und unterschiedlichen Hysterese sowie deren Standardabweichungen (Untersuchung S2).

### 3.2.3 Staffelung der Einlagerungsmenge

#### 3.2.3.1 Temperaturführung

Die Temperaturen im Küvettenschacht wurden auf 10 °C gehalten. Tabelle 13 zeigt die Durchschnittstemperaturen in Spinatnähe ab sechs Stunden Messdauer (Untersuchung S3). Die Temperaturen in der oberen Etage in Gemüsenähe lagen zwar niedriger als die Solltemperatur von 10 °C im Luftschacht, aber sie unterschieden sich trotz unterschiedlicher Einlagerungsmengen nicht signifikant.

Tabelle 13: Durchschnittstemperaturen bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen von Spinat ab sechs Stunden Messdauer.

Eingelagerte Menge [g]	10	20	38	75	150	300
Durchschnittstemperatur ab 6 h Messdauer	8,5	8,4	8,2	8,6	8,4	8,5

#### 3.2.3.2 Atmung

Die Atmungsraten von Spinat bei gestaffelten Einlagerungsmengen sind von der 6. bis zur 20. Stunde dargestellt, da in diesem Zeitraum eine konstante Temperatur von 10 °C eingehalten wurde (Abbildung 30, Untersuchung S3). Die Atmungsraten bei 75 g, 150 g und 300 g Einlagerungsmenge verliefen über die Untersuchungsdauer relativ konstant. Bei den Einlagerungsmengen 10 g, 20 g sowie 38 g zeigte sich eine steigende Tendenz in der Atmungsrate, obwohl die Spinatblätter besonders bei den Gefäßen mit sehr geringer Einlagerungsmenge (10 g, 20 g) nach 18 Stunden Untersuchungsdauer fast getrocknet waren.

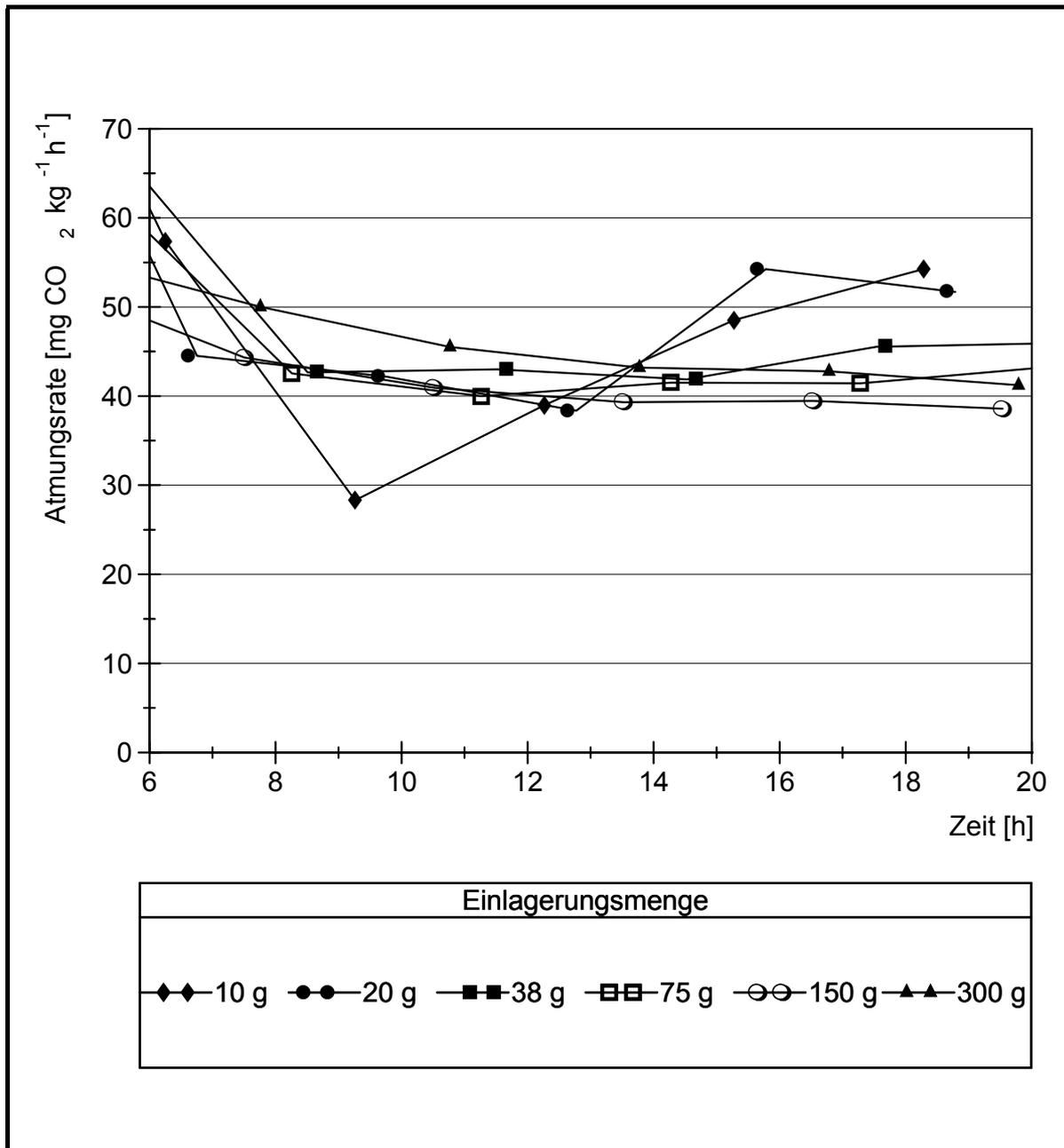


Abbildung 30: Atmungsraten von Spinat bei gestaffelten Einlagerungsmengen (Untersuchung S3).

### 3.2.3.3 Transpiration

Die Transpirationskoeffizienten von Spinat bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen hatten sich nach ca. 10 Stunden Messdauer weitestgehend angeglichen (Abbildung 31, Untersuchung S3). Nur bei 75 g Einlagerungsmenge lag der Transpirationskoeffizient etwas höher als bei den weiteren Einlagerungsmengen. Dies kam vermutlich dadurch zustande, dass hier ein Gefäß ausgefallen war und deshalb anstatt zwei Gefäßen nur eines zur Auswertung herangezogen werden konnte.

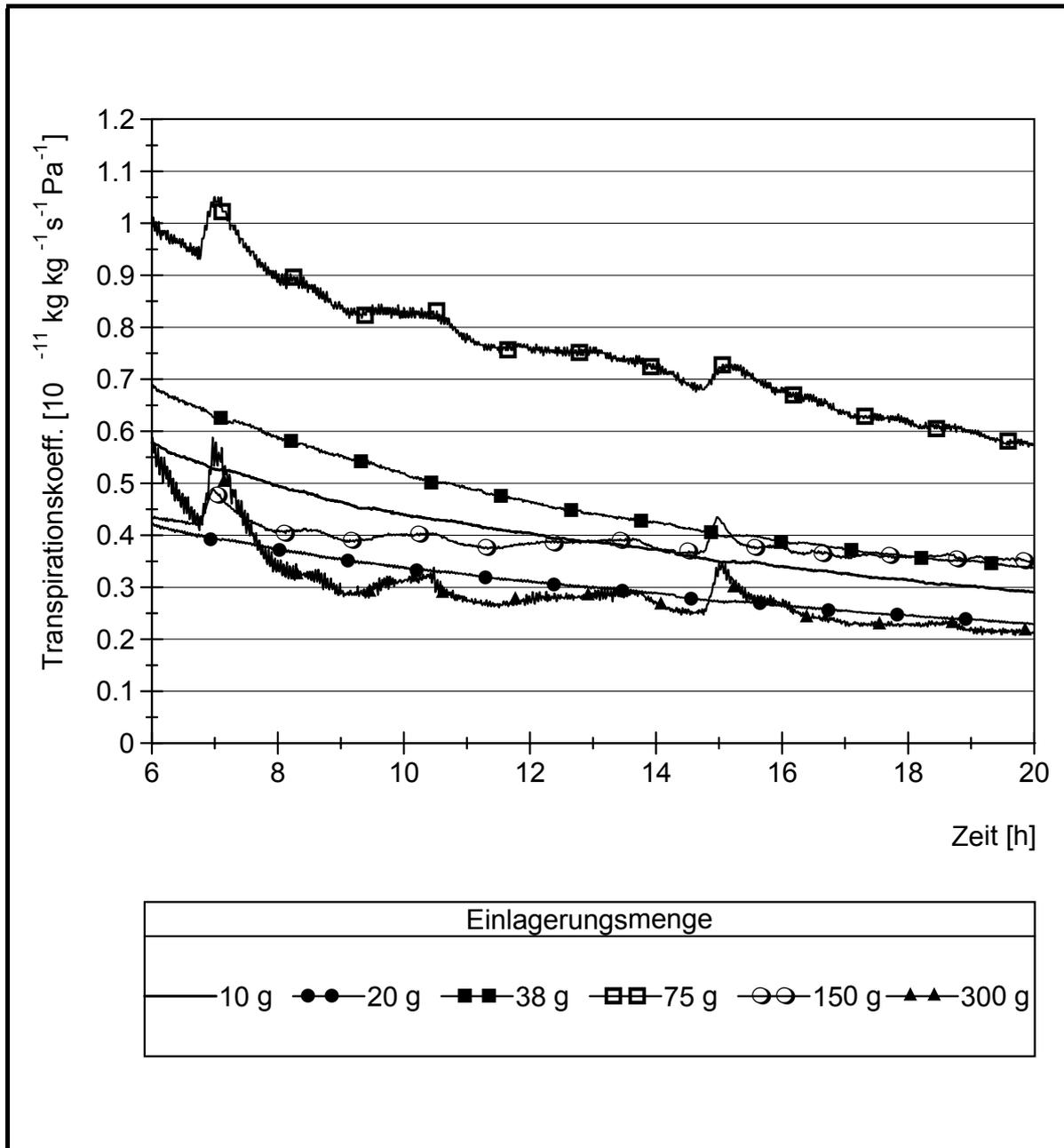


Abbildung 31: Transpirationskoeffizienten von Spinat bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen (Untersuchung S3).

Je geringer die eingelagerte Menge an Spinat war, desto größer war das Dampfdruckdefizit (Abbildung 32). Mit zunehmender Einlagerungsmenge wurden die Unterschiede geringer. Zwischen 75 g und 150 g Einlagerungsmenge bestand fast kein Unterschied mehr im Dampfdruckdefizit, bei 300 g lag das Dampfdruckdefizit am niedrigsten.

Das Dampfdruckdefizit und damit die Wasserdampfabgabe in den Küvetten hing zwar von der eingelagerten Menge an Spinat ab, nicht aber der Transpirationskoeffizient

selbst. Bis zu einer Einlagerungsmenge von 38 g trat keine Kondensation an den Küvettenwänden auf. Bei 75 g waren bereits wenige Kondensationstropfen zu sehen.

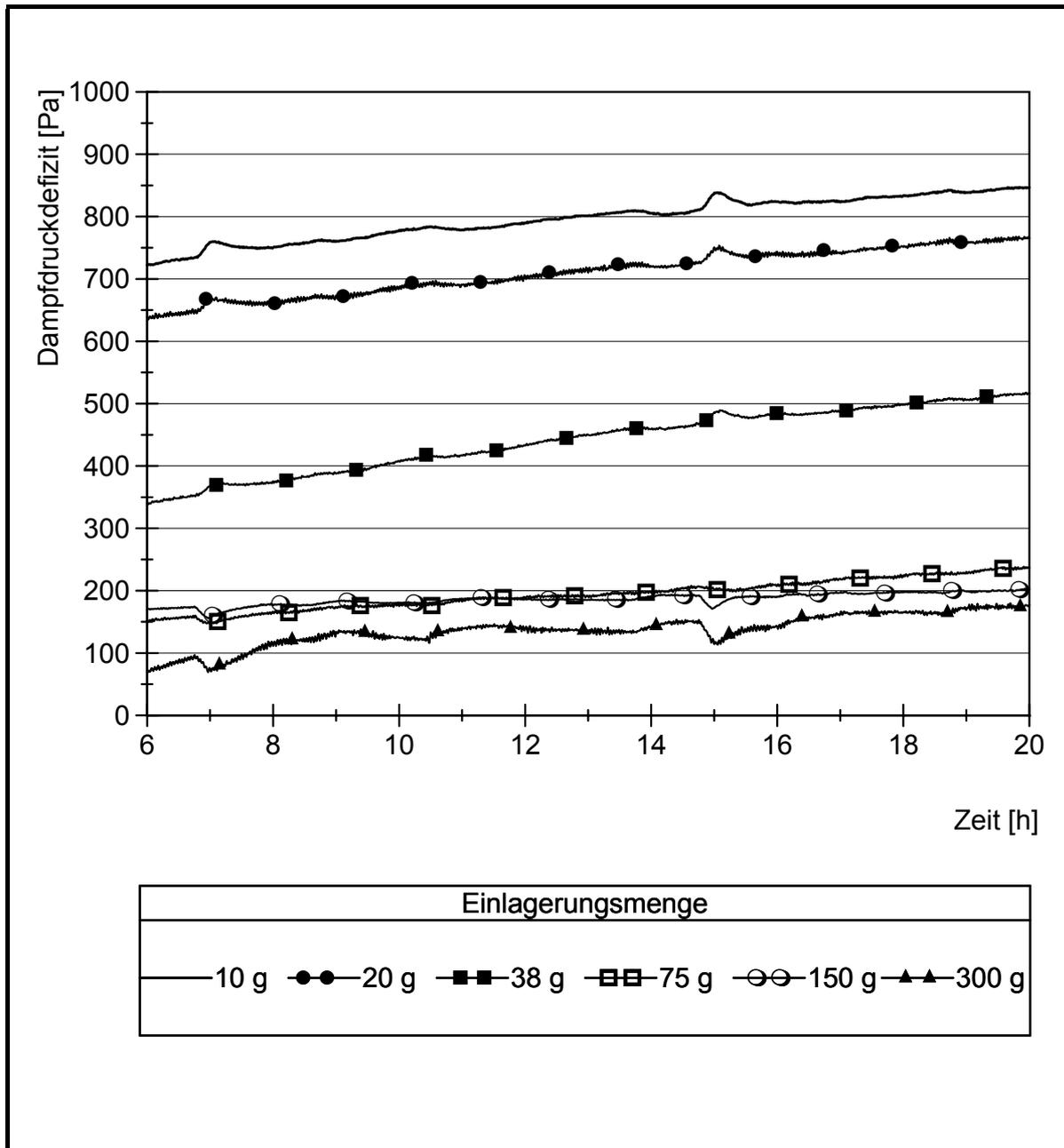


Abbildung 32: Dampfdruckdefizit bei gestaffelten Einlagerungsmengen von Spinat (Untersuchung S3).

### 3.2.3.4 Schwund

Mit zunehmender Einlagerungsmenge sank der prozentuale Gewichtsverlust von gelagertem Spinat (Abbildung 33). Allerdings stieg der Anteil an Kondenswasser, der durch Kondensation von Wasserdampf an den Küvettenwänden entstanden war. Um

keine Kondensation an den Küvettenwänden zu bekommen, müssen weniger als 75 g Spinat eingelagert werden.

Bei 300 g, 150 g und 75 g Einlagerungsmenge waren die Blätter zum großen Teil welk, besonders an der Oberfläche des Stapels und am Küvettenrand. Bei den Küvetten mit geringerer Einlagerungsmenge waren die Blätter bei der Auslagerung stark getrocknet.

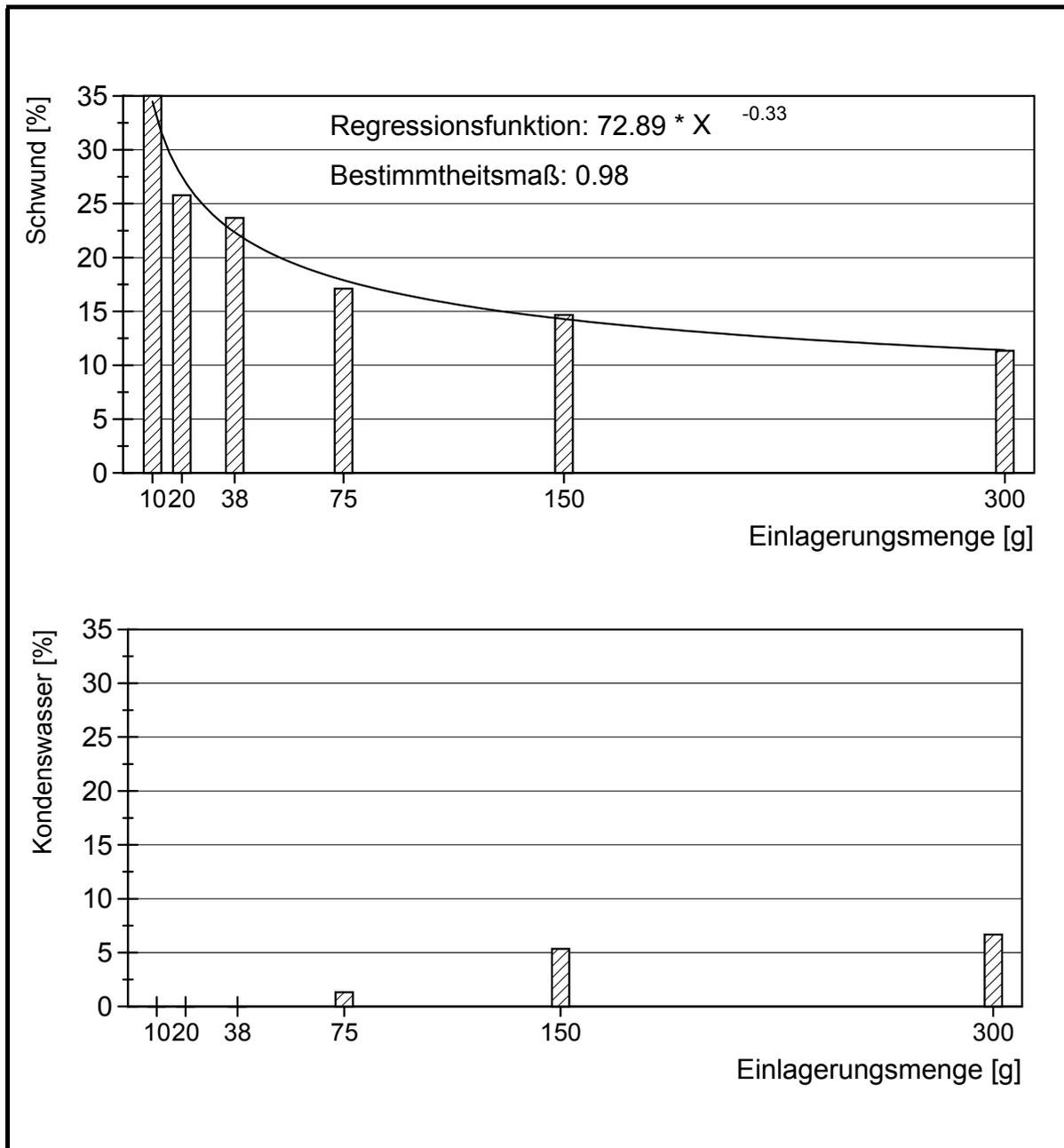


Abbildung 33: Schwund und Kondenswasser in den Küvetten bei gestaffelten Einlagerungsmengen von Spinat (Untersuchung S3).

### **3.3 Stangenbohnen**

3.3.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane

#### *3.3.1.1 Temperaturverlauf in den Küvetten*

Die Küvettenluft in Bohennähe hat die Temperaturschwingung verzögert mitgemacht, allerdings stärker gedämpft als bei den untersuchten Blattgemüsearten, besonders bei den Schwingungsdauern 50 min und 60 min (Abbildung 34, Untersuchungen B1a, b und c.). Mit zunehmender Schwingungsdauer wurde die Verzögerung kürzer. Das Temperaturniveau in Bohennähe lag unter dem im Schacht.

#### *3.3.1.2 Temperaturverteilung in den Küvetten*

Die Messung der Oberflächentemperaturen der gelagerten Stangenbohnen ergab eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Küvetten. Bei der Schwingungsdauer 40 min (Abbildung 35, Untersuchung B1a) war die Verteilung der Temperatur bei der Hysterese 2 K in beiden Etagen auf dem gleichen Niveau. Bei der Hysterese 1 K und bei konstantem Sollwert lag die Temperatur in der unteren Etage etwas höher als in der oberen. Eine Temperaturschwingung war hier nur bei der Hysterese 2 K zu erkennen.

Bei der Schwingungsdauer 50 min (Untersuchung B1b) waren die Temperaturen bei konstantem Sollwert in beiden Etagen im Niveau gleich, bei der Hysterese 1 K lagen sie in der unteren Etage etwas höher als in der oberen, eine Schwingung ist aber nicht zu erkennen. Bei der Hysterese 2 K sind die Oberflächentemperaturen in der oberen Etage der Schwingung relativ ausgeprägt gefolgt, in der unteren nicht (Abbildung 36).

Bei der Schwingungsdauer 60 min (Untersuchung B1c) lagen die Oberflächentemperaturen der untersuchten Stangenbohnen bei konstantem Sollwert in der unteren Etage etwas höher als in der oberen, bei den Hysteresen 1 K und 2 K lagen sie in etwa auf gleichem Niveau. Eine Schwingung der Oberflächentemperatur ist jedoch nur bei der Hysterese 2 K andeutungsweise zu erkennen (Abbildung 37).

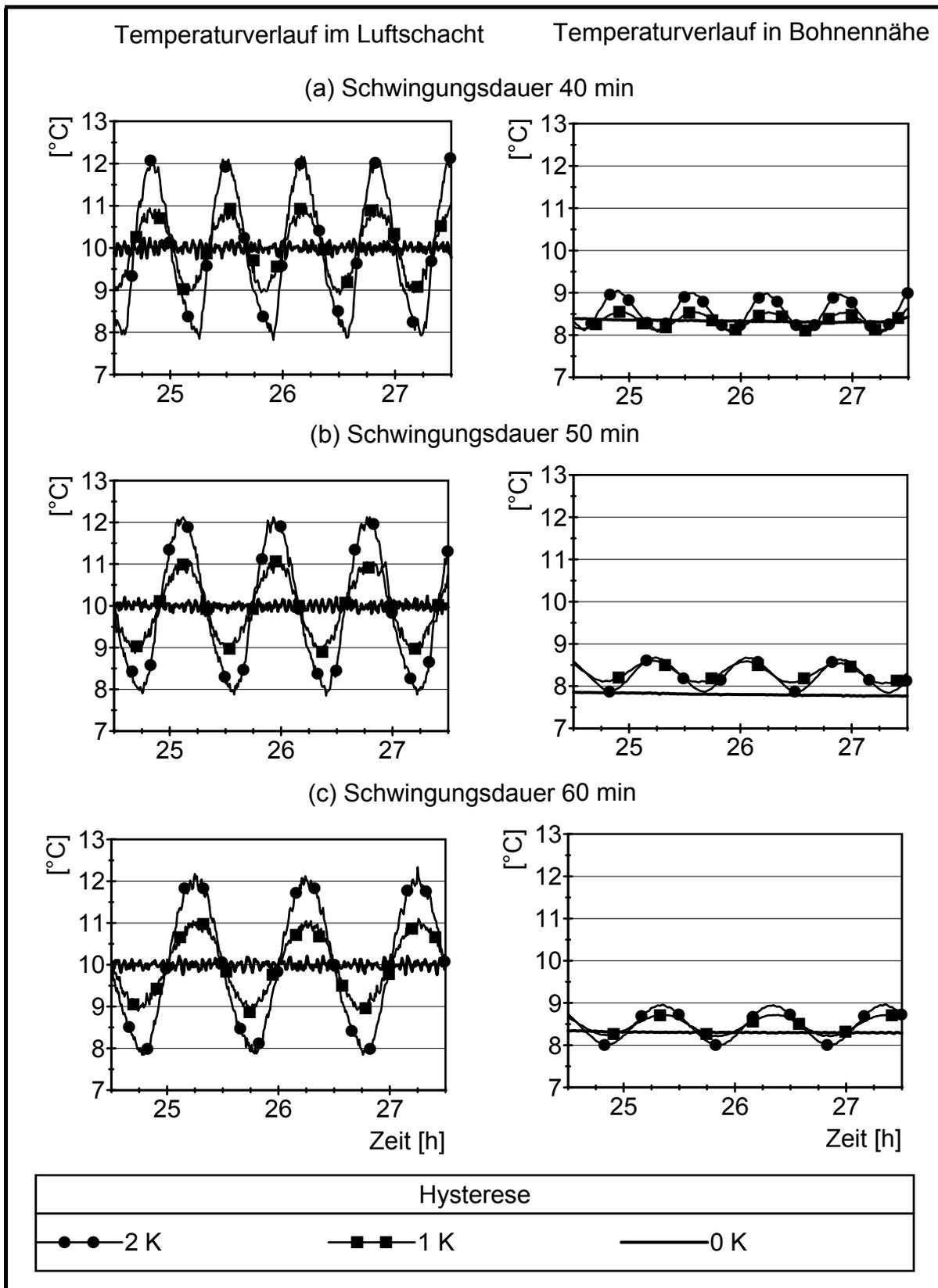


Abbildung 34: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Kuvettenschacht und in Stangenbohnnähe (Untersuchung B1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von drei Stunden Messdauer.

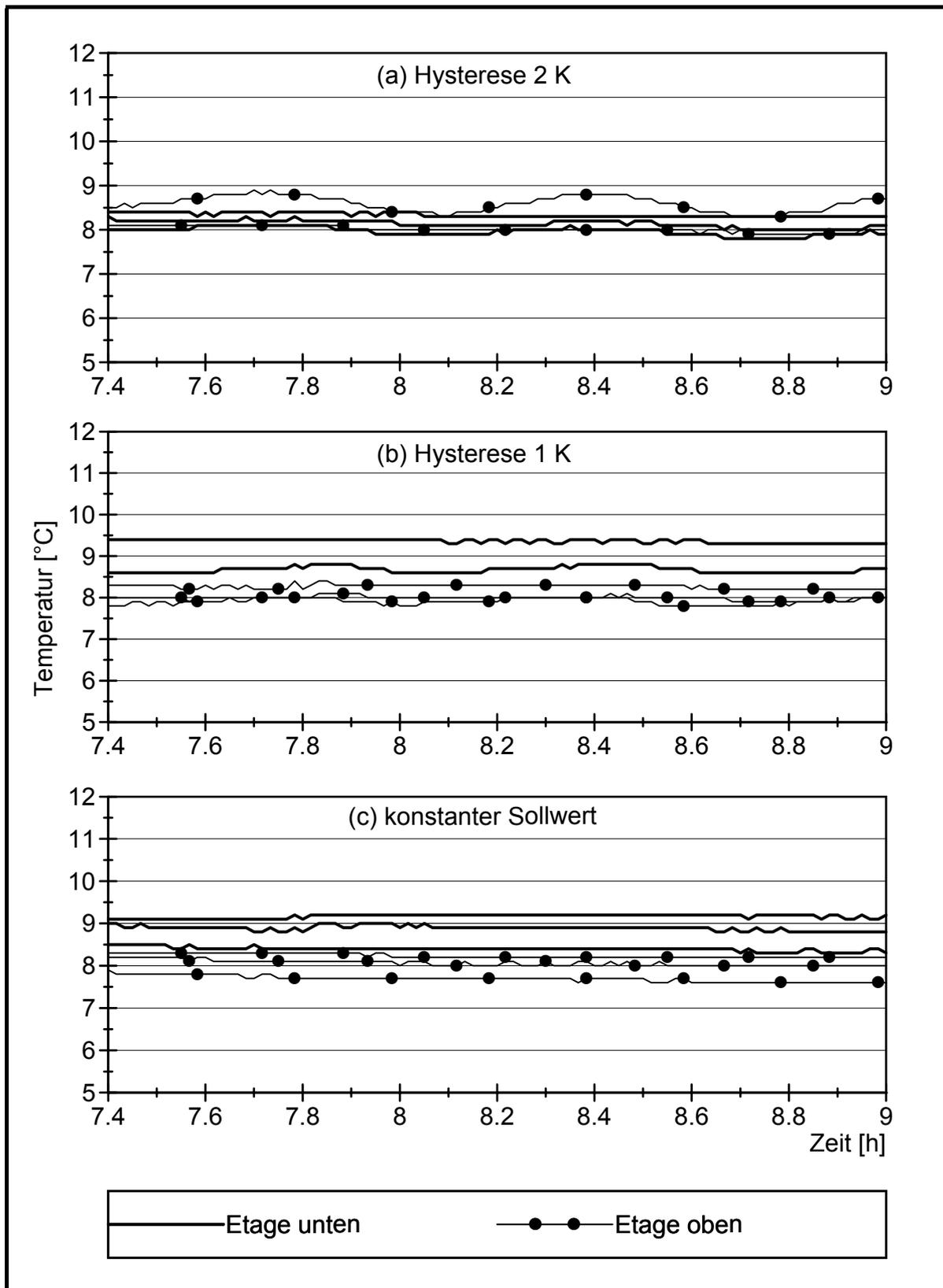


Abbildung 35: Verteilung der Oberflächentemperatur gelagerter Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Kuvette bei unterschiedlichen Hysteresen und einer Schwingungsdauer von 40 min (Untersuchung B1a).

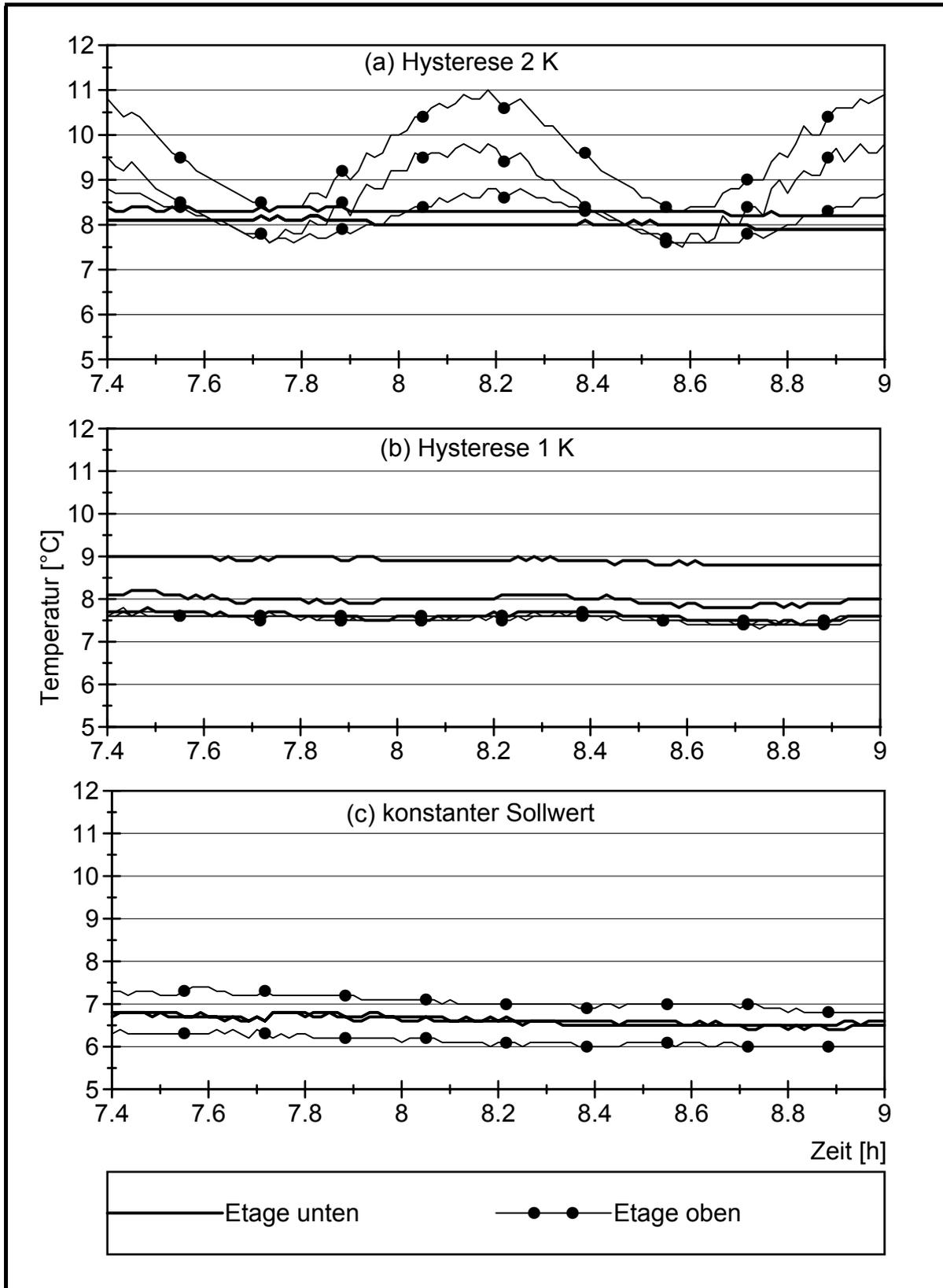


Abbildung 36: Verteilung der Oberflächentemperatur gelagerter Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Küvette. Schwingungsdauer 50 min (Untersuchung B1b).

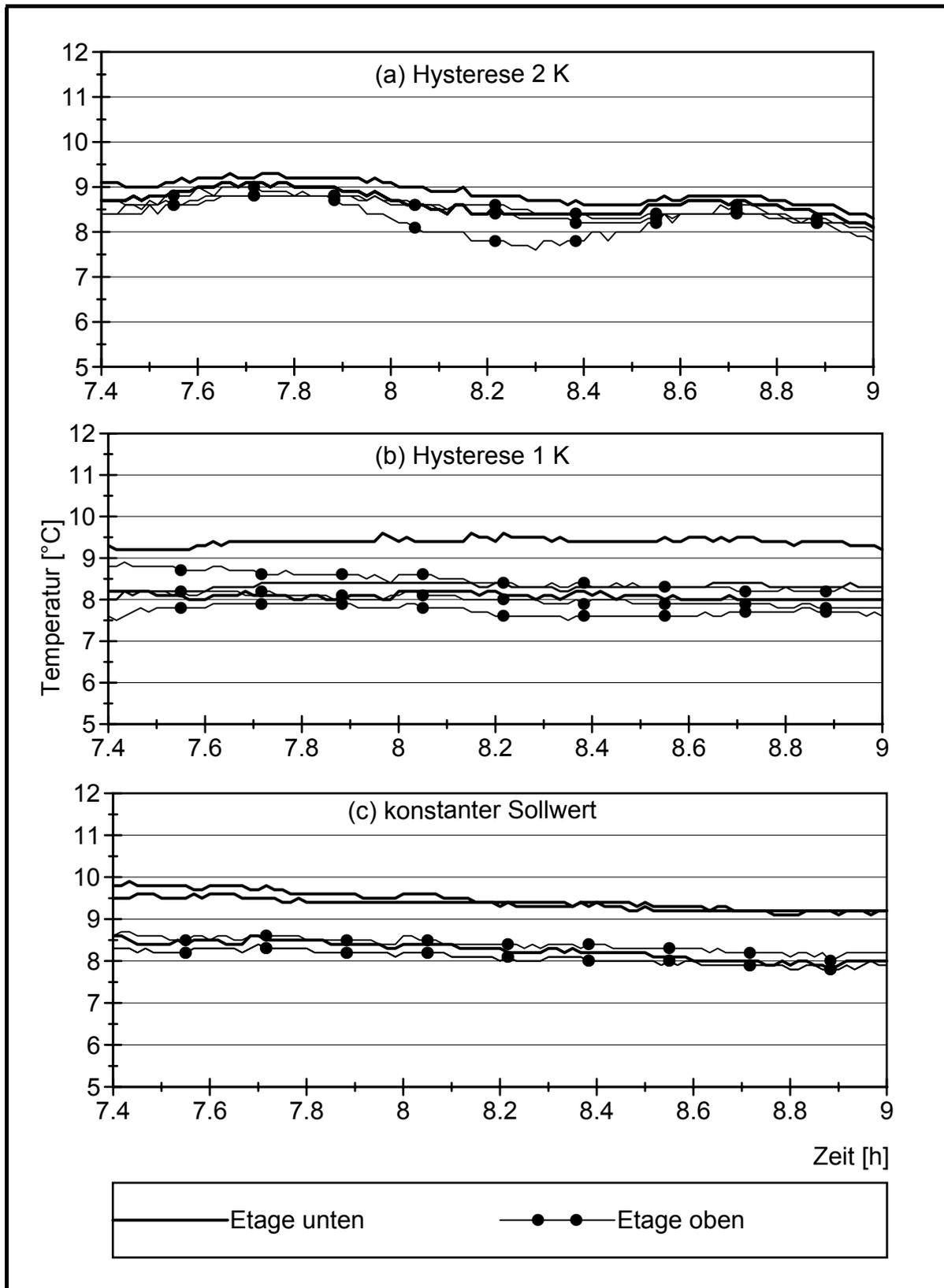


Abbildung 37: Verteilung der Oberflächentemperatur der gelagerten Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Küvette bei unterschiedlichen Hysteresen und einer Schwingungsdauer von 60 min (Untersuchung B1c).

### 3.3.1.3 *Atmung*

Bei keiner der untersuchten Schwingungsdauern konnten signifikante Unterschiede zwischen der Auswirkung von schwingender und konstanter Lagertemperatur auf die Atmung von Stangenbohnen festgestellt werden (Abbildung 38, Untersuchung B1). Bei der Schwingungsdauer 40 min verlief die Atmung der Stangenbohnen bei allen untersuchten Temperaturvarianten identisch (Abbildung 38a), bei den Schwingungsdauern 50 min (Abbildung 38b) und 60 min (Abbildung 38c) verlief die Atmung der Stangenbohnen, die bei schwankender Temperatur gelagert wurden, geringfügig höher als die bei konstanter Temperatur gelagerten.

### 3.3.1.4 *Transpiration*

Die Wasserdampf-Nettoabgabe der gelagerten Stangenbohnen verlief bei allen untersuchten Schwingungsdauern bei einer Hysterese von 2 K niedriger als bei der Hysterese 1 K und konstantem Sollwert (Abbildung 39, Untersuchung B1). Bei der Schwingungsdauer 40 min verlief die Wasserdampfabgabe bei der Hysterese 1 K und bei konstantem Sollwert identisch (Abbildung 39a, Untersuchung B1a und d). Bei den Schwingungsdauern 50 min (Abbildung 39b, Untersuchung B1b und e) und 60 min (Abbildung 39c, Untersuchung B1c und f) war die Wasserdampfabgabe der Stangenbohnen bei der Hysterese 1 K höher als bei konstanter Temperaturführung.

Bei allen untersuchten Schwingungsdauern lag das Dampfdruckdefizit bei 2 K Hysterese höher als bei 1 K oder konstanter Temperatur (Abbildung 40). Bei der Schwingungsdauer 40 min lag das Dampfdruckdefizit bei einer Hysterese von 1 K niedriger als bei konstanter Temperatur (Abbildung 40a). Bei den Schwingungsdauern 50 min (Abbildung 40b) und 60 min (Abbildung 40c) verliefen die Dampfdruckdefizite bei konstanter Temperatur und bei Hysterese 1 K nahezu gleich.

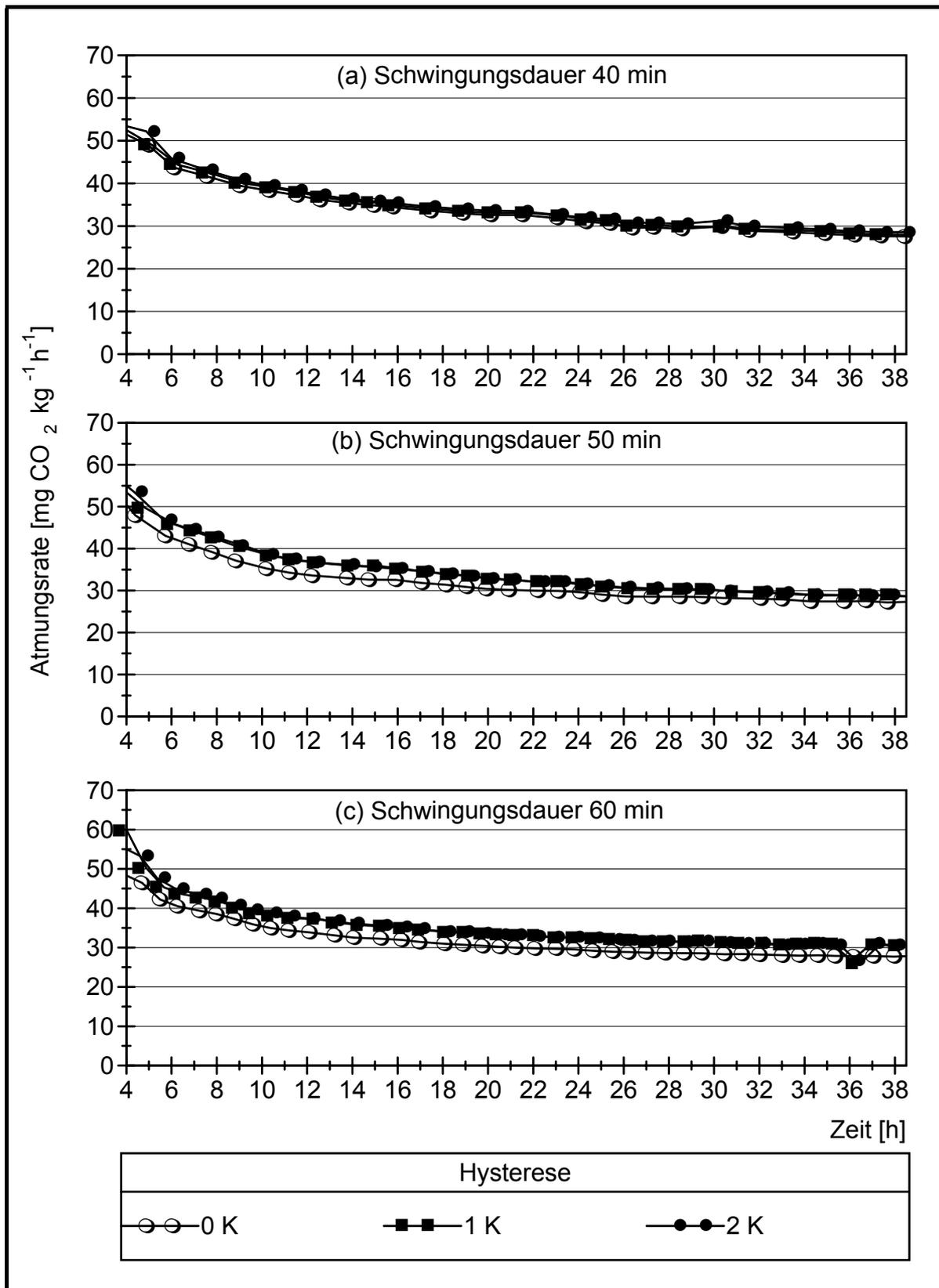


Abbildung 38: Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung B1).

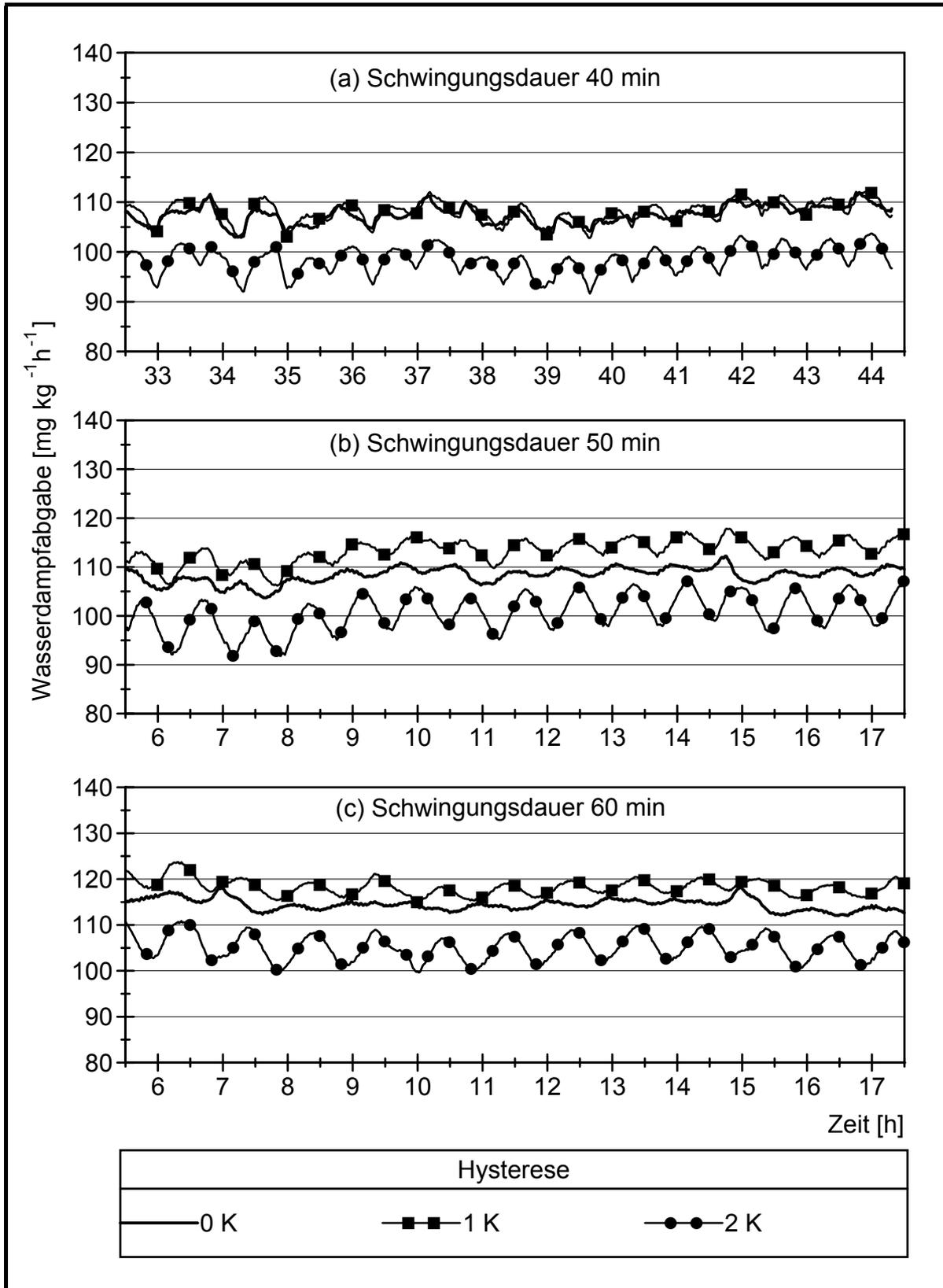


Abbildung 39: Wasserdampfabgabe gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung B1).

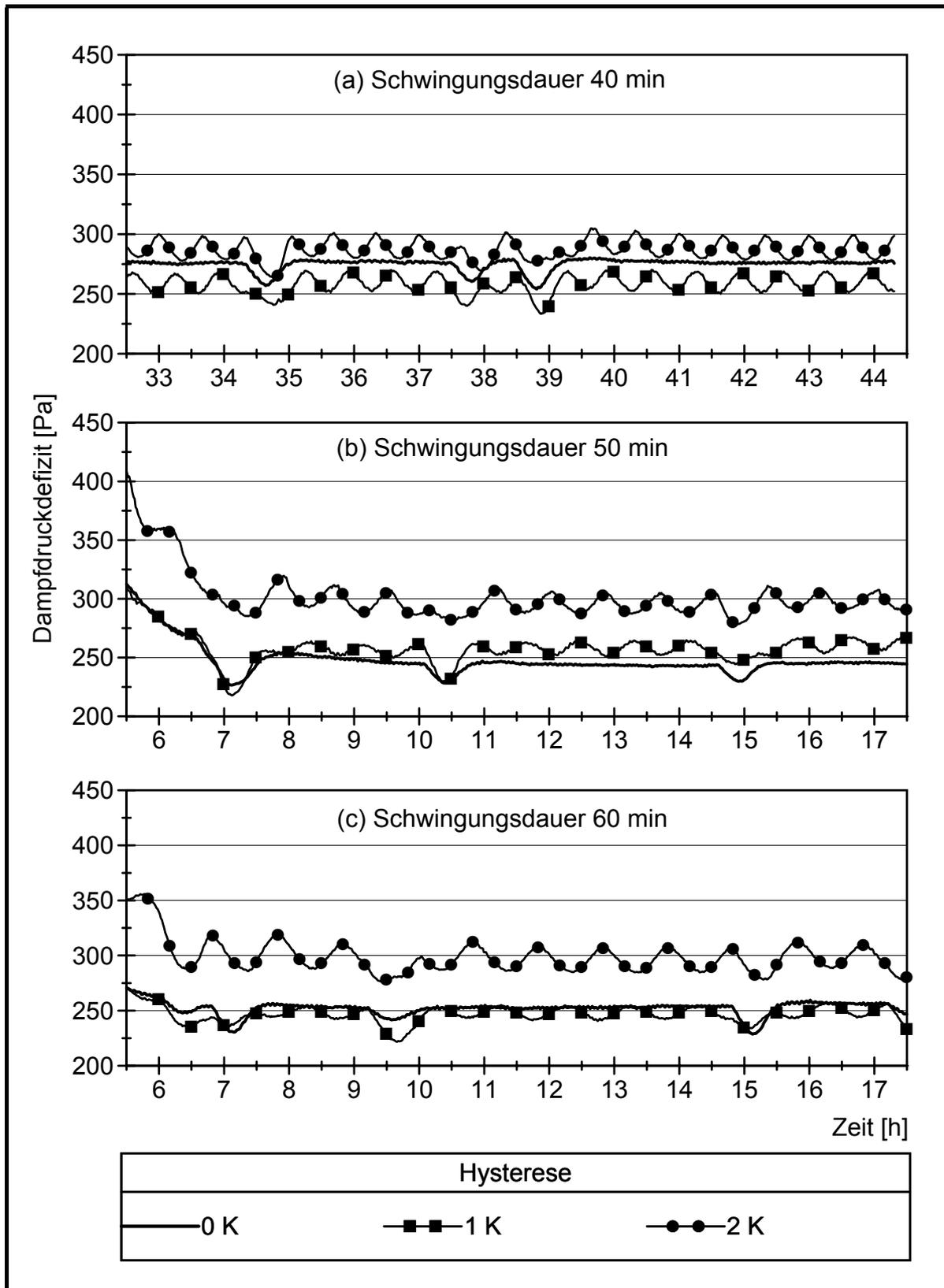


Abbildung 40: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei gelagerten Stangenbohnen (Untersuchung B1).

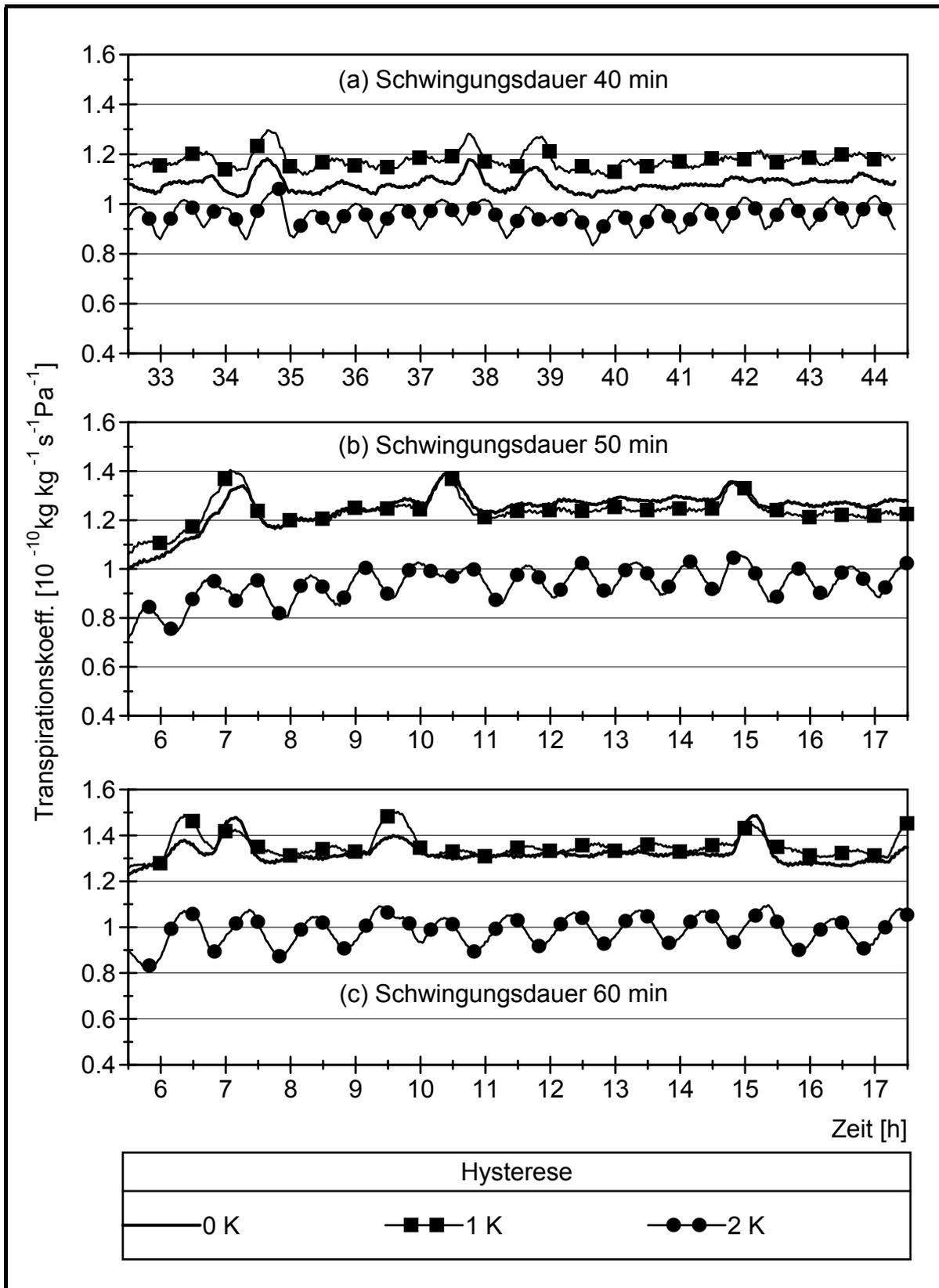


Abbildung 41: Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung B1).

Die Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen waren bei allen drei untersuchten Schwingungsdauern bei den Varianten mit einer Hysterese von 2 K am niedrigsten (Abbildung 41). Bei einer Schwingungsdauer von 40 min lag der Transpirationskoeffizient bei 1 K Hysterese höher als bei konstanter Temperatur (Abbildung 41a, Untersuchung B1a und d). Bei den Schwingungsdauern 50 min (Abbildung 41b, Untersuchung B1b und e) und 60 min (Abbildung 41c, Untersuchung B1c und f) verliefen die Transpirationskoeffizienten bei 1 K Hysterese und konstanter Temperatur fast gleich.

### 3.3.1.5 Schwund

Schwund und Kondenswasser der bei schwingenden Temperaturen gelagerten Stangenbohnen wurden jeweils zum Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur in Bezug gesetzt (Abbildung 42). Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten gefunden werden. Der prozentuale Gewichtsverlust gelagerter Stangenbohnen war wesentlich niedriger als bei den untersuchten Blattgemüsearten.

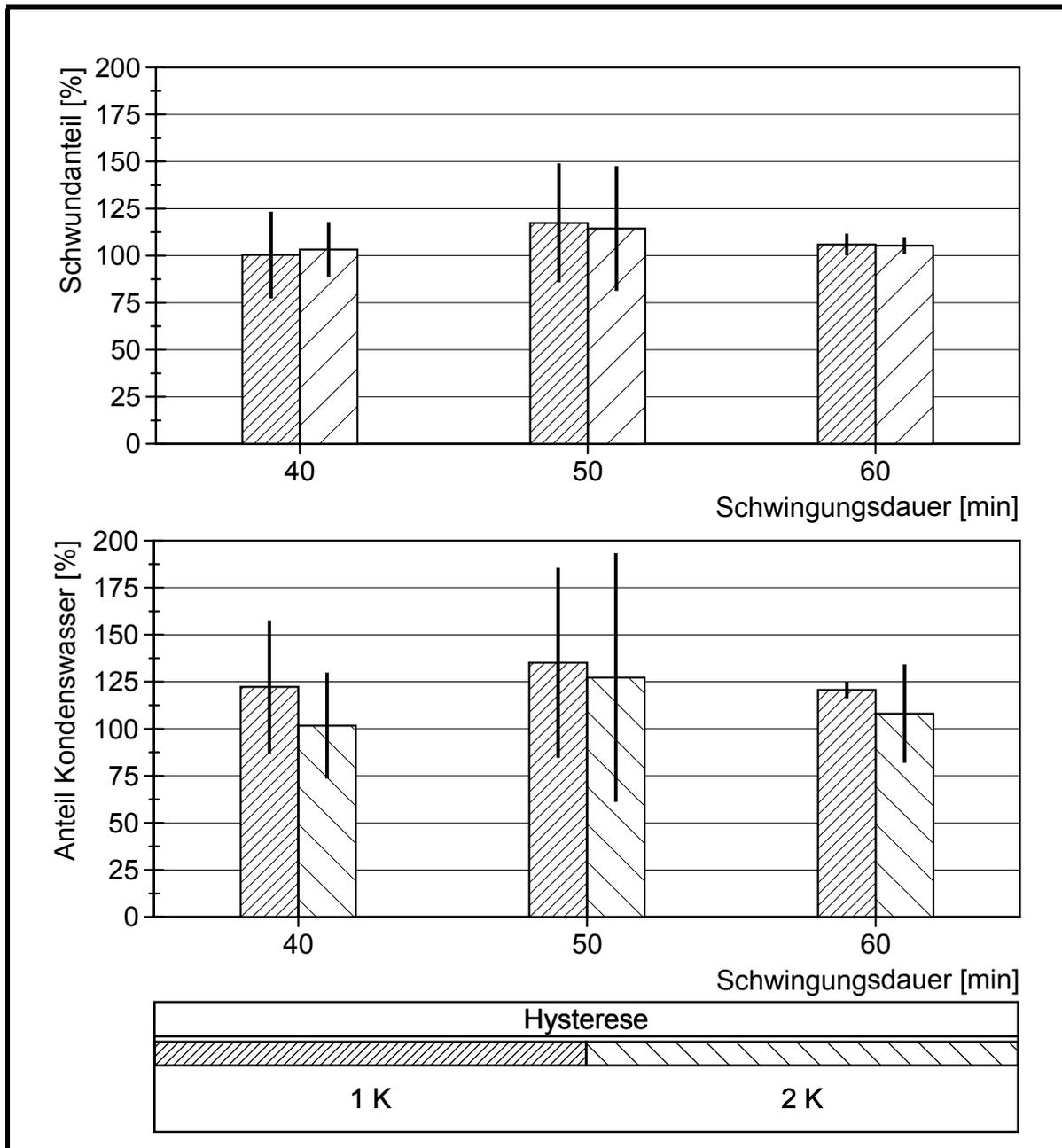


Abbildung 42: Anteile an Schwund von gelagerten Stangenbohnen und Kondenswasser in den Küvetten sowie deren Standardabweichungen bei schwingender Temperatur bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung B1).

### 3.3.2 Auswirkung gestaffelter Hysteresen bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden

#### 3.3.2.1 Temperaturverlauf

Abbildung 43 zeigt exemplarisch den Verlauf von drei Temperaturen in den oberen Etagen in Bohnennähe bei gestaffelten Hysteresen (Untersuchung B2). Die

Temperaturen lagen in Bohnennähe niedriger als im Luftschaft der Küvetten. Je größer die Hysterese war, um so mehr war die „Mittellinie“ der Temperaturschwingung nach unten verschoben. Die Spannweite der Temperaturschwankung in Bohnennähe war nahezu genauso groß wie im Luftschaft.

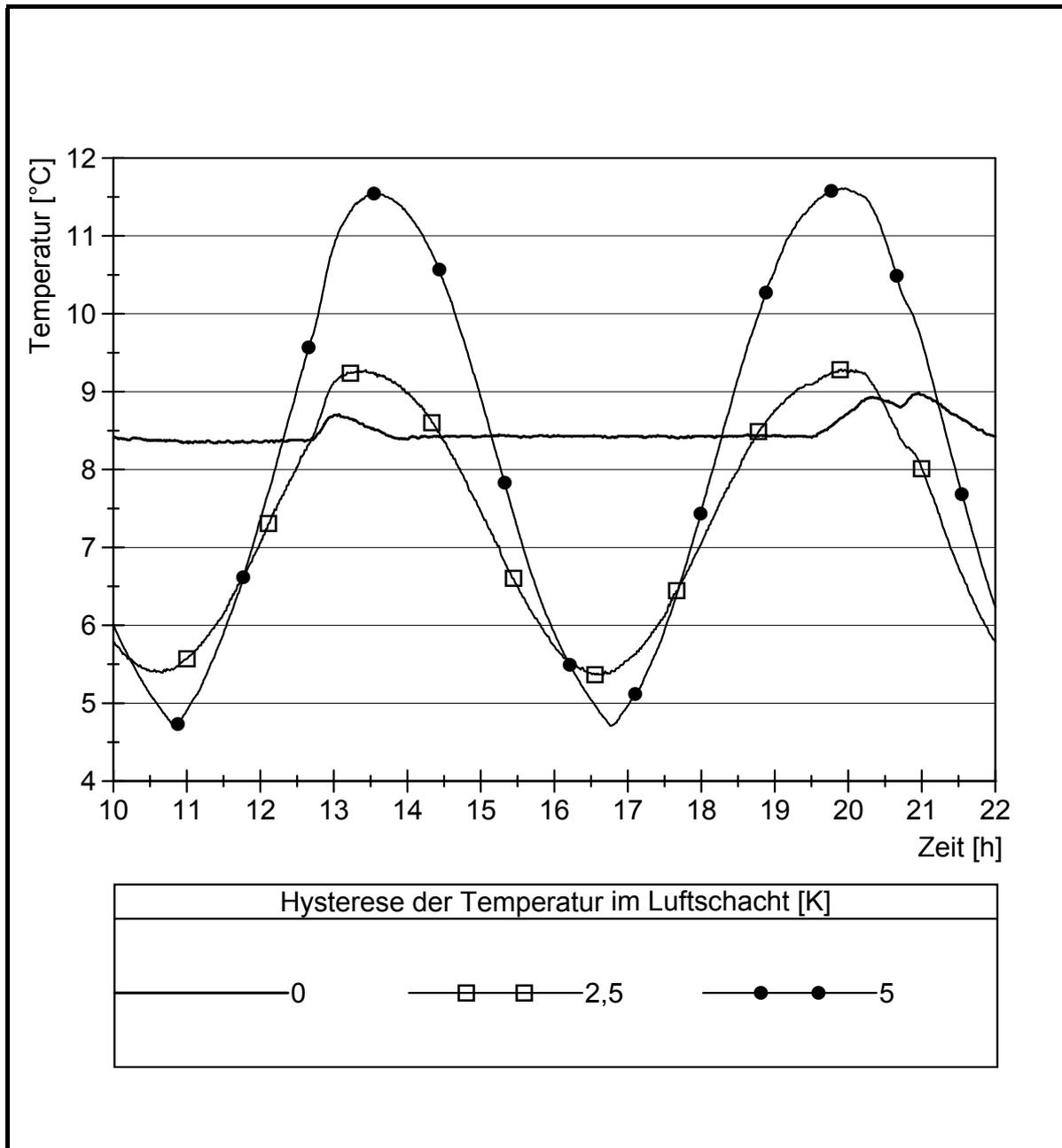


Abbildung 43: Temperaturverläufe in den oberen Etagen in Bohnennähe bei Temperaturschwankungen im Luftschaft mit gestaffelten Hysteresen (Untersuchung B2). Dargestellt sind drei exemplarische Kurven für einen repräsentativen Ausschnitt von 12 Stunden Messdauer.

### 3.3.2.2 *Atmung*

In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind die gemessenen Atmungsraten von Stangenbohnen mit Berechnungen der  $Q_{10}$ -Regel verglichen. Es wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 1,98 ermittelt und den Berechnungen zugrunde gelegt. Die Grafiken veranschaulichen, dass die tatsächlich gemessenen Atmungsraten der gelagerten Stangenbohnen sehr nahe bei den berechneten Kurven lagen. Nur bei den Hysteresen 4,5 K und 5 K waren die Abweichungen größer als bei den geringeren Hysteresen.

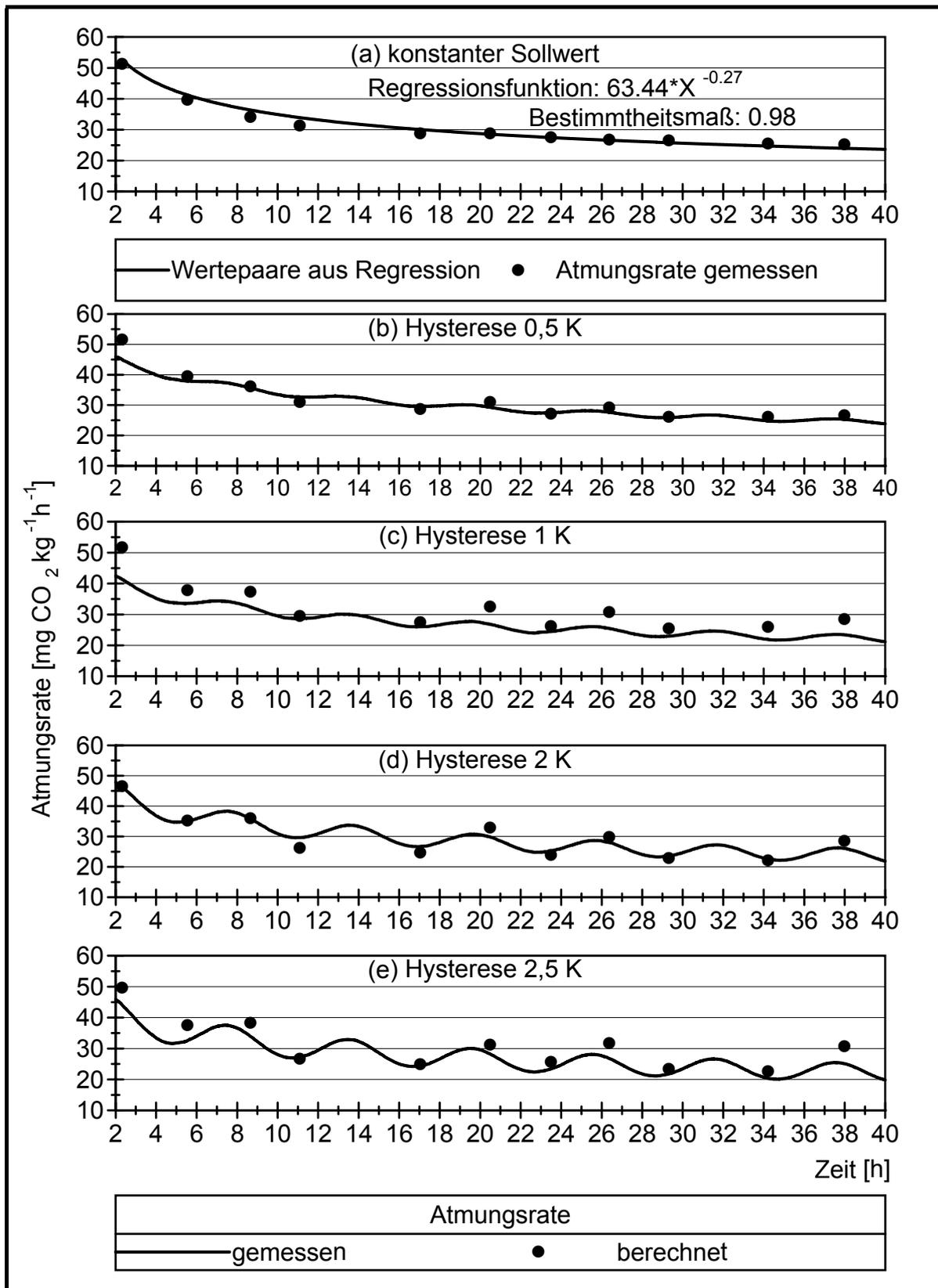


Abbildung 44: Gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen von 0,5 K bis 2,5 K (Untersuchung B2). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

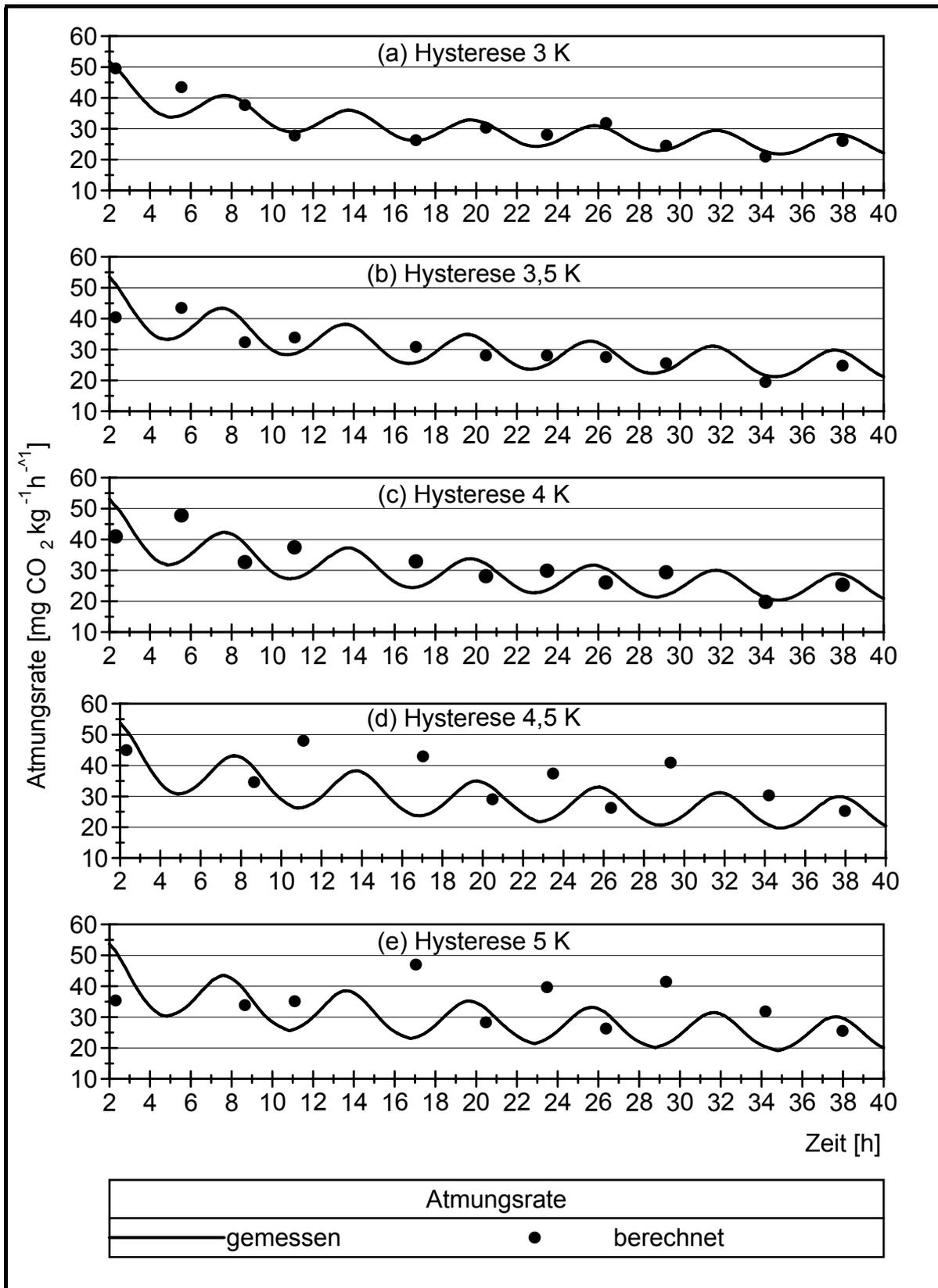


Abbildung 45: Gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen von 3 K bis 5 K. Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt (Abbildung 44).

### 3.3.2.3 Transpiration

Bei der Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen konnte festgestellt werden, dass die Spannweite der Schwankung in der Wasserdampf-Nettoabgabe mit steigender Hysterese der Schwankung der Lufttemperatur größer wurde (Abbildung 46).

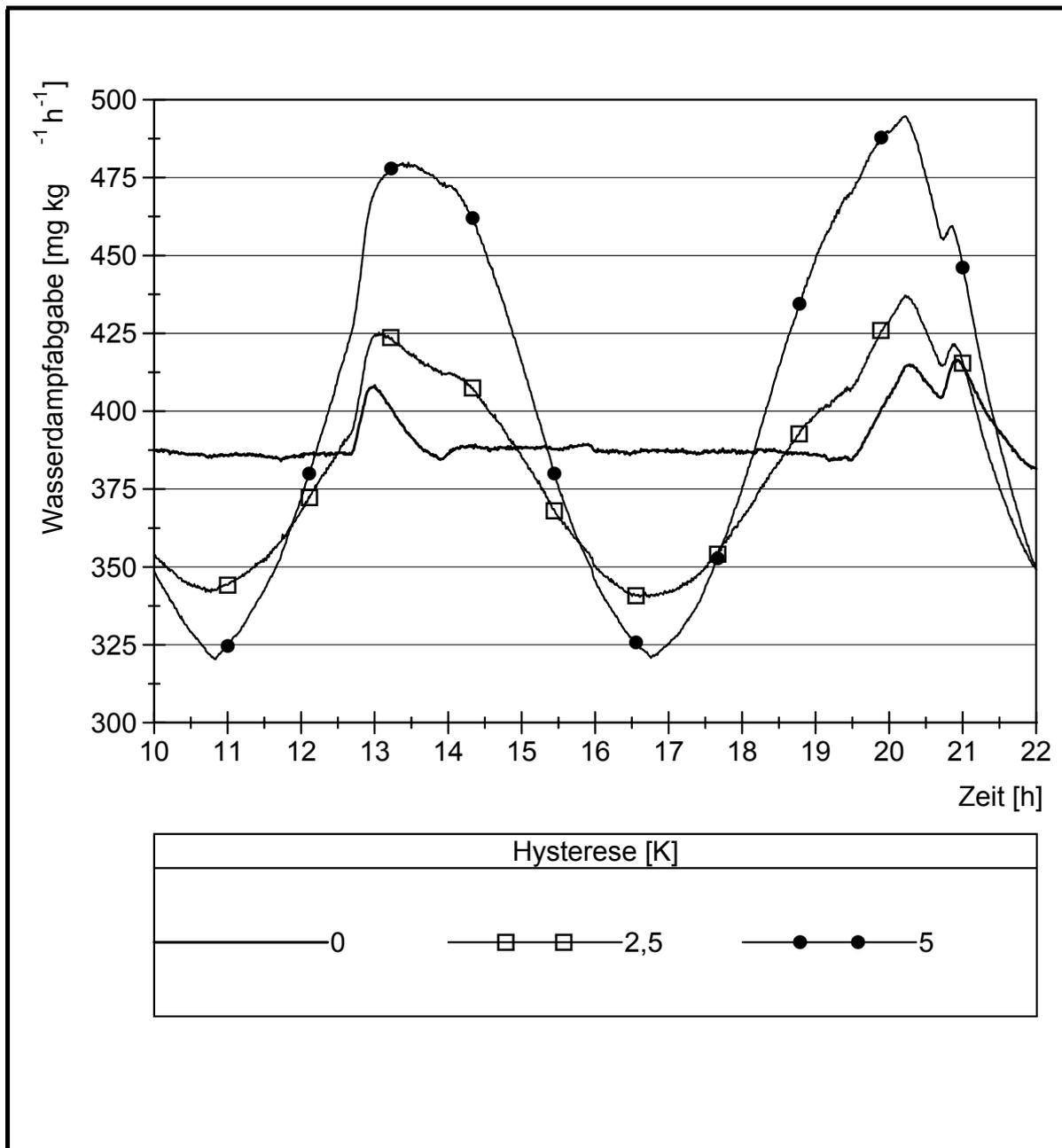


Abbildung 46: Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen (Untersuchung B2). Dargestellt sind drei exemplarische Kurven für einen repräsentativen Ausschnitt von zwölf Stunden Messdauer.

Das Dampfdruckdefizit lag bei größerer Hysterese höher als bei geringerer. Es konnte aber keine direkte Abstufung in Abhängigkeit von der Hysterese der Temperaturschwankung festgestellt werden (Abbildung 47).

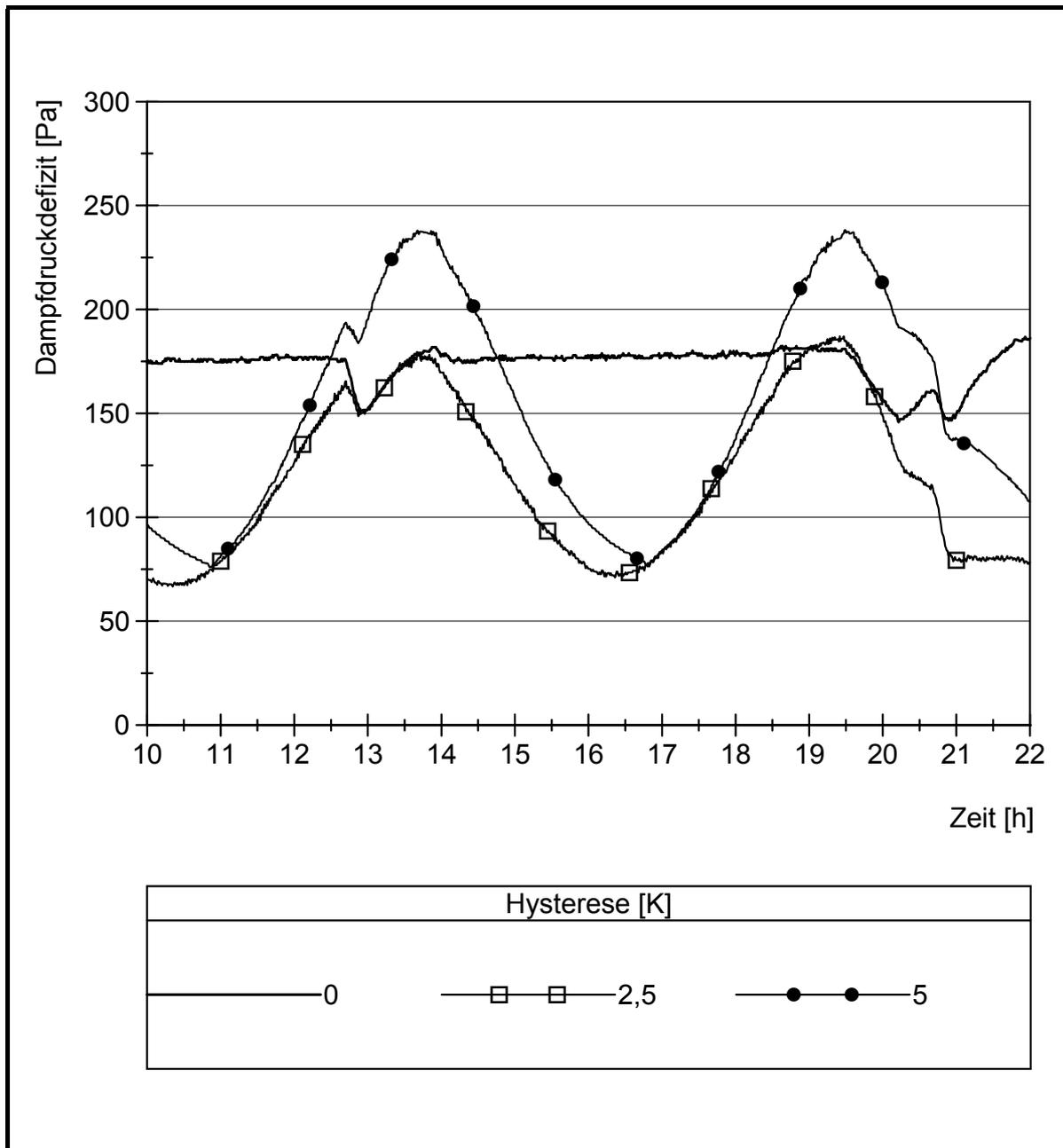


Abbildung 47: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen bei Stangenbohnen (Untersuchung B2). Dargestellt sind drei exemplarische Kurven.

Auch bei den Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen (Abbildung 48) ließ sich keine Abstufung in Abhängigkeit von der Hysterese erkennen.

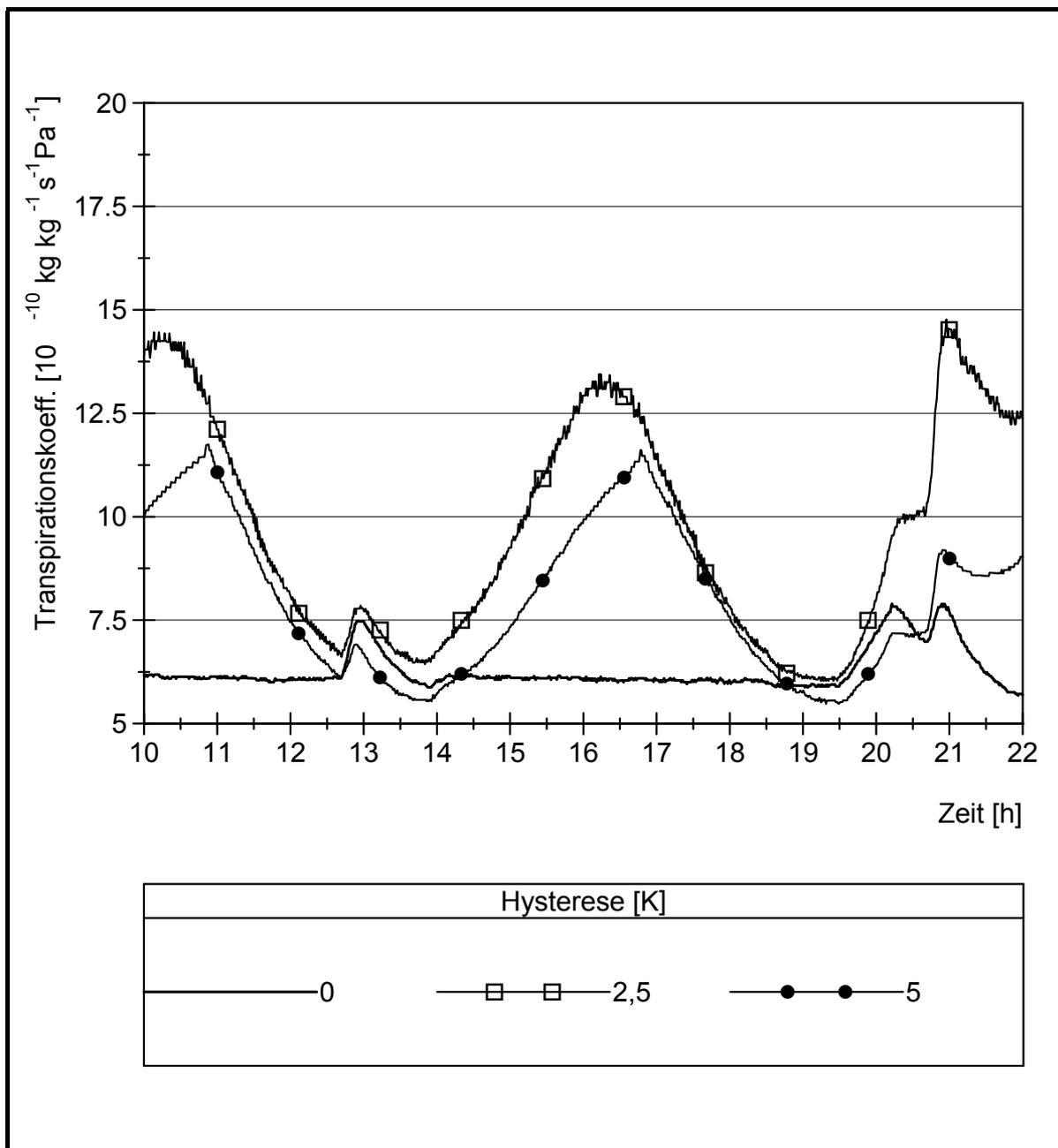


Abbildung 48: Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen von sechs Stunden Schwingungsdauer und gestaffelten Hysteresen (Untersuchung B2). Dargestellt sind drei exemplarische Kurven für einen repräsentativen Ausschnitt von 12 Stunden Messdauer.

### 3.3.2.4 Schwund

Die Tendenz, dass bei steigender Hysterese sowohl der Gesamtschwund gelagerter Stangenbohnen als auch der Anteil an Feuchtigkeitsverlust durch Kondensation von Wasserdampf an den Küvettenwänden größer wurde, ist deutlich zu erkennen (Abbildung 49).

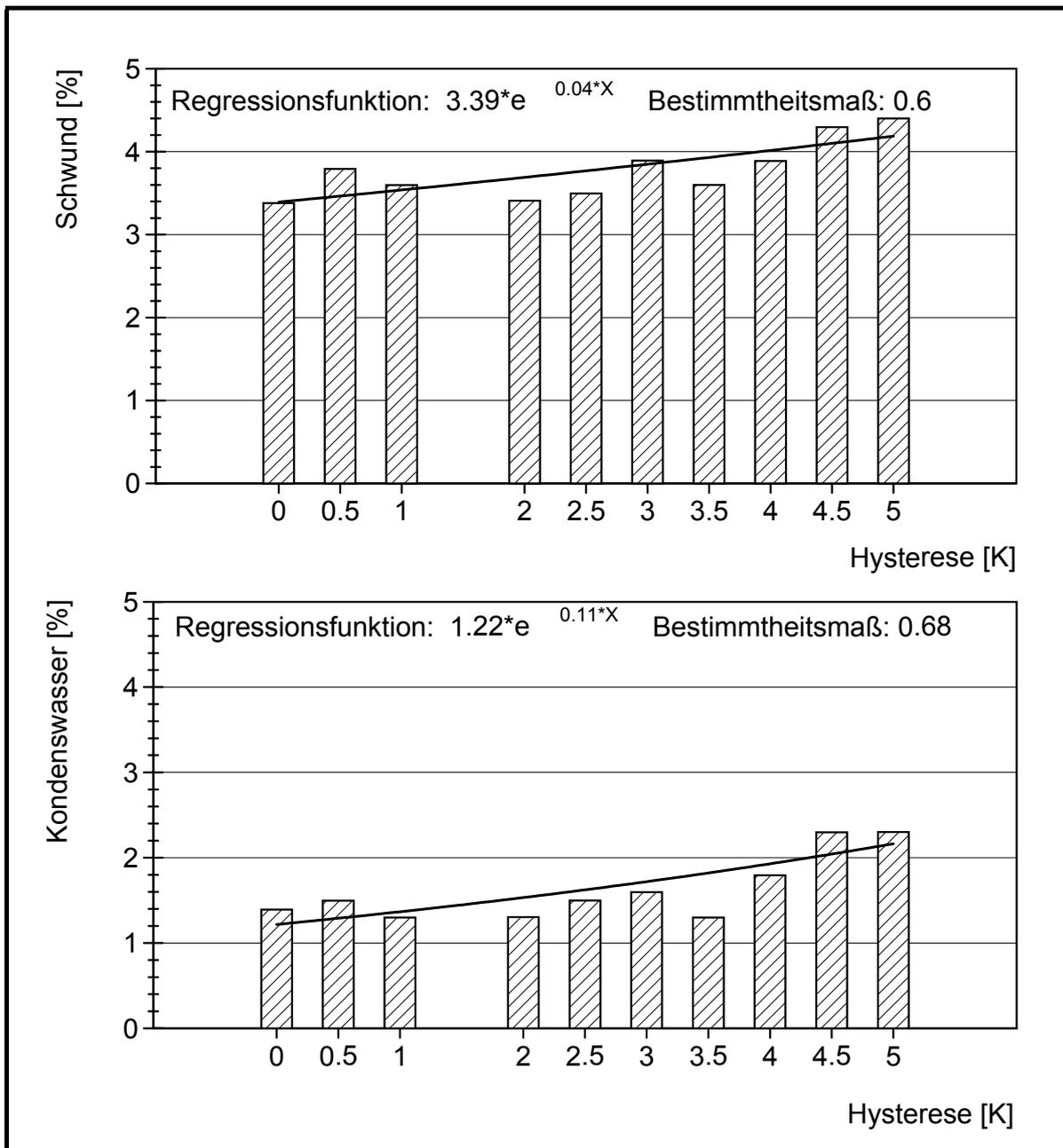


Abbildung 49: Schwund gelagerter Stangenbohnen sowie Kondenswasser in den Küvetten bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hysteresen (Untersuchung B2).

### **3.4 Radies**

3.4.1 Einfluss der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen auf den Temperaturverlauf in den Küvetten und die physiologische Reaktion der Pflanzenorgane

#### *3.4.1.1 Temperaturverlauf bei den Schwingungsdauern 1 h, 6 h, 12 h*

Bei allen untersuchten Schwingungsdauern lag das Temperaturniveau in Radiesnähe in der oberen Etage unterhalb von dem im Schacht (Abbildung 50). Trotzdem hat die Lufttemperatur in Radiesnähe die Schwingung gedämpft mitgemacht. Bei der Schwingungsdauer von einer Stunde war die Dämpfung groß, besonders im oberen Bereich. Die Maxima der Temperaturen lagen nur bei etwa 9,5 °C bei der Hysterese 3 K, im Gegensatz zu circa 11 °C bei den Schwingungsdauern sechs Stunden sowie 12 Stunden. Die Zeitverzögerung war bei den drei Schwingungsdauern minimal (Untersuchung R1).

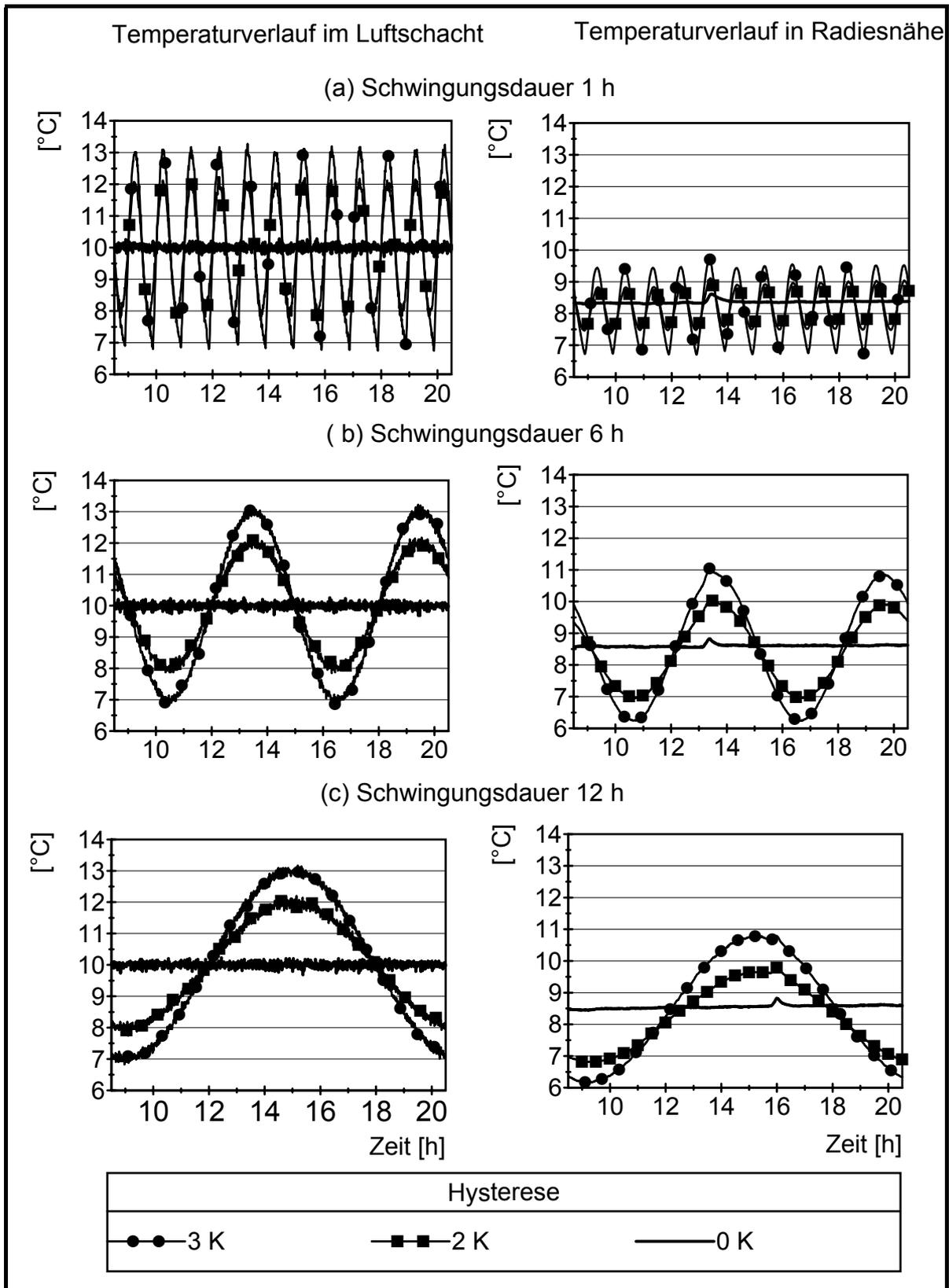


Abbildung 50: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Luftschacht und in Radiesnähe bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung R1). Gezeigt wird ein repräsentativer Ausschnitt von 12 Stunden Messdauer.

### 3.4.1.2 *Atmung*

Abbildung 51 zeigt gemessene und berechnete Atmungsraten bei einer Schwingungsdauer von einer Stunde (Untersuchung R1a). Bei der Hysterese 2 K lagen die Atmungsraten der Radies zu Beginn der Messung höher als die berechneten Kurven (Abbildung 51b). Mit zunehmender Messdauer lagen die gemessenen Werte immer näher an der berechneten Kurve. Bei der Hysterese 3 K lagen die gemessenen Werte bereits nach ca. fünf Stunden Messdauer relativ genau auf der berechneten Kurve (Abbildung 51c).

Bei einer Schwingungsdauer von sechs Stunden kombiniert mit den Hysteresen 2 K (Abbildung 52b) und 3 K (Abbildung 52c) folgten die gemessenen Werte für die CO<sub>2</sub>-Nettoabgabe schon nach kurzer Messzeit der berechneten Kurve (Untersuchung R1b). Allerdings hat die Atmung der Radies nach ca. 20 Stunden Messdauer verzögert auf Temperaturänderungen reagiert.

Die gemessenen und berechneten Atmungsraten der Radies, die bei Temperaturschwankungen mit 12 Stunden Schwingungsdauer gelagert wurden, sind in Abbildung 53 aufgezeichnet (Untersuchung R1c). Tendenziell lagen die gemessenen Werte geringfügig niedriger als die berechneten Kurven, besonders bei der Hysterese 2 K (Abbildung 53b). Aber grundsätzlich reagierte die Atmung der gelagerten Radies gemäß der Q<sub>10</sub>-Regel auf Temperaturänderungen. Der Q<sub>10</sub>-Wert lag bei 2,25.

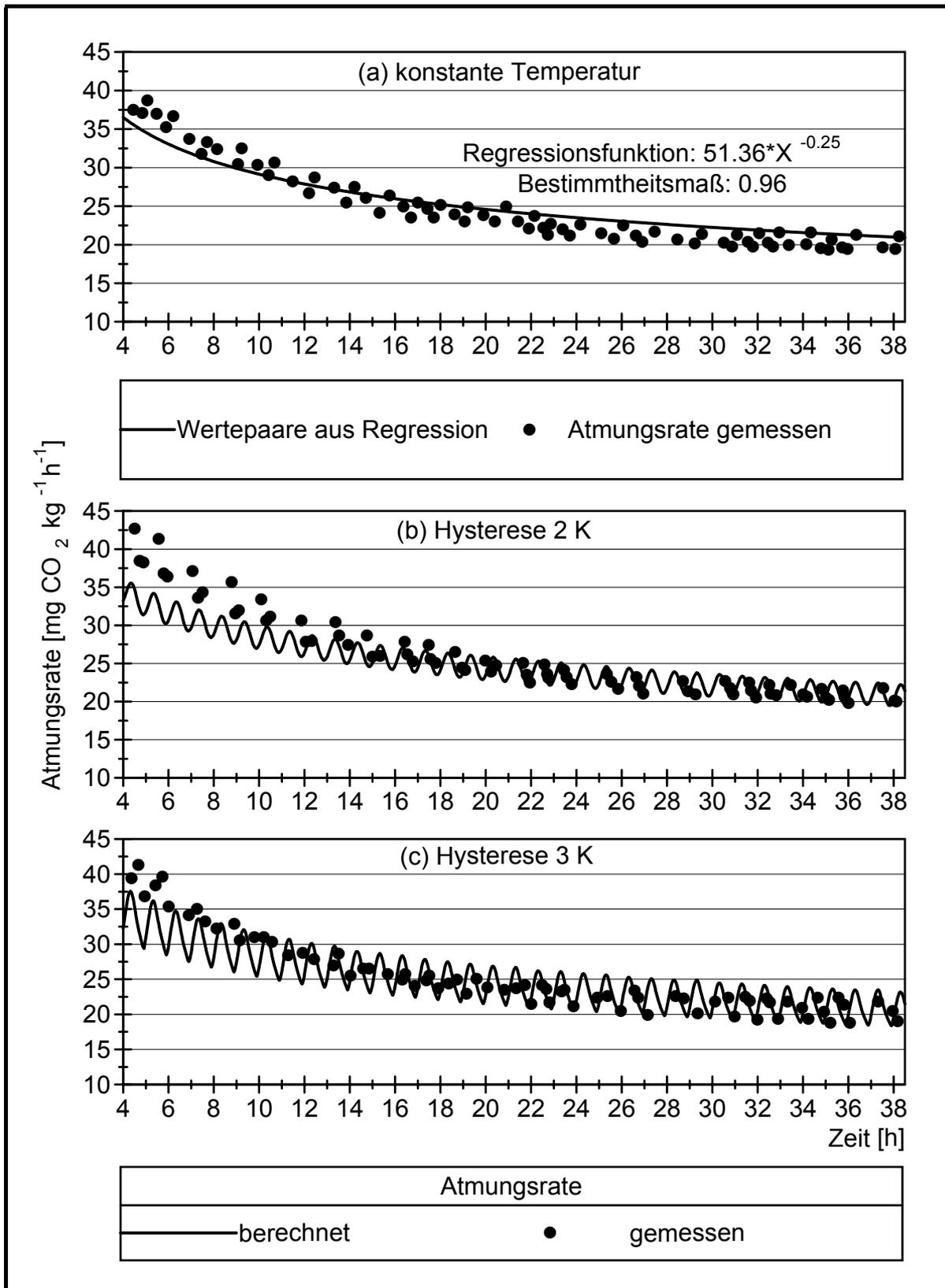


Abbildung 51: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von einer Stunde (Untersuchung R1a). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

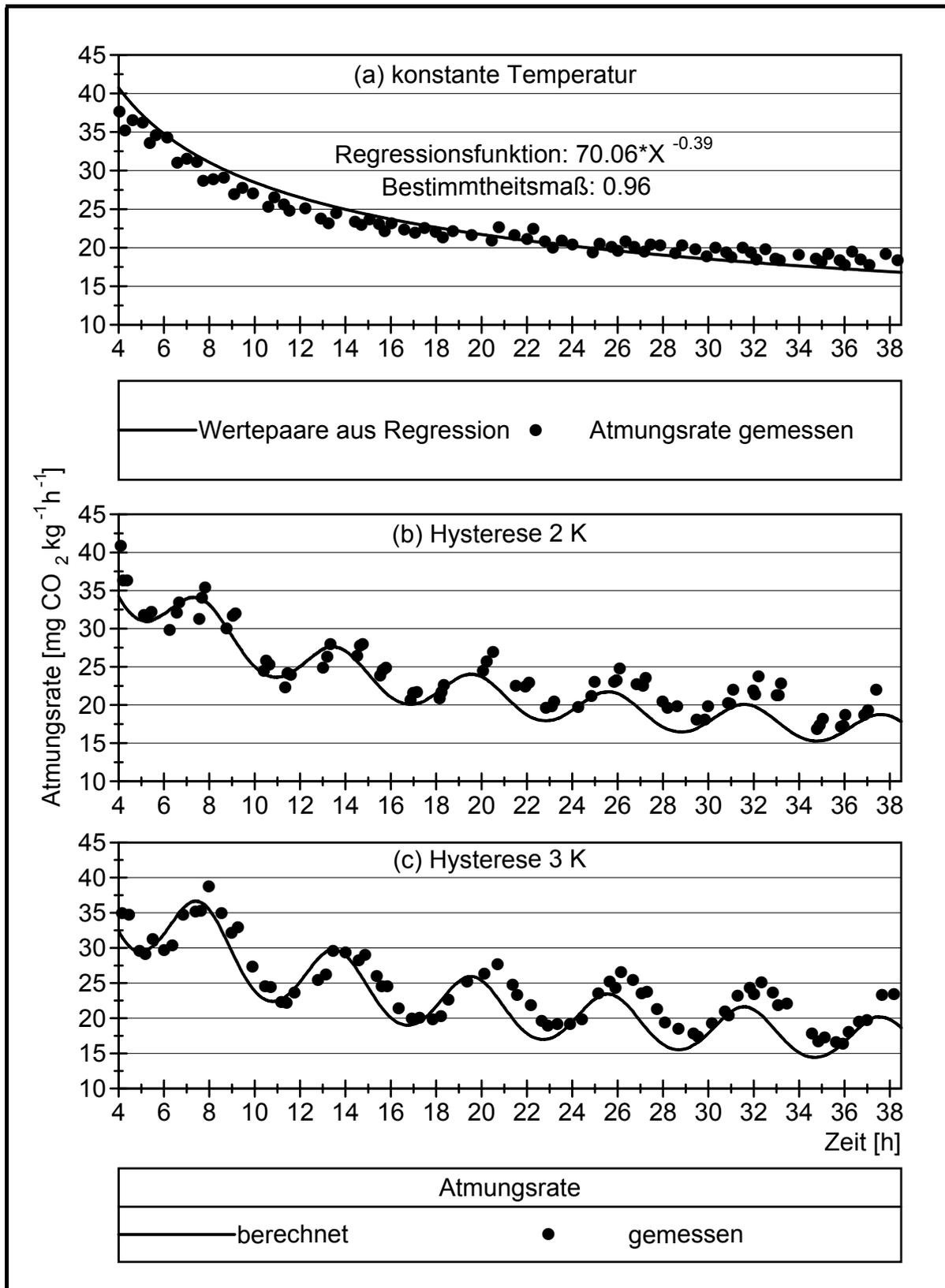


Abbildung 52: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von sechs Stunden (Untersuchung R1b). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

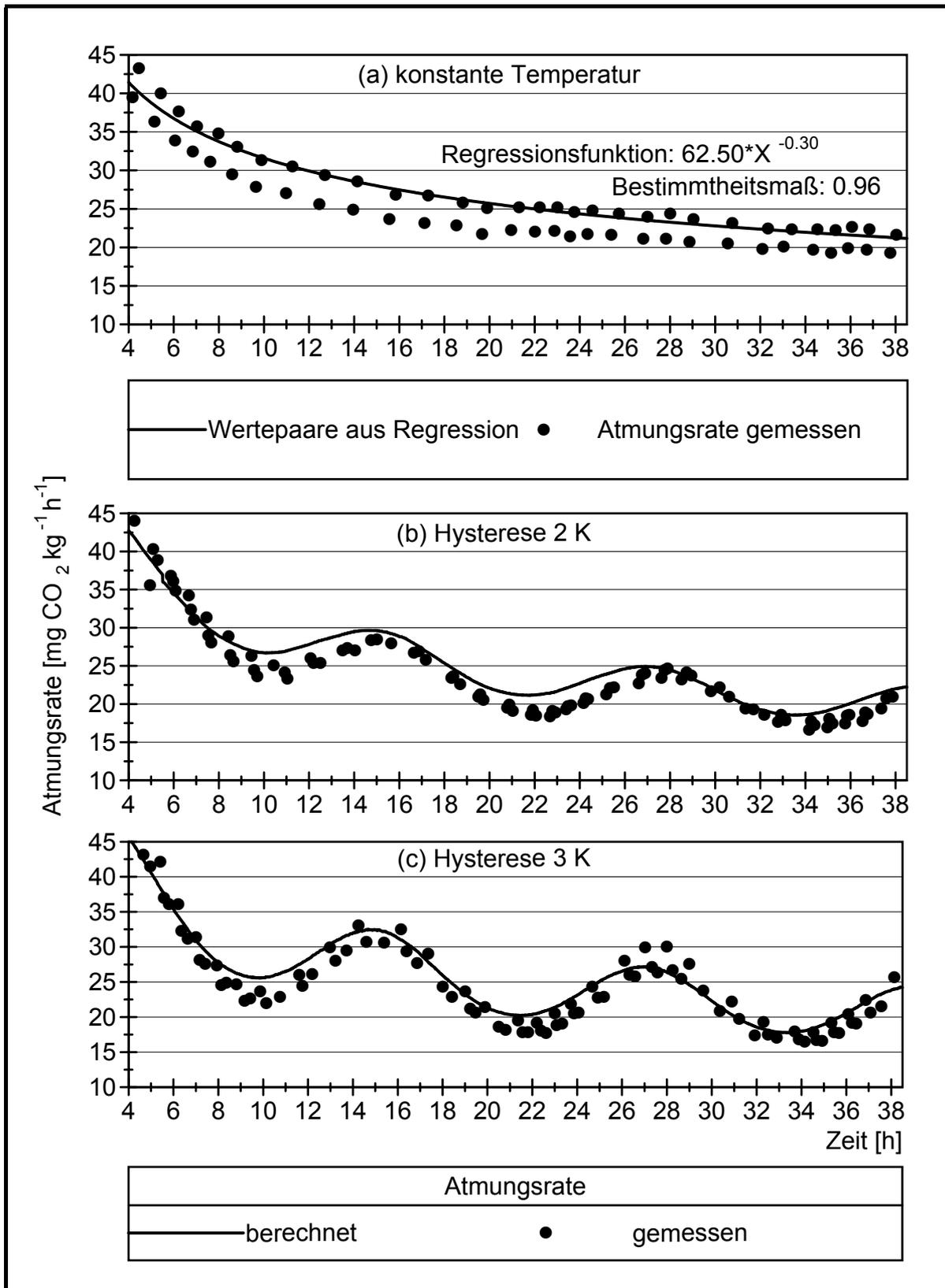


Abbildung 53: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von 12 Stunden (Untersuchung R1c). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

### 3.4.1.3 *Transpiration*

Bei der Darstellung der Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Radies (Abbildung 54) bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen von 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K wird besonders deutlich, dass die Schwankungsbreite der Wasserdampfabgabe mit zunehmender Schwingungsdauer größer wurde, und zwar im oberen Bereich. Zwischen den Schwingungsdauern sechs Stunden (Abbildung 54b, Untersuchung R1b) sowie zwölf Stunden (Abbildung 54c, Untersuchung R1c) herrschte diesbezüglich kein großer Unterschied, jedoch bei der untersuchten Schwingungsdauer von einer Stunde (Abbildung 54a, Untersuchung R1a) zeigte sich dieser Effekt sehr deutlich. Bei einer Schwingungsdauer von einer Stunde wurde die Wasserdampfabgabe der Radies bei sinkender Temperatur gesenkt, sie stieg aber bei steigender Temperatur nicht in vollem Maße wieder an. Bei allen untersuchten Schwingungsdauern blieben die maximalen sowie die minimalen Werte über die gesamte Versuchsdauer hinweg auf demselben Niveau.

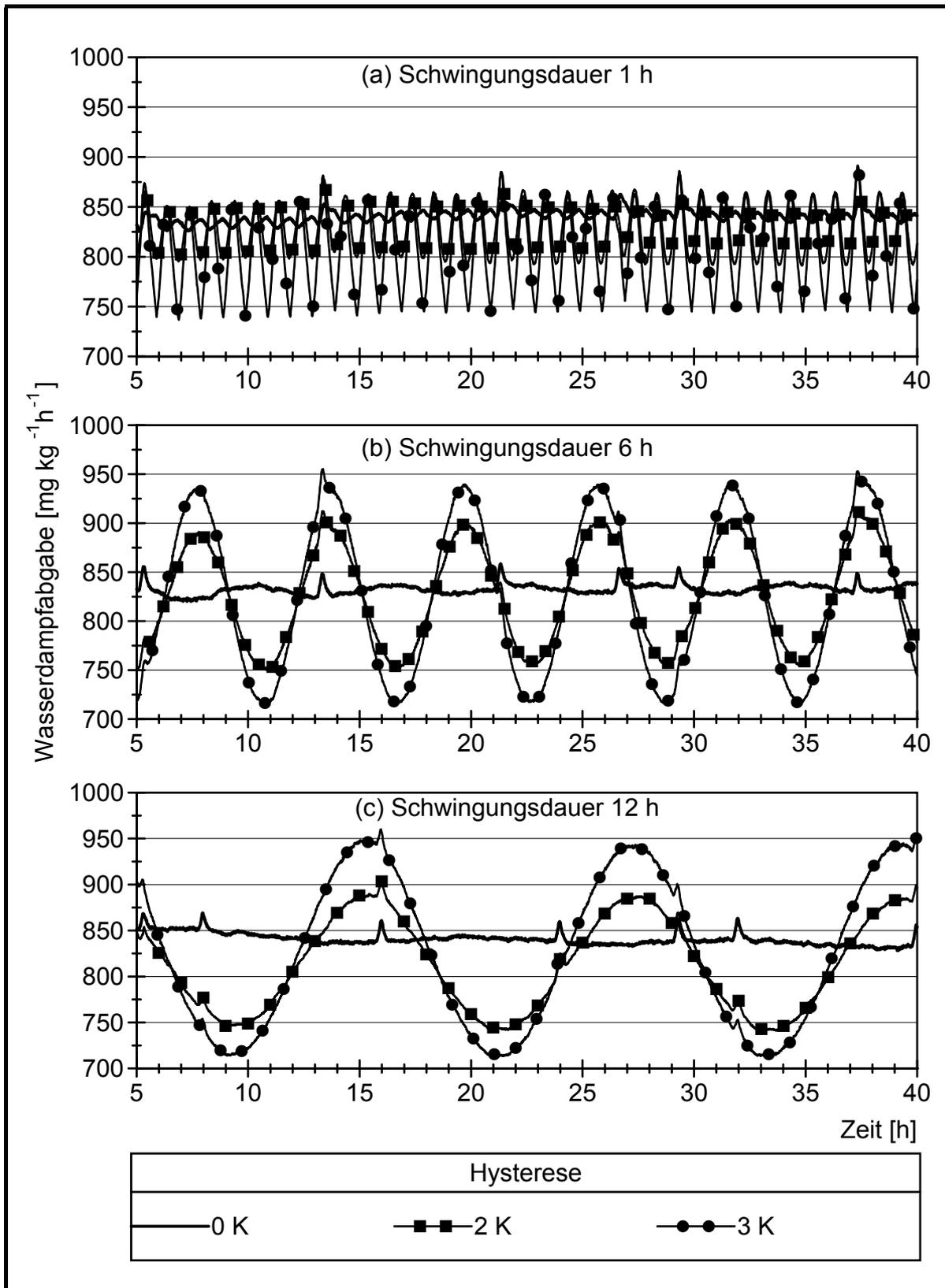


Abbildung 54: Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K (Untersuchung R1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von 12 Stunden Messdauer.

Beim Dampfdruckdefizit bei unterschiedlichen Temperaturführungen (Abbildung 55) fällt auf, dass sich bei allen untersuchten Schwingungsdauern über die Versuchsdauer hinweg eine steigende Tendenz zeigte, bei schwingender sowie bei konstanter Temperaturführung. Diese Tatsache wirkte sich auf die einzelnen Transpirationskoeffizienten aus, deren Maximal- sowie Minimalwerte stetig sanken (Abbildung 56).

#### *3.4.1.4 Schwund*

Schwund und Kondenswasser der bei schwingenden Temperaturen gelagerten Radies wurden jeweils zum Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur in Bezug gesetzt (d. h. Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur = 100 %, Abbildung 57). Obwohl die Unterschiede sehr gering waren, ist zu erkennen, dass bei den drei einwirkenden Schwingungsdauern diejenigen Radies den geringsten Schwund hatten, die bei schwankender Temperatur mit 2 K Hysterese gelagert wurden. Diejenigen, die bei schwankender Temperatur mit 3 K Hysterese gelagert wurden, hatten den höchsten Schwund. Bei den Schwingungsdauern eine Stunde und sechs Stunden (Untersuchung R1a und b) entstand bei der Hysterese 2 K sowie bei konstanter Temperatur gleich viel Kondenswasser an den Küvettenwänden. Bei 12 Stunden Schwingungsdauer war die Kondensation bei 2 K Hysterese am niedrigsten und bei 3 K am höchsten (Untersuchung R1c).

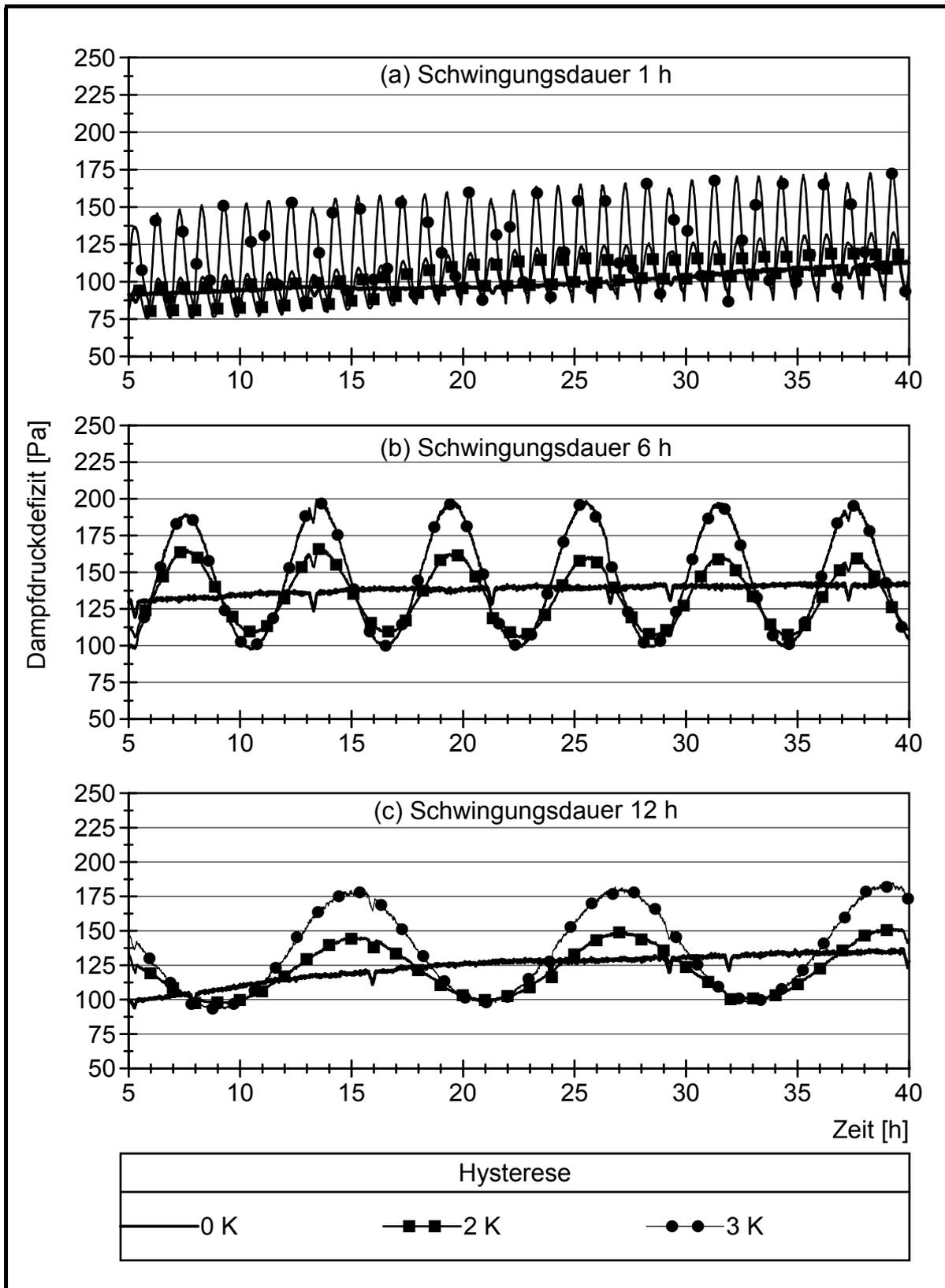


Abbildung 55: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen von 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K bei gelagerten Radies (Untersuchung R1).

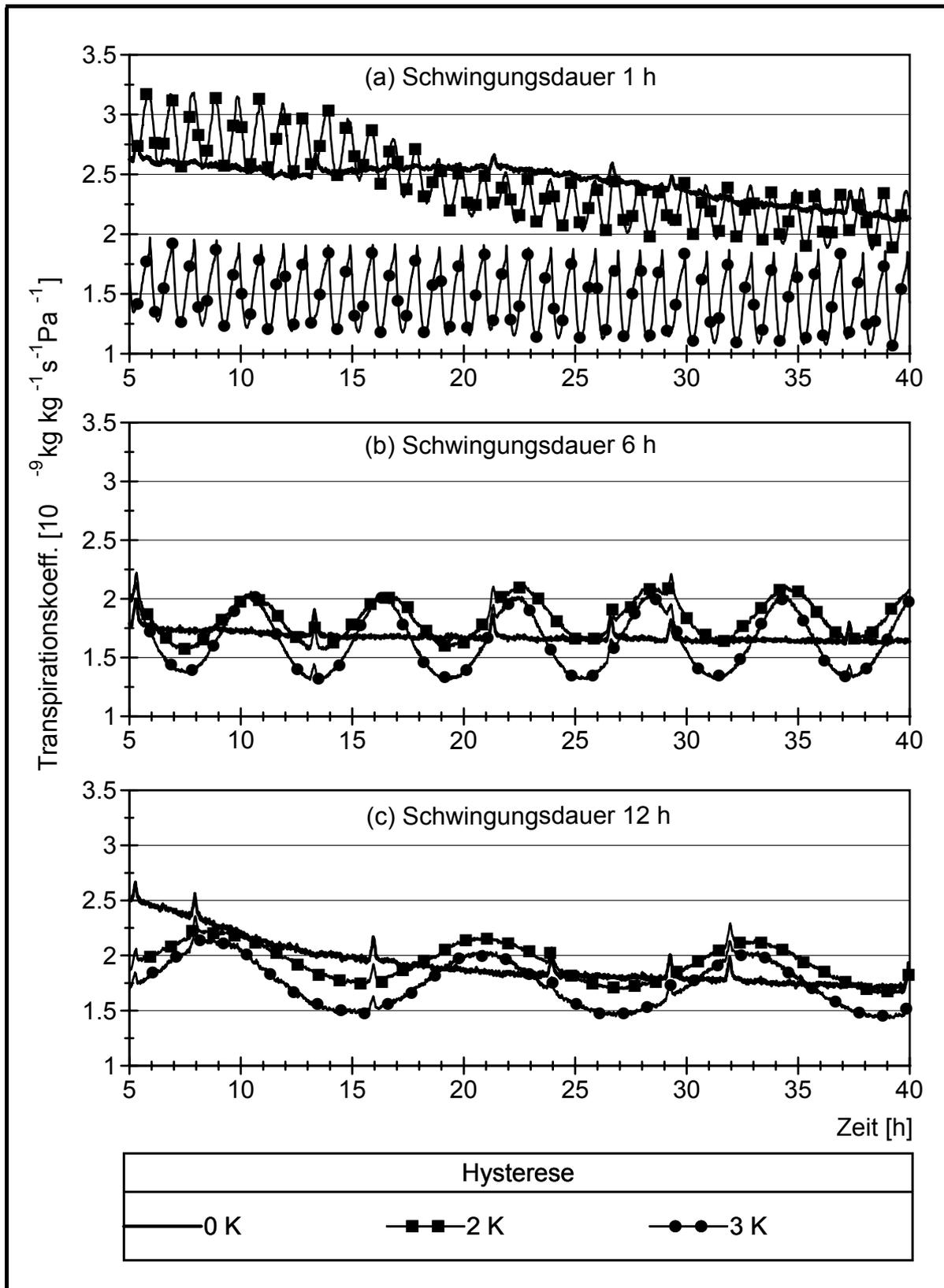


Abbildung 56: Transpirationskoeffizienten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen von 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K (Untersuchung R1).

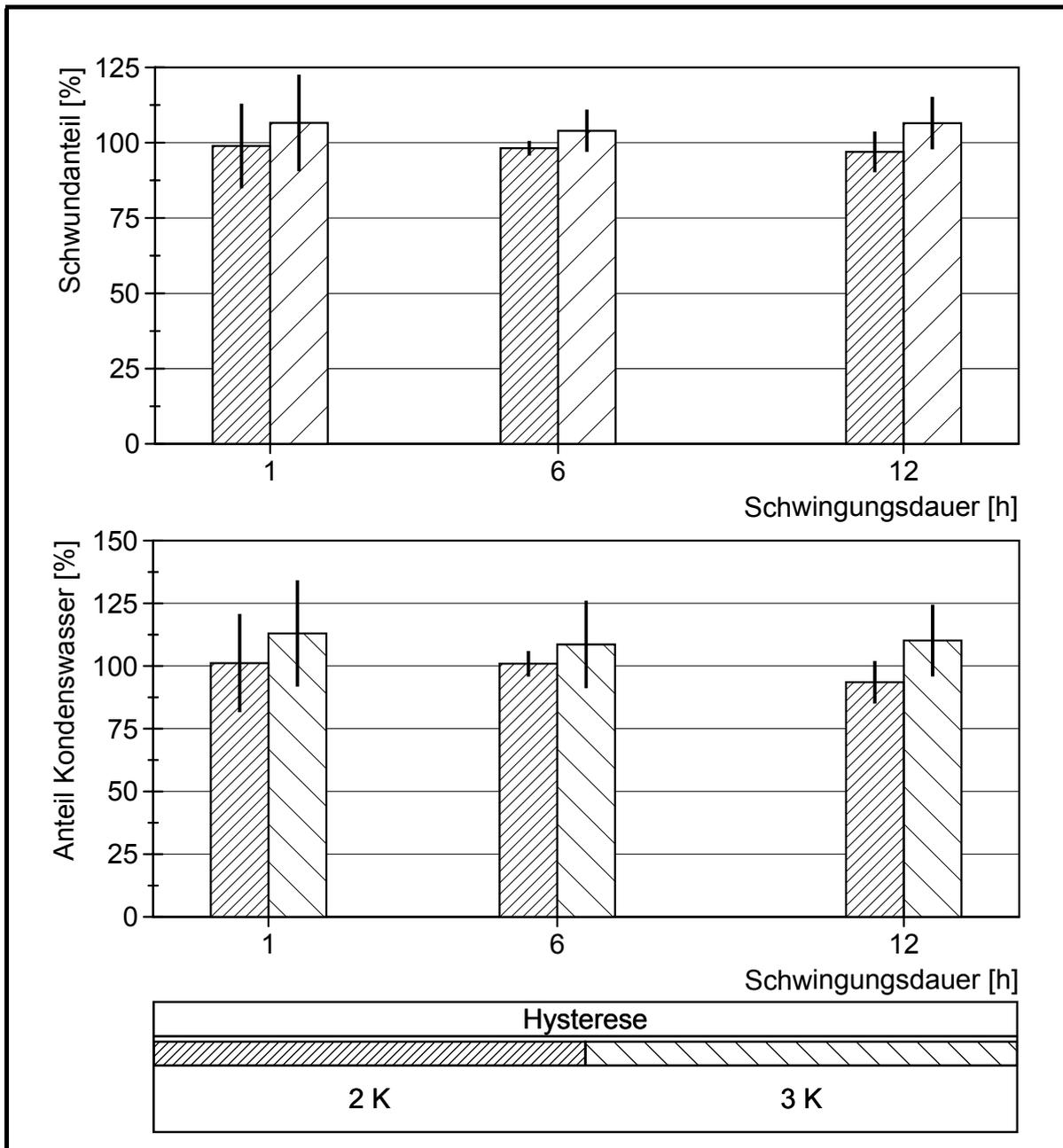


Abbildung 57: Anteile an Gesamtschwund gelagerter Radies und Kondenswasser in den Küvetten sowie deren Standardabweichungen bei schwingender Temperatur bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung R1).

### 3.4.2 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration der gelagerten Pflanzenorgane

#### 3.4.2.1 Temperaturverlauf

Die Radieschen wurden direkt nach der Ernte eingelagert und es dauerte ca. drei Stunden, bis sich die Temperatur im Inneren der Knollen der Temperatur in der Küvette angeglichen hatte. Die Spanne zwischen Lufttemperatur und Temperatur in den Radiesknollen wurde mit zunehmender Schwingungsdauer größer (Tabelle 14, Untersuchung R2).

Tabelle 14: Minimal-, Maximal-, und mittlere Temperaturen im Luftschacht und in den Radiesknollen bei konstanter Temperatur sowie bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).

Temperatur [°C]	Minimum		Maximum		Mittelwert	
	Luft	Gemüse	Luft	Gemüse	Luft	Gemüse
<b>0</b>	9.52	6.77	10.39	7.36	9.99	7.15
<b>3</b>	6.61	6.35	13.38	8.55	9.88	7.35
<b>6</b>	6.61	5.58	13.38	9.16	9.84	7.40
<b>8</b>	6.77	5.36	13.38	9.17	9.87	7.30
<b>12</b>	6.61	5.75	13.38	9.77	9.90	7.71

### 3.4.2.2 Atmung

Für Radies wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 2.25 berechnet. Die Regressionsanalyse mit den durch die  $Q_{10}$ -Regel auf 10 °C umgerechneten Atmungsraten ergab eine Potenzfunktion mit negativer Steigung. Tabelle 15 sind Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße zu entnehmen.

Tabelle 15: Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichungen der Atmungsraten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2). Die Werte wurden mit Hilfe der  $Q_{10}$ -Regel auf Atmungsraten bei 10 °C umgerechnet.

Schwingungsdauer [h]	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß $\beta$
	$a$	$b$	
<b>0</b>	72.84	-0.37	0.82
<b>3</b>	78.95	-0.38	0.80
<b>6</b>	71.14	-0.36	0.83
<b>8</b>	72.40	-0.36	0.79
<b>12</b>	71.54	-0.36	0.74

Statistisch konnten keine signifikanten Unterschiede in der Atmungsintensität der unterschiedlichen Varianten nachgewiesen werden, weder mit Originalwerten der  $CO_2$ -Abgabe noch mit auf 10 °C umgerechneten Werten. Abbildung 58 zeigt die berechneten sowie die tatsächlich gemessenen Atmungsraten von Radies bei Temperaturschwankungen mit gestaffelten Schwingungsdauern sowie einer Hysterese von 3 K. Besonders zu Beginn der Messung lagen auch hier ähnlich wie bei der Untersuchung der Kombinationen von drei Schwingungsdauern mit drei unterschiedlichen Hysteresen (Schwingungsdauer eine Stunde, Abbildung 51) die gemessenen Werte über der berechneten Atmungsrate. Im Untersuchungsverlauf passte sich jedoch die Atmungsrate der Radies bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern immer den Temperaturverhältnissen in den Küvetten an und folgte dem Verlauf der simulierten Kurve (Untersuchung R2).

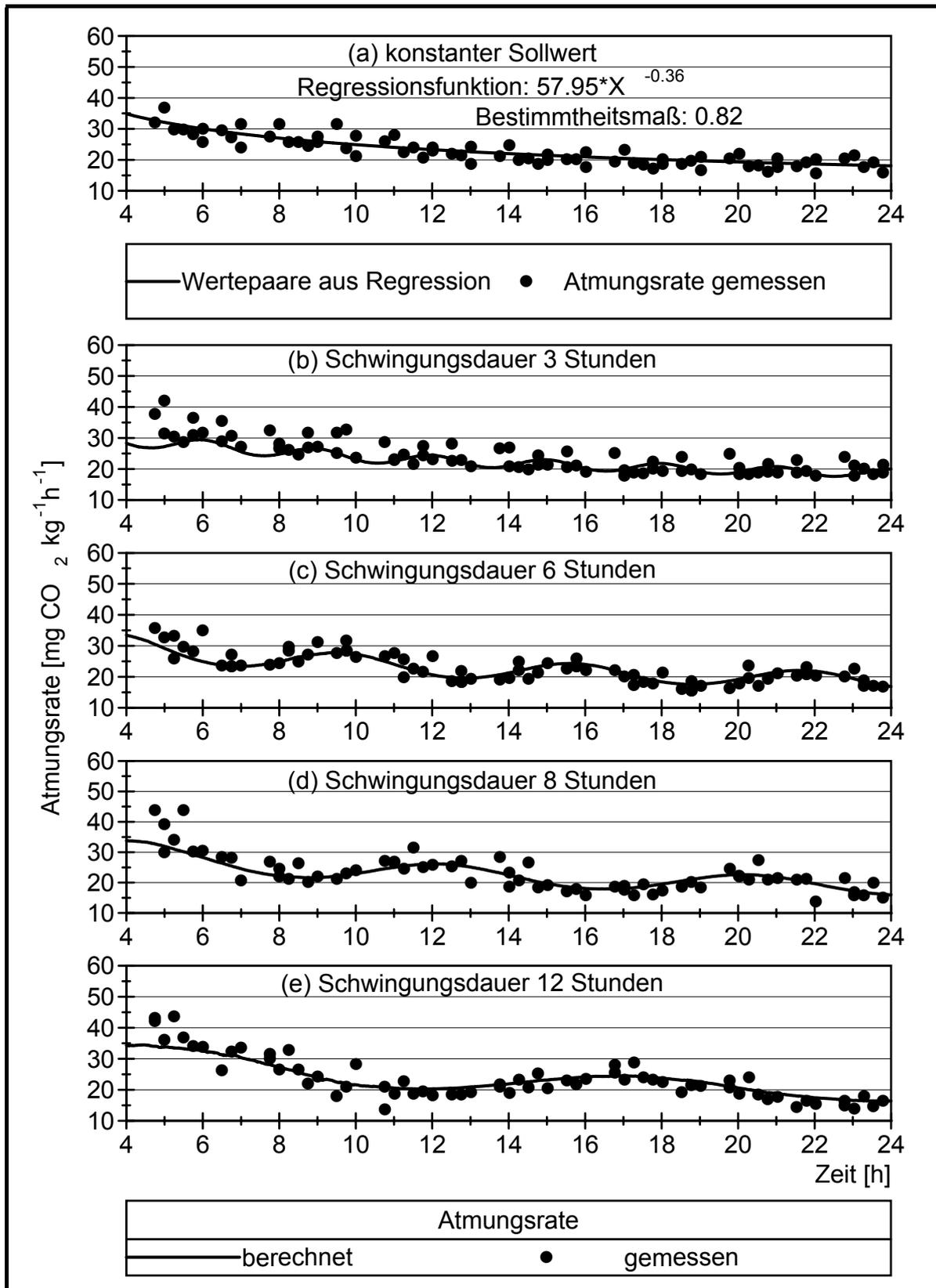


Abbildung 58: Berechnete und gemessene Atmungsraten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

### 3.4.2.3 *Transpiration*

Die Wasserdampfabgabe der gelagerten Radies hat sich nahezu ohne Verzögerung dem sich verändernden Dampfdruckdefizit angepasst (Abbildung 59a und b), so dass sich bei den Transpirationskoeffizienten nur leichte Schwankungen ergaben (Abbildung 59c).

Abbildung 60 macht deutlich, wie sich Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Radies bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern zueinander verhielten. Bei konstanter Temperatur sank die Wasserdampfabgabe mit der Versuchsdauer leicht ab, also stieg das Dampfdruckdefizit an und damit sank der Transpirationskoeffizient. Bei den Schwingungsdauern drei Stunden sowie sechs Stunden passte sich die Wasserdampfabgabe fast vollständig dem sinkenden Dampfdruckdefizit an ("Täler" der Sinuskurve), sie erreichte aber nicht die Maxima ("Berge" der Sinuskurve) bei steigendem Dampfdruckdefizit. Folglich ergaben sich daraus sinkende Transpirationskoeffizienten bei steigendem Dampfdruckdefizit und umgekehrt. Mit zunehmender Schwingungsdauer (acht Stunden, 12 Stunden) passte sich die Wasserdampfabgabe dem sich verändernden Dampfdruckdefizit an, jedoch nie ganz vollständig, so dass die Transpirationskoeffizienten immer als entgegengesetzte Schwingung verliefen.

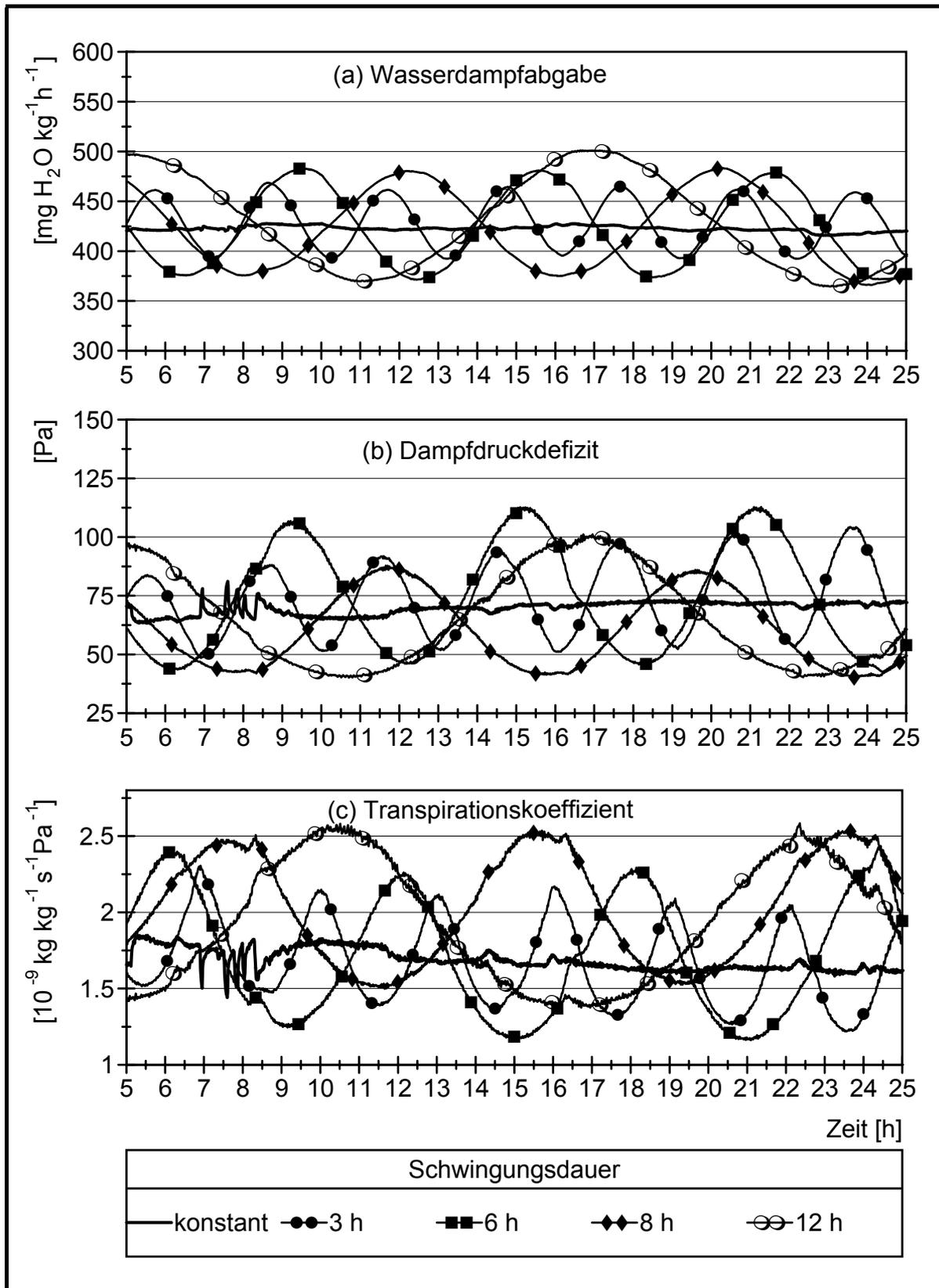


Abbildung 59: Wasserdampfabgabe (a), Dampfdruckdefizit (b) sowie Transpirationskoeffizienten (c) von Radies bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).

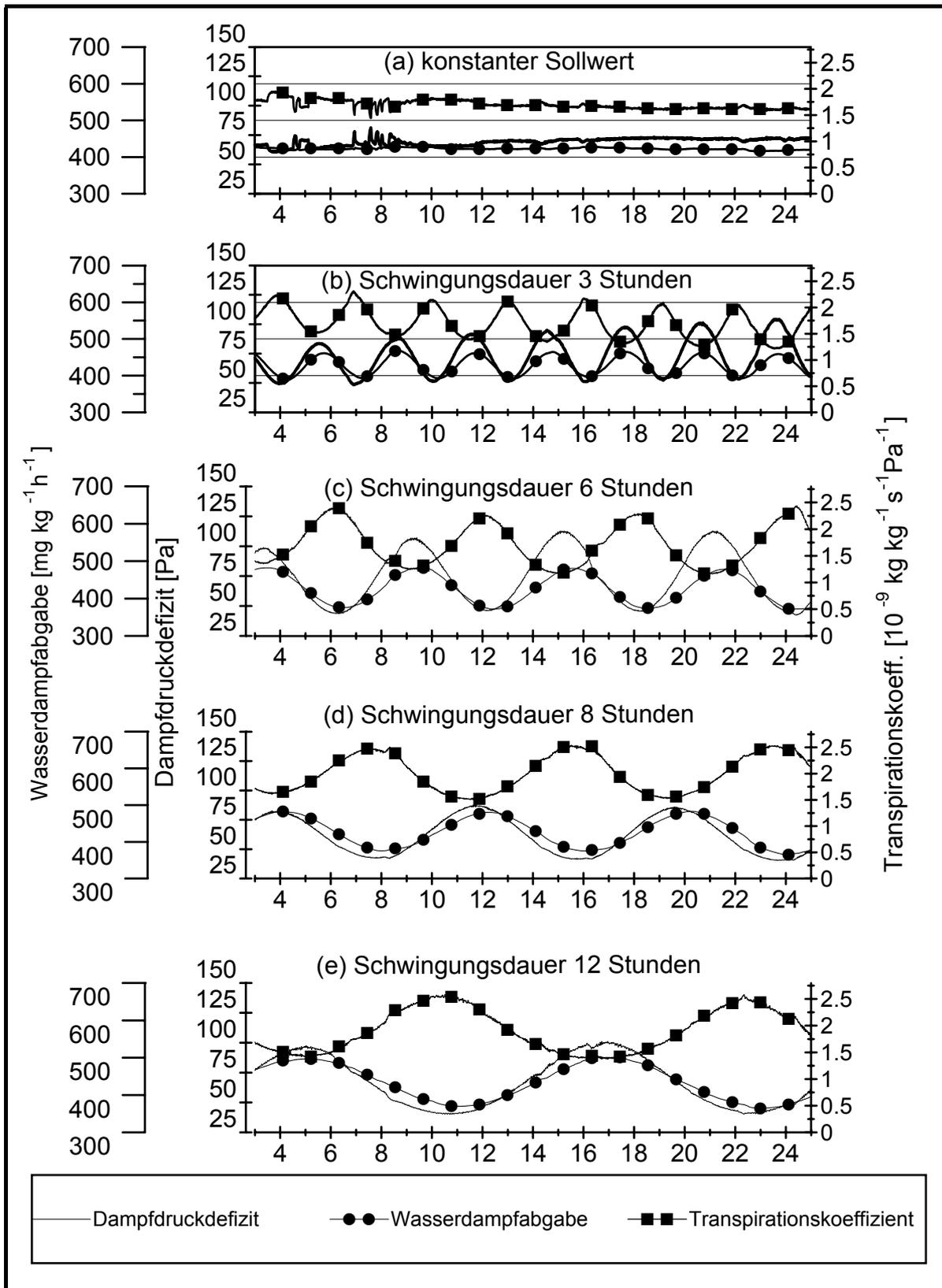


Abbildung 60: Wasserdampf-abgabe, Dampdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Radies im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).

### 3.4.2.4 Schwund

Die Unterschiede zwischen den getesteten Schwingungsdauern sowohl im Schwund als auch im Kondenswasser gelagerter Radies waren sehr gering mit hohen Standardabweichungen, so dass keine Signifikanzen nachgewiesen werden konnten (Abbildung 61, Untersuchung R2).

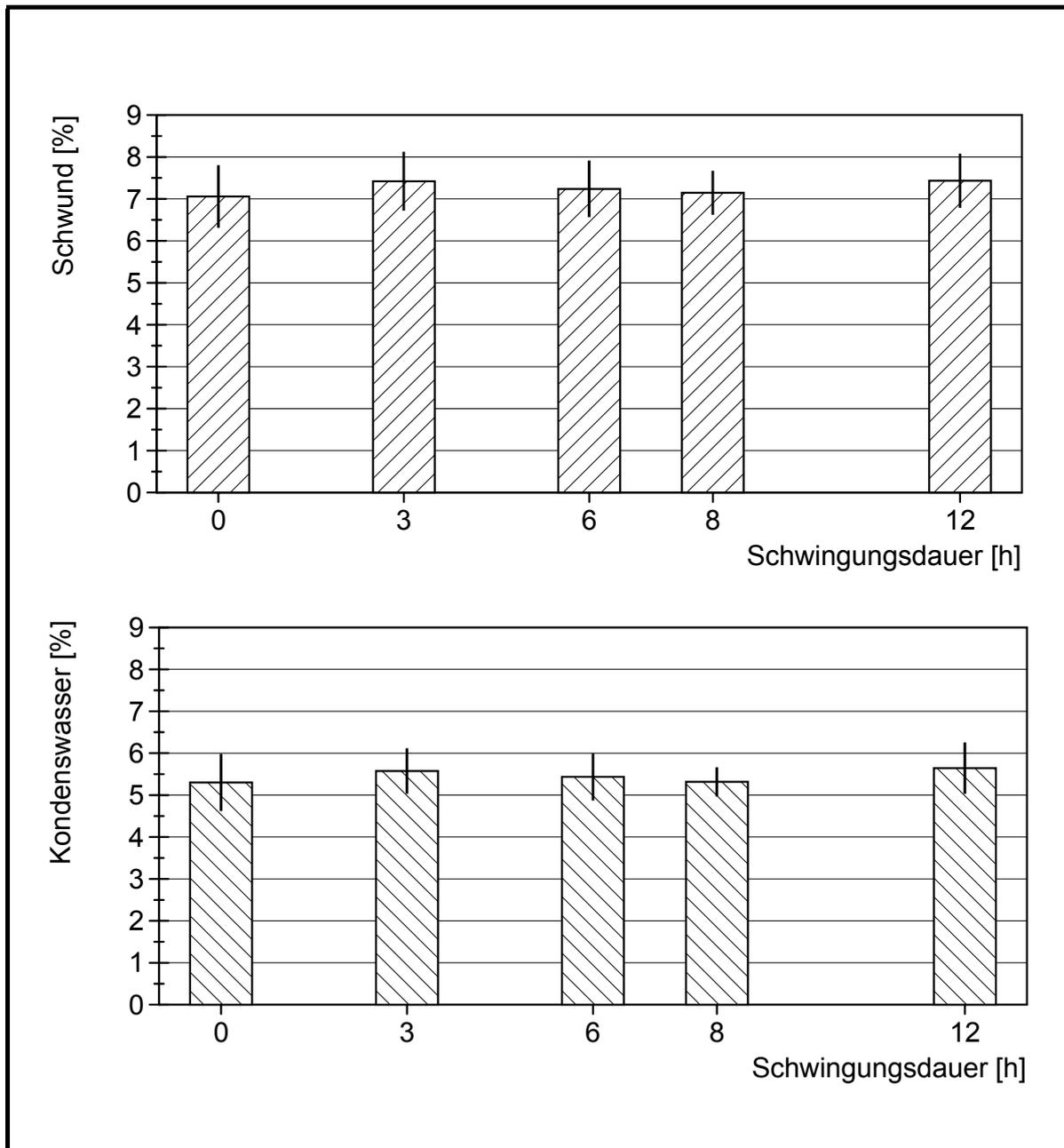


Abbildung 61: Schwund gelagerter Radies sowie Kondenswasser an den Küvettenwänden und deren Standardabweichungen bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit 3 K Hysterese und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).

### 3.4.3 Auswirkung einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde auf Atmung und Transpiration

#### 3.4.3.1 *Temperaturverlauf und Atmung*

Abbildung 62 verdeutlicht den Verlauf der Atmungsrate von Radies in Abhängigkeit von Temperaturänderungen (Untersuchung R3). Dargestellt ist die tatsächlich gemessene Atmungsrate verglichen mit der durch die  $Q_{10}$ -Regel berechneten. Bei einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde hat sich die Atmungsintensität der gelagerten Radies vollständig den Temperaturverhältnissen in der Küvette angepasst, was durch den identischen Verlauf von gemessener und berechneter Kurve zu sehen ist. Erst nach 30 Stunden Messdauer war die Atmungsintensität der Radies niedriger als vorausgerechnet.

#### 3.4.3.2 *Transpiration*

Beim Temperaturanstieg verlief der Anstieg der Wasserdampfabgabe "steiler" als der des Dampfdruckdefizits und zwar um so mehr, je höher die Temperatur wurde (Abbildung 63). Folglich sank der Transpirationskoeffizient nicht "als Spitze" entgegengesetzt zum Dampfdruckdefizit, sondern eher als flache Kurve und stieg erst bei Temperaturabsenkung unter 4 °C wieder stärker an. Trotz Welkeerscheinungen bei zunehmender Untersuchungsdauer war die Wasserdampfabgabe der Radies am Ende der Untersuchung etwas höher als zu Beginn.

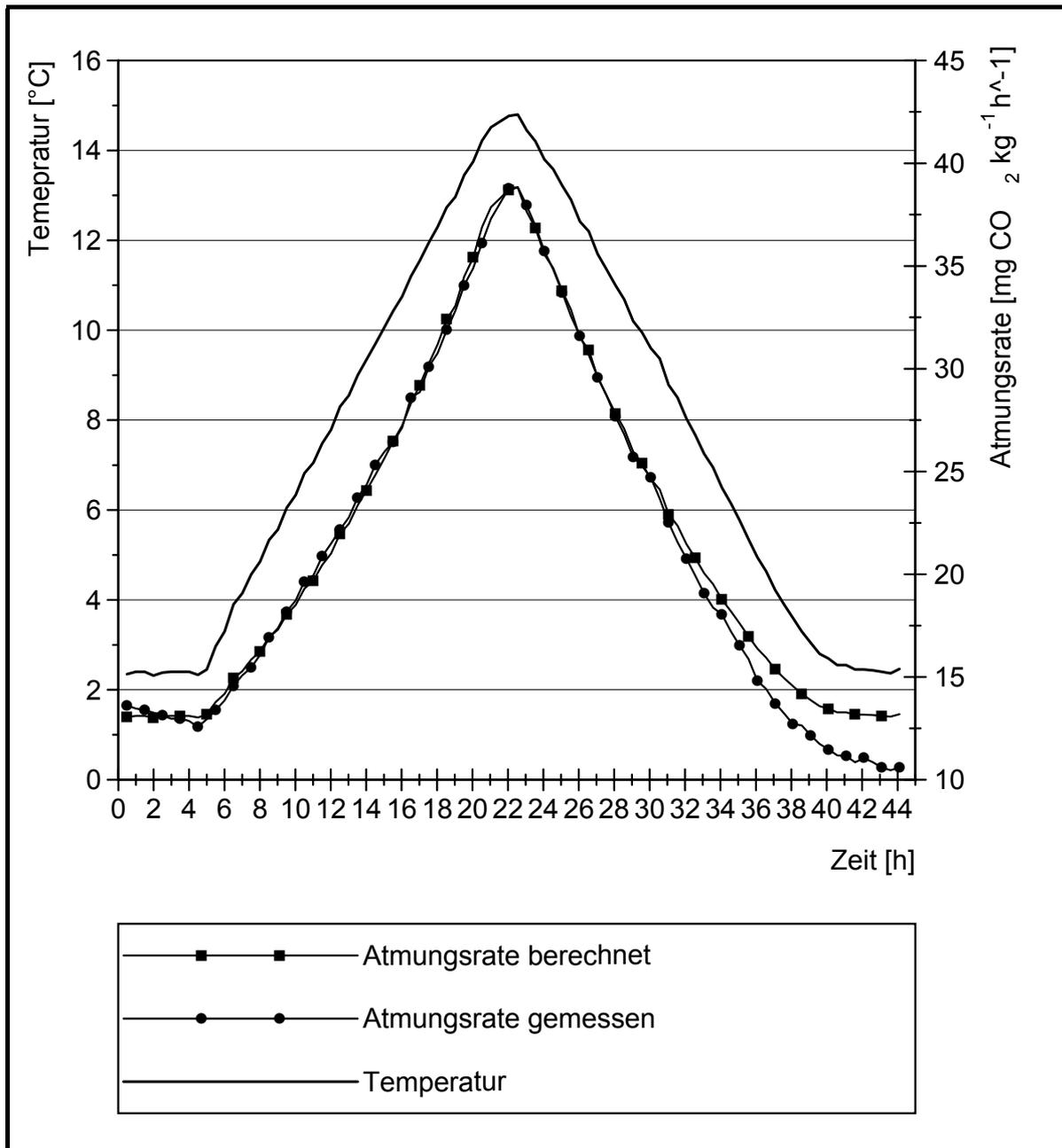


Abbildung 62: Temperaturverlauf, gemessene und berechnete Atmungsrate von gelagerten Radies bei einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde (Untersuchung R3).

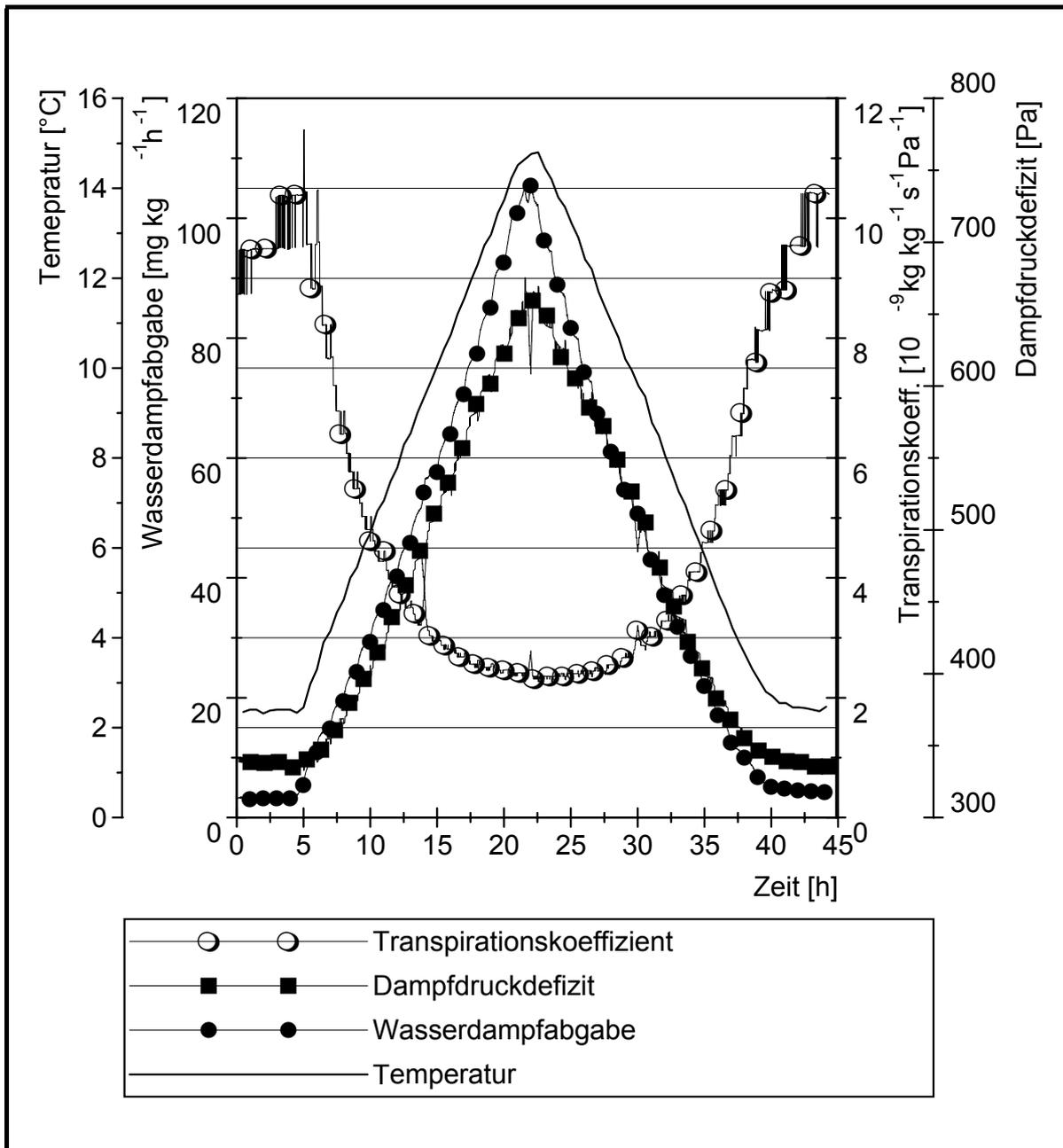


Abbildung 63: Temperaturverlauf, Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von Radies bei einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde (Untersuchung R3).

## 3.5 Tomaten

3.5.1 Vergleich der Auswirkungen einer kurzen Schwingungsdauer bei kleiner Hysterese mit denen einer langen Schwingungsdauer bei großer Hysterese auf die physiologische Reaktion von Tomaten

### 3.5.1.1 Atmung

Die Atmungsrate gelagerter Tomaten bei konstanter Temperatur war etwas höher als bei kurzer Schwingungsdauer mit kleiner Hysterese (Abbildung 64). Die Kurve der Atmungsrate bei langer Schwingungsdauer mit großer Hysterese schwang sinusförmig um die Kurve der Atmungsrate bei konstanter Temperatur (Untersuchung T1).

### 3.5.1.2 Transpiration

Die Wasserdampfabgabe gelagerter Tomaten bei konstanter Temperatur war völlig identisch mit der bei kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese, denn die Kurven lassen sich in der Grafik nicht unterscheiden (Abbildung 65a). Das Dampfdruckdefizit in den Küvetten war bei kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese niedriger als bei konstanter Temperatur, aber die Kurven liegen dicht beieinander (Abbildung 65b). Bei langer Schwingungsdauer und großer Hysterese schwang das Dampfdruckdefizit um das bei konstanter Temperatur, aber nicht als Mittelpunkt sondern nach oben verschoben. Generell stieg bei allen Varianten das Dampfdruckdefizit mit zunehmender Versuchsdauer an.

Die Transpirationskoeffizienten der Tomaten bei konstanter Temperatur lagen zu Beginn der Messung unter denen bei Temperaturschwankungen mit kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese, die Kurven lassen sich aber ab einer Messdauer von 40 Stunden nicht mehr unterscheiden (Abbildung 65c). Die Transpirationskoeffizienten bei langer Schwingungsdauer und großer Hysterese lagen unterhalb von denen der beiden weiteren Varianten und machten eine leichte Schwingung. Bei allen Varianten sanken die Transpirationskoeffizienten mit zunehmender Versuchsdauer.

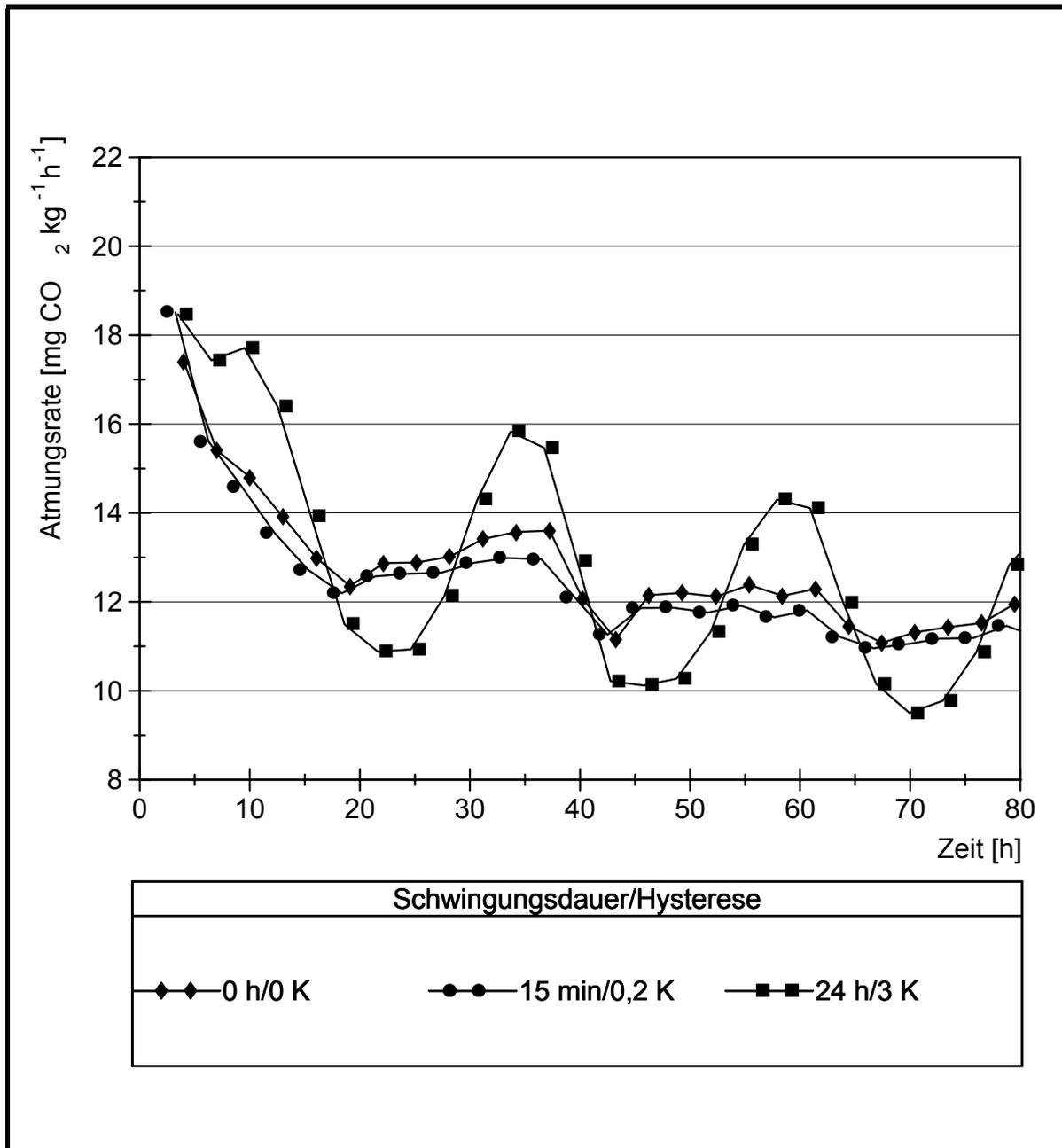


Abbildung 64: Atmungsraten von gelagerten Tomaten bei Temperaturschwankungen mit kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese (15 min/0,2 K), langer Schwingungsdauer und großer Hysterese (24 h/3 K) sowie konstanter Temperatur (Untersuchung T1).

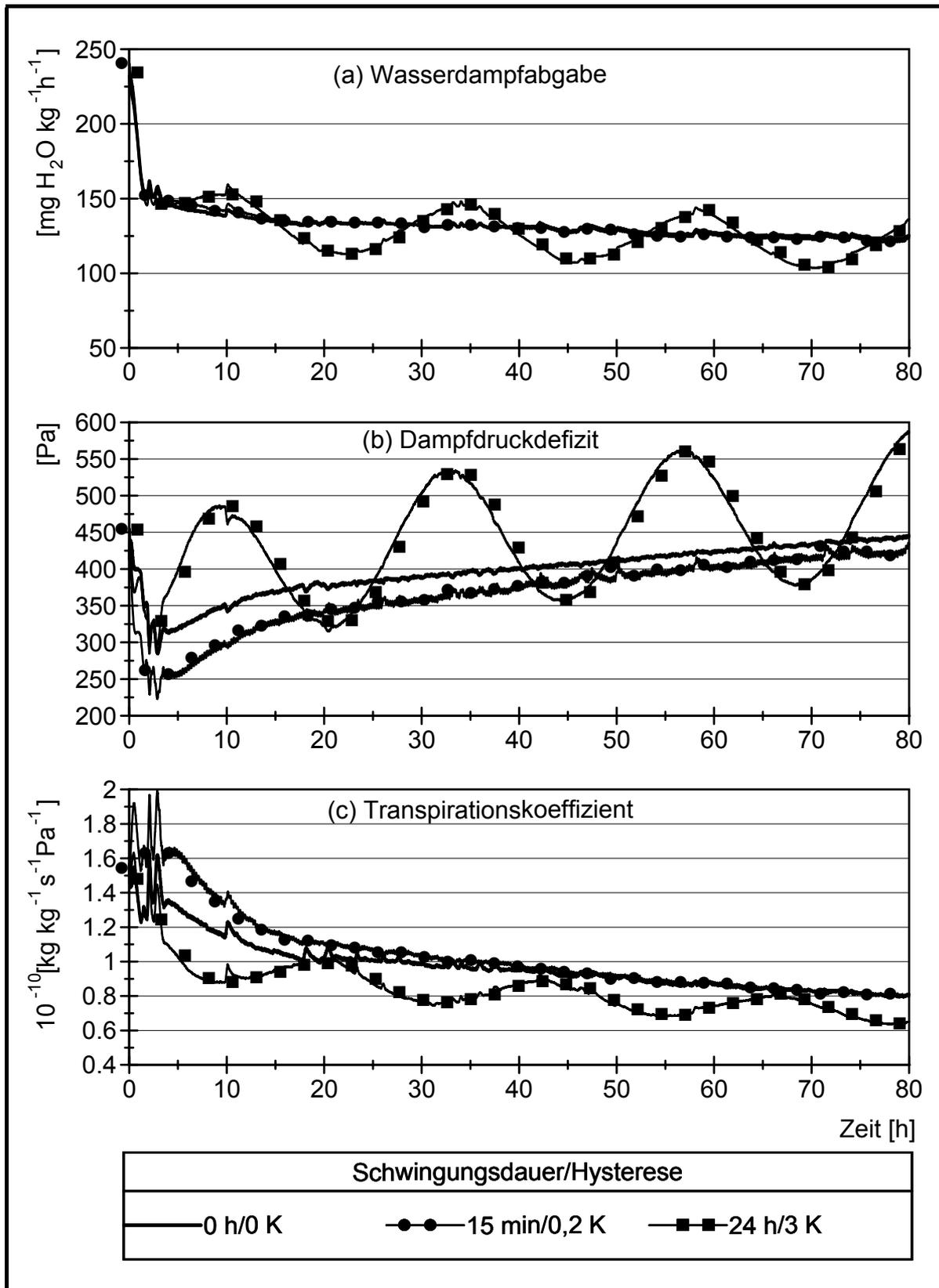


Abbildung 65: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von gelagerten Tomaten bei Temperaturschwankungen mit kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese (15 min/0,2 K), langer Schwingungsdauer und großer Hysterese (24 h/3 K) sowie konstanter Temperatur (Untersuchung T1).

## ***3.6 Einlegegurken***

### *3.6.1.1 Temperaturverlauf*

Das Temperaturniveau in Gurkennähe lag bei allen untersuchten Schwingungsdauern tiefer als im Schacht (Abbildung 66). Bei der Schwingungsdauer 40 min lag das Temperaturniveau bei der Hysterese 1 K am niedrigsten und bei der Hysterese 2 K am höchsten (Abbildung 66a). Bei der Schwingungsdauer 50 min lagen die Temperaturmaxima bei der Hysterese 2 K am höchsten, die Minima waren bei den Hysteresen 1 K und 2 K gleich (Abbildung 66b). Bei der Hysterese 60 min überschritten sich die Kurven (Abbildung 66c).

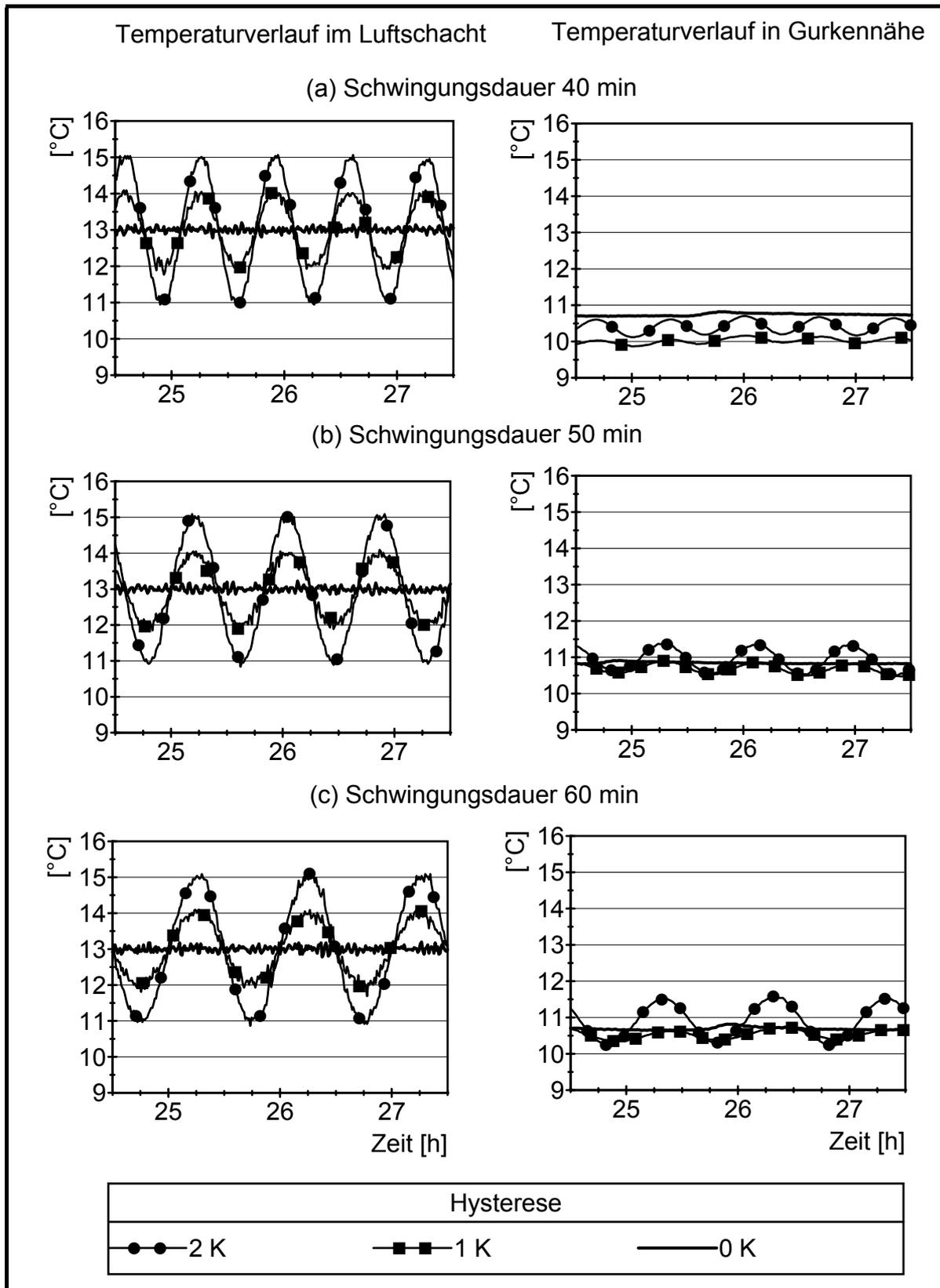


Abbildung 66: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Kuvettenschacht und in Einlegegurkennähe (Untersuchung E1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von drei Stunden Messdauer.

### 3.6.1.2 *Atmung*

Es konnten keine signifikanten Unterschiede im Atmungsverlauf der gelagerten Einlegegurken zwischen den unterschiedlichen Varianten festgestellt werden (Abbildung 67). Bei den Schwingungsdauern 40 min (Abbildung 67a, Untersuchung E1a und d) sowie 50 min (Abbildung 67b, Untersuchung E1b und e) verliefen die Atmungsraten bei den getesteten Hysteresen fast identisch. Bei der Schwingungsdauer 60 min (Abbildung 67c, Untersuchung E1c und f) lag die Atmungsrate der Einlegegurken bei 2 K Hysterese geringfügig über derjenigen bei 1 K Hysterese und konstanter Temperatur.

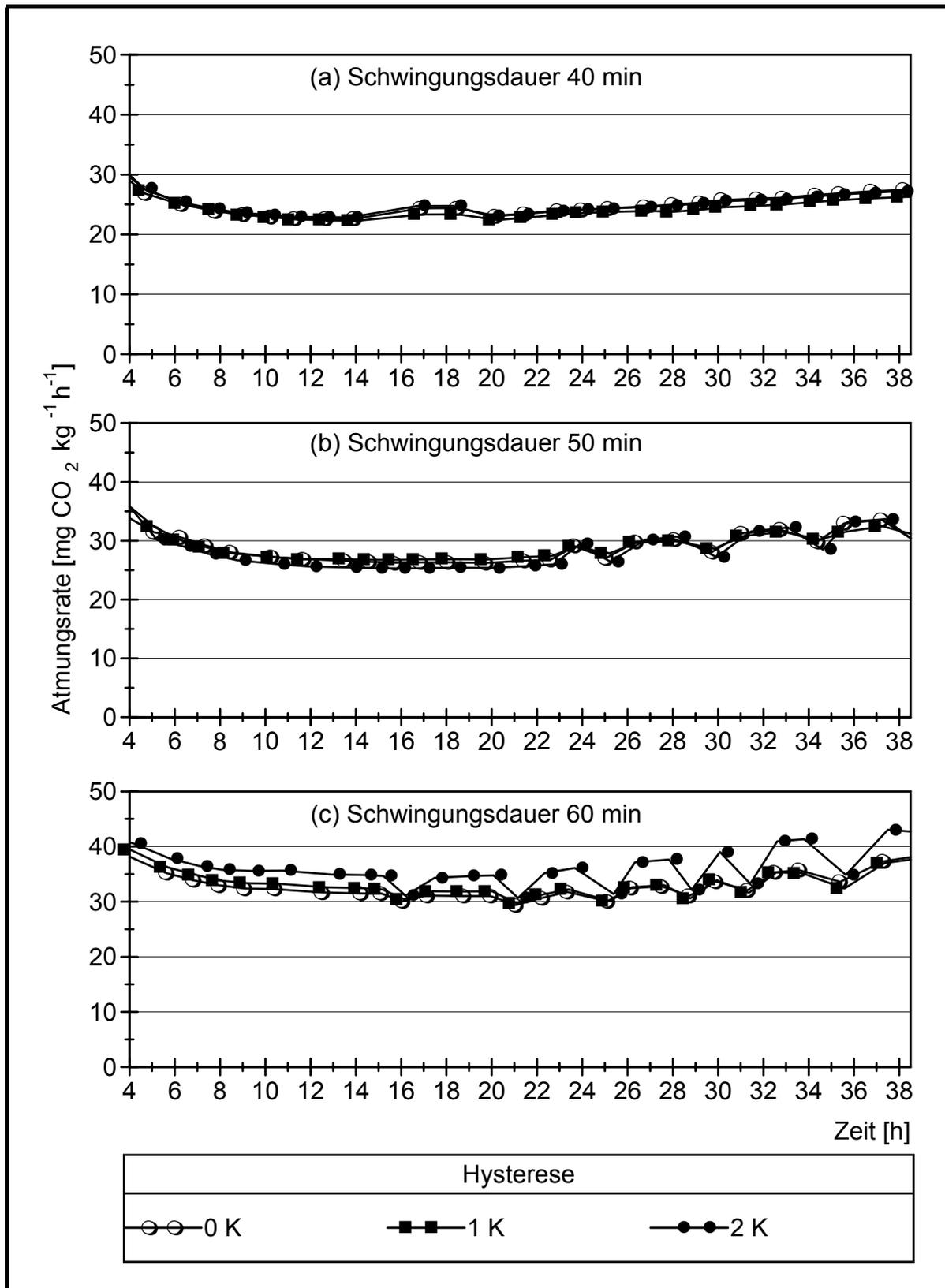


Abbildung 67: Atmungsraten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1).

### 3.6.1.3 *Transpiration*

Bei der untersuchten Schwingungsdauer 40 min lag die Wasserdampfabgabe gelagerter Einlegegurken bei konstanter Temperatur am höchsten und bei schwingender Temperatur mit 2 K Hysterese am niedrigsten (Abbildung 68a). Bei der Schwingungsdauer 50 min lag die Wasserdampfabgabe gelagerter Einlegegurken bei schwingender Temperatur mit 1 K Hysterese am höchsten und bei konstanter Temperatur am niedrigsten (Abbildung 68b). Bei 60 min Schwingungsdauer schwingen die Kurven der Wasserdampfabgabe bei den Hysteresen 1 K sowie 2 K um die Kurve der Wasserdampfabgabe bei konstanter Temperatur. Bei 1 K Hysterese wurde von den Einlegegurken etwas mehr Wasserdampf abgegeben als bei 2 K Hysterese, die Unterschiede waren jedoch gering (Abbildung 68c).

Das Dampfdruckdefizit lag bei 40 min Schwingungsdauer und 2 K Hysterese am höchsten und bei 0 K (konstante Temperatur) am niedrigsten (Abbildung 69a). Bei der Schwingungsdauer 50 min war das Dampfdruckdefizit bei 1 K Hysterese höher und bei 2 K Hysterese niedriger als bei konstanter Temperatur (Abbildung 69b). Bei der Schwingungsdauer 60 min überschritten die Maxima des Dampfdruckdefizits bei 1 K die Kurve bei konstanter Temperatur. Das höchste Dampfdruckdefizit entstand hier bei 2 K Hysterese (Abbildung 69c).

Die Transpirationskoeffizienten lagen bei der untersuchten Schwingungsdauer von 40 min bei konstanter Temperatur und mit 1 K Hysterese schwankender Temperatur sehr nahe beieinander. Derjenige bei 2 K Hysterese war deutlich niedriger (Abbildung 70a). Bei der Schwingungsdauer 50 min schwang der Transpirationskoeffizient um denjenigen bei konstanter Temperatur (Abbildung 70b). Der Transpirationskoeffizient bei 2 K Hysterese verlief hier ebenfalls deutlich niedriger als bei konstanter Temperatur und 1 K Hysterese. Bei der Schwingungsdauer 60 min lag der Transpirationskoeffizient bei 1 K Hysterese höher und bei 2 K Hysterese niedriger als bei einer Hysterese von 0 K (Abbildung 70c).

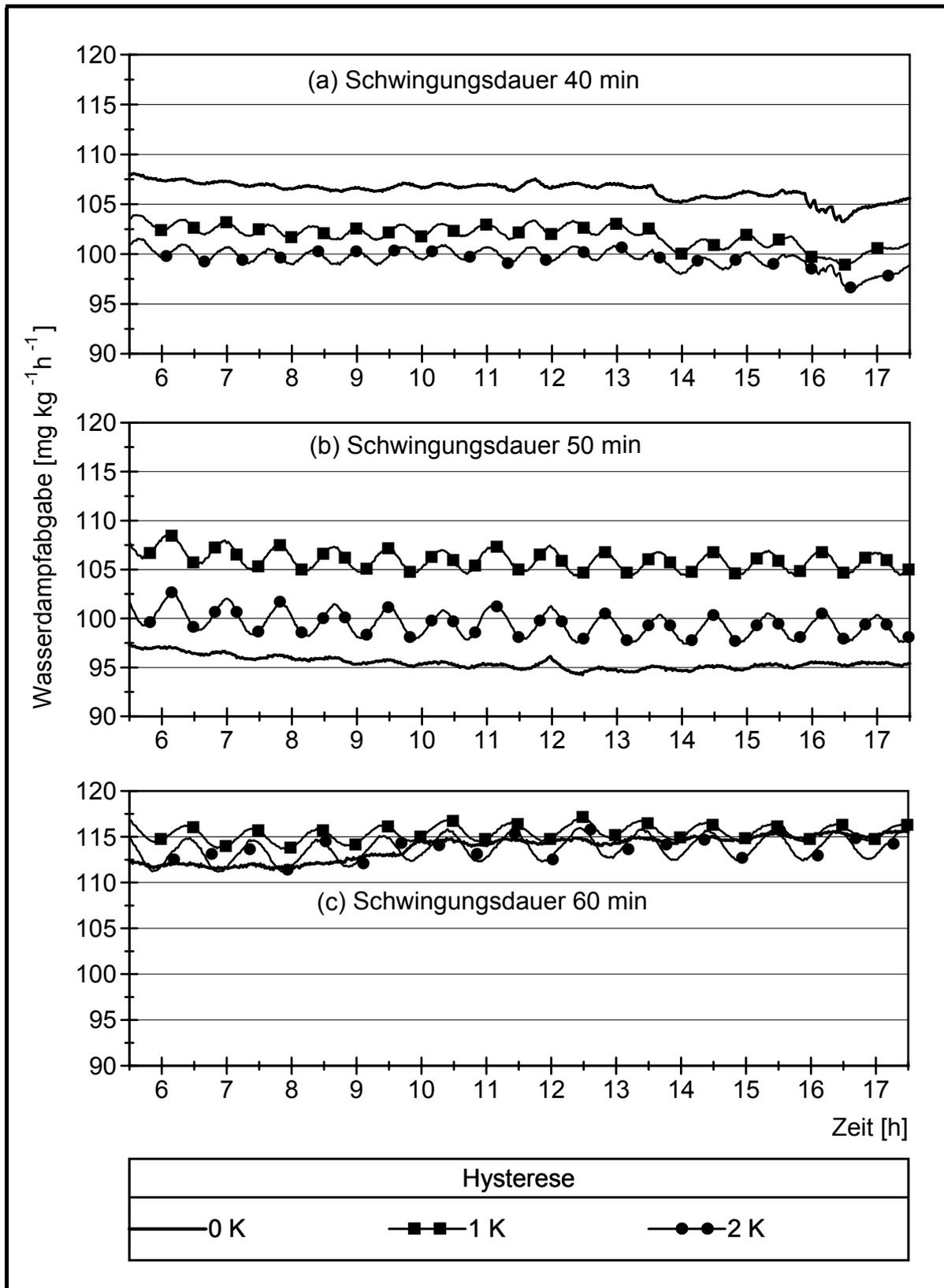


Abbildung 68: Wasserdampfabgabe gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1).

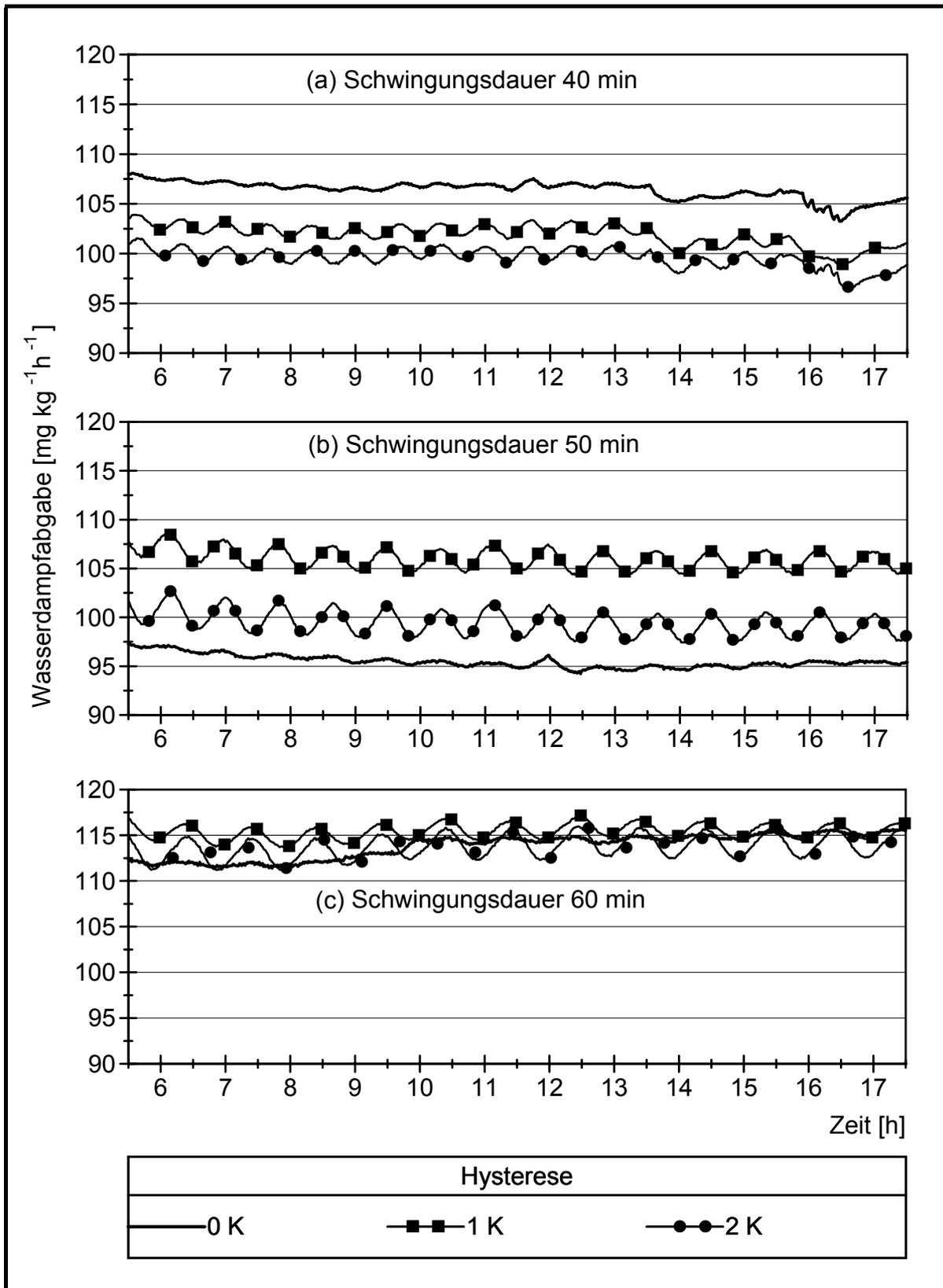


Abbildung 69: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei Einlegegurken (Untersuchung E1).

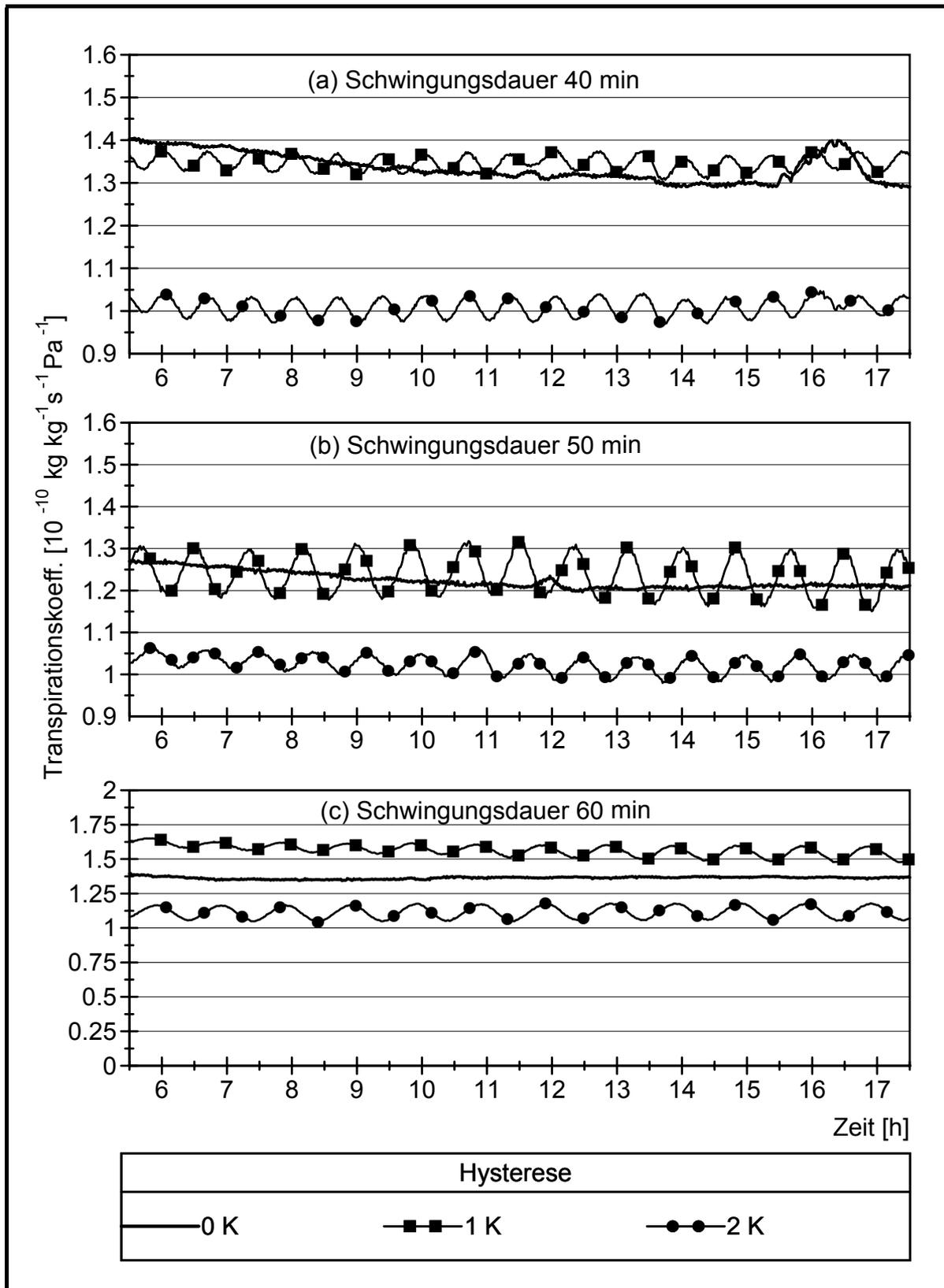


Abbildung 70: Transpirationskoeffizienten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1).

### 3.6.2 Staffelung der Einlagerungsmenge

#### 3.6.2.1 *Atmung und Transpiration bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C*

Die Kühlraumtemperatur betrug 0,5 °C, die Temperatur in den Küvetten wurde auf 10 °C gehalten (Untersuchung E2). Sehr geringe Unterschiede in der Atmungsintensität sowie große Standardabweichungen deuten darauf hin, dass die Atmungsintensität gelagerter Einlegegurken nicht von der eingelagerten Menge beeinflusst wurde (Abbildung 71a).

Wasserdampfabgabe (Abbildung 71b) sowie Transpirationskoeffizienten (Abbildung 71d) zeigten eine hohe Abhängigkeit von der eingelagerten Menge. Je geringer die eingelagerte Menge war, um so höher waren Wasserdampfabgabe sowie Transpirationskoeffizienten. Das Dampfdruckdefizit war bei allen eingelagerten Mengen relativ gleich und in der Tendenz nur leicht steigend (Abbildung 71c), das heißt dass die gelagerten Früchte auch bei geringer Einlagerungsmenge die Wassermenge, die durch den Luftstrom abtransportiert wurde, nachliefern konnten.

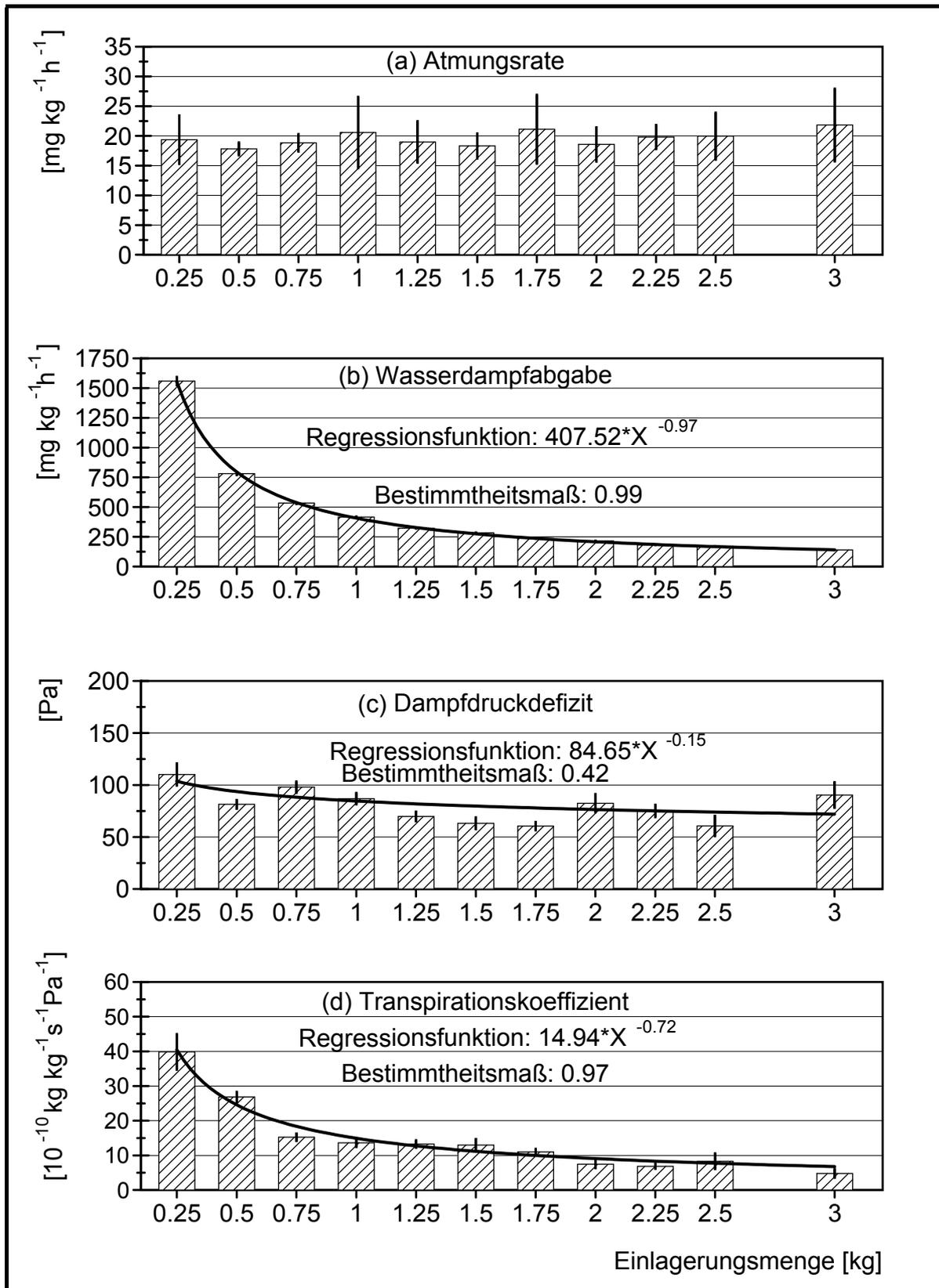


Abbildung 71: Atmungsraten (a), Wasserdampfabgabe (b), Dampfdruckdefizit (c) sowie Transpirationskoeffizienten (d) gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen und einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C (Untersuchung E2).

In Abbildung 72 sind Schwund gelagerter Einlegegurken sowie Kondenswasser in Bezug auf die eingelagerte Menge dargestellt. Insgesamt ließ sich keine Abhängigkeit feststellen.

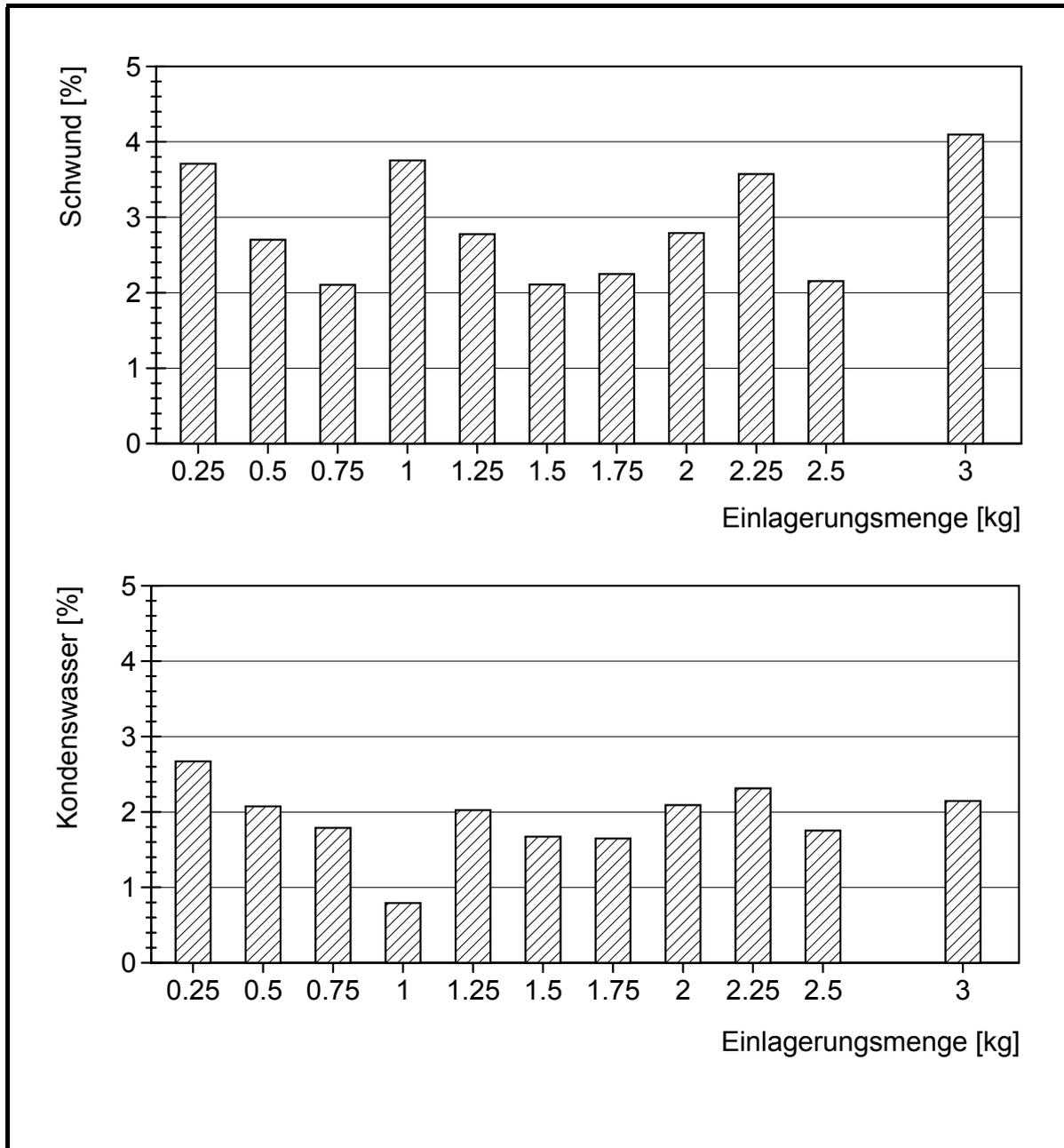


Abbildung 72: Schwund und Kondenswasser gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen und einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C (Untersuchung E2).

### 3.6.2.2 *Atmung und Transpiration bei einer Kühlraumtemperatur von 10 °C*

Die Kühlraumtemperatur sowie die Küvettentemperaturen betragen 10 °C (Untersuchung E3). Die Atmungsintensität lag hier höher als bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C, was wahrscheinlich dadurch zu erklären ist, dass bei 10 °C im Kühlraum die Temperatur in Einlegegurkennähe höher war als bei 0,5 °C im Kühlraum, obwohl die Temperatur in der Küvette gleich gesteuert wurde. Auffällig ist, dass bei gleicher Küvetten- und Kühlraumtemperatur die Standardabweichungen der CO<sub>2</sub>-Abgabe kleiner sowie einheitlicher sind als bei 0,5 °C im Kühlraum und 10 °C in der Küvette. Aber auch hier konnte keine Abhängigkeit zwischen Einlagerungsmenge und Atmungsintensität von gelagerten Einlegegurken nachgewiesen werden (Abbildung 73a).

Wasserdampfabgabe der gelagerten Einlegegurken sowie Dampfdruckdefizit waren bei der Kühlraumtemperatur von 10 °C (Abbildung 73b und c) höher als bei 0,5 °C (Abbildung 71b und c) und zeigten eine hohe Abhängigkeit von der eingelagerten Menge. Bei den Transpirationskoeffizienten war die Abhängigkeit weniger eindeutig (Abbildung 73d).

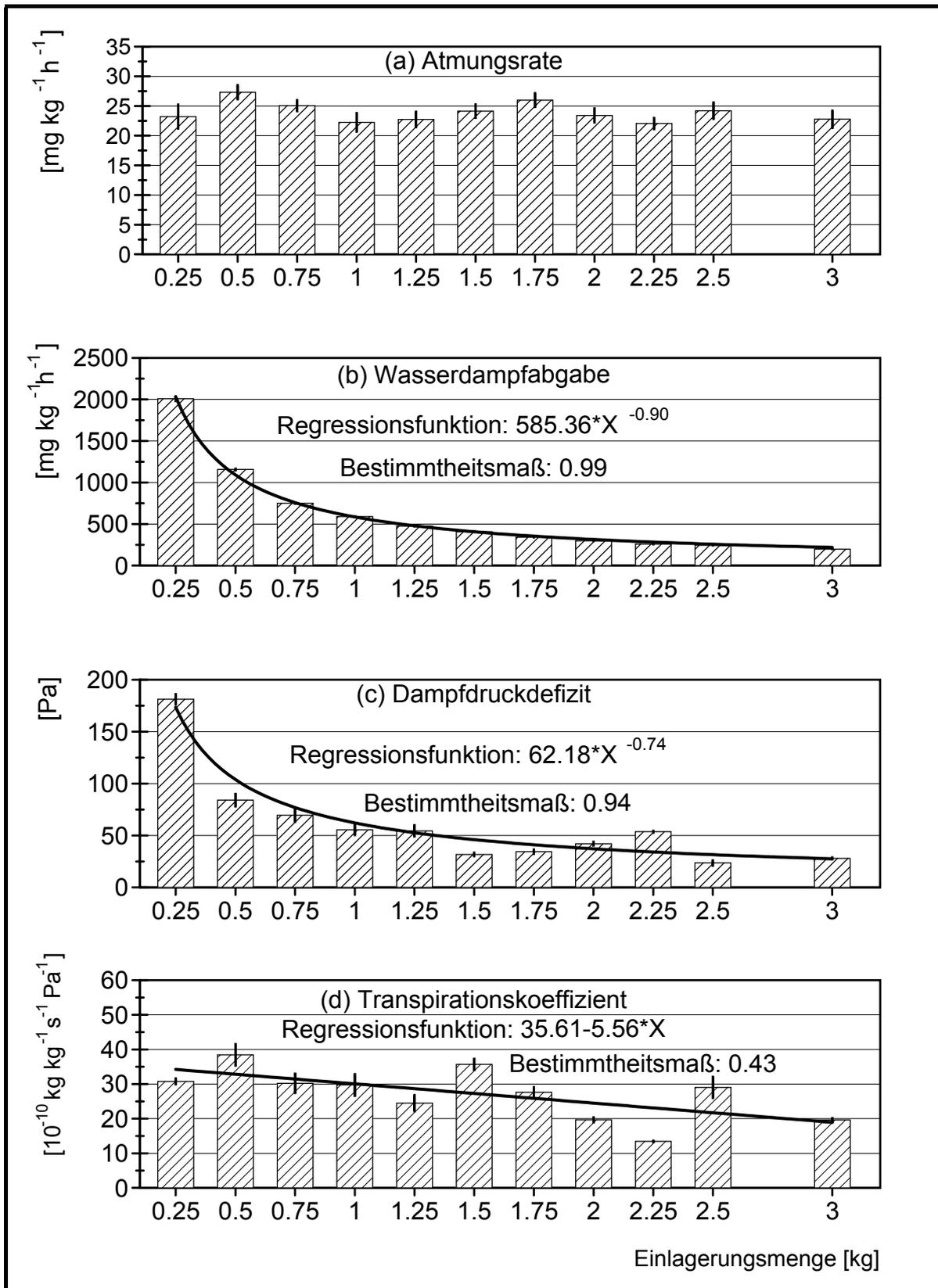


Abbildung 73: Atmungsraten (a), Wasserdampfabgabe (b), Dampfdruckdefizit (c) sowie Transpirationskoeffizienten (d) gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen bei einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten sowie im Kühlraum (Untersuchung E3).

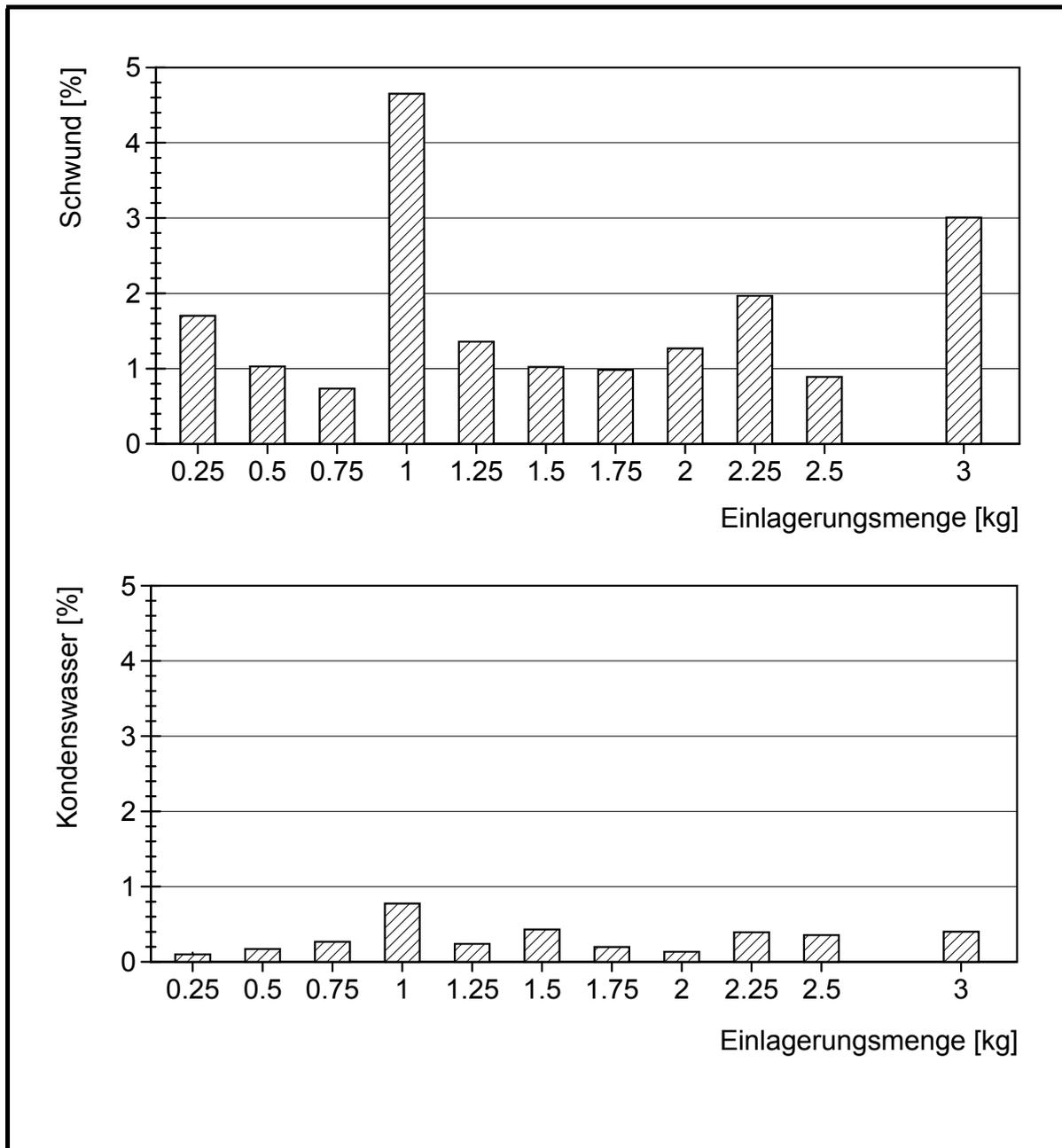


Abbildung 74: Schwund und Kondenswasser gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen bei einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten sowie im Kühlraum (Untersuchung E3).

Schwund gelagerter Einlegegurken sowie Kondenswasser bei einer Kühlraum- und Küvettemperatur von 10 °C (Abbildung 74) waren um mehr als die Hälfte geringer als bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C (Abbildung 72). Trotzdem ließ sich keine Abhängigkeit zwischen Schwund bzw. Kondenswasser und Einlagerungsmenge nachweisen.

### 3.6.3 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration

#### 3.6.3.1 *Temperaturverlauf*

Bei dieser Untersuchung standen keine geeigneten Thermoelemente zur Verfügung, um die Temperatur in den Gurkenfrüchten zu bestimmen. Da Einlegegurken in Bezug auf die Transpirationsintensität und die Fruchtgröße eher Radies (Kapitel 3.4) gleichen als Speisezwiebeln (Kapitel 3.7), wurde für die Berechnungen mit Hilfe der  $Q_{10}$ -Regel die Temperaturmessung in Radiesknollen zugrunde gelegt.

#### 3.6.3.2 *Atmung*

Statistisch konnten keine signifikanten Unterschiede in der Atmungsintensität von Einlegegurkenfrüchten der unterschiedlichen Varianten nachgewiesen werden, weder mit Originalwerten der  $CO_2$ -Abgabe noch mit auf  $10\text{ °C}$  umgerechneten Werten. Abbildung 75 zeigt die mit Hilfe der  $Q_{10}$ -Regel berechneten sowie die tatsächlich gemessenen Atmungsraten gelagerter Einlegegurken bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. Die Atmungsintensität gelagerter Einlegegurken (Abbildung 75) war geringer als die von Radies (Abbildung 58). Obwohl die Simulation der Atmungsintensitäten von Einlegegurken als Reaktion auf Temperaturschwankungen mit den Temperaturverläufen in Radies als Grundlage und einem  $Q_{10}$ -Wert von 3,5 aus der Literatur (BÖTTCHER 1996) durchgeführt wurde, stimmten die tatsächlich gemessenen Atmungsraten bei allen Schwingungsdauern über die gesamte Messdauer hinweg sehr gut mit den vorausgerechneten Werten überein.

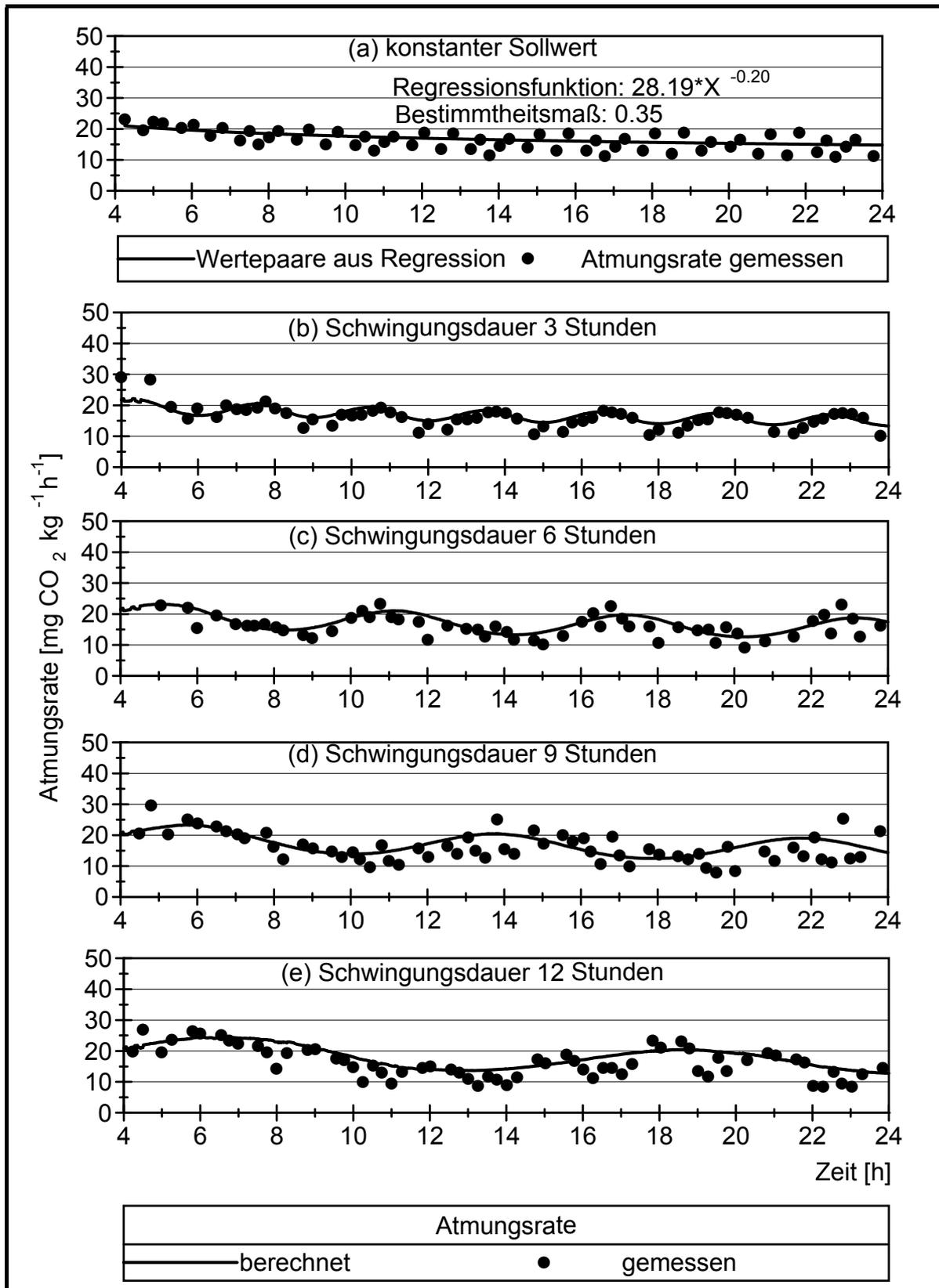


Abbildung 75: Berechnete sowie gemessene Atmungsraten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E4). Den Berechnungen wurden die Wertepaare aus der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

### 3.6.3.3 *Transpiration*

Die Wasserdampfabgabe gelagerter Einlegegurken hat sich mit dem Dampfdruckdefizit verändert (Abbildung 76a und b). Je länger die Schwingungsdauer der Temperaturschwankung war, desto größer war die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Wasserdampfabgabe der gelagerten Gurkenfrüchte. Die Wasserdampf-abgabe bei schwingender Temperatur schwang um diejenige bei konstanter Temperatur, aber nicht als Mittellinie sondern leicht nach oben versetzt. Über die Messdauer hinweg zeigte sich bei der Wasserdampf-abgabe eine leicht steigende Tendenz.

Beim Dampfdruckdefizit war die Abstufung in Abhängigkeit von der Schwingungsdauer der Temperaturschwankung nicht eindeutig (Abbildung 76b). Bei der Schwingungsdauer von drei Stunden lagen sowohl Maxima als auch Minima des Dampfdruckdefizits höher als bei den längeren Schwingungsdauern. Bei neun Stunden Schwingungsdauer waren die Maxima am zweithöchsten gefolgt von sechs Stunden und 12 Stunden. Die Minima der Kurven lagen bei sechs Stunden Schwingungsdauer am niedrigsten und bei neun Stunden sowie 12 Stunden geringfügig höher, die Unterschiede waren jedoch gering. Insgesamt zeigte sich auch beim Dampfdruckdefizit über die Versuchsdauer hinweg eine steigende Tendenz. Jedoch konnte sich die Wasserdampf-abgabe der Einlegegurken nie ganz dem sich mit der Temperaturschwankung verändernden Dampfdruckdefizit anpassen, so dass sich schwankende Transpirationskoeffizienten ergaben (Abbildung 76c). Abbildung 77 zeigt, wie sich Wasserdampf-abgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Einlegegurken bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern zueinander verhielten. Bei konstanter Temperatur verliefen Wasserdampf-abgabe, Dampfdruckdefizit und Transpirationskoeffizient konstant (Abbildung 77a). Bei der Schwingungsdauer 3 h schwankte das Dampfdruckdefizit relativ stark, aber die Wasserdampf-abgabe nur wenig (Abbildung 77b). Deshalb ergaben sich bei sehr niedrigem Dampfdruckdefizit hohe Transpirationskoeffizienten. Ähnlich verlief die Reaktion bei den Schwingungsdauern sechs Stunden, neun sowie 12 Stunden.

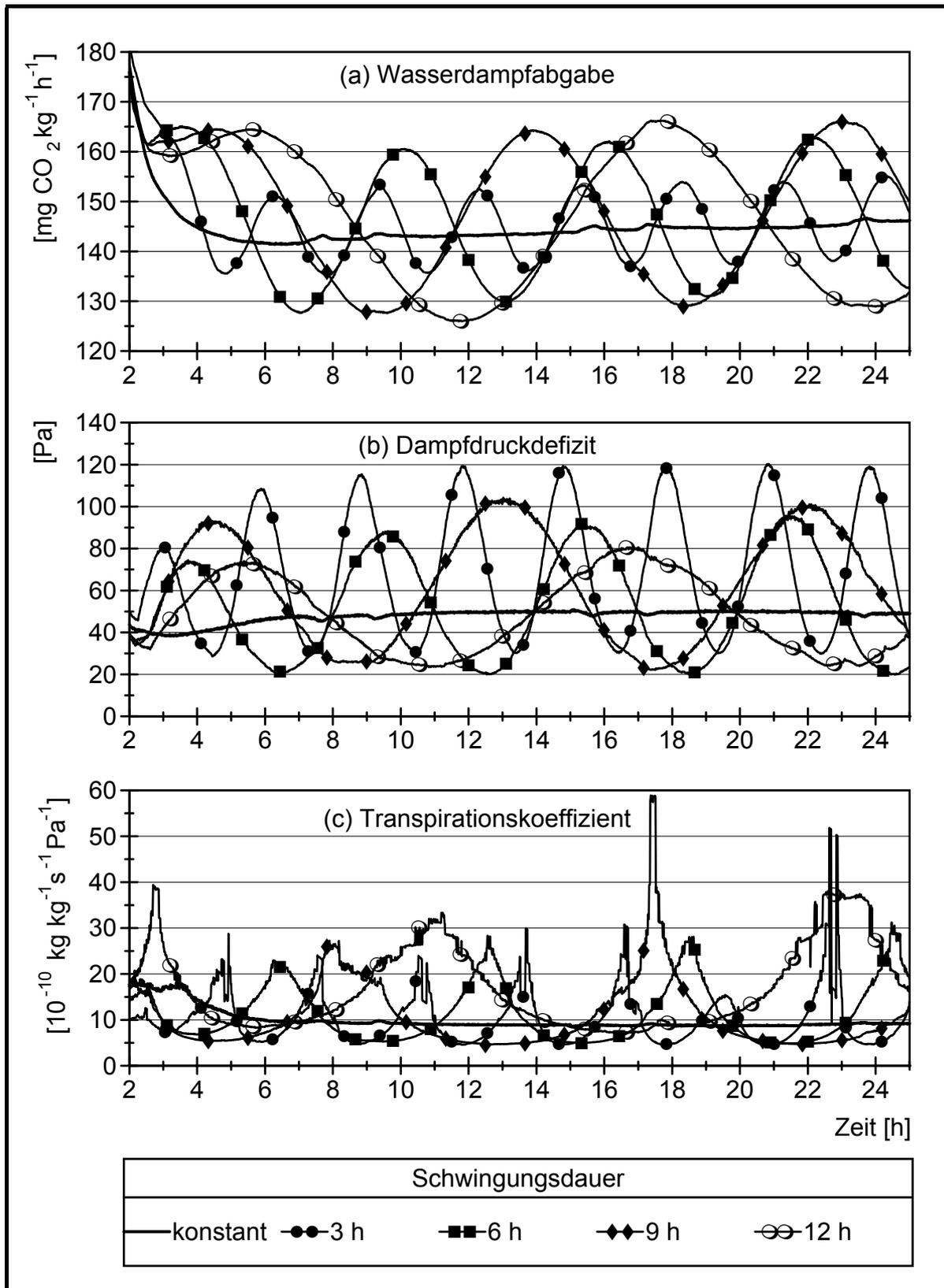


Abbildung 76: Wasserdampfabgabe (a), Dampfdruckdefizit (b) sowie Transpirationskoeffizienten (c) von Einlegegurken bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E4).

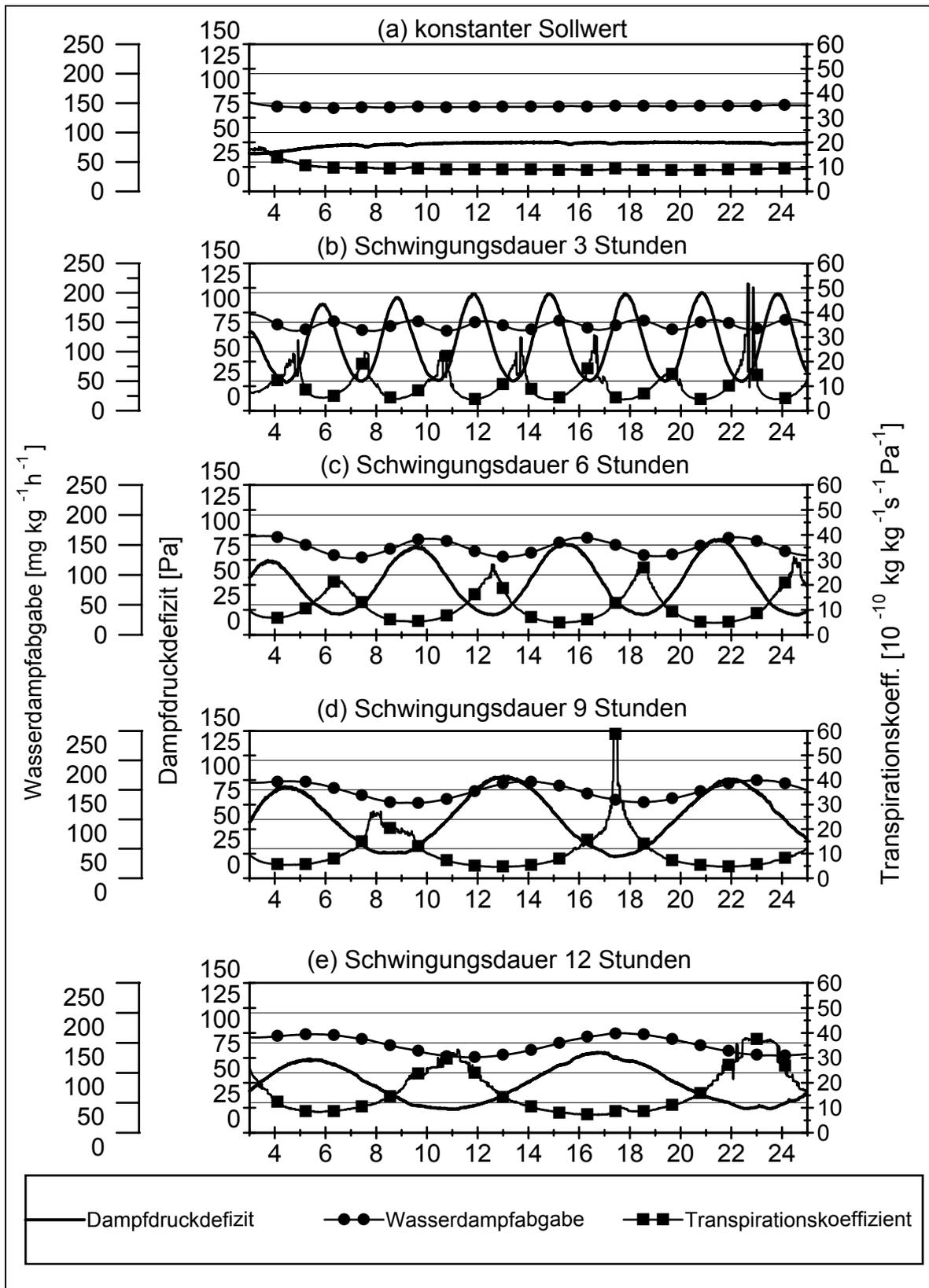


Abbildung 77: Wasserdampfabgabe, Dampdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Einlegegurken im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. (Untersuchung E4).

### 3.6.3.4 Schwund

Die Unterschiede sowohl im Schwund als auch im Kondenswasser zwischen den getesteten Schwingungsdauern waren äußerst gering mit relativ hohen Standardabweichungen, so dass keine signifikanten Unterschiede in der Auswirkung unterschiedlicher Schwingungsdauern auf den Schwund gelagerter Einlegegurken sowie Kondenswasser in den Küvetten nachgewiesen werden konnten (Abbildung 78).

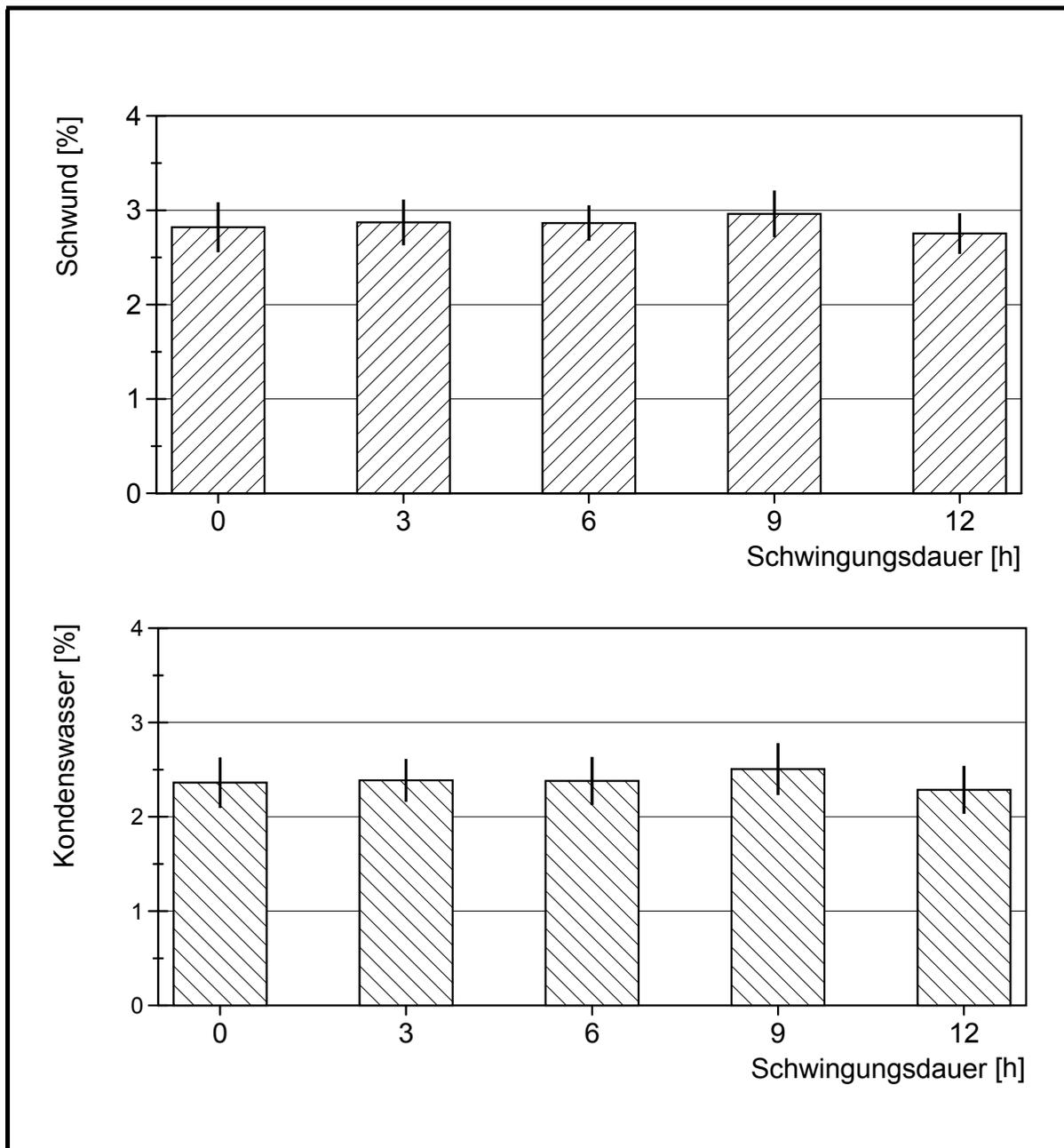


Abbildung 78: Schwund sowie Kondenswasser gelagerter Einlegegurken und deren Standardabweichungen bei konstantem Temperaturverlauf sowie Temperaturschwankungen mit 3 K Hysterese und gestaffelten Schwingungsdauern.

### 3.6.4 Messungen zur Temperaturverteilung in der Küvette

#### *3.6.4.1 Messungen in Einzelfrüchten*

Bei konstanter Temperatur hat sich die Temperatur im Innern der einzeln gelagerten Einlegegurkenfrüchte vollständig der Küvettentemperatur angepasst (Untersuchung E5). Bei schwankender Temperatur waren die Gurkenfrüchte stets kühler als die Küvettenluft. Die Früchte haben die Temperaturschwankung der Küvettenluft mitgemacht. Bei drei Stunden Schwingungsdauer war die Verzögerung deutlich erkennbar, bei sechs Stunden nur leicht und ab acht Stunden Schwingungsdauer war die Temperaturschwankung im Gemüse fast unverzögert (Abbildung 79).

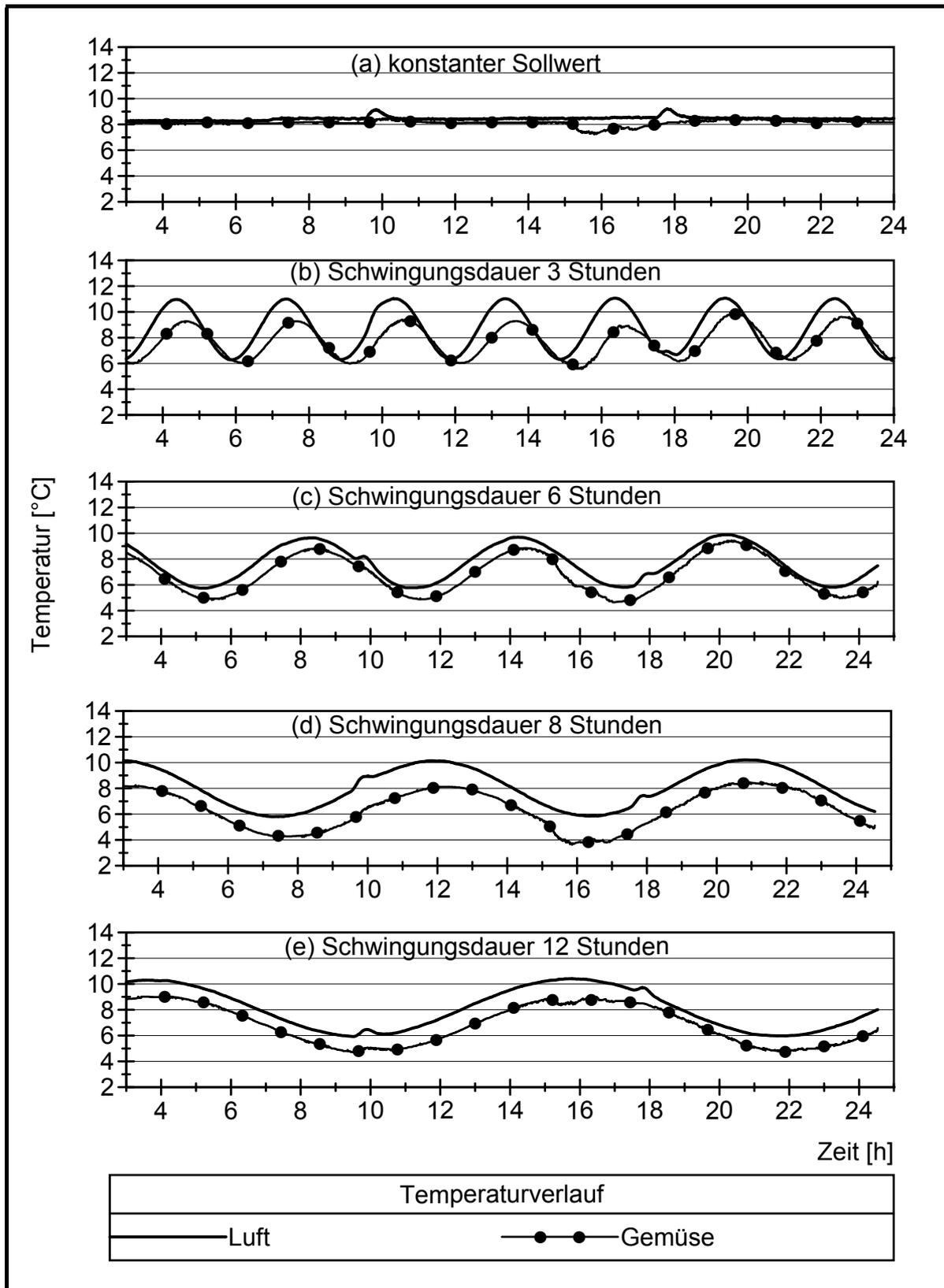


Abbildung 79: Temperaturverlauf in der Kuvettenluft sowie im Innern der einzeln gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E5).

In Tabelle 16 sind die Temperatur-Spannweiten innerhalb der untersuchten Einlegegurkenfrüchte in der unteren und oberen Etage sowie die gesamte Temperatur-Spannweite aufgelistet. In der unteren Etage waren die Temperaturunterschiede bei acht Stunden Schwingungsdauer am geringsten und bei drei Stunden am höchsten. In der oberen Etage war die Temperaturspanne bei konstanter Temperatur am niedrigsten und bei acht Stunden Schwingungsdauer am höchsten. Die Temperaturspanne zwischen den Früchten in der oberen und der unteren Etage lag bei 12 Stunden Schwingungsdauer am niedrigsten und bei acht Stunden am höchsten.

Tabelle 16: Temperatur-Spannweite innerhalb einzeln gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E5).

Schwingungsdauer [h]	Temperatur-Spannweite [K]		
	untere Etage	obere Etage	gesamt
0	0,24	0,10	0,42
3	0,41	0,62	0,79
6	0,31	0,35	0,59
8	0,14	0,98	1,76
12	0,19	0,33	0,41

#### 3.6.4.2 Temperaturmessungen im Stapel

Bei konstanter Temperatur hat sich die Temperatur im Innern der im Stapel gelagerten Einlegegurkenfrüchte vollständig der Lufttemperatur angepasst (Abbildung 80, Untersuchung E6). Bei einer Hysterese von 3 K und einer Schwingungsdauer von sechs Stunden haben die Früchte im Stapel die Temperaturschwingung gedämpft und verzögert mitgemacht.

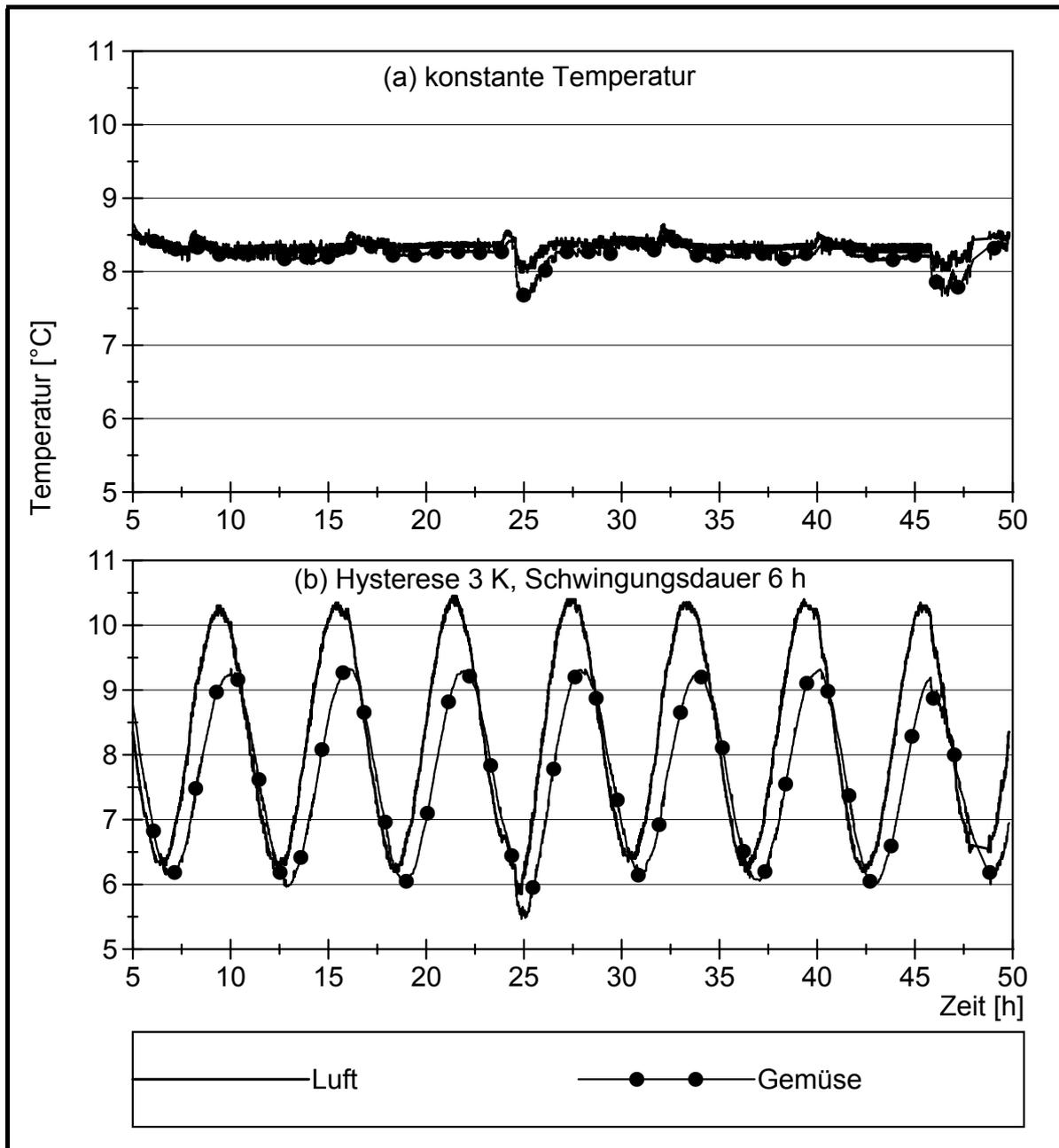


Abbildung 80: Temperaturverlauf in der Kuvettenluft sowie im Innern der im Stapel gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und sechs Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E6). Pro Frucht wurden drei Thermolemente eingestochen.

Tabelle 17 gibt Aufschluss über die Temperaturdifferenzen innerhalb des Stapels von Einlegegurken bei konstanter sowie mit 3 K Hysterese und sechs Stunden Schwingungsdauer schwankender Temperatur (Untersuchung E6). Bei konstanter sowie bei schwankender Temperatur waren die Spannweiten in der unteren Etage geringer als in der oberen Etage, aber jeweils einheitlich. Der gesamte Temperaturunterschied zwischen unten und oben war bei schwankender Temperatur um 0,5 K größer als bei konstanter Temperatur, sowohl in der Luft als auch im Gemüse.

Tabelle 17: Temperatur-Spannweite im Stapel gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und 6 h Schwingungsdauer (Untersuchung E6).

Schwingungs- dauer [h]	Temperatur-Spannweite [K]			
	untere Etage	obere Etage	gesamt Gemüse	gesamt Luft
0	0,5	0,9	1,0	0,8
6	0,6	0,8	1,5	1,3

In Abbildung 81 ist der Temperaturverlauf in der Küvettenluft sowie im Innern der gelagerten Einlegegurken im Stapel bei konstanter und mit 3 K Hysterese und 3 h Schwingungsdauer schwankender Temperatur dargestellt (Untersuchung E7). Die Temperatur in den Gurken lag niedriger als in der Küvettenluft. Die Gurken haben die Temperaturschwankung gedämpft und verzögert mitgemacht.

In Tabelle 18 (Untersuchung E7) sind die Spannweiten der Temperaturen gelagerter Einlegegurken im Stapel bei konstanter Temperatur sowie bei schwankender Temperatur mit einer Hysterese von 3 K und einer Schwingungsdauer von sechs Stunden verglichen. In der unteren Etage war die Temperaturdifferenz bei konstanter Temperatur wesentlich kleiner als bei schwankender Temperatur, in der oberen Etage war es umgekehrt. Die gesamte Temperatur-Spannweite zwischen oben und unten war bei 3 K Hysterese und drei Stunden Schwingungsdauer etwas höher als bei konstanter Temperatur. In der Luft waren die Unterschiede zwischen oben und unten bei konstanter sowie bei schwankender Temperatur gleich.

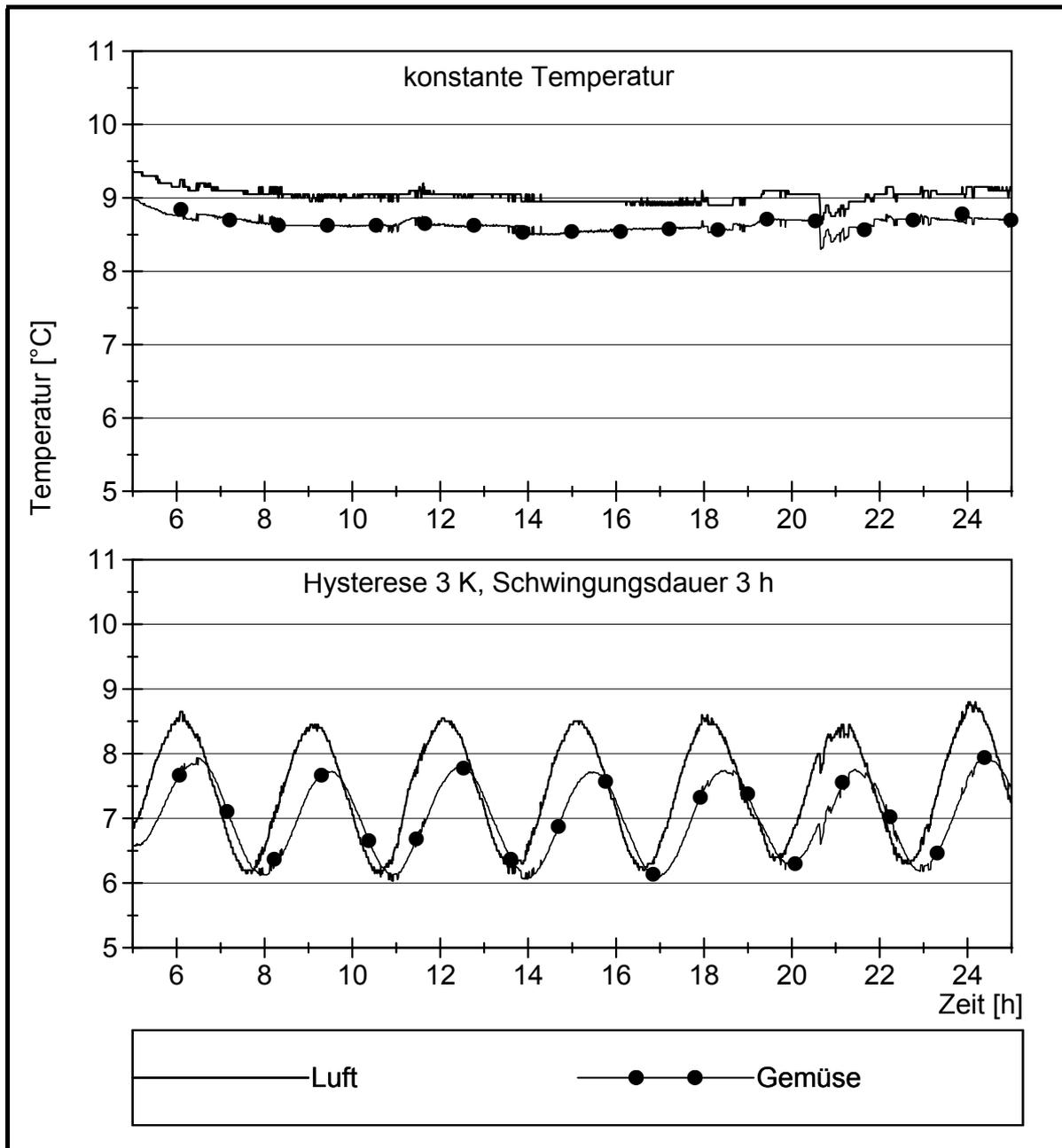


Abbildung 81: Temperaturverlauf in der Küvettenluft sowie im Innern der im Stapel gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und drei Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E 7). Pro Frucht wurde ein Thermoelement ins Zentrum eingestochen.

Tabelle 18: Temperatur-Spannweite im Stapel gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und drei Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E7).

Schwingungsdauer [h]	Temperatur-Spannweite [K]			
	untere Etage	obere Etage	gesamt Gemüse	gesamt Luft
0	0,3	0,9	1,1	0,7
3	1,2	0,4	1,5	0,7

### 3.7 Zwiebeln

#### 3.7.1 Auswirkung einer Staffelung der Schwingungsdauer auf Atmung und Transpiration

##### 3.7.1.1 Temperaturverlauf

Da die Zwiebeln vor den Untersuchungen bei 1 °C gelagert wurden, dauerte es ca. 3,5 Stunden, bis sich die Temperatur im Inneren der Bulben der Küvettentemperatur angepasst hatte. Die Temperaturkurven in Abbildung 82 zeigen aber deutlich, dass die Bulben die Temperaturschwankung verzögert und gedämpft mitgemacht haben. Je langsamer die Schwingungsdauer der Lufttemperaturschwankung war, desto ausgeprägter schwang die Temperatur im Inneren der Bulben mit. Der Übersichtlichkeit halber wurden in Abbildung 82 die Temperaturkurven nur für einen Ausschnitt von 24 Stunden dargestellt.

In Tabelle 19 sind die maximalen, minimalen sowie die mittleren Temperaturen in der Luft und in den Zwiebeln aufgeführt. Daraus kann abgelesen werden, dass bei längerer Schwingungsdauer die Temperaturschwankungen im Gemüse größer wurden. Außerdem verlagerte sich der Temperaturmittelwert weiter nach unten, was daran lag, dass in der Versuchsanlage mehr Leistung zum Aufheizen als zum Abkühlen verwendet wurde. Dadurch konnte sich das Gemüse bei schneller Temperaturschwankung nicht vollständig abkühlen. Es fand aber keine stetige Erwärmung des Gemüses während des Untersuchungsverlaufes statt.

Es wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 1,42 ermittelt und den Berechnungen mittels  $Q_{10}$ -Regel zugrunde gelegt.

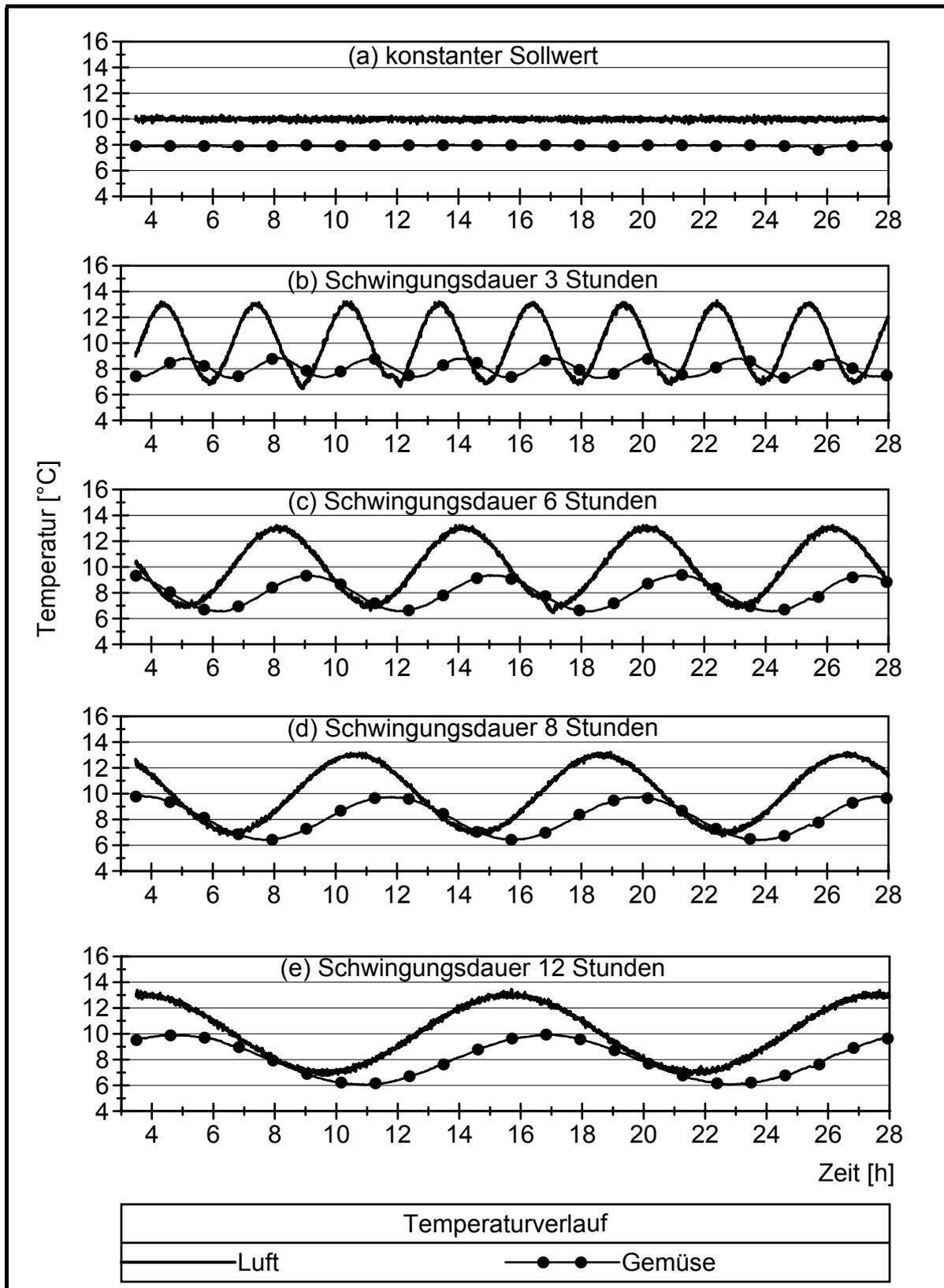


Abbildung 82: Temperaturverlauf in der Luft und in den Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1).

Tabelle 19: Minimal-, Maximal- und Mittlere Temperaturen in der Luft und in den Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1).

Temperatur [°C]	Minimum		Maximum		Mittelwert	
	Luft	Gemüse	Luft	Gemüse	Luft	Gemüse
<b>0</b>	9.45	7.93	10.39	8.15	10.00	7.56
<b>3</b>	6.46	8.07	13.30	8.86	10.02	7.24
<b>6</b>	6.46	7.94	13.30	9.43	9.88	6.53
<b>8</b>	6.69	8.08	13.23	9.86	9.87	6.37
<b>12</b>	6.69	7.99	13.46	9.94	9.89	6.03

### 3.7.1.2 Atmung

Statistisch konnten keine signifikanten Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Abgabe der einzelnen Varianten nachgewiesen werden, weder mit Originalwerten der Atmungsraten, noch mit auf 10 °C umgerechneten Werten. Deshalb werden die Ergebnisse grafisch verdeutlicht. Die Regressionsanalyse der mit der Q<sub>10</sub>-Regel umgerechneten Atmungsraten über die Zeit ergibt folgende Funktion:

$$Y = ax^b$$

Tabelle 20: Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße des Atmungsverlaufs von Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1).

Schwingungsdauer [h]	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß
	<i>a</i>	<i>b</i>	
<b>0</b>	2.80	0.20	0.78
<b>3</b>	3.00	0.19	0.60
<b>6</b>	3.12	0.18	0.70
<b>8</b>	3.22	0.18	0.66
<b>12</b>	3.03	0.20	0.84

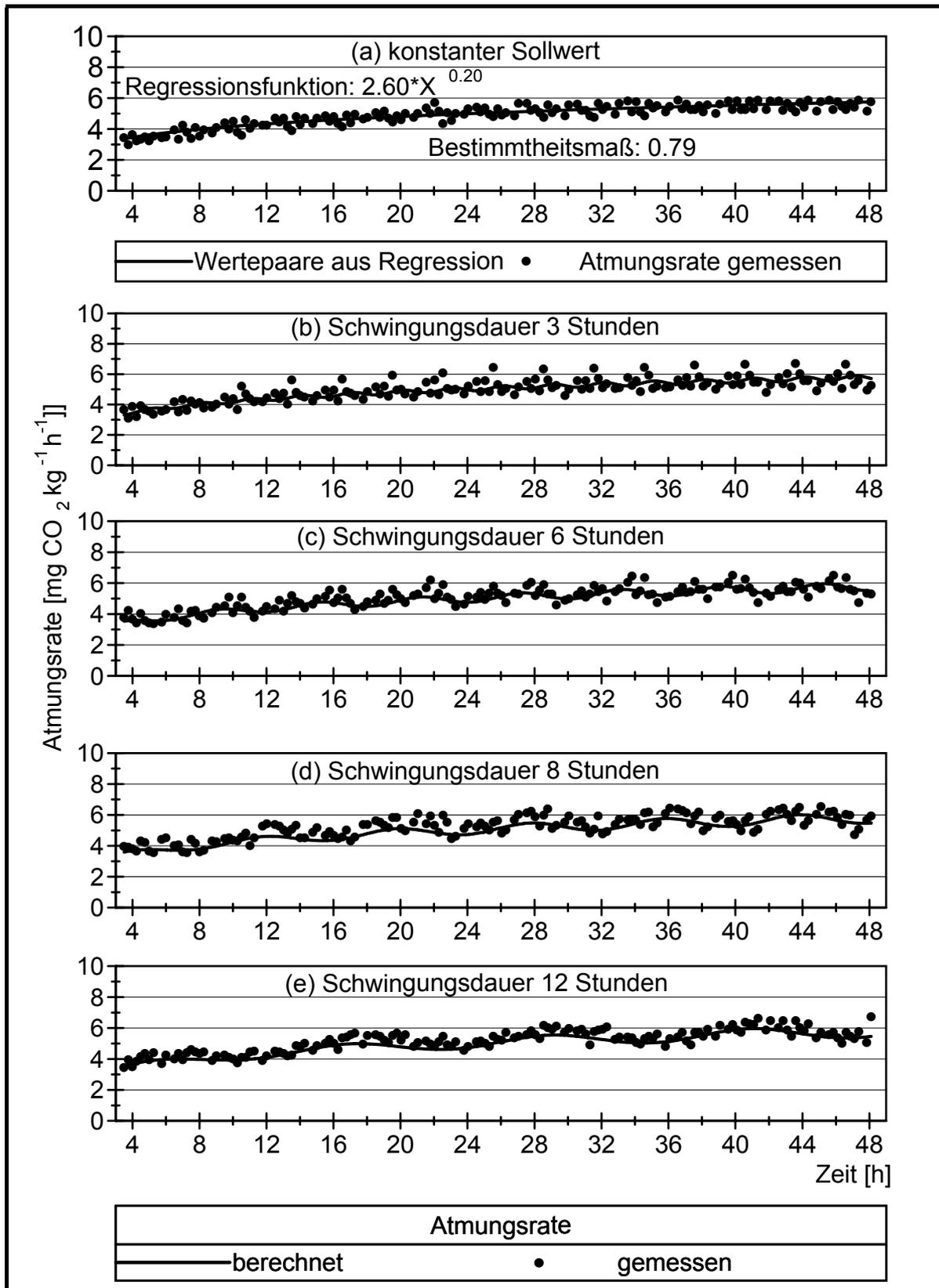


Abbildung 83: gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Speisezwiebeln bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). Den Berechnungen wurden die Wertepaare der Regressionsgleichung der Atmung bei konstanter Temperatur zugrunde gelegt.

Die Atmungsrate gelagerter Speisezwiebeln bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern war prinzipiell den vorausberechneten Kurven gefolgt (Abbildung 83). Die Maxima der gemessenen Werte lagen eher höher als die berechneten Werte. Grundsätzlich war der Verlauf der Atmungsraten der Zwiebeln sowohl bei konstanter als auch bei schwankender Temperatur im Gegensatz zu dem der weiteren untersuchten Gemüsearten über die Lagerdauer hinweg steigend.

### 3.7.1.3 *Transpiration*

Aufgrund des hohen Transpirationswiderstandes der Zwiebelschalen ist an den Küvettenwänden kein Wasserdampf kondensiert. Dadurch ist die Zwiebel für die Darstellung der Transpiration in Abhängigkeit von der Temperatur sehr gut geeignet.

Im Gegensatz zur Atmungsrate sank die Wasserdampfabgabe der Zwiebeln mit der Lagerdauer kontinuierlich ab (Abbildung 84a) und passte sich zusätzlich dem sich mit den Temperaturschwankungen verändernden Dampfdruckdefizit an. Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Wasserdampfabgabe veränderte sich mit der Schwingungsdauer. Bei einer Schwingungsdauer von drei Stunden war die Spannweite am geringsten, bei längerer Schwingungsdauer wurde die Spannweite größer, die Unterschiede zwischen sechs Stunden, acht Stunden sowie 12 Stunden Schwingungsdauer waren jedoch sehr gering. Bei acht Stunden Schwingungsdauer waren die Maxima am größten, zwischen sechs Stunden und 12 Stunden Schwingungsdauer gab es hier kaum Unterschiede. Die minimale Wasserdampfabgabe war jeweils bei 12 Stunden Schwingungsdauer am geringsten. Generell konnte festgestellt werden, dass die Wasserdampfabgabe bei Temperaturerniedrigung sank und bei Temperaturerhöhung wieder anstieg. Es fand aber bei schwankenden Temperaturen keine überproportionale Steigerung der Wasserdampfabgabe im Vergleich zu konstanter Temperaturführung statt.

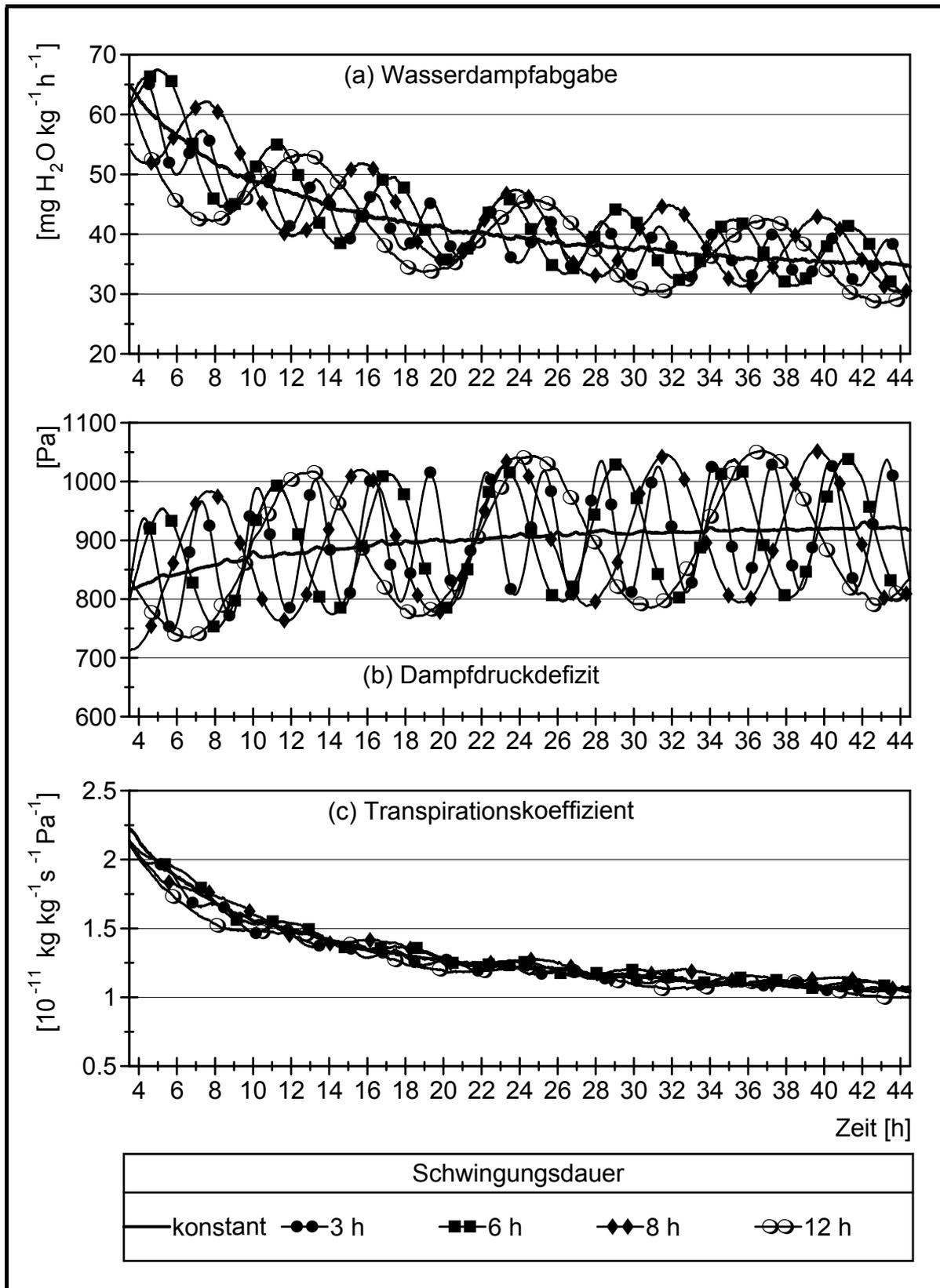


Abbildung 84: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1).

Das Dampfdruckdefizit zeigte insgesamt einen leicht steigenden Verlauf. Doch auch hier wirkte sich die Temperaturschwankung derart aus, dass bei steigender Temperatur das Dampfdruckdefizit stieg und bei sinkender Temperatur wieder fiel (Abbildung 84b). Hinsichtlich der Spannweite zwischen maximalem und minimalem Dampfdruckdefizit war zwischen den getesteten Schwingungsdauern nur eine leichte Abstufung zu erkennen. Die Spannweite war bei drei Stunden Schwingungsdauer am geringsten und wurde bei längerer Schwingungsdauer größer.

Folglich zeigten die Transpirationskoeffizienten der gelagerten Speisezwiebeln über die Versuchsdauer hinweg eine fallende Tendenz. Zwischen konstanter Temperatur und Temperaturschwankungen mit gestaffelten Schwingungsdauern war jedoch kein wesentlicher Unterschied zu erkennen (Abbildung 84c).

Wie sich Dampfdruckdefizit, Wasserdampfabgabe und Transpirationskoeffizienten gelagerter Zwiebeln im direkten Vergleich zueinander verhielten zeigt Abbildung 85. Grundsätzlich stieg das Dampfdruckdefizit während der Versuchsdauer an und schwankte mit der Temperatur. Dementsprechend passte sich die Wasserdampfabgabe den Schwankungen des Dampfdruckdefizits an, also bei steigendem Dampfdruckdefizit stieg auch die Wasserdampfabgabe und bei sinkendem Dampfdruckdefizit sank sie wieder. So ergaben sich bei den Transpirationskoeffizienten nur geringe Schwankungen.

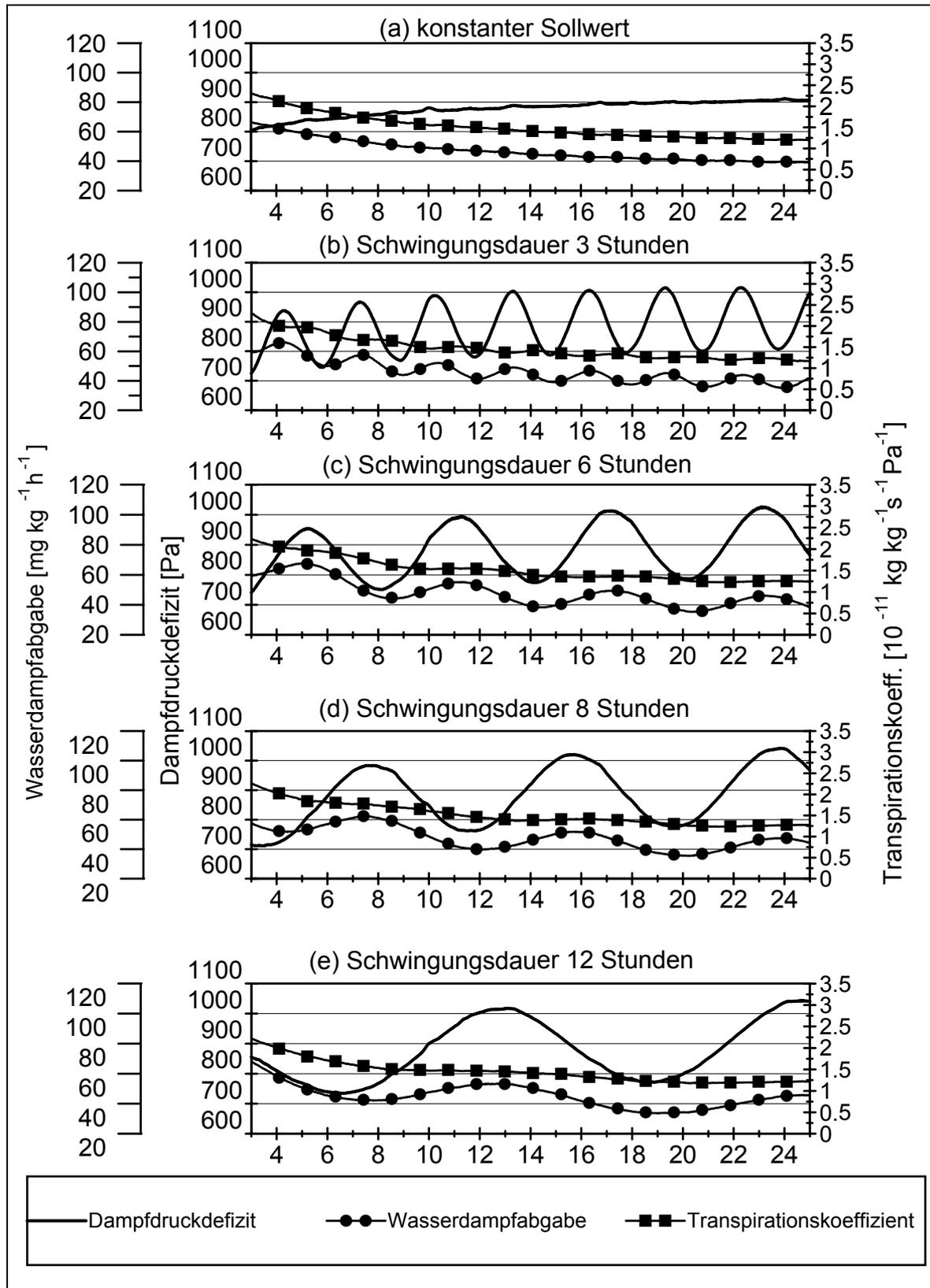


Abbildung 85: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Speisezwiebeln im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. (Untersuchung Z1).

## 4 Diskussion

Sowohl Stoffwechsel- als auch Transpirationsintensität von gelagertem Gemüse werden sehr stark durch die Temperatur beeinflusst. Dass sich demnach auch Temperaturschwankungen auf Atmung und Transpiration von Gemüse auswirken, steht außer Frage. Diskutiert werden muss jedoch einerseits, ob sich die Stoffwechselintensität des Lagergutes gemäß der Arrhenius-Gleichung bzw.  $Q_{10}$ -Regel verhält, oder ob es durch schwankende Lagertemperaturen zu einer physiologischen Überreaktion kommt, wie bei RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) angedeutet.

Andererseits muss die Frage erörtert werden, inwiefern der Feuchtigkeitsentzug der Pflanzenorgane durch schwankende Lagertemperaturen erhöht wird. Bei SEISENBERGER (1996) waren die Verluste höher, wenn die Lagertemperatur mit kleiner Hysterese schnell um ihren Mittelwert oszillierte als bei größerer, langsamer Temperaturschwankung.

Im Grunde schließen sich diese beiden Hypothesen nicht gegenseitig aus. Bei RUBIN (1953) geht es um die Atmung und bei SEISENBERGER (1996) um Verluste allgemein, die aber zum größten Teil durch Transpiration bzw. durch Feuchteentzug des Kühlsystems verursacht werden. Als dritte Hypothese wäre zu erörtern, ob sich die Effekte bei Temperaturschwankungen oberhalb und unterhalb des Mittelwertes gegenseitig ausgleichen.

### 4.1 *Atmung und Temperatur*

Wie alle chemischen Prozesse ist auch die Atmung dem Einfluss der Temperatur unterworfen (LUNDEGÅRDH 1960). Das klassische Konzept des Temperatureffektes auf chemische und biochemische Prozesse ist, dass eine Temperaturerhöhung um 10 K die Reaktionsrate verdoppelt. Für einzelne Reaktionen trifft dies sehr oft zu. Handelt es sich aber, wie bei der Atmung von Pflanzenmaterial, um einen Prozess mit mehreren Stufen, bei denen die Zwischenprodukte alternative Wege zur Umsetzung haben, muss der Temperatureffekt nicht unbedingt so eindeutig sein. Der plötzliche Temperaturanstieg um 10 K, sofern sich die Temperatur in einem nicht schädigenden Bereich befindet, bewirkt bei Pflanzenmaterial eine ungefähre Verdoppelung der  $O_2$ -Aufnahme,  $CO_2$ -Abgabe oder des Kohlenhydrateabbaus, aber danach könnten eine Unzahl von Anpassungen wie erhöhte Seiten- und Rückreaktionen die Reaktionsrate des Gesamtprozesses beeinflussen. Außerdem können Kurzzeit- und Langzeitreaktion des gelagerten Produktes unterschiedlich sein (BURTON 1982). Am Beispiel von

Kartoffeln zeigt BURTON (1982), dass das Verhältnis der Atmungsraten bei unterschiedlichen Temperaturen abhängig ist von der Lagerdauer, dem physiologischen Zustand und von der weiteren Aktivität des Materials, z. B. als Folge der Dormanz oder des verstärkten Austriebs. ROBINSON et al. (1975) bezeichnen die Annahme, dass sich die Atmung von gelagertem Gemüse bei einem Temperaturanstieg um 10 K verdoppelt, als "dubios". Die Autoren kritisieren, dass diese Annahme in Publikationen oft für Berechnungen von Atmungsraten bei unterschiedlichen Temperaturen verwendet wird, ohne Überprüfung der tatsächlichen Auswirkung von verschiedenen Temperaturbedingungen auf die Atmungsraten von Gemüse. Die Autoren heben hervor, dass Pflanzenmaterial variabel ist und die von ihnen bestimmten Atmungsraten nur für die verwendeten Produkte gelten. Sie sind zwar als repräsentativ anzusehen, dennoch können Abweichungen möglich sein. ROBINSON et al. (1975) haben die Atmungsraten von zahlreichen Obst- und Gemüsearten bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt. In Tabelle 21 sind die Atmungsraten der Gemüsearten ausgewählt, die auch in eigenen Untersuchungen verwendet wurden. Zusätzlich wurden Atmungsraten aus BÖTTCHER (1996) sowie aus HENZE und HANSEN (1988) dargestellt. Schon allein der Vergleich der Werte aus diesen Quellen zeigt große Differenzen. Korrespondierend zu Tabelle 21 sind in Tabelle 22 die jeweiligen  $Q_{10}$ -Werte berechnet. Daraus wird erkennbar, dass die  $Q_{10}$ -Werte für jede Gemüseart nur im Zusammenhang mit dem Temperaturbereich betrachtet werden können, für den sie bestimmt worden sind. LUNDEGÅRDH (1960) berichtet von kurz andauernden Versuchen mit Kartoffelblättern, dass deren Atmung einer sehr steilen Optimumkurve folgte, wobei die  $Q_{10}$ -Werte im aufsteigenden Ast der Kurve stetig anstiegen. Der Autor weist bereits darauf hin, dass bei physiologischen Vorgängen Differenzen in verschiedenen Temperaturbereichen beobachtet wurden, und das Alter der Organe eine Rolle spielt. KADER (1987) hingegen gibt  $Q_{10}$ -Werte von 2,5 bis 4 für einen Temperaturbereich von 0 °C bis 10 °C und von 2,0 bis 2,5 für einen Temperaturbereich von 10 °C bis 20 °C an. BURZO (1980) verzeichnete bei Untersuchungen mit 18 Gemüsearten einen Anstieg der Atmungsintensität um 2,8 bei einer Temperaturerhöhung von 0 °C auf 10 °C, während sie sich bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C auf 20 °C nur um den Faktor 2,1 erhöhte. Nach den Messungen von ROBINSON et al. (1975) war jedoch weder nachzuweisen, dass der  $Q_{10}$ -Wert mit steigender Temperatur sinkt, noch umgekehrt. Demnach scheint es für jede Gemüseart einen bestimmten Temperaturbereich zu geben, in dem sich eine Temperaturänderung besonders stark auf den Stoffwechsel auswirkt, nämlich dann, wenn der  $Q_{10}$ -Wert am höchsten ist. BURZO (1980) hat festgestellt, dass sich die Atmungsintensitäten unterschiedlicher Gemüsearten bei einer Temperaturerhöhung von 0 °C auf 5, 10, 15 sowie 20 °C 1,7-, 2,8-, 2,5- sowie 6-fach erhöhten. Bei einer Temperaturabsenkung von 10 °C auf 0 °C trat bei kälteempfindlichen Arten (z. B. Tomaten) eine

Verringerung der Atmungsintensität um das 3,3-fache, bei resistenten Arten nur um das 2,7-fache auf.

Tabelle 21: Atmungsraten einiger Gemüsearten bei unterschiedlichen Temperaturen (aus ROBINSON et al. 1975, BÖTTCHER 1996, HENZE und HANSEN 1988)

	CO <sub>2</sub> -Produktion [mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]							
	nach ROBINSON					nach BÖTTCHER / HENZE u. HANSEN		
Temperatur [°C] / Gemüseart	0	5	10	15	20	5	10	15
Bohnen	35	52	87	120	145	5,8 - 6,6	9,4 - 12,1	15,4 - 22,0
Gurken	6	8	13	14	15	1,4 - 2,5	2,8 - 3,6	5,5 - 7,7
Einlegegurken	-	-	-	-	-	1,4 - 1,9	2,75 - 3,4	5,0 - 6,6
Zwiebeln	3	5	7	7	8	0,8 - 1,3	1,2 - 1,8	1,7 - 2,5
Spinat	50	70	80	120	150	6,0 - 10,0	11,6 - 17,1	22,0 - 30,0
Tomaten	6	9	15	23	30	1,0 - 1,3	1,8 - 2,3	2,8 - 4,5
Radies	-	-	-		-	4,4 - 4,8	5,5 - 6,1	10,8 - 11,5

In eigenen Untersuchungen lagen die Atmungsraten z. T. etwas niedriger als die Angaben von ROBINSON et al. (1975), aber höher als diejenigen von BÖTTCHER (1996) und HENZE und HANSEN (1988). Bei Temperaturschwankungen lag der Temperaturmittelwert in der Regel bei 10 °C, die Schwankungsbreite lag maximal zwischen 7 °C und 13 °C, deshalb wird die gemessene Atmungsintensität immer mit einer Atmungsintensität bei 10 °C aus den Tabellen verglichen. Für Stangenbohnen wurden Atmungsintensitäten zwischen 20 und 60 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> gemessen. Speisewiebeln hatten bei uns (Untersuchung Z 1, Abbildung 83) Atmungsraten von 2,9 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> bis 6,7 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, also Werte, die zwischen denen von ROBINSON et al. (1975) und BÖTTCHER (1996) liegen. Die Untersuchungen an Einlegegurken zeigten höhere Atmungsraten als bei BÖTTCHER (1996), nämlich zwischen 22 und 45 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Untersuchung E1, Schwingungsdauern 40, 50, 60 min, Hysterese konstant, 1 K und 2 K), Mittelwerte von 17,8 bis 21,8 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> bzw. von 22,7 bis 27,9 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Untersuchungen E2 und E3, Abbildung 71 und Abbildung 73, Staffelung der Einlagerungsmenge). Dies lässt sich durch die höheren Temperaturen zwischen 10 °C und 16 °C erklären. Bei der Staffelung der Schwingungsdauer kamen bei Temperaturen zwischen 7 °C und 13 °C Atmungsraten zwischen 7,8 und 31,4 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> zustande (Untersuchung E4, Abbildung 75). Bei Spinat lagen sie zwischen 80 und knapp unter 40 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> bei Untersuchungen mit drei Schwingungsdauern und drei Hysteresen (Untersuchung S1, Abbildung 20) und nur zwischen 40 und 20 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> bei Temperaturschwankungen mit sechs Stunden Schwingungsdauer und unterschiedlichen Hysteresen (Untersuchung S2, Abbildung 25). Diese Unterschiede können aber nicht durch die Temperaturschwankung bedingt

gewesen sein, da die Varianten, die bei konstanter Temperatur gelagert wurden, die Unterschiede ebenfalls zeigten.

Offensichtlich haben sich physiologische Merkmale wie Alter, Größe und Beschaffenheit der Blätter auf die Atmungsintensität ausgewirkt. Die Blätter für Untersuchung S1 wurden im Versuchsjahr 1998 Ende Mai bzw. Anfang Juni geerntet, diejenigen für Untersuchung S2 1999 bereits Mitte Mai. Die Blätter, die für Untersuchung S3 (Staffelung der Einlagerungsmenge, Abbildung 30) einige Tage später geerntet worden sind, wiesen nämlich ähnlich hohe Atmungsraten auf wie die aus Untersuchung S1. Bei den untersuchten Tomaten lagen die Atmungsraten eher im Bereich der Angaben von ROBINSON et al. (1975) zwischen  $9,3$  und  $20,6 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Die Atmungsraten von Radies bei Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs und 12 Stunden bei konstanter Temperatur und Hysteresen von 1 K und 2 K sowie bei gestaffelten Schwingungsdauern lagen ebenfalls höher als die Werte, die bei HENZE und HANSEN (1988) angegeben werden. So wurden bei Untersuchung R1 (Abbildung 51 bis Abbildung 53) zwischen  $14$  und  $96 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  sowie bei Untersuchung R2 (Abbildung 58) zwischen  $13,7$  und  $46,8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  gemessen.

Tabelle 22: Aus den von ROBINSON et al. (1975) gemessenen Atmungsraten berechnete  $Q_{10}$ -Werte.

Temperaturbereich [°C] / Gemüseart	$Q_{10}$ -Werte			
	0-5	5-10	10-15	15-20
breite Bohnen	2,21	2,79	1,90	1,46
Gurken	1,77	2,64	1,16	1,15
Zwiebeln	2,77	1,96	1	1,31
Spinat	1,96	1,31	2,25	1,56
Tomaten	2,25	2,78	2,35	1,70

In den eigenen Untersuchungen wurde für Stangenbohnen ein  $Q_{10}$ -Wert von 1,98 und für Zwiebeln von 1,42 ermittelt und den Berechnungen zugrunde gelegt. Der Temperaturbereich, für den diese Werte ermittelt wurden, lag zwischen  $7 \text{ °C}$  und  $13 \text{ °C}$ . Diese Werte sind durchaus mit denen von ROBINSON et al. (1975) vergleichbar. PRAEGER (2001) hat für den Temperaturbereich zwischen  $10 \text{ °C}$  und  $20 \text{ °C}$  für Schlangengurken einen  $Q_{10}$ -Wert von 1,4 und für Zwiebeln einen Wert von 2,1 ermittelt.

Betrachtet man eine Atmungskurve mit typisch exponentiellem zeitlichem Verlauf, so stellt sich die Frage, an welcher Stelle der Kurve gilt der  $Q_{10}$ -Wert eigentlich? Hat sich die Temperatur nach der Einlagerung bereits nach wenigen Stunden der Umgebungstemperatur angepasst, so ist die Atmung des Gemüses in der Regel relativ hoch und sinkt im weiteren Verlauf rasch ab, obwohl das Gemüse immer dieselbe Temperatur hat (z. B. bei den Untersuchungen mit gestaffelten Schwingungsdauern bei Radies (Untersuchung R2, Abbildung 58) und Zwiebeln (Untersuchung Z1, Abbildung 83). Diese höhere Atmungsintensität in den ersten Stunden nach der Einlagerung könnte eine Reaktion auf den Stress bei der Ernte sein, der dann mit der Zeit abklingt, oder von einer langsamen Anpassung des Stoffwechsels an große Temperaturdifferenzen herrühren. Werden  $Q_{10}$ -Werte aus Angaben von BÖTTCHER (1996) berechnet, so ergeben sich für Buschbohnen Werte von 2,66 - 3,33, für Radies mit Laub 2,66 - 2,55, für Tomaten 2,77 - 3,56 und für Zwiebeln 2 - 1,96. Die Bereiche gelten jeweils für erntefrisches Gemüse bzw. für Gemüse in der Ruhephase. Das bedeutet also auch, dass sich der  $Q_{10}$ -Wert mit der Lagerdauer ändert. Der  $Q_{10}$ -Wert aus unseren Untersuchungen mit Radies (mit Laub) ergab 2,25 und lag damit etwas niedriger als die Literaturangabe. Auch ARTÉS et al. (1993) berichten, dass die  $Q_{10}$ -Werte gelagerter Grapefruit mit zunehmender Lagerdauer abnahmen.

Die Berechnung der  $Q_{10}$ -Werte aus Atmungsraten und Temperaturen der vorliegenden Untersuchungen hat sich dementsprechend schwierig gestaltet. KADER (1987) und SALUNKHE und DESAI (1985) fordern, dass die  $Q_{10}$ -Werte in der initialen Atmungsphase berechnet werden sollen, da in dieser Zeit die Atmung der meisten Gemüsearten (außer Zwiebeln und Knoblauch) am höchsten ist. Für den Lageristen dienen die  $Q_{10}$ -Werte in erster Linie dazu, die maximal zu erwartende Atmungswärme zu ermitteln und danach den Lagerraum mit der erforderlichen Kälte- und Lüfterleistung auszustatten (BÖTTCHER 1996, KADER 1987, SALUNKHE und DESAI 1985).

In der Regel werden die Faktoren für  $Q_{10}$  bestimmt, indem mehrere Partien einer Gemüseart bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert und deren Atmungsraten zu adäquaten Zeitpunkten verglichen werden. MEMPEL (2000) hat für die Bestimmung des  $Q_{10}$ -Wertes von Möhren die Temperatur während der Messung um 5 K erhöht und erhielt einen  $Q_{10}$ -Wert von 1,8, der den Angaben aus der Literatur entsprach (RYALL und LIPTON 1972). In der vorliegenden Arbeit wurden die  $Q_{10}$ -Werte erst im nachhinein bestimmt. Zu jedem gemessenen Wert für die Atmungsrate lag ein dazugehöriger Temperaturwert vor. Die  $Q_{10}$ -Werte wurden dann aus dem Verhältnis von einem Wert zum nächsten berechnet und insgesamt gemittelt. Hier überlagerte sich folglich der Temperatureffekt einerseits und die steigende (bei Zwiebeln) oder fallende Tendenz der Atmungsrate andererseits. Außerdem waren die

Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen aufeinanderfolgenden Messwerten für CO<sub>2</sub> sehr gering. Besonders in der Phase der initialen Atmung kamen entweder utopisch hohe oder sehr kleine Werte für Q<sub>10</sub> heraus. Deshalb wurden diese Werte bei der Berechnung ausgeschlossen. Wurden die Q<sub>10</sub>-Werte für einen Abschnitt berechnet, bei dem sich die Atmungsintensität nur noch wenig änderte, dann waren sie mit denen aus der Literatur vergleichbar und wurden für Simulationsberechnungen herangezogen.

#### 4.1.1 Vergleich der gemessenen Atmungsintensitäten mit berechneten Werten

Durch die Versuchsanordnung bedingt wurde bei unseren Messungen der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Küvettenluft immer bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen. Dies machte einen direkten Vergleich der Atmungsintensitäten bei unterschiedlichen Temperaturführungen schwierig. Da zumindest die Lufttemperatur in Gemüsenähe bei allen Untersuchungen kontinuierlich aufgezeichnet wurde und zum Teil sogar die Temperatur im Gemüse, konnten die gemessenen Atmungsintensitäten mit Hilfe der Q<sub>10</sub>-Regel rechnerisch vergleichbar gemacht werden. Bei kurzen Schwingungsdauern bis zu einer Stunde unterschieden sich die berechneten Werte nicht wesentlich von den Originalwerten. Es zeigten von wenigen Ausnahmen abgesehen keine der untersuchten Gemüsearten Unterschiede im Atmungsverhalten zwischen konstanter Temperatur und den Hysteresen 1 K sowie 2 K.

Bei gelagertem Feldsalat lagen die Atmungsraten bei der Schwingungsdauer 50 min (Untersuchung F1, Abbildung 13b) immer niedriger als bei den beiden weiteren Schwingungsdauern. Dieser Effekt konnte nicht an der Temperaturführung liegen, da die Varianten mit konstanter Temperatur sonst bei allen drei Schwingungsdauern die gleiche Atmungsintensität hätten aufweisen müssen. Die konstanten Varianten hatten aber immer nahezu denselben Atmungsverlauf wie die schwingenden Varianten und es konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die insgesamt höheren Atmungsintensitäten von gelagertem Feldsalat bei den Untersuchungen mit 50 min Schwingungsdauer könnten durch einen Befall mit echtem Mehltau verursacht worden sein.

Bei Spinat war die Atmungsintensität bei einer Schwingungsdauer von 40 min kombiniert mit einer Hysterese von 1 K signifikant niedriger als bei 2 K Hysterese oder bei konstanter Temperatur (Untersuchung S1, Abbildung 20a). Bei dieser Variante war die Temperaturspannweite innerhalb der Küvette am geringsten, das heißt die Temperatur war am besten verteilt. Das könnte zu einer insgesamt niedriger liegenden Temperatur bei dieser Variante geführt haben. Die Temperaturverteilung

konnte jedoch nur exemplarisch für einen Zeitabschnitt in je einer Küvette pro Variante gemessen werden, so dass diese Vermutung nicht überprüft werden konnte. Es ließ aber keine der Untersuchungen an Blattgemüsearten darauf schließen, dass deren Atmungsintensität durch schwankende Temperaturen überproportional beeinflusst wurde.

Bei Stangenbohnen (Untersuchung B1, Abbildung 38) sowie bei Einlegegurken (Untersuchung E1, Abbildung 67) wurden bei den schwingenden Varianten zum Teil etwas höhere Atmungsintensitäten gemessen als bei den konstanten Varianten. Dieser Effekt lag höchstwahrscheinlich an den etwas höheren Temperaturen zum Messzeitpunkt. Die Unterschiede ließen sich jedoch nicht sichern und deuten ebenfalls nicht darauf hin, dass es hier zu einer überproportionalen Steigerung der Stoffwechselintensität durch schwankende Temperaturen gekommen ist.

Die Lagerung von Radies bei Schwingungsdauern von einer, sechs sowie 12 Stunden zeigte, dass sich deren Atmung bei langsamerer Schwingungsdauer dem veränderten Temperaturniveau sehr gut angepasst hat. Bei der Schwingungsdauer von einer Stunde lagen die Messwerte zu Untersuchungsbeginn über den berechneten Kurven. Die theoretischen Atmungsraten bei diesen Untersuchungen (Untersuchung R1, Abbildung 51 bis Abbildung 53) sind nicht mit den Temperaturen in den Knollen sondern in der Luft in Gemüsenähe berechnet worden. Es ist also durchaus möglich, dass sich in der Abkühlphase die Temperaturen in den Knollen bei schnellen Temperaturschwankungen nicht so schnell dem Temperaturniveau in der Luft angepasst haben wie bei langsamen Schwankungen.

Der Vergleich der Atmungsintensitäten von Tomaten bei konstanter Temperatur sowie bei kleinen schnellen und großen langsamen Temperaturschwankungen zeigte geringfügig höhere CO<sub>2</sub>-Abgabewerte bei konstanter Temperatur als bei kleinen schnellen Temperaturschwankungen (Untersuchung T1, Abbildung 64). Die Atmungsrate der Tomaten bei großen langsamen Temperaturschwankungen schwang um die der weiteren beiden Varianten, so dass hier auch nicht von einer Intensivierung der Atmung über die Q<sub>10</sub>-Regel hinaus durch Temperaturschwankungen gesprochen werden kann.

Um vergleichbare Werte für die CO<sub>2</sub>-Abgabe zu erhalten, wurden bei der Untersuchung S2 an Spinat die Temperaturschwankungen mit sechs Stunden Schwingungsdauer und 1,5 sowie 3 K Hysterese so "angeordnet", dass die CO<sub>2</sub>-Abgabe immer beim Durchlaufen von 10 °C bzw. nach 15 min Durchströmzeit bei der konstanten Variante gemessen wurde. Trotz Speicherung bei einheitlicher Temperatur

oszillierte die CO<sub>2</sub>-Abgabe bei schwankenden Temperaturen um die Kurve der CO<sub>2</sub>-Abgabe bei konstanter Temperatur (Abbildung 25). Die Speicherbedingung der Messwerte war so programmiert, dass sie ausgelöst wurde, wenn die Luft in der Küvette 10 °C unter- oder überschritt. Je nach Standort der Küvette braucht die Luft aber ca. 10 s, bis sie von der Küvette zum Analysator gelangt. Also hat die Luft, die sich zum Speicherzeitpunkt am Analysator befand, die Küvette bei geringfügig höherer bzw. niedrigerer Temperatur verlassen, bei der folglich die Atmung des gelagerten Gemüses geringfügig höher oder niedriger war. Dies konnte bei folgenden Tests durch die Programmierung einer Zeitverzögerung in die Speicherbedingung ausgeglichen werden. Jedoch war das System mit dieser Erweiterung des virtuellen Schaltplanes offensichtlich überlastet, da die Umschaltung der Magnetventile gestört wurde. Außerdem hätte die Speicherung beim Durchlaufen von 10 °C den Nachteil gehabt, dass bei langen Schwingungsdauern zu wenige Messwerte erfasst worden wären. Deshalb wurde auf dieses Verfahren verzichtet und statt dessen die tatsächlich gemessenen Atmungsraten mit Simulationen verglichen.

Die Untersuchung gestaffelter Hysterese kombiniert mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden bei Stangenbohnen ließ erkennen, dass die Atmungsintensität bei den Hysterese 4,5 K sowie 5 K von der mit Hilfe der Q<sub>10</sub>-Regel berechneten Kurve stärker nach oben abwich als bei geringeren Hysterese (Untersuchung B2, Abbildung 44). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass sich die Atmung bei sehr großen Hysterese doch überproportional intensiviert. Vermutlich dauert es um so länger bis sich die Atmung wieder dem niedrigeren Temperaturniveau angepasst hat, je höher die Hysterese ist. ITO et al. (1985) berichten, dass die Atmungsintensität von Spargel, welcher schnellen Temperaturerhöhungen ausgesetzt war, auch nach Erreichen des Temperaturmaximums im Innern der Stangen weiter anstieg. Dies bedeutete einen weiteren Anstieg der Atmungsintensität bei gleichbleibender oder bereits wieder sinkender Temperatur. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich bei Spinat, Erbsen und Shiitake-Pilzen. Die von den oben genannten Autoren untersuchten Gemüsearten zeigten bei schnellen Temperatursteigerungen von 1 °C auf 11 °C (6 bis 16 min pro K) nur eine leichte Intensivierung der Atmung, bis die Temperatur im Innern der Gemüse auf ca. 5 °C angestiegen war. Je höher die Temperatur danach anstieg, desto mehr wurde die Atmung intensiviert. Bei anschließend sinkender Temperatur waren die Atmungsintensitäten pro Temperaturstufe stets höher als bei steigender Temperatur. Offensichtlich hat sich die Atmungsintensität bei sinkender Temperatur nicht mehr dem niedrigeren Ausgangswert anpassen können.

Bei den eigenen Untersuchungen hat bei einer Temperaturerhöhung um 1 K pro Stunde die tatsächlich gemessene Atmungsrate gelagerter Radies genau der

simulierten Kurve entsprochen, und zwar bei ansteigender und sinkender Temperatur (Untersuchung R3, Abbildung 62). Der zunächst erfolgte Temperaturanstieg hat also die Atmungsintensität der Radies beim nachfolgenden Absinken der Temperatur nicht beeinflusst. Offensichtlich war die Temperaturänderung langsam genug, so dass sich die Pflanzenorgane den veränderten Umweltbedingungen vollständig anpassen konnten. Dass die gemessene Atmungsrate nach ca. 30 Stunden Messdauer niedriger war als die berechnete Kurve, lag entweder an der Abnahme des zu veratmenden Substrates oder an der zunehmenden Welke der Radies. Die mit gestaffelten Einlagerungsmengen erzielten Ergebnisse bei Spinat ergaben große Feuchtigkeitsverluste bei sehr geringen Einlagerungsmengen, die sich auf die Atmungsintensität leicht steigernd auswirkten. Ähnliche Effekte stellte KRAXNER (1981) bei Salat fest, der bei höheren Wasserverlusten ebenfalls höhere Atmungsraten aufwies. Deshalb hätte zunehmende Welke die Atmungsintensität der Radies wahrscheinlich eher gesteigert. Bereits VAADIA et al. (1961) fanden, dass welke Blätter um 62 % mehr atmeten als die Blätter von turgeszenten Kontrollpflanzen, und dass die Aktivität oxidativer Enzyme in gestressten Pflanzen erhöht ist. Also war bei den eigenen Untersuchungen mit Radies eher die Abnahme des zu veratmenden Substrates die Ursache dafür, dass im zweiten Untersuchungsabschnitt die gemessene Atmungsintensität unter der berechneten lag. Feuchtigkeitsverlust wäre bei ITO et al. (1984) eine mögliche Erklärung für die höhere Atmungsintensität nach vorheriger Temperatursteigerung. Bei schnellen Temperatursteigerungen im Innern des Gemüses (z.B. 6 min pro K) müssen die Autoren mit großen Temperaturdifferenzen zwischen Gemüse und Lagerluft gearbeitet haben, die das Dampfdruckdefizit erhöht und damit dem Gemüse Feuchtigkeit entzogen haben müssen. LUNDEGÅRDH (1960) spricht von eintretenden Schockwirkungen bei plötzlichen Temperaturveränderungen und vermutet, dass diese mit Hydratationsänderungen zusammenhängen.

Fortschritte in der Forschung auf molekularer Ebene liefern heutzutage weitere Erklärungsmöglichkeiten für Reaktionen von lebenden Organismen auf Hitzeschock. So werden durch einen plötzlichen Temperaturanstieg, der über 5 bis 15 K höher liegen kann als die Durchschnittstemperatur, bei der ein Organismus normalerweise lebt, die Transkription vieler Gene eingestellt und diejenige anderer Gene stimuliert. Es werden sogenannte Hitzeschockproteine gebildet, die sich bei Bakterien und Pflanzen ebenso wie bei Tieren und Menschen finden (HEß 1999). Die Struktur eines Proteins wird nach hierarchischen Prinzipien gebildet. Die Primärstruktur entsteht durch die Reihenfolge der einzelnen Aminosäuren in der Polypeptidkette. Wasserstoffbrückenbindungen zwischen dem Sauerstoff und dem Stickstoff der Peptidbindung ergeben die sekundäre Struktur eines Polypeptids. Die Tertiäre Struktur kommt durch Wechselwirkungen zwischen den Seitenketten zustande. Kommen nun

mehrere Polypeptidketten ins Spiel, treten die Seitenketten mehrerer unterschiedlicher Polypeptide miteinander in Verbindung. Dadurch entsteht die quartäre Struktur eines Polypeptids, die aber meistens nur in Gegenwart von Hilfsproteinen, sogenannten Chaperonen, eingenommen wird. Über die Spaltung von ATP wird die Energie für deren Funktion bereitgestellt. Bei Hitzeschock werden verstärkt Chaperone als Hitzeschockproteine gebildet. Sie sorgen dafür, dass durch Konformationsänderungen hitzestabilere Proteine gebildet werden. Dadurch wird die Thermotoleranz der betreffenden Zellen erhöht. Hitzeschockproteine werden auch bei leichtem Temperaturschock für längere Zeit gebildet (HEß 1999). Möglicherweise wurden bei den Untersuchungen von ITO et al. (1985) durch den bei sehr schneller Erwärmung auftretenden Hitzeschock vermehrt Chaperone gebildet, und zwar auch noch nachdem die Proben wieder abgekühlt wurden. Die Energie dafür mussten die gelagerten Pflanzenorgane durch eine Intensivierung des Stoffwechsels bereitstellen. Auch bei den eigenen Untersuchungen mit Bohnen, die Temperaturschwankungen mit Hysteresen bis zu 5 K ausgesetzt wurden, war die überproportionale Steigerung der Atmungsintensität unter Umständen die Folge eines erhöhten Energiebedarfs der Pflanzenzellen, um Synthese und Funktion lebenswichtiger Hitzeschockproteine zu ermöglichen. Kann die Zelle die notwendigen Hitzeschockproteine nicht herstellen, so kann sie sich nicht auf den neuen Umweltfaktor einstellen und ein Hitzeschock würde zum Zelltod führen (KINDL 1994). Wie jedoch die Temperaturerhöhung von der Pflanze registriert wird und wodurch es zu einer selektiven Aktivierung bestimmter Gene kommt, die für die Synthese der Hitzeschockproteine verantwortlich sind, ist noch weitestgehend unklar.

Betrachtet man die Atmungsintensitäten von Radies (Untersuchung R2, Abbildung 58), Einlegegurken (Untersuchung E4, Abbildung 75) sowie von Zwiebeln (Untersuchung Z1, Abbildung 83), die bei konstanter Temperatur sowie schwankenden Temperaturen mit einer Hysterese von 3 K kombiniert mit gestaffelten Schwingungsdauern gelagert wurden, so kann für alle untersuchten Gemüsearten gesagt werden, dass die Atmungsintensität des Lagergutes der nach der  $Q_{10}$ -Regel simulierten Atmungsintensität folgt. Offensichtlich ist die Schwingungsdauer von drei Stunden bereits langsam genug, so dass sich die Atmung der gelagerten Pflanzenorgane den sich verändernden Temperaturverhältnissen anpassen kann.

Bei der Untersuchung der Atmungsintensität gelagerter Gemüsearten wurde deren generell fallende bzw. bei Zwiebeln ansteigende Tendenz im Zeitverlauf durch den Temperatureffekt überlagert. Außerdem war aufgrund der Versuchsanordnung eine Durchströmzeit von 15 Minuten für jedes Gefäß erforderlich, das heißt bei zwölf Gefäßen lagen für einen Messdurchgang zwischen dem ersten und dem letzten

Messwert immer 2 ¾ Stunden. Also war der Messwert des ersten Gefäßes automatisch immer höher bzw. bei Zwiebeln niedriger als der des letzten, obwohl die Kurven den gleichen Verlauf hatten. Dies machte den direkten Vergleich von Mittelwerten der CO<sub>2</sub>-Abgabe unmöglich und erschwerte die statistische Auswertung der Versuche.

Um eventuell auftretende Unterschiede in der Atmungsintensität statistisch absichern zu können, hätte die Anzahl der Messgefäße größer sein müssen. Dadurch wäre jedoch die Zeitspanne eines Messdurchgangs noch länger gewesen. Bei den Untersuchungen mit gestaffelten Schwingungsdauern (Radies, Einlegegurken, Zwiebeln) wurde dies dadurch ausgeglichen, dass bei mehreren Untersuchungsdurchläufen die Varianten immer um eine Stelle versetzt wurden. So konnte sowohl der Standorteinfluss als auch der Einfluss des Messzeitpunktes ausgeglichen werden. Die Werte wurden mit Hilfe der Q<sub>10</sub>-Regel auf einheitliches Temperaturniveau umgerechnet. Trotzdem brachte die statistische Auswertung der Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Atmungsintensität. Eine theoretische Studie über Verlustraten an Lebensmitteln von LABUZA (1979) hat gezeigt, dass die Durchschnittstemperatur zwischen zwei Extremen einer fluktuierenden Situation das wahre Ausmaß einer Reaktion unterschätzt. Betrachtet man die Q<sub>10</sub>-Regel genauer so wird klar, dass schwankende Temperaturen bei Gemüse höhere Atmungsraten bewirken müssen als konstante, da die Temperatur im Exponenten steht. VAROQUAUX et al. (1995) berichten, dass der Logarithmus der Atmungsrate von Pilzen und Endivien proportional zur Lagertemperatur ist. Das bedeutet, dass ein linearer Temperaturanstieg eine exponentielle Steigerung der Atmung verursacht, die bei Schwankungen nicht in vollem Maß durch anschließendes Absinken der Temperatur ausgeglichen wird. Um wieviel die Atmungsraten gelagerter Pflanzenorgane bei schwankender Temperatur höher sind, hängt vom Q<sub>10</sub>-Wert und von der Höhe der Temperaturschwankung ab, nicht aber von deren Geschwindigkeit. Schon HICKS (1944) wies darauf hin, dass bei schwankenden Temperaturen der Unterschied zwischen mittlerer Temperatur und effektiver Temperatur bei Q<sub>10</sub>-Werten, die im Bereich von zwei liegen, bei der Lagerung von Nahrungsmitteln nicht von praktischer Bedeutung ist, es sei denn, diese sind direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt. Er gibt an, dass bei einem Q<sub>10</sub>-Wert von 2 und einer sinusförmig schwingenden Temperatur mit einer Amplitude von 5 K die effektive Temperatur um 0,42 K über der mittleren Temperatur liegt. Das bedeutet, dass Nahrungsmittel, die bei 10 °C ± 5 K gelagert werden, dieselbe Stoffwechselintensität erreichen wie bei einer Lagerung bei konstanten 10,42 °C. Tabelle 23 zeigt, um wieviel die effektive Lagertemperatur die mittlere Temperatur übersteigt in Abhängigkeit von der Höhe der Hysterese einer sinusförmigen Temperaturschwankung bei unterschiedlichen Q<sub>10</sub>-Werten:

Tabelle 23 : Betrag der Erhöhung der effektiven im Vergleich zur mittleren Temperatur bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Hysterese bei  $Q_{10}$ -Werten von 1,5 bis 10 (Verändert nach HICKS 1944). Ein Nahrungsmittel mit dem  $Q_{10}$ -Wert 2 hat z.B. bei  $10\text{ °C} \pm 5\text{ K}$  dieselbe Stoffwechselintensität wie bei konstanten  $10,42\text{ °C}$ .

$Q_{10}$ -Wert	Betrag der Erhöhung der effektiven Temperatur bei unterschiedlichen Hysterese [K]			
	5 K	10 K	15 K	20 K
1,5	0,25	1,02	2,28	3,89
2	0,42	1,68	3,64	6,22
3	0,67	2,56	5,37	8,78
10	1,33	4,61	8,51	12,89

Unter den von uns untersuchten Bedingungen ergeben sich nach der  $Q_{10}$ -Regel sehr geringe Atmungssteigerungen bei schwankenden Temperaturen, die mit den vorhandenen Mitteln nicht abgesichert werden konnten.

Tabelle 24 zeigt die Mittelwerte der simulierten Atmungsraten von Speisezwiebeln und Radies bei konstanter und schwankender Temperatur. Bei Radies, die eine mittlere Atmungsrate aufweisen, kann die konstante Variante geringfügig von den schwankenden Varianten unterschieden werden, aber wirklich nur minimal. Bei Zwiebeln, die von vornherein eine sehr geringe Atmungsrate haben, unterschieden sich die Werte der einzelnen Varianten erst bei der zweiten Stelle hinter dem Komma. Dadurch wird jedoch die Aussage bekräftigt, dass schwankende Temperaturen im Bereich von  $10\text{ °C} \pm 3\text{ K}$  keine überproportionale Intensivierung der Atmung von gelagertem Gemüse hervorrufen.

In unseren Untersuchungen ist die Atmungsintensität der gelagerten Pflanzenorgane in Abhängigkeit von der Temperatur stets der  $Q_{10}$ -Regel gefolgt und die  $Q_{10}$ -Werte lagen zwischen eins und drei. In einem praxisüblichen Kühlraum, bei dem die Temperaturschwankungen um ein vielfaches geringer sind als bei der vorliegenden Versuchsanordnung, kann davon ausgegangen werden, dass eine mögliche Atmungssteigerung kaum ins Gewicht fällt.

Tabelle 24: Mittelwerte der rechnerisch simulierten Atmungsraten gelagerter Radies und Speisewiebeln bei konstanter Temperatur von 10 °C sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern.

Schwingungsdauer [h]	Mittelwerte der simulierten Atmungsraten [mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]	
	Radies	Zwiebeln
0	23,53	4,93
3	24,0	4,95
6	24,23	4,93
8	24,04	4,96
12	24,78	4,94

#### 4.1.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse von RUBIN (1953)

Laut RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) erhöhen schnelle Temperaturschwankungen bei der Lagerung von Obst und Gemüse deren Atmungsintensität. Die Lagertemperatur bewegte sich aber zwischen +2°C und +8°C innerhalb von 24 h, das heißt es handelte sich hier um für unsere Verhältnisse sehr langsame Schwankungen mit relativ hoher Spannweite. Basierend auf den Ergebnissen von RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) hat BÖTTCHER (1996) Atmungssteigerungen von 15 % (Zwiebeln), 30 % (Rote Rüben) und 43 % (Möhren) errechnet, aber vermutlich ohne die genaue Versuchsbeschreibung zu kennen. Als Erklärung dafür schreibt er, dass sich enzymatische Reaktionen nicht so schnell wieder an ein niedrigeres Temperaturniveau angleichen können.

Tabelle 25: Atmungsintensitäten bei stabiler und schwankender Temperatur nach RUBIN (1953).

Lagertemperatur	Atmungsintensität [mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]		
	Zwiebeln	Möhren	Rote Rüben
5 °C stabil	9,9	7,7	12,2
schwankend von 2 °C bis 8 °C innerhalb von 24 h	11,4	11,0	15,9

Wird der Versuch von RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) rechnerisch mit Hilfe der Q<sub>10</sub>-Regel simuliert, so müßte der Q<sub>10</sub>-Wert von Zwiebeln 13 (Abbildung 86a), der von Roten Rüben 35 (Abbildung 86b) und der von Möhren sogar 64 (Abbildung 86c) sein, um die in den Ergebnissen (Tabelle 25) beschriebenen Atmungssteigerungen zu erreichen, was ziemlich unrealistisch erscheint. Bei der

---

rechnerischen Simulation wurde eine sinusförmige Temperaturkurve mit einer Hysterese von 3 K, einer Schwingungsdauer von 24 Stunden und einem Temperaturmittelwert von 5 °C zugrunde gelegt. Als Ausgangswert wurde jeweils die von RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) angegebene Respirationsintensität bei stabiler Temperaturführung genommen und daraus mit Hilfe der Van't Hoff'schen Gleichung bzw. der  $Q_{10}$ -Regel theoretisch pro Minute ein Atmungswert berechnet. Die Mittelwerte aus den simulierten Kurven entsprechen den Werten aus Tabelle 25. In Wirklichkeit würden jedoch die Atmungsraten bei konstanter Temperatur nicht wie in der Modellrechnung angenommen konstant verlaufen, sondern sich mit der Zeit verändern. Der genaue Verlauf der jeweiligen Atmungsintensitäten ist jedoch den Angaben aus SABUROW und ANTONOW (1953) nicht zu entnehmen.

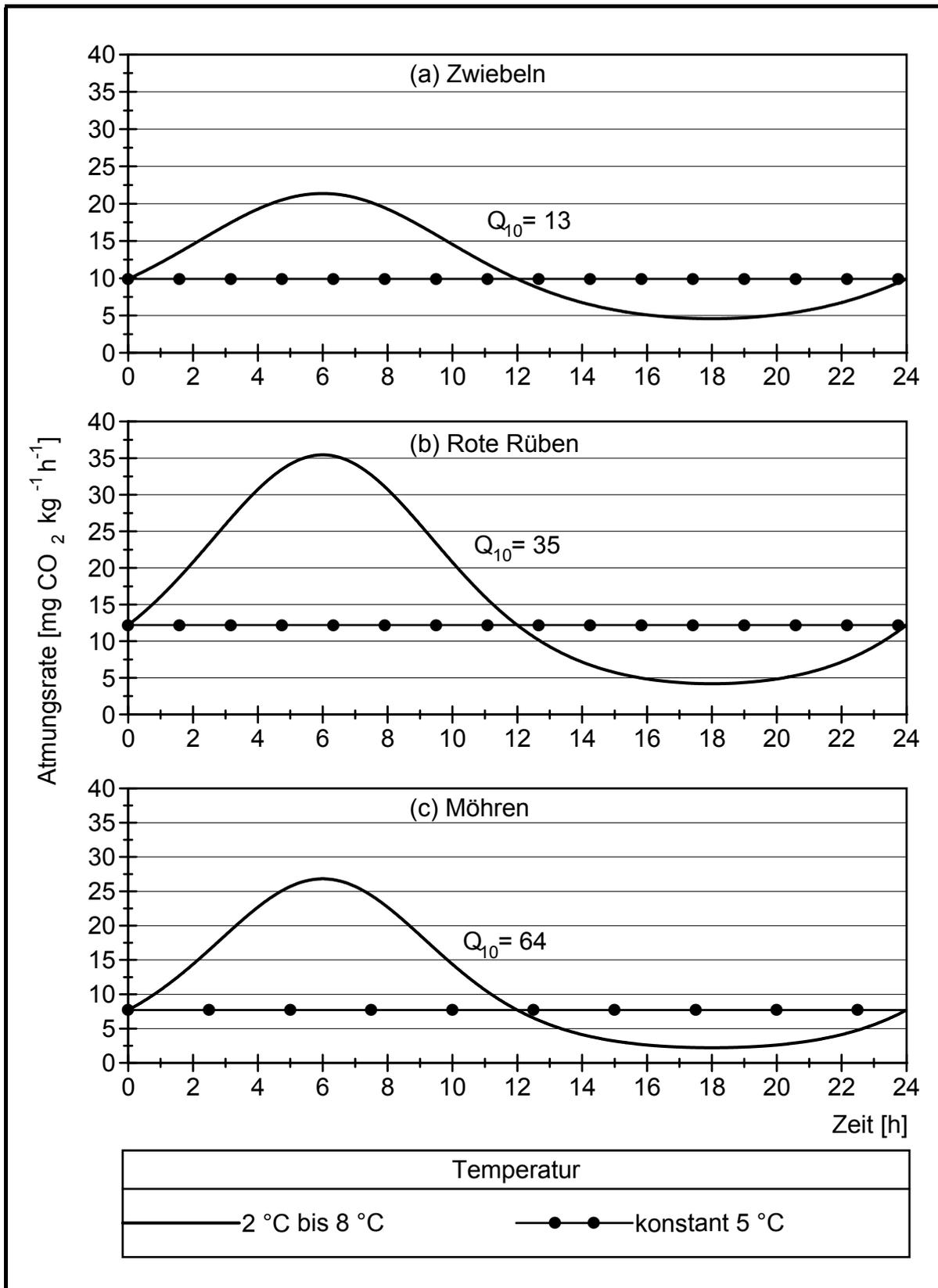


Abbildung 86: Darstellung der Simulationsberechnungen mit Hilfe der Q<sub>10</sub>-Regel, um auf die Ergebnisse von RUBIN (1953) zu kommen.

Da wir nicht wissen, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Methode gemessen wurde, lassen sich die Ergebnisse des Autors nur schwer erklären. Es könnte z. B. sein, dass die Atmung der entsprechenden Lagergüter zu einem Zeitpunkt bestimmt wurde, als sich die Temperaturkurve gerade im "oberen Bogen" befand. Dann wären die gemessenen Werte auch bei "normalen"  $Q_{10}$ -Werten durchaus realistisch, aber nicht repräsentativ. Beim ersten Betrachten liegt jedoch die Vermutung nahe, durch die Temperaturschwankung würde eine physiologische Überreaktion in Gang gesetzt, die die Atmungsintensität überproportional ansteigen lässt, ähnlich wie beim Auftreten von Kälteschäden. Diese Vermutung konnte aber bei keiner Untersuchung der vorliegenden Arbeit bestätigt werden.

Was aber Abbildung 86 sehr schön zeigt ist, dass sich die Auswirkung der Temperaturabweichung nach oben keinesfalls durch diejenige nach unten ausgleicht. In der Grafik ist deutlich zu sehen, dass die "unteren Bögen" wesentlich flacher verlaufen als die "oberen Bögen".

Eine mögliche Erklärung für die erhöhte Atmungsintensität bei fluktuierenden Temperaturen könnten die Modellberechnungen und deren Verifizierung durch SCHAFFNER und LABUZA (1997) liefern. Demnach wird durch sinusförmig fluktuierende Temperaturen ein exponentielles Mikробenwachstum auf Lebensmitteln hervorgerufen. Die Autoren sprechen hier von einem "Temperatur-History-Effekt". Möglicherweise war das Lagergut bei RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) mit Mikroorganismen besetzt, die sich dann bei fluktuierenden Temperaturen sehr stark vermehrten, was zu einer erhöhten Mikroorganismenatmung führte.

#### 4.1.3 Regulation der Stoffwechselintensität

Um Aufschluss über die Temperaturempfindlichkeit des Stoffwechsels der Pflanzenzelle zu bekommen, sollen nun die wichtigsten Regulationsmöglichkeiten beim Abbau der Speichersubstanzen näher beleuchtet werden, obwohl in dieser Arbeit keine diesbezüglichen Untersuchungen unternommen worden sind. Als Speichersubstanz lagert die Pflanze hauptsächlich Stärke ein, die in mehreren Prozessen gespalten und schließlich zu  $\text{CO}_2$  und Wasser abgebaut wird.

##### *4.1.3.1 Regulationsmechanismen bei der Glykolyse*

Ein zentraler Prozess, der Ausgangsstoffe für zahlreiche Stoffwechselwege liefert, ist die Glykolyse. Deshalb wird deren Regelungsmechanismen besondere Bedeutung zuerkannt. Hexosezucker in Form von Glucose ist die typische Starterverbindung, die

in den Abbauprozess lebender Pflanzenzellen eingeschleust wird. Die Glykolyse erzeugt daraus Pyruvat, indem zunächst das Hexosemolekül umgeformt wird um daraus Triosephosphat und schließlich Phosphoenolpyruvat (PEP) zu bilden. Dieses Phosphoenolpyruvat dient als Substrat für mindestens sechs Enzyme, die unterschiedliche Abbau- und Synthesewege einleiten (DAVIES 1987). Dazu gehören unter anderem die Gluconeogenese, die Biosynthese von Aromaten und schließlich der oxidative Abbau des Pyruvat im Citratzyklus. Laut DUQUE et al. (1999) wird auch der Anstieg der Atmungsintensität bei klimakterischen Früchten wie z.B. Äpfeln durch eine erhöhte Glykolyserate verursacht. Stärkeumwandlung und Akkumulation von löslichen Zuckern beginnen nach Angaben der Autoren bereits nach der Ernte und sind nicht an das Klimakterium gekoppelt.

Geeignete Ansatzstellen zur Regulation der Glykolyse sind die Enzyme, welche irreversible Reaktionsschritte katalysieren (RICHTER 1996, DEY und HARBORNE 1997). Zuckermoleküle sind generell als Phosphorsäureester stoffwechselaktiv. Als erster Reaktionsschritt der Glykolyse wird zunächst das Glucosemolekül phosphoryliert und mit Hilfe der Phosphofruktokinase in ein Fructosemolekül umgeformt. Das Produkt : Substrat-Verhältnis liegt bei dieser Reaktion viel niedriger als deren Gleichgewichtskonstante, was darauf hindeutet, dass wir es hier mit einem irreversiblen Prozess zu tun haben (DEY und HARBORNE 1997).

Bei der Phosphofruktokinase handelt es sich um ein Enzym mit allosterischer Regulation. Es besteht aus mehreren Untereinheiten, die aktive Zentren aufweisen. Allosterische Effektoren bzw. Inhibitoren werden nicht am aktiven Zentrum angelagert, sondern an anderen Stellen, sie verändern jedoch die räumliche Struktur des Gesamtmoleküls und damit auch die Affinität des Enzyms zum Substrat. Die Reaktionskinetik folgt einem sigmoiden Kurvenverlauf, das heißt mit steigender Substratkonzentration steigert sich die Reaktionsgeschwindigkeit (Abbildung 87).

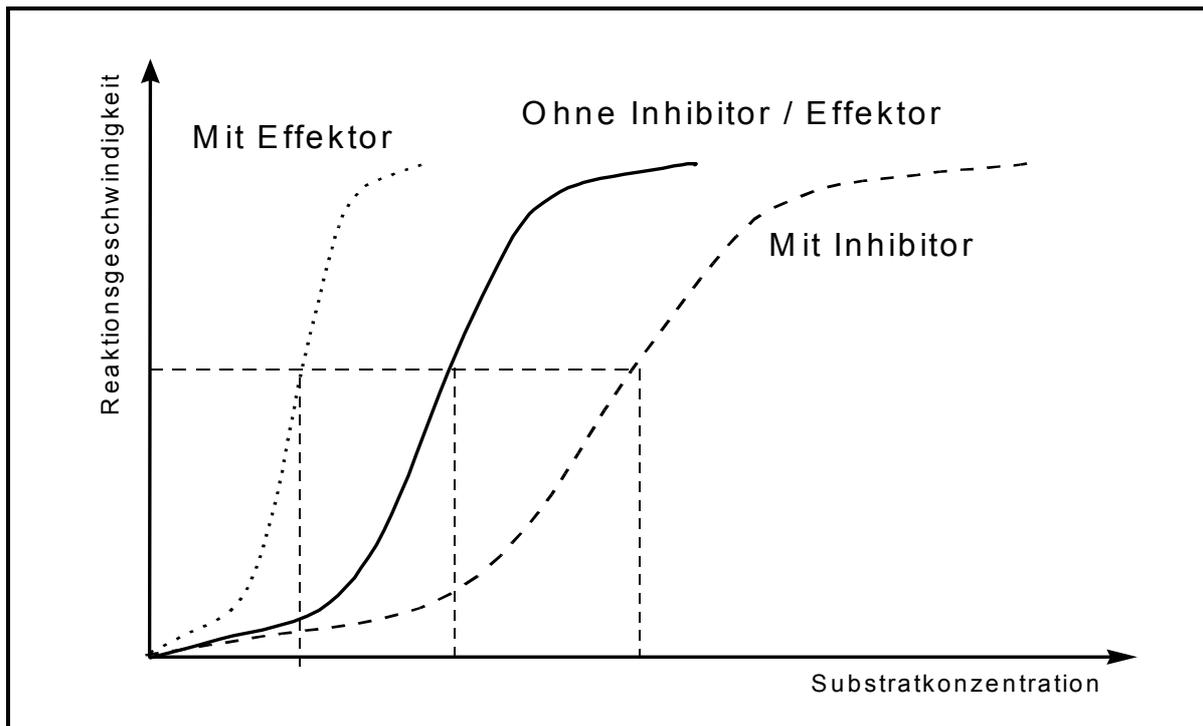


Abbildung 87: Sigmoide Kinetik eines Enzyms mit allosterischer Regulation (verändert nach KARLSON 1984).

Phosphofruktokinase wird durch ATP allosterisch kontrolliert, das heißt die Bildung des Fructosemoleküls wird durch hohe Konzentrationen an ATP, eines ihrer Substrate, gehemmt (DAVIES 1987). ATP wirkt als Inhibitor für die nachfolgende Reaktionssequenz, da kein Substrat mehr nachfließt. Dieser Effekt wird durch einen Überschuss an Citrat verstärkt, also wird die Reaktion zusätzlich durch Vorhandensein von Synthese-Vorstufen in ausreichender Menge verlangsamt. Im Gegenzug dazu wird die Aktivitätshemmung der Phosphofruktokinase durch ADP (Adenosindiphosphat) und AMP (Adenosinmonophosphat) als positive Effektoren wieder aufgehoben (RICHTER 1996). Zusätzlich wird die Phosphofruktokinase durch eines ihrer Produkte, nämlich Fructosebisphosphat, aktiviert.

Es gibt Anzeichen dafür, dass Enzymregulationen, bei denen Phosphat übertragen wird, generell nicht von der absoluten Konzentration der Adenosin-Nucleotide abhängt, sondern durch das Verhältnis der Konzentrationen von ATP : ADP oder ATP : AMP bestimmt werden (PRADET und RAYMOND 1987). Offensichtlich trifft dies jedoch für die Phosphofruktokinase nicht zu (TURNER und TURNER 1975, zit. in PRADET und RAYMOND 1987). Bei der Phosphatübertragung wirkt sich das Temperaturniveau auf den Ablauf der Reaktionskette aus, denn niedrige Temperaturen verringern das Phosphat-Transfer-Potential (MARRÉ 1961). Also wird pro Zeiteinheit weniger Phosphat übertragen. So wird der Ablauf der Reaktionsschritte verlangsamt,

bei denen es zur Übertragung eines Phosphatrestes kommt und damit schließlich auch die nachfolgenden Schritte.

Durch die vielfältigen Regulationsmechanismen der Phosphofruktokinase avanciert sie zum Schrittmacher-Enzym der Glykolyse (RICHTER 1996). KINDL (1994) betrachtet die von ihr katalysierte Reaktion als Schaltstelle der Glykolyse. Für den prä-klimakterischen Anstieg der Atmung bei Äpfeln im Kühllager scheint sie hingegen nicht verantwortlich zu sein. Analysen von DUQUE et al. (1999) ergaben, dass deren Aktivität während des Klimakteriums relativ konstant blieb. Lediglich bei weiteren glykolytischen Enzymen, wie z.B. der Pyruvat-Kinase, war eine zeitliche Veränderung der Aktivität zu verzeichnen. Bei Absenkung der Lagertemperatur auf 4 °C zeigte die Atmungsintensität der gelagerten Äpfel dieselben Veränderungen wie beim Durchlaufen des Klimakteriums bei höheren Temperaturen, außer dass der Prozess wesentlich langsamer ablief. Dies bedeutet, dass Enzymaktivitäten bei Stoffwechselreaktionen zwar durch die Temperatur beeinflusst werden, dass aber weitere Faktoren unter Umständen eine übergeordnete Rolle spielen.

Ein weiteres Schlüsselenzym der Glykolyse ist die Pyruvat-Kinase. Sie katalysiert den exergonischen Phosphat-Transfer von Phosphoenolpyruvat auf ADP. Die Pyruvat-Kinase wird durch ATP, Citrat sowie hohe Konzentrationen an  $\text{Ca}^{2+}$  gehemmt und durch ADP,  $\text{K}^+$  sowie  $\text{Mg}^{2+}$  stimuliert (DEY und HARBORNE 1997).

#### 4.1.3.2 Regulation der Bildung von Acetyl-CoA

Acetyl-CoA ist eine Schlüsselverbindung, die als Ausgangsstoff für weitere Synthesewege, wie z.B. Citratzyklus oder Isoprenoid-Biosynthese, dient. Die Bildung von Acetyl-CoA aus Pyruvat wird vom Enzymkomplex Pyruvat-Dehydrogenase katalysiert, der aus mehreren Untereinheiten besteht. Der Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex wird durch reversible Phosphorylierung reguliert. Bei Überschuss an ATP, Acetyl-CoA oder  $\text{NADH}+\text{H}^+$  wird durch die Pyruvat-Dehydrogenase-Kinase ein Phosphatrest von ATP auf die Decarboxylase/Dehydrogenase übertragen und der gesamte Enzymkomplex wird inaktiviert. Eine Reaktivierung des Enzymkomplexes erfolgt erst wieder durch eine  $\text{Ca}^{2+}$ -abhängige Phosphatase, die den Phosphatrest wieder abspaltet. Diese Enzymuntereinheit wird durch hohe  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentrationen aktiviert (RICHTER 1996). Bei der Bildung von Acetyl-CoA spielt also der Temperatureinfluss hauptsächlich bei der Phosphatübertragung eine Rolle.

#### 4.1.3.3 Regulationsmechanismen bei Citratzyklus und Atmungskette

Der Citratzyklus übernimmt eine Schlüsselrolle im Kohlenstoffmetabolismus, da er den Abbau von Glucose zu  $\text{CO}_2$  vervollständigt. Acetyl-Coenzym A, das Endprodukt der Glykolyse, welche im Cytosol stattfindet, wird in den Mitochondrien vollständig "verbrannt" (DEY und HARBORNE 1997). Als Ansatzpunkte für die Regulation des Citratzyklus kommen mehrere Faktoren in Frage, wie z.B. der Enzymdurchsatz ganz allgemein, welcher bekanntlich temperaturabhängig ist. Außerdem spielen ADP : ATP-Verhältnisse und der pH-Wert eine Rolle. Denkbar wäre auch eine Regulation über den Transport von Metaboliten durch die Mitochondrienmembran (DEY und HARBORNE 1997), deren Fluidität starke Auswirkungen auf den Stoffwechsel hat (KINDL 1994). WILKINSON (1970) vermutet, dass bei tiefen Temperaturen durch Veränderung der Membranpermeabilität und -viskosität Störungen im Pflanzengewebe hervorgerufen werden. Inwieweit die aufgezählten Faktoren bei der Regulation dieses Stoffwechselweges involviert sind, ist noch nicht ganz klar. Offensichtliche Ansatzpunkte der Regulation sind die Versorgung mit Acetyl-CoA und die Inhibition des Enzymkomplexes Pyruvat-Dehydrogenase durch seine Endprodukte. Außerdem wirkt Citrat regulierend auf die Glykolyse und beeinflusst so die Menge an verfügbarem Acetyl-CoA (DEY und HARBORNE 1997). Der Citratzyklus selbst wird in erster Linie über die irreversible Bildung von Citrat reguliert, wobei die Energieladung entscheidend ist. Bei hohem ATP-Bedarf kondensiert Oxalacetat mit Acetyl-CoA und das daraus entstehende Citrat wird im Zyklus weiter verarbeitet. Bei Überproduktion von ATP wird die Gluconeogenese begünstigt. Beim Citratzyklus dient NAD bzw. FAD als Protonenakzeptor. Es entsteht  $\text{NADH} + \text{H}^+$ , welches anschließend bei der Endoxidation in der Atmungskette mit Sauerstoff wieder zu NAD und Wasser regeneriert wird. Dabei wird ebenfalls ATP gebildet. Die Aktivität der gesamten Atmungskette wird durch die verfügbare Menge an ADP bestimmt. Wird also kein ATP benötigt, unterbleibt die Regeneration von ADP (RICHTER 1996).

#### 4.1.4 Einfluss der Temperatur auf abzubauenende Substanzen

Der RQ-Wert oder Atmungsquotient beschreibt das Verhältnis von  $\text{CO}_2$ -Abgabe und  $\text{O}_2$ -Aufnahme durch das Lagergut und gibt wertvolle Hinweise auf das veratmete Substrat. Liegt der RQ-Wert bei eins ( $\text{RQ}=1$ ), so wurde Glucose veratmet, liegt er darunter ( $\text{RQ}<1$ ), dann dienen Fette als Substrat für die Atmung und ein RQ-Wert über eins ( $\text{RQ}>1$ ) deutet auf organische Säuren als Substrat hin. Offensichtlich spielt hier neben der Gemüseart und der Lagerdauer (d. h. Substratverfügbarkeit) auch die Temperatur eine Rolle. ULRICH berichtete 1974, dass mit der Temperatur auch das Verhältnis von  $\text{CO}_2$ -Abgabe und  $\text{O}_2$ -Aufnahme stieg. Äpfel, die bei  $18\text{ }^\circ\text{C}$  gelagert

wurden, hatten einen RQ-Wert von 0,93, was darauf hindeutet, dass hauptsächlich Glucose abgebaut wurde. Wurden die Äpfel bei 33 °C gelagert, so erhöhte sich der RQ-Wert auf 1,36, was auf organische Säuren als Substrat schließen lässt. Das bedeutet, dass mit der Temperaturänderung eine Änderung der katalytischen Eigenschaften der am Stoffwechsel beteiligten Enzyme einhergeht (KINDL 1994), so dass statt Glucose weitere Substrate wie organische Säuren oder Fette veratmet werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen konnte die Sauerstoffaufnahme des gelagerten Gemüses nicht bestimmt werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass hauptsächlich Glucose als Substrat für die Atmung diente, da die Temperaturen meistens im Bereich zwischen 7 °C und 13 °C lagen und höchstens vier, meistens nur ein bis zwei Tage gelagert wurde.

Mit der Temperatur ändert sich unter anderem auch der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Lagergutes. Untersuchungen von YOO et al. (1997) an Zwiebeln haben jedoch ergeben, dass mit steigender Temperatur die CO<sub>2</sub>-Gehalte im Innern der Bulben anstiegen. Zwiebeln, die bei 13 °C und 20 °C gelagert wurden, hatten nach vier bzw. acht Wochen Lagerdauer die höchsten Atmungsraten. Daraus ergaben sich jedoch nicht unbedingt die höchsten CO<sub>2</sub>-Gehalte im Innern der Bulben. Die Autoren schlagen vor, dass die Unterschiede im CO<sub>2</sub>-Gehalt durch die Räume zwischen den fleischigen Schalen beeinflusst werden könnten.

## ***4.2 Einfluss der Temperaturschwankungen auf die Transpiration***

### **4.2.1 Theorie der Transpiration**

Als treibende Kraft für die Transpiration wurde bereits in der Einführung das Dampfdruckdefizit der Luft genannt. Nun soll der Zusammenhang zwischen Sättigungsdampfdruck, Dampfdruckdefizit und Temperatur näher beleuchtet werden. Damit das in der Pflanze enthaltene Wasser in die Dampfphase übergeht, müssen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen getrennt werden. Für diesen Vorgang ist eine bestimmte Energiemenge notwendig, die Verdampfungsenthalpie des Wassers. Diese kinetische Energie muss beim Verlassen der Moleküle der flüssigen Phase größer werden als die zwischenmolekulare Bindungsenergie. Sie wird der Umgebung in Form von Wärmeenergie entzogen. Die Menge an Teilchen, die die zwischenmolekulare Bindungsenergie überwinden, wird also bei Energiezufuhr, das heißt bei steigender Temperatur größer (VON WILLERT et al. 1995).

Das Dampfdruckdefizit berechnet sich aus der Differenz des Sättigungsdampfdrucks der Luft und deren tatsächlichem Wasserdampfdruck. Betrachtet man noch einmal die

Formel zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks der Luft (Gleichung 24, S.45) wird klar, dass der Sättigungsdampfdruck um so höher wird, desto höher die Lufttemperatur ist.

Mit linearem Ansteigen der Temperatur steigt der Sättigungsdampfdruck exponentiell. Die Umgebungsluft mit definiertem Wasserdampfdruck hat einen bestimmten Wasserdampfgehalt, die Differenz zum Sättigungsdampfdruck nimmt einen bestimmten Wert ein. Steigt nun die Temperatur dieser Luft, so bleibt der absolute Wassergehalt gleich und nur der Sättigungsdampfdruck erhöht sich. Folglich steigt damit die Differenz zwischen tatsächlichem Wasserdampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck exponentiell an, da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann als kalte. Im Grunde kann man sagen, wärmere Luft mit einem bestimmten Wasserdampfgehalt ist "trockener" als kühlere mit demselben Wasserdampfgehalt.

Wenn Luft mit einer Temperatur von 0 °C eine relative Luftfeuchtigkeit von 90 % besitzt, so entspricht das bei einem Sättigungsdampfdruck von 610,76 Pa einem Dampfdruckdefizit von 61,08 Pa bzw. einem Dampfdruck von 549,68 Pa. Wird diese Luft nun erwärmt, ohne dass ihr Feuchtigkeit zugeführt wird, bleibt dieser Dampfdruck gleich, nur Sättigungsdampfdruck und damit das Dampfdruckdefizit ändern sich, wie Tabelle 26 zeigt:

Tabelle 26: Veränderung von Sättigungsdampfdruck und Dampfdruckdefizit bei einem gleichbleibenden Wasserdampfdruck von 549,68239 Pa, welcher einer relativen Luftfeuchte von 90 % bei 0 °C entspricht.

Temperatur [°C]	Sättigungsdampfdruck [Pa]	Dampfdruckdefizit [Pa] bei gleichbleibendem Wassergehalt
0	610,7582	61,07581
1	656,6706	106,98821
2	705,6046	155,92221
3	757,7316	208,04921
4	813,2262	263,54381
5	872,2747	322,59231
6	935,072	385,38961
7	1001,817	452,13461
8	1072,722	523,03961
9	1148,007	598,32461
10	1227,899	678,21661

Um dem Problem der Entfeuchtung des Lagergutes bei schnell schwankender Temperatur rechnerisch auf die Spur zu kommen, wurde mit Hilfe des Wärmestroms die theoretisch abgegebene Menge an Wasser bei schwankenden Temperaturen berechnet. Die Formel lautet:

$$\Phi_v = \frac{\alpha}{cpL} \times A \times \xi \times R \times (X_s - X_l) \quad (\text{Gleichung 25})$$

$\Phi_v$  : Wärmestrom durch Transpiration [W]

$\alpha$  : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

$cpL$  : spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

$A$  : Oberfläche [ $\text{m}^2$ ]

$R$  : Verdampfungsenthalpie des Wassers [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]

$\xi$  : Wasserbedeckungsfaktor [-]

$X_s$  : Sättigungsfeuchte der Luft bei Oberflächentemperatur [ $\text{kg kg}^{-1}$ ]

$X_l$  : Wassergehalt der Luft [ $\text{kg kg}^{-1}$ ]

der Massenstrom ergibt sich dann aus:

$$M = \frac{\Phi_v}{R} \quad (\text{Gleichung 26})$$

also

$$M = \frac{\alpha}{cpL} \times A \times \xi \times (X_s - X_l) \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (\text{Gleichung 27})$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Luft, deren Fließgeschwindigkeit und der Länge des umströmten Körpers (VON WILLERT et al. 1995), im vorliegenden Fall des gelagerten Gemüses. Da diese Größen für die in dieser Arbeit durchgeführte Versuchsreihe schwer zu bestimmen sind, wurde die Formel mit verschiedenen Werten durchgerechnet. Für den Wasserbedeckungsfaktor wurde ein Wert von 0,33 angenommen, den WALKER (1985) für Radiesknollen bestimmt hat. Es wurden die theoretischen Temperaturverläufe mit konstanter Temperatur von 10 °C, schwingende Temperaturen mit einem Mittelwert von 10 °C, einer Hysterese von 3 K und Schwingungsdauern von drei, sechs, acht und 12 Stunden zugrunde gelegt. Anders als bei der Atmung sind bei der Transpiration hauptsächlich die Oberflächentemperaturen relevant. Beim Wasserdampfgehalt der Luft wurde von einer relativen Luftfeuchte von 95 % ausgegangen. Die meisten Gemüsearten stehen

---

zwar mit einer relativen Luftfeuchte von ca. 99 - 99,5 % im Gleichgewicht (BURTON 1982), es wird jedoch bei Messung im Durchflussverfahren ständig Wasserdampf abtransportiert. Die spezifische Wärme der Luft beträgt  $1,005 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , beim konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurde mit  $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (BERTRAM 1996) gerechnet und als Fläche wurde  $1 \text{ m}^2$  angenommen. Bei dieser rechnerischen Betrachtung zeigt sich, dass die Varianten, die unter schwingender Temperatur gelagert werden, zwar geringfügig mehr transpirieren müssten als die bei konstanter Temperatur gelagerten, aber sie müssten unabhängig von der Schwingungsdauer alle gleich viel transpirieren. Bei der Modellrechnung ergab sich pro  $\text{m}^2$  Gemüseoberfläche in 24 Stunden eine Gesamtwasserabgabe von 120,94 g bei konstanter Temperatur und 122,02 g bei schwingender Temperatur.

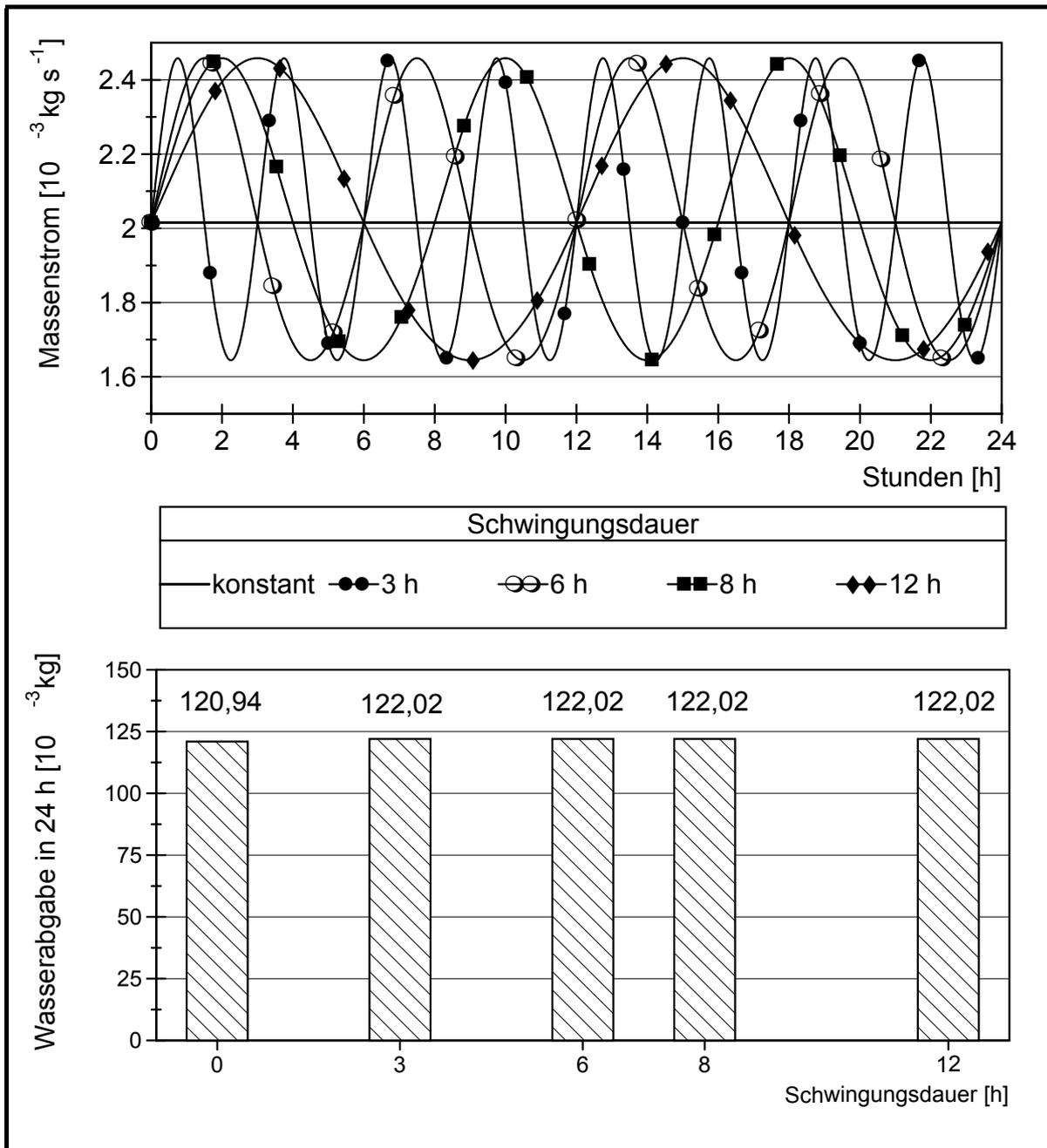


Abbildung 88: Massenstrom aus 1 m<sup>2</sup> Gemüseoberfläche sowie Gesamtwasserabgabe in 24 Stunden bei konstanten 10 °C oder schwankender Temperatur mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern.

Mögliche Unterschiede zwischen den hier untersuchten Varianten der unterschiedlichen Gemüsearten lagen demnach höchstens im Grammbereich, da pro Küvette höchstwahrscheinlich eher weniger als 1 m<sup>2</sup> Gemüseoberfläche eingelagert waren. Der Unterschied zwischen schwingenden und konstanten Varianten ergibt sich nur dadurch, dass sich der Sättigungsdampfdruck mit steigender Temperatur nicht linear sondern exponentiell ändert. Es zeigt sich also genauso wie bei der Atmung, dass für den Effekt der Temperatur auf die Transpiration nur die absolute Höhe der

Abweichungen und nicht die Häufigkeit ausschlaggebend ist. Für die Berechnungen wurden für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und den Wasserbedeckungsfaktor  $\xi$  konstante Werte angenommen. Es wäre jedoch durchaus möglich, dass sich auch diese Größen mit der Temperatur ändern. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Änderung dieser Faktoren im untersuchten Temperaturbereich zu vernachlässigen ist. Das Augenmerk sei nun noch einmal auf den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  gerichtet. GERTHSEN et al. (1989) geben einen Wert von  $6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  für die meisten Stoffe im Ruhezustand an, KUCHLING (1986) gibt z. B. für mäßig bewegte Luft senkrecht zu einer Metallwand einen Bereich von  $23 - 70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  und für stark bewegte Luft  $58 - 290 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  an. Vergleicht man nun diese Werte mit dem Wärmeübergangskoeffizienten von kondensierendem Wasserdampf ( $11\,600 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ !), so liegt das Problem sicherlich darin, dass in der entwickelten Versuchsanlage der Wasserentzug durch Kondensation an den Küvettenwänden die Transpiration des untersuchten Gemüses viel stärker gesteigert hat als die Temperaturschwankung.

#### 4.2.2 Vergleich eigener Messungen mit der Literatur sowie kritische Betrachtung

Durch die Versuchsanordnung bedingt wurde dem zu untersuchenden Gemüse der größte Teil der Feuchtigkeit aufgrund von Kondensation von Wasserdampf an den Küvettenwänden entzogen. Dieser Feuchtigkeitsentzug konnte jedoch nicht kontinuierlich erfasst, sondern nur am Versuchsende als Gesamt-Wasserverlust ermittelt werden. Eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Transpiration war also nur bei solchen Arten möglich, bei denen die Luftfeuchte in den Küvetten geringer war und kein Wasser auskondensiert ist, weil sie gute Transpirationsbarrieren haben. Dies waren Tomaten (Untersuchung T1, Abbildung 65) und Zwiebeln (Untersuchung Z1, Abbildung 84). Es wurde zwar bei weiteren Arten wie Spinat sowie Einlegegurken versucht, eine Kondensation durch die Verringerung der Einlagerungsmenge zu verhindern, was aber nicht gelungen ist. Und wenn, dann waren die zulässigen Einlagerungsmengen so gering, dass die gelagerten Blätter bzw. Früchte am Ende der Messperiode stark ausgetrocknet waren. So wäre es schwierig geworden, eventuell auftretende Effekte von Temperaturschwankungen auf Atmung und Transpiration eindeutig zu erklären. Bei der Dauer eines Messzyklus von drei Stunden hätte die Versuchsdauer nicht wesentlich verkürzt werden können, da sonst nicht genügend Messwerte für eine sinnvolle Auswertung zur Verfügung gestanden hätten.

Die Wasserdampfabgabe gelagerter Tomaten war bei konstanter Temperatur völlig identisch mit der bei kleinen schnellen Temperaturschwankungen (Abbildung 65a). Also wurde die Transpirationsrate durch eine derart geringe Temperaturschwankung

(0,2 K/15 min) überhaupt nicht beeinflusst, obwohl das Dampfdruckdefizit bei konstanter Temperatur etwas höher war (Abbildung 65b). Dies wirkte sich auf die Transpirationskoeffizienten kaum aus (Abbildung 65c). Trotz höherem Dampfdruckdefizit hatte die Variante mit der großen langsamen Temperaturschwankung geringere Transpirationsraten als die beiden weiteren Varianten. Die Wasserdampfabgabe der untersuchten Tomaten sank trotz steigenden Dampfdruckdefizits während der Versuchsdauer nur leicht ab, also sanken auch die Transpirationskoeffizienten. Daraus kann gefolgert werden, dass die Tomatenfrucht mit steigendem Dampfdruckdefizit im Verhältnis weniger transpiriert. Die Tomaten der vorliegenden Untersuchungen waren aber auch nach 80 Stunden Messdauer noch verkaufsfähig, also kam die Verringerung der Transpirationskoeffizienten vermutlich nicht durch zu starken Feuchtigkeitsverlust zustande. Eventuell erhöhen Tomaten mit steigendem Dampfdruckdefizit ihren Transpirationswiderstand. DIAZ-PEREZ (1997) hat ähnliche Beobachtungen an Tomaten gemacht. Gewichtsverlust und die Durchlässigkeit der Cuticula nahmen während der Lagerung permanent ab. Der Autor hält es für möglich, dass Änderungen der Wasserdampfdurchlässigkeit der Cuticula mit der Durchlässigkeit für andere Gase, wie z.B. O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Ethylen in Zusammenhang stehen könnte. Die unterschiedliche Durchlässigkeit für Wasserdampf verändert das Nachernteverhalten der Tomaten, indem die Diffusion anderer Gase beeinflusst wird, wodurch sich auch die Empfindlichkeit von unterschiedlich reifen Tomaten gegenüber CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>-Gehalten unter CA-Bedingungen erklären lässt. WALKER (1985) berichtet jedoch von Radieschen, dass deren Transpirationswiderstand unabhängig vom Austrocknungsgrad ist. Darauf ließ die Linearität der Gewichtsverluste während der Messdauer schließen. Für Möhren zeigten dies ÅPELAND und BAUGERØD (1971). FISCHER (1967) (zit. in WALKER 1985) berichtet jedoch, dass Blätter mit zunehmender Austrocknung steigende Transpirationswiderstände aufwiesen.

Folien als Verpackungsmaterialien zeigen unterschiedliche Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Luftfeuchte. Es wäre durchaus möglich, dass die Epidermis von Früchten und Gemüse ähnlich reagiert (SASTRY 1985). Laut KRAXNER (1981) kann der Wasserverlust von Gemüse nur als eine von der Zeit, von der Luftfeuchte und von der Temperatur abhängige Funktion dargestellt werden. Die Transpiration von Gemüse ist also eine Funktion und keine Konstante. Diese Forderung deckt sich auch mit den vorliegenden Versuchsergebnissen, bei denen die Transpirationskoeffizienten bei schwankender Temperatur und Luftfeuchte immer entgegengesetzt zu Wasserdampfabgabe und Dampfdruckdefizit schwanken. Nach PATEL et al. (1988) sinkt bei steigender Dampfdruckdifferenz der Transpirationskoeffizient. Auch WALKER (1985) fand in Untersuchungen mit Weißkohl, dass dessen Transpirationskoeffizient mit sinkendem Dampfdruckdefizit ansteigt. BURTON (1982)

berichtet von steigenden Verlusten bezogen auf das Dampfdruckdefizit bei höherer Luftfeuchte. Bei PERTIERRA (1995) reagierten die untersuchten Gemüsearten unterschiedlich auf steigendes Dampfdruckdefizit. Kohlrabi und Porree reagierten mit nicht linear sinkendem und Radies mit steigendem Transpirationskoeffizienten. Rosenkohl zeigte diesbezüglich keine deutliche Reaktion auf unterschiedliches Dampfdruckdefizit.

Speisezwiebeln hatten bei den vorliegenden Untersuchungen eine geringere Wasserdampfabgabe als Tomaten, die bei leicht steigendem Dampfdruckdefizit mit der Versuchsdauer verhältnismäßig stärker absank (Untersuchung Z1, Abbildung 84a und b). Die Bulben waren nach der Untersuchung ebenfalls noch vermarktungsfähig. Die Transpirationskoeffizienten der untersuchten Zwiebeln hatten über die Untersuchungsdauer hinweg eine fallende Tendenz, die einzelnen Varianten ließen sich jedoch kaum unterscheiden (Abbildung 84c). Dies spricht dafür, dass schwankende Temperaturen in den Küvetten keinen Effekt auf den Transpirationswiderstand der Zwiebeln hatten.

Bei allen weiteren untersuchten Gemüsearten, bei denen nur das Kondenswasser, welches nach der Auslagerung im Gefäß zurückgeblieben war, sowie der Gesamtschwund verglichen wurde, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Temperaturvarianten festgestellt werden. Diese Tatsache spricht ebenfalls gegen die Vermutung, Temperaturschwankungen würden die Transpiration von gelagertem Gemüse überproportional erhöhen. ITO und NAKAMURA (1985) untersuchten Spargel, breite Bohnen, Shii-Take- sowie Enoki-Take-Pilze, Schalotten, Erbsen und Trauben auf Frische- und Qualitätsmerkmale nach Lagerung bei fluktuierenden Temperaturen. Die Amplituden betragen  $\pm 5$  K,  $\pm 3$  K sowie  $\pm 1$  K bei Schwingungsdauern von sechs Stunden und 12 Stunden und einer Standardtemperatur von  $6^{\circ}\text{C}$ . Die Bedingungen waren also durchaus mit denen in dieser Arbeit vergleichbar. Die Autoren stellten fest, dass die Toleranz gegenüber fluktuierenden Temperaturen von Spargel, Bohnen, Schalotten und den untersuchten Pilzarten sehr gering war und fordern für deren Lagerung möglichst niedrige, konstante Temperaturverhältnisse. Bei Erbsen und Trauben stellten ITO und NAKAMURA (1985) eine höhere Toleranz gegenüber Temperaturschwankungen fest. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Arten, die sehr viel transpirieren, empfindlicher auf Temperaturschwankungen reagieren als solche, die wie Erbsen und Trauben durch deren Schale einen guten Transpirationswiderstand haben. In der Arbeit von SEISENBERGER (1996) hatten Möhren im direktgekühlten Lager im Vergleich zum Mantelkühlager nach 98 bzw. 147 Tagen Lagerdauer mehr Feuchtigkeit verloren als Sellerie. WALKER (1985) schreibt, dass der Transpirationskoeffizient bei geringem

Dampfdruckdefizit ( $<16$  Pa) ansteigt und dass die Transpiration in diesem Bereich sehr viel stärker auf Änderungen der Temperatur oder der Luftfeuchte im Lager reagiert als bei größerem Dampfdruckdefizit.

#### 4.2.3 Feuchtigkeitsmessung und exakte Bestimmung der Transpiration des Versuchsgutes

Nach SASTRY (1985) führen hohe relative Luftfeuchten ( $LF \leq 95\%$ , für manche Produkte mit hohen Transpirationsraten wie Pfirsiche oder Rosenkohl auch schon darunter) und niedrige Luftgeschwindigkeiten bei Messungen und Modellberechnungen oft zu großen Fehlern. Werden approximierende mathematische Modelle erstellt, können genaue Transpirationskoeffizienten nur bei niedrigen Luftfeuchten und hohen Luftgeschwindigkeiten erzielt werden (GAFFNEY et al. 1985). Bei niedrigen Temperaturen und hohen Luftfeuchten ist die Transpiration gering und folglich der Fehler groß (PATEL et al. 1988). CHAU et al. (1988) empfehlen für die größtmögliche Genauigkeit von Transpirationsmessungen eine Luftgeschwindigkeit von  $200 - 400 \text{ m min}^{-1}$  und eine relative Luftfeuchte von  $50 - 70 \%$ . In eigenen Untersuchungen lag bei Zwiebeln die relative Luftfeuchte zwischen  $15 \%$  und  $25 \%$ , bei Tomaten zwischen  $65 \%$  und  $85 \%$ . Die Luftgeschwindigkeit in Gemüsenähe lag zwischen  $6 \text{ m min}^{-1}$  und  $30 \text{ m min}^{-1}$ . Bei den weiteren untersuchten Gemüsearten ist über den Verlauf der Transpirationskoeffizienten keine Aussage zu treffen.

Die meisten Transpirationsberechnungen, die in der Literatur erwähnt werden, gelten nur für Einzel Früchte (ÅPELAND und BAUGERØD 1971, VAN DEN BERG und LENTZ 1971, CHAU et al. 1988a und b, FOCKENS und MEFFERT 1972, LENTZ et al. 1971, PATEL et al. 1988, SASTRY et al. 1978, SASTRY und BUFFINGTON 1983). ROMERO und CHAU (1987) haben festgestellt, dass die Transpiration von Valencia-Orangen im Stapel um  $40 \%$  niedriger ist als bei Einzel Früchten. Daher sind Modelle, die die Transpiration einzelner Früchte simulieren, nicht geeignet, um die Transpiration im Stapel vorauszusagen. Die Ergebnisse der beiden Autoren beschreiben eine hohe initiale Transpirationsrate bedingt durch ein hohes Dampfdruckdefizit. Die austretende Feuchtigkeit füllt schnell die Zwischenräume des Stapels, so dass das Dampfdruckdefizit sinkt und damit auch die Transpirationsrate. Ein späteres leichtes Ansteigen der Transpirationsrate könnte durch einen Temperaturanstieg innerhalb des Stapels aufgrund der Atmungswärme verursacht werden. ROMERO und CHAU (1987) gehen davon aus, dass durch Temperaturunterschiede innerhalb des Stapels Konvektionsströme entstehen, welche die Wasserabgabe des Lagerstapels fördern.

#### 4.2.4 Probleme und Grenzen bei der Versuchsanordnung

Hoher Wasserverlust des Pflanzenmaterials bedingt eine fortschreitende Abnahme des Wasserpotentials mit fortschreitender Austrocknung. Deshalb sinkt die Wasserverlustrate allmählich ab (BURTON 1982). Bei eigenen Untersuchungen erfolgte durch die starke Temperaturdifferenz zwischen Kühlraumluft und Küvettenluft, die notwendig war, um die Temperaturschwungung in der Küvette zu ermöglichen, ständige Kondensation an den Küvettenwänden. Die Austrocknung des Untersuchungsgutes war besonders stark. Der größte Nachteil an diesem Effekt war jedoch, dass die Wasserabgabe des untersuchten Gemüses nicht im zeitlichen Verlauf betrachtet werden konnte, sondern nur als Gesamt-Wasserverlust nach Beendigung des Untersuchungsdurchlaufs. Möglicherweise war der Wasserverlust beim "Herunterkühlen" am Anfang der Untersuchung so groß, dass Unterschiede zwischen den Varianten im weiteren Verlauf nicht mehr differenziert werden konnten.

Die kapazitiven Feuchtefühler zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte in den Küvetten wurden mit Salzlösungen regelmäßig geeicht, jedoch waren im ersten Versuchsjahr drei dieser Fühler defekt. Nach deren Reparatur stellte sich heraus, dass die Temperaturmessung der 12 Fühler ebenfalls neu kalibriert werden musste. Die Kalibrierung der Temperaturkanäle wurde mit Prüfwiderständen durchgeführt. Variationen in den Messungen vor diesem Zeitpunkt (08.06.1999) können evtl. durch leichte Abweichungen der Fühler verstärkt worden sein.

### ***4.3 Die ideale Versuchsanordnung***

Wie aus den vorherigen Kapiteln hervorgeht, konnten mit der vorhandenen Versuchsanlage nicht alle Effekte fluktuierender Temperaturen auf das Nachernteverhalten von gelagertem Gemüse nachgewiesen werden. Welche Voraussetzungen müsste also eine ideale Versuchsanlage erfüllen?

#### 4.3.1 Temperatursteuerung

Ein großer Nachteil der bestehenden Versuchsanlage war die technische Realisierung der Temperaturschwankungen. Der Kühlraum wurde auf 0,5 °C gehalten und die Temperatur in den Küvetten wurde auf den entsprechenden Wert um 10 °C geheizt. Nur durch diese extreme Temperaturdifferenz zwischen Kühlraum- und Küvettenluft konnte die gewünschte Temperaturschwankung überhaupt realisiert werden. Dementsprechend viel Wasser ist an den Küvettenwänden auskondensiert und wurde dem System ständig entzogen. Um genaue Informationen über das Transpirationsverhalten auch von solchen Gemüsearten zu bekommen, die keine so guten Tranpirations-

barrieren haben wie die untersuchten Zwiebeln oder Tomaten, müsste jegliche Kondensation in den Küvetten verhindert oder wenigstens minimiert und deren zeitliche Erfassung ermöglicht werden.

Ein weiteres Manko der bestehenden Versuchsanlage war die Temperaturverteilung innerhalb der Küvetten. Es konnte nicht hundertprozentig garantiert werden, dass an jedem Punkt des Gemüses dieselbe Temperatur herrschte. Das Gemüse müsste im Versuchsgefäß an einer definierten Stelle platzierbar sein und die Temperatur anhand eines Fühlers, der sich im Luftstrom an der Gemüseoberfläche befindet, gesteuert werden.

In der verwendeten Versuchsanlage war die Temperatur nur über ein Relais regelbar, das heißt es gab die Möglichkeiten "Heizung an" oder "Heizung aus". Es wurde also entweder mit der vollen Leistung der Heizelemente (150 W) oder überhaupt nicht geheizt. Eine stufenlose, leistungsgeregelte Steuerung würde eine noch genauere Temperaturführung ermöglichen.

### 4.3.2 Messeinrichtungen

#### 4.3.2.1 *Feuchte*

Die Messung der Luftfeuchte mit kapazitiven Feuchtefühlern hatte den Vorteil, dass mit beliebiger Häufigkeit gemessen werden konnte, da jede Küvette mit einem solchen Fühler ausgestattet war. Der Nachteil an dieser Methode war allerdings, dass das Wasser, welches dem System durch Kondensation entzogen wurde, nicht zeitlich erfasst werden konnte. Deshalb würde die zusätzliche Einrichtung einer Feingewichtsmessung, mit welcher der Gewichtsverlust der gelagerten Pflanzenorgane kontinuierlich erfasst wird, wertvolle Informationen über deren Transpirationsverhalten liefern.

#### 4.3.2.2 *Messhäufigkeit und Datenauswertung*

Um genaue Informationen über das physiologische Verhalten gelagerter Pflanzenorgane zu erhalten, ist eine hohe Messhäufigkeit für Parameter wie z.B. CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfabgabe entscheidend. Um gesicherte Aussagen über das Atmungsverhalten von Gemüse bei Temperaturänderungen treffen zu können, müsste CO<sub>2</sub> mit derselben Häufigkeit gemessen werden wie die Temperatur selbst. So könnte die Zeitspanne zwischen der Temperaturänderung und der physiologischen Reaktion des

Lagergutes bestimmt werden, was Aufschluss über eventuelle Stoffwechselreaktionen wie z. B. die Bildung von Hitzeschockproteinen geben könnte.

Traditionell werden pflanzliche Produkte dadurch charakterisiert, dass eine qualitätsgebende Eigenschaft für jedes einzelne Produkt eines Stapels bestimmt wird. Der Mittelwert steht dann für das Verhalten des Produktes allgemein. Sind die Stapel homogen, funktioniert diese Methode ganz gut. Bei heterogenem Material wird unterschiedliches Verhalten von Produktstapeln mit unterschiedlichen, sich verändernden Eigenschaften nicht erfasst (TIJSKENS et al. 1999). Bei der vorliegenden Arbeit hat sich bestätigt, dass die Betrachtung von Mittelwerten über einen definierten Zeitraum wesentliche Erkenntnisse unter Umständen verschleiern kann, da sich Effekte, die sich mit den äußeren Bedingungen verändern, bei der Gesamtbetrachtung ausgleichen können. Zerstörungsfreie Messmethoden am lebenden Objekt gewinnen somit an Bedeutung. Aus Modellversuchen sowohl an einzelnen Objekten als auch im Stapel, bei denen möglichst viele Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte sowie Luftgeschwindigkeit genau geregelt werden können, sollten wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden, die dann als sinnvolle Grundlage für Großversuche dienen.

#### *4.3.2.3 Zusammensetzung der Lagerluft*

Außerdem wäre ein Messsystem wünschenswert, mit dem auch andere Komponenten der Lagerluft bestimmt werden können, wie z. B. Sauerstoff und Ethylen. Durch die Erfassung des Sauerstoffverbrauchs könnten Rückschlüsse auf veratmete Substrate gezogen werden und damit auch auf die Auswirkung der Lagertemperatur auf Stoffwechselwege. Im Bereich der interzellulären Regulation kommt dem Ethylen eine ganz besondere Rolle zu (WEICHMANN 2000). Stressreaktionen des gelagerten Gemüses könnten mit Hilfe von dessen Ethylenabgabe quantifiziert werden. Da zunächst eine Untersuchung von Einzelfrüchten am sinnvollsten erscheint, müsste die Messeinrichtung für die Gaszusammensetzung eine sehr hohe Empfindlichkeit aufweisen, um auch kleinste Spuren der einzelnen Komponenten genau zu erfassen. Denkbar wäre z. B. die Messung mittels Gaschromatografen.

#### *4.3.3 Zusätzliche Untersuchungen im Bereich der Molekularbiologie*

Alle Veränderungen während der Nacherntephase lassen sich über die Regulation der Genaktivität beschreiben (WEICHMANN 2000). Weiterführende Forschung in der Nacherntephysiologie auf zellulärer und molekularbiologischer Basis ist unbedingt notwendig, um unser Wissen und Verständnis für die Vorgänge nach der Ernte zu erweitern. Interessant wäre unter anderem die Frage nach den "Temperaturrezeptoren"

in der Pflanzenzelle. Wie nimmt die Pflanzenzelle eine Temperaturänderung überhaupt wahr? Welche Proteine oder Membranbestandteile verändern sich dabei? Warum reagieren Pflanzen unterschiedlich auf Klimaveränderungen? Zunächst gilt es herauszufinden, inwiefern sich Temperaturveränderungen auf die einzelnen Schritte des Primärstoffwechsels auswirken. Wie kommt es letztendlich dazu, dass Gene, die Enzyme für die Reaktionsschritte z. B. der Glykolyse oder des Citratzyklus codieren, exprimiert werden. Welche Rolle spielt dabei die Umgebungstemperatur? So haben BOTONDI et al. (1996) bei der Lagerung von Radicchio bei 0 °C im Vergleich zu 6 °C einen höheren Gehalt an Putrescin feststellen können. Die Anreicherung von solchen Polyaminen führt auf zellulärer Ebene bei längerer Lagerdauer offensichtlich zu einer Beschleunigung der Seneszenz, obwohl an der gelagerten Pflanze äußerlich keine Kälteschadenssymptome feststellbar sind. Außerdem halten die Autoren den Gehalt an Polyaminen im gelagerten Pflanzengewebe für einen guten Indikator für dessen physiologisches Verhalten bei der Lagerung, da deren Biosynthese durch Temperaturveränderungen beeinflusst wird.

Eine weitere zu klärende Frage wäre, auf welche Weise sich die Struktur der Pflanzenoberfläche in Abhängigkeit von Veränderungen des Dampfdruckdefizits der Umgebungsluft verändert. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass sich der Transpirationskoeffizient mit dem Dampfdruckdefizit verändert. Welche Mechanismen hat also die Pflanze nach der Ernte, sich gegen übermäßige Transpiration zu schützen? Andererseits sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass sich durch zu geringe Transpiration und mangelnden Gasaustausch unter Umständen unerwünschte Stoffe im Pflanzengewebe anreichern können, die dann z.B. die Schalenbräune beim Apfel verursachen, wobei es auch hier gegenteilige Angaben gibt. Studien im Alten Land haben auch bei hohen Luftfeuchten kein erhöhtes Auftreten von physiologischen Erkrankungen hervorgebracht (QUAST 2000). Hier scheint es hinsichtlich Lagerempfehlungen sehr große regionale Unterschiede zu geben, was die optimale Luftfeuchte angeht. Kennzahlen zur maximal notwendigen Transpiration für unterschiedliche Obst- und Gemüsearten müssten ermittelt werden, um unerwünschte Effekte im Lager zu vermeiden.

Mathematische Modellierung und Simulation biophysikalischer Prozesse sind für die weitere Grundlagenforschung auch auf dem Gebiet der Nachernte ein unerlässliches Werkzeug. Deren Anwendung in diesem Bereich sollte weiter ausgebaut werden.

#### ***4.4 Kritische Betrachtung der Ergebnisse von SEISENBERGER (1996)***

Lagerversuche in unterschiedlichen Kühlsystemen mit unterschiedlichen Gemüsearten ergaben einen höheren Schwund, wenn Temperatur und Dampfdruckdefizit der Luft mit kleiner Hysterese schnell um ihren Mittelwert schwankten (SEISENBERGER 1996). Da die Gewichtsverluste durch Atmung vernachlässigt werden können, bedeutet dies, dass das Direktkühlsystem mit elektronischem Expansionsventil, dessen Temperatur mit kleiner Abweichung schnell um den Mittelwert schwankte, beim Lagergut größere Feuchtigkeitsverluste verursachte als ein Mantelkühlsystem, dessen Temperaturabweichung größer, aber dafür langsamer war. Die Vermutung lag nahe, dass durch die schnelle Schwankung der Temperatur und damit auch des Dampfdruckdefizits in der Lagerluft des direkt gekühlten Raumes die Transpiration des Gemüses in irgendeiner Weise angeregt wurde. Dies konnte einerseits durch die Herabsetzung des Transpirationswiderstandes der gelagerten Pflanzenorgane geschehen, dann wäre der Feuchtigkeitsverlust physiologisch bedingt gewesen. Andererseits wäre denkbar, dass durch Kondensation und Eisbildung am Verdampfer und durch den in der Einleitung beschriebenen "Pumpeffekt" (HENZE und HANSEN 1988) der Lagerluft ständig Wasser entzogen wurde, was zu einem höheren Dampfdruckdefizit geführt hat, das durch die Transpiration des Gemüses wieder ausgeglichen werden musste. Diese beiden Faktoren sind schwer voneinander zu trennen, weil sie sich gegenseitig beeinflussen. Einerseits bedingt eine niedrige Luftfeuchte bzw. ein hohes Dampfdruckdefizit die Intensivierung der Transpiration, andererseits erhöht die Transpiration des Gemüses den Feuchtigkeitsgehalt der Lagerluft bzw. erniedrigt deren Dampfdruckdefizit. Wenn bei SEISENBERGER (1996) in den beiden Lagersystemen Mantel- und Direktkühlraum keine wesentlichen Unterschiede im Dampfdruckdefizit geherrscht haben (26 Pa und 34 Pa) bedeutet das nicht unbedingt, dass im Direktkühlraum dem Lagergut nicht wesentlich mehr Feuchtigkeit entzogen wurde als im Mantelkühlraum. Bei den vorliegenden Untersuchungen hat sich die relative Luftfeuchte bzw. das Dampfdruckdefizit auf ein konstantes Niveau eingestellt (zumindest solange die gelagerten Pflanzenteile noch genügend Wasser abgeben konnten), obwohl dem System ständig feuchte Luft entnommen und trockene Luft hinzugefügt wurde. Dies bedeutet, dass dem gelagerten Gemüse kontinuierlich Wasser entzogen wurde, obwohl in den Küvetten nahezu Sättigungfeuchte erreicht wurde. Um über den Wasserentzug im Kühlraum Aussagen treffen zu können, wäre es unerlässlich, die Wassermenge, die dem Kühlraum entzogen wird, z.B. durch Auslitern zu erfassen. Zusätzliche Verluste durch Türen, Ritzen, etc. oder die Befeuchtung von Boden und Wänden würden dabei nicht erfasst, was zu Ungenauigkeiten führen würde. Also wurde in der vorliegenden

Arbeit durch Modelluntersuchungen Aufschluss über den Wasserverlust gelagerter Pflanzen bei schwankenden Temperaturen erlangt.

Es gibt in der Literatur bereits Hinweise, dass Kühlsysteme, bei denen eine sehr hohe und möglichst konstante relative Luftfeuchte eingestellt und gehalten werden kann, den Schwund der gelagerten Produkte minimieren. Bereits 1955 hebt LENZ hervor, dass in einem Mantelkühlraum die Austrocknung der Oberfläche von gefrorenen Produkten bis auf ein zu vernachlässigendes Maß reduziert werden konnte. Die Möglichkeit, im Mantelkühlraum Luftfeuchten nahe 100 % zu erhalten bei gleichmäßiger Temperaturverteilung sowie geringer Luftgeschwindigkeit, stellte sich als Vorteil gegenüber direkt gekühlten Räumen heraus. POULSEN et al. (1994) haben die Eignung eines "normalen" Kühlsystems (wahrscheinlich mit Direktkühlung) und einer Eisbankkühlung für die Lagerung von Kopfsalat, einem Produkt mit hoher Transpirationsrate, verglichen. Bei der Eisbankkühlung stammt die Feuchte in der Lagerluft aus dem Kühlsystem selbst und nicht aus dem gelagerten Produkt. In dem von POULSEN et al. (1994) beschriebenen Versuch konnte die Lagertemperatur in der Eisbankkühlung etwas genauer eingestellt werden ( $1^{\circ}\text{C} \pm 0,3 \text{ K}$ ) als bei der "normalen" Kühlung ( $1^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ K}$ ). Über die Schwankungshäufigkeit sind leider keine Angaben gemacht. Der Unterschied war aber so gering, dass er durchaus auch auf unterschiedlicher Platzierung des Temperaturfühlers oder verschiedenen Messsystemen beruhen kann. Die Atmung von Kopfsalat (dem untersuchten Gemüse) bei  $1^{\circ}\text{C}$  ist zu vernachlässigen. Die relative Luftfeuchte der beiden Systeme wies deutliche Unterschiede auf (95 % bei "normaler" Kühlung und 99 - 100 % bei Eisbankkühlung) und lieferte auch eine plausible Begründung dafür, warum die Verluste in der Eisbankkühlung immer geringer waren als in der "normalen" Kühlung.

Nach ZAUSSINGER (1979) sind Schwankungen in der Größenordnung von  $1^{\circ}\text{C}$  bis  $2,5^{\circ}\text{C}$  mit einer Periodendauer von weniger als einer Stunde absolut unbedenklich. Wesentlich ist nur der Mittelwert über einen längeren Zeitraum. Langfristige Schwankungen der mittleren Raumtemperatur von  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  sind absolut tragbar. Dem setzt SEISENBERGER (1996) entgegen, dass möglicherweise die Hysterese und die Frequenz, mit der ein Parameter um seinen Mittelwert schwankt, ausschlaggebender für das Lagerergebnis sind als das absolute Niveau von Temperatur und Luftfeuchte.

Die eigenen Untersuchungen zur Auswirkung von fluktuierenden Temperaturen auf gelagertes Gemüse und die theoretischen Berechnungen lassen aber erkennen, dass die Frequenz bzw. die Schwingungsdauer der Temperaturschwankungen nur insofern eine Rolle spielt, als das Gemüse die Temperaturschwankung um so intensiver mitmacht, je langsamer sie ist. Also bedeutet eine kürzere Schwingungsdauer automatisch eine

geringere Temperaturabweichung im Gemüse (Abbildung 1). FU und LABUZA (1997) nehmen an, dass Nahrungsmittel sofort auf Temperaturveränderungen in der Umgebung reagieren. Dieser Effekt wird durch geeignete Verpackung verringert. Außerdem gehen die Autoren davon aus, dass je kürzer die Periode der zyklischen Temperaturschwankung ist, desto geringer ist die Temperaturvariation innerhalb des Produkts und damit die Änderung der Reaktionsrate auf veränderte Temperaturen. Bei unseren Versuchen, bei denen die Temperatur im Inneren erfasst wurde, hat das Gemüse die Abweichung von 3 K erst bei einer Schwingungsdauer von 12 Stunden richtig mitgemacht, wenn überhaupt. Die einzelnen Varianten hatten dadurch unterschiedliche Temperaturniveaus.

Die Temperaturabweichungen in einem praxisüblichen Kühlraum und deren Häufigkeit dürften verglichen mit unseren Untersuchungsbedingungen für die Atmung und die Transpiration des Lagergutes kaum relevant sein. SEISENBERGER (1996) hat für den direktgekühlten Raum mit elektronischem Expansionsventil Schwankungen von insgesamt 0,3 K innerhalb von 15 min und für den Mantelkühlraum etwa 0,6 K in ca. drei Stunden gemessen. Das Gemüse hat evtl. die Temperaturschwankung im Mantelkühlraum mitgemacht, aber nahezu unmöglich die geringe Schwankung mit hoher Frequenz im direktgekühlten Raum. Die Ursachen für die höheren Lagerverluste im letztgenannten müssen anderswo zu suchen sein. Grundsätzlich war die Temperatur an beiden von SEISENBERGER (1996) aufgezeichneten Zeiträumen im Mantelkühlraum höher als im direktgekühlten Raum. Es könnten z. B. die Oberflächentemperaturen der Mantelinnenwand und der Verdampferrohrschlange, die für die Wärme- bzw. Kälteübertragung und damit auch für den Massenfluss und Feuchtigkeitsentzug verantwortlich sind, unterschiedlich gewesen sein. Leider konnten diese Parameter nicht gemessen werden, da zu der Zeit keine geeigneten Fühler zur Verfügung standen (SEISENBERGER 2000). Wie oben schon diskutiert wurde, liegt der Wärmeübergangskoeffizient für kondensierenden Wasserdampf um Zehnerpotenzen höher als für andere Stoffe. Mit großer Wahrscheinlichkeit war die Differenz zwischen Wandtemperatur und Kühlraumluft kleiner als die Differenz zwischen Verdampferoberfläche und Kühlraumluft, was zur Folge hatte, dass im Mantelkühlraum weniger Wasser auskondensiert ist als im direktgekühlten Raum. Weiterhin könnten unterschiedliche Windgeschwindigkeiten geherrscht haben, welche die Transpiration ebenfalls unterschiedlich beeinflusst haben könnten. LENZ (1955) berichtet von zu vernachlässigenden Windgeschwindigkeiten in dem von ihm getesteten Mantelkühlraum. Außerdem könnten die Wandisolierungen der beiden von SEISENBERGER (1996) getesteten Kühlräume unterschiedlich gewesen sein. Bei Lagerversuchen mit Äpfeln im Alten Land wurde durch eine zu dünne Wandisolierung und nicht vorhandene Fußbodenisolierung ein erhöhter Wasserentzug beobachtet, der

dadurch zustande kam, dass der erhöhte Wärmeeinfall von außen durch längeres Laufen der Kälteanlage ausgeglichen werden musste (QUAST 2000). LENTZ und ROOKE (1956) erwähnen bereits, dass beim Mantelkühlraum der kühlende Luftstrom nicht direkt mit der Lagerluft in Verbindung steht und deshalb Temperatur und Luftfeuchte im Innern des Raumes nicht unmittelbar durch den Wärmeeinfall von außen beeinflusst werden. Darüber hinaus geben die Autoren an, dass beim Mantelkühlsystem die Eisbildung an der Verdampferrohrschlange verhindert wird, wodurch bei direkt kühlenden Systemen dem Lagergut viel Wasser entzogen wird.

Bei den Untersuchungen von SEISENBERGER (1996) wies das Dampfdruckdefizit im direktgekühlten Raum entsprechend der Temperaturschwankung ebenfalls Schwankungen auf, beim Mantelkühlraum blieb es relativ konstant. Was außerdem auffällt ist, dass sich das Dampfdruckdefizit bei beiden betrachteten Terminen beim Mantelkühlraum nicht wesentlich geändert hat, aber beim direktgekühlten Raum lag es einmal im Niveau über dem des Mantelkühlraumes und einmal darunter, es hat sich also mit der Zeit verändert. Das kann einerseits an der Änderung des Temperaturniveaus der Umgebungsluft gelegen haben, andererseits könnte die Dichtigkeit der beiden Raumkonstruktionen unterschiedlich gewesen sein. Durch die doppelte Wandung des Mantelkühlraums bleibt nicht nur die Feuchtigkeit im Raum besser erhalten (KRAXNER 1981, LENTZ und VAN DEN BERG 1971), sondern der Wärmeeinfall von außen wird doppelt abgeschirmt, da die Luft im Mantelzwischenraum zusätzlich eine gute Isolierung darstellt. LENTZ und VAN DEN BERG (1971) vergleichen den Effekt der Wärmedurchlässigkeit des Wandungsmaterials auf das Lagerklima mit dem der Atmungswärme des Gemüses. Die Arbeiten von HENTSCHEL (1997) belegen, dass die äußere Wärmeeinwirkung das Lagerklima entscheidend beeinflusst. Mit steigender Umgebungstemperatur erhöhte sich das Dampfdruckdefizit.

Die Schwankung im Dampfdruckdefizit des direktgekühlten Raumes bei SEISENBERGER (1996) ist sicherlich unter anderem dadurch zustande gekommen, dass aufgrund sich verändernder Temperaturdifferenzen zwischen Verdampferoberfläche und Kühlraumluft durch Unterschreiten des Taupunktes ständig Wasser auskondensiert ist. Dieses musste schließlich vom eingelagerten Produkt wieder nachgeliefert werden, um das Gleichgewicht zwischen ungesättigter Luft und Sättigungsfeuchte an der laminaren Grenzschicht des Gemüses wieder herzustellen. Die Diskussion macht deutlich, dass die beiden Systeme Mantelkühlraum und direkt gekühlter Raum nicht hundertprozentig vergleichbar waren. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von SEISENBERGER (1996) zeigt die vorliegende Arbeit um so mehr, dass die Ursachen für Lagerverlust, die vom Produkt selbst herrühren (d. h.

physiologische Reaktionen) und jene, die durch das Kühlsystem bedingt sind, nur sehr schwer getrennt zu untersuchen sind.

HENTSCHEL (1997) variierte in Versuchen mit einer Kaltlagerzelle unterschiedliche Steuer- und Regelgrößen zur Optimierung des Raumklimas. Beim Vergleich unterschiedlicher Expansionsventile schnitten die Modelle (beides elektronisch geregelte Ventile) mit höherer mittlerer und minimaler Lamellentemperatur des Verdampfers am besten ab. Die Daten veranschaulichen, dass das Dampfdruckdefizit im Raum mit elektronischem Expansionsventil weniger oft und mit geringerer Spannweite schwankte, aber es lag auch im Niveau weit unter dem der Variante mit thermisch geregeltem Ventil. Die Verdampfer bereiften weniger und es waren weniger Maschinenläufe erforderlich. Dies entspricht den Ausführungen von BELKER (1996), dass lange Verdichterlaufzeiten eine stärkere Austrocknung des Lagergutes bewirken. Latenzwärmenutzung, bei der das am Verdampfer entstehende Eis abgeblasen und als Wasserdampf der Lagerluft wieder zugeführt wird, streckt die notwendigen Arbeitsintervalle und reduziert die Abtauzeiten. Bei den Untersuchungen von HENTSCHEL (1997) lieferte die geringste eingestellte Solltemperaturdifferenz von 0,2 K bei der Lagerung von Möhren die besten Ergebnisse, zumindest in den Wintermonaten bei geringerer Wärmeeinwirkung von außen. Er erachtet das Betreiben einer Kälteanlage bei einer Temperatur von 0,3 °C mit kleiner Hysterese (0,3 K) und höherer Frequenz als günstig. Ab einer Solltemperatur von 0,6 °C hat sich das Oszillieren mit größerer Hysterese (0,5 K) und geringerer Frequenz als verlustärmer erwiesen. Positive Effekte auf das Lagerklima erreichte SCHIER (2000) durch eine bedarfsabhängige Nutzung der Latenzwärme der Luftkühlerlamellen. Bei einer Kälteanforderung erfolgte das Einschalten des Verdichters erst, wenn die Lamellentemperatur der Luftkühler nahe der Raumtemperatur war. Durch die geringe Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Kühlerlamellen erfolgte beim Starten des Verdichters keine Taupunktunterschreitung und diese wurde während der Verdichterlaufzeiten geringer. Daraus folgte eine geringere Bereifung des Verdampfers und potentielle Abtauvorgänge wurden verzögert, was erheblich zur Energieeinsparung beitrug und den Lagerertrag verbesserte.

#### ***4.5 Wärmeübertragung bei fluktuierenden Temperaturen***

Für die Berechnung des Wärmeübergangs zwischen gelagertem Gemüse und Lagerluft wird vorausgesetzt, dass die Temperaturdifferenz während des Wärmeübergangs konstant ist. Dies ist in praxisüblichen, direkt gekühlten Lagerräumen nur bedingt der Fall. In der vorliegenden Arbeit gestaltet sich eine konkrete Berechnung von Wärmeübergängen schwierig, weil die Voraussetzungen dafür nicht erfüllt sind. Am schwierigsten würde wohl die Gemüseoberfläche zu bestimmen sein, da die

Untersuchungen nicht an Einzelorganen vorgenommen wurden, sondern im Stapel. Also sind die Grenzbedingungen an den einzelnen Stellen im Stapel vermutlich sehr unterschiedlich gewesen. Außerdem wurde die Oberflächentemperatur des Gemüses nicht gemessen sondern wenn überhaupt, dann nur die Temperatur in der Gemüsemitte. Durch die Anordnung in den Küvetten konnte keine hundertprozentig gleichmäßige Temperaturverteilung in der Küvettenluft gewährleistet werden. Außerdem sind die Wärmeübergangskoeffizienten der untersuchten Gemüsearten nicht bekannt.

Bleibt nun entgegen den in der Einführung (Kapitel 1.6.1 Wärmeübertragung zwischen gelagertem Gemüse und Umgebungsluft) genannten Forderungen die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Gemüse bzw. zwischen Gemüseoberfläche und Gemüsezentrum nicht ständig konstant, so variiert die Höhe und die Richtung des übertragenen Wärmestroms mit den äußeren Bedingungen. Die Schemazeichnung (Abbildung 89) verdeutlicht jedoch, dass sich bei fluktuierenden Temperaturen die Temperatur der Gemüseoberfläche weitaus weniger verändert als diejenige der Umgebungsluft. Bei Temperaturschwankungen von 0,5 K, wie sie in einem praxisüblichen Kühlraum auftreten, ist anzunehmen, dass die Temperatur im Zentrum des Gemüses konstant bleibt.

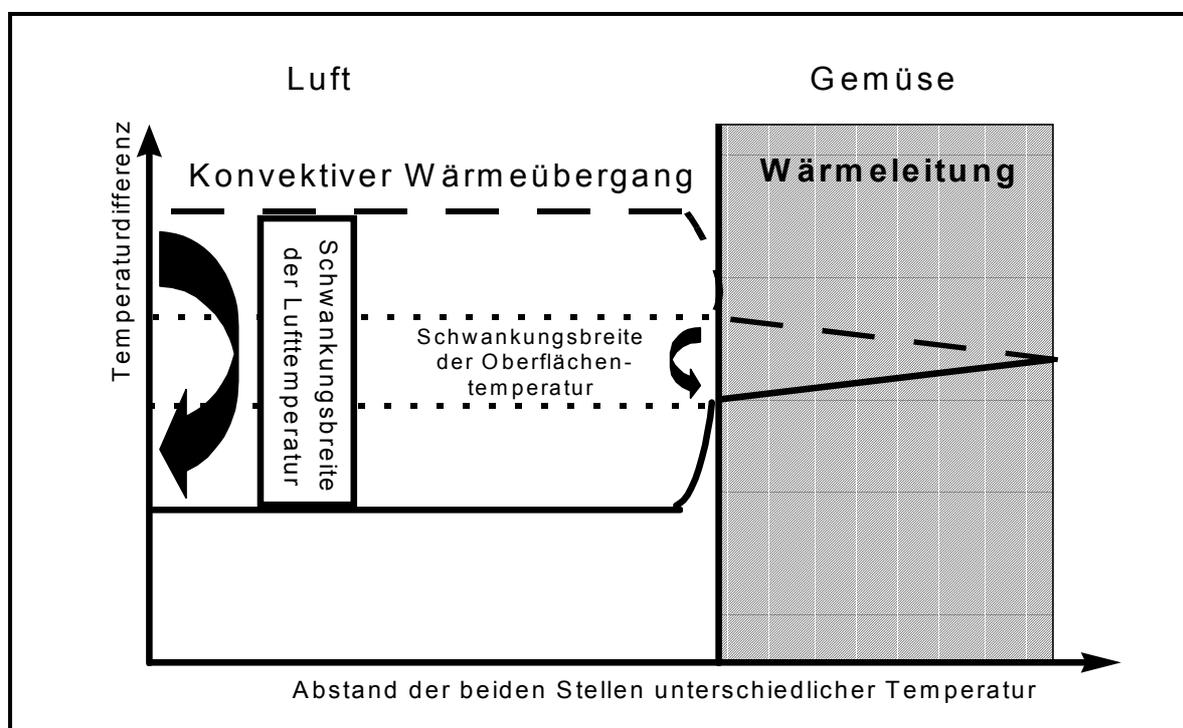


Abbildung 89: Wärmedurchgang bei fluktuierenden Temperaturen.

#### 4.5.1 Optimierung der Wärmeübertragung

Zur Optimierung der Wärmeübertragung zwischen gelagertem Gemüse und Umgebungsluft muss die Temperaturdifferenz zwischen Gemüseoberfläche und Luft immer aufrecht erhalten bleiben und zwar möglichst konstant, so dass ein ständiger Wärmestrom von der Gemüseoberfläche zur Umgebungsluft hin fließen kann. Aufgrund von Stoffwechselfvorgängen gibt das Lagergut ständig Energie an die Luft ab. Um die Temperaturdifferenz aufrecht zu erhalten muss aber die von der Luft aufgenommene Energie ständig wieder entzogen werden, was im direkt gekühlten Lager am Wärmetauscher geschieht. Um die Wärmestromdichte konstant zu halten, müsste die vom Gemüse abgegebene Wärme ständig mit der Atmungswärme-produktion angepasster Leistung abgeführt werden. Dies hat einerseits Konsequenzen für die Oberflächentemperatur des Wärmetauschers und andererseits für die Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung der Lagerluft. Wie im Kapitel 1.6.1.1 (Physikalische Grundlagen) bereits erörtert, hängt der konvektive Wärmeübergang von der Geschwindigkeit des umströmenden Mediums, im vorliegenden Fall der Lagerluft, ab.

## 5 Konsequenzen für die Lagerpraxis

Die theoretischen Betrachtungen der physiologischen Vorgänge im gelagerten Produkt sowie die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit sprechen dafür, dass je kleiner die Schwankungsbreite der Temperatur ist um so geringer ist der Effekt auf Atmung und Transpiration. Andererseits sollte das Kühlsystem so beschaffen sein, dass es dem Lagergut möglichst wenig Wasser entzieht. Dazu können aus technischer Sicht größere Schwankungsbreiten der Temperatur notwendig sein.

Bei der Kühl Lagerung von lebenden Materialien, was Gemüse ja ist, handelt es sich um ein komplexes System, bei dem sich sehr viele Effekte gegenseitig überlagern. Die eigentliche Transpiration von gelagertem Gemüse selbst wird durch den ständigen Wasserentzug durch das Kühlsystem - bei der praktischen Lagerung - und durch die Kondensation an den Küvettenwänden - bei den vorliegenden Untersuchungen - überlagert. Der Versuch mit Speisezwiebeln zeigt, dass die Unterschiede im Wasserentzug zwischen schwankenden und konstanten Varianten sehr gering sind, wenn kein oder nur wenig Wasser durch äußere Einflüsse entzogen wird. Der Temperatureffekt auf die Atmungsrate wird durch die Atmungsdrift überlagert, was speziell in unseren Untersuchungen aufgrund der geringen Messhäufigkeit den Nachweis von Unterschieden erschwert hat.

Für den Anwender in der Lagerpraxis wäre ein computergesteuertes System wünschenswert, bei dem er nur noch die entsprechende zu lagernde Pflanzenart anzuklicken braucht, gewünschte maximale Lagerdauer sowie Verwendungszweck, und sich alles andere von selbst regelt. Welche Aufgaben ergeben sich daraus sowohl für die Forschung als auch für die Kältetechnik?

Zukünftig müssten also biophysikalische Datenbanken erstellt werden, die alle für die Nacherntebehandlung der unterschiedlichen Gemüsearten relevanten Angaben enthalten. Dazu gehören primär die optimale Lagertemperatur sowie die relative Luftfeuchte für die entsprechende Art, so dass z. B. eine Schädigung der gelagerten Produkte durch zu tiefe Lagertemperaturen von vornherein ausgeschlossen werden kann. Der natürliche Verlauf der Atmungsintensität bei entsprechender Temperatur ist ebenfalls ein sehr wichtiges Kriterium für eine den Bedürfnissen des Gemüses angepasste Klimaführung im Lager. Klimakterische Arten oder Zwiebeln während oder nach der Dormanz weisen charakteristische Atmungsverläufe auf. Dies wirkt sich einerseits auf die Atmungswärmeproduktion und andererseits auf die CO<sub>2</sub>-Abgabe aus. Diese beiden Faktoren haben wiederum Einfluss auf die benötigte Kälteleistung sowie auf den Sauerstoffbedarf und die CO<sub>2</sub>-Anreicherung im Lager. In weiteren Experimenten müsste die Toleranz unterschiedlicher Gemüsearten gegenüber Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen ermittelt werden, um diese Angaben in die Klimasteuerung des Kühlraumes einfließen zu lassen. So könnte das Lagerergebnis in Bezug auf Investitions- und Energiekosten optimiert werden.

Aus technischer Sicht wäre eine Optimierung des Wärmeübergangs zwischen Gemüse und Umgebungsluft sowie zwischen Verdampferoberfläche und angesaugter Kühlraumluft zu gewährleisten. Um einen gleichmäßigen Abtransport der Atmungswärme zu gewährleisten, muss das gelagerte Produkt möglichst gleichmäßig und laminar umströmt werden. Das bedeutet, dass die Luftgeschwindigkeit nicht zu hoch sein darf. Theoretisch müssten die gelagerten Organe einzeln und in der Luft schwebend gelagert werden, um ein Optimum bei der Wärmeübertragung zu erreichen, was natürlich nicht realisierbar ist. Bei der praktischen Lagerung gibt es bereits Ansätze, die Wärmeübertragung durch Luftführungsbleche oder -wände sowie textile Luftführungen und der sogenannten Shut-up-Technologie, zu verbessern. SCHIER (2000) erreichte durch den Einbau von Luftführungsblechen eine bessere Kaltluftverteilung in kritischen Bereichen und damit insgesamt eine bessere und gleichmäßigere Fruchtqualität im Apfellager. Bei der Shut-up-Technologie wird ein leichter Stoff direkt am Verdampfer über die Ventilatoren gezogen. Bei Betrieb der Ventilatoren bläst sich der Shut-up, ein textiler Schlauch, auf, wirkt als Gleichrichter und erhöht die Luftgeschwindigkeit. Dadurch wird ebenfalls die Durchlüftung im

Lagerraum verbessert. Bei Ventilatorstillstand fällt der textile Schlauch zusammen und verhindert eine Luftumwälzung am Verdampfer. Bei einer möglichen Nachverdampfung wird so verhindert, dass sich die Temperatur der Verdampferoberfläche zu weit abkühlt.

Die bedarfsgerechte Anpassung der Wärmeentzugsleistung könnte entweder über die CO<sub>2</sub>-Abgabe des Lagergutes oder dessen Oberflächentemperatur berechnet werden. Es wären also entweder teure Analysatoren notwendig oder zahlreiche Temperaturmess-einrichtungen, die mit einigem Zeitaufwand im Lager verteilt werden müssten, um eine repräsentative Temperaturerfassung zu gewährleisten. Eine Alternative dazu wären berührungslose Messverfahren zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Lagergutes. Die Temperaturführung müsste dann derart geregelt werden, dass der Taupunkt möglichst wenig unterschritten wird. Zu prüfen wäre auch, ob es sich für empfindliche Arten nicht als günstiger erweist, nicht auf die minimal mögliche Temperatur zu kühlen. BOTONDI et al. (1996) empfehlen z. B. für Radicchio eine Temperatur von 6 °C, obwohl auf 0 °C oder tiefer gekühlt werden könnte. Im Vergleich hatten Radicchioköpfe, die bei 6 °C gelagert wurden, geringere Verluste als bei 0 °C. Deren Atmung unterschied sich bei beiden Temperaturen nur unwesentlich. Bei 6 °C ergaben sich jedoch weniger Maschinenläufe, was zu einer geringeren Entfeuchtung führte.

Um den Feuchteverlust in einem Kühlraum zu minimieren, muss er möglichst luftdicht sein. Dann entsteht jedoch das Problem des Sauerstoffmangels sowie der Anreicherung unerwünschter Stoffe in der Lageratmosphäre. Die Entwicklung neuer Mikrotechnologien und Messverfahren ist notwendig, um Sauerstoffverbrauch, CO<sub>2</sub>- und Ethylenabgabe genau zu bestimmen. Ebenso wie die Kälteleistung könnte dann auch der Luftaustausch bedarfsgerecht gesteuert werden. Eine definierte Sauerstoffnachlieferung sowie Systeme zur Absorption von CO<sub>2</sub> und Ethylen müssen installiert werden.

Eine weitere zu klärende Frage wäre, inwieweit gelagerte Pflanzenorgane auf große Temperaturdifferenzen reagieren. Bei ITO et al. (1985) war der Effekt auf die Atmung der gelagerten Gemüse größer, wenn sich deren Temperatur von 1 °C auf 11 °C schnell änderte. Die vorliegenden Untersuchungen an Stangenbohnen zeigten eine leichte "Übersteuerung" der Atmung bei großen Hysteresen. Interessant wäre zu klären, inwieweit sich eine schrittweise Abkühlung bei der Einlagerung bzw. eine schrittweise Erwärmung bei der Auslagerung auf Qualität und Haltbarkeit des Gemüses auswirkt. Es ist anzunehmen, dass nicht nur die Temperaturdifferenz zwischen Verdampferoberfläche und Kühlraumluft eine entscheidende Rolle bei der

Minimierung der Verluste spielt, sondern auch die Temperaturdifferenz zwischen Gemüseoberfläche und Kühlraumluft.

Im folgenden wird ein Vorschlag für den Ablauf einer Temperaturregelung im Kühllager gemacht, bei der die Lagertemperatur in Abhängigkeit der Atmungsintensität des Lagergutes und der Taupunkttemperatur im Raum geregelt wird (Abbildung 90).

Zunächst gibt der Lagerist die Gemüseart, Verwendungszweck, gewünschte maximale Lagerdauer über ein Menü oder per Mausklick ein. Dann werden die entsprechenden Parameter für die betreffende Gemüseart aus dem Speicher geladen. Dazu gehören die optimale Lagertemperatur und Luftfeuchte und deren Grenzwerte, der natürliche Atmungsverlauf der Gemüseart (Klimakterium, Dormanz), der  $Q_{10}$  Wert für den betreffenden Temperaturbereich sowie zulässige Konzentrationen an  $CO_2$  und Ethylen. Diese Daten können dann ständig mit der Ist-Situation verglichen und dementsprechend Entscheidungen getroffen werden. Voraussetzung ist natürlich, dass die Software Stammdaten über die betreffende Gemüseart enthält. Denkbar wäre eine Software, bei der die unterschiedlichen Gemüsearten als Module hinzugefügt werden können.

Nach Einlesen der Parameter wird die Lagertemperatur auf ein optimales Niveau abgesenkt. Um die Lagertemperatur möglichst stabil und den Bedürfnissen entsprechend zu steuern, beginnt nun ein Regelalgorithmus, bei dem zunächst die Atmungsintensität des Lagergutes, die Raumtemperatur, Luftfeuchte und die Temperatur der Verdampferoberfläche erfasst werden. Die Raumtemperatur ergibt sich dann als Funktion der Atmungsintensität, wobei auch der  $Q_{10}$ -Wert mit einfließt, um die Toleranz bei Temperaturschwankungen ermitteln zu können. Nachfolgend wird der Taupunkt berechnet. Die Temperatur des Verdampfers ergibt sich als Funktion der Raumtemperatur. Nun muss die Verdampferoberfläche so gesteuert werden, dass der Taupunkt der Lagerluft nicht oder möglichst wenig unterschritten wird. Auf diese Weise kommt es zu einer geringeren Eisbildung und damit wird auch dem Lagergut weniger Feuchtigkeit entzogen. Außerdem können so Abtauzyklen verringert werden, was eine gleichmäßigere Temperaturführung bedeutet und sich somit positiv auf die Qualität des Lagergutes auswirkt. Kommt es dennoch zu einer nicht tolerierbaren Temperaturerhöhung im Raum, z. B. durch Wärmeeinfall von außen oder erhöhte Atmung, so muss ein Unterprogramm gestartet werden, um den notwendigen Kältebedarf zu ermitteln. Dann muss ein Unterschreiten der Taupunkttemperatur an der Verdampferoberfläche möglich sein, aber die Temperaturdifferenz sollte so gering wie möglich gehalten werden.

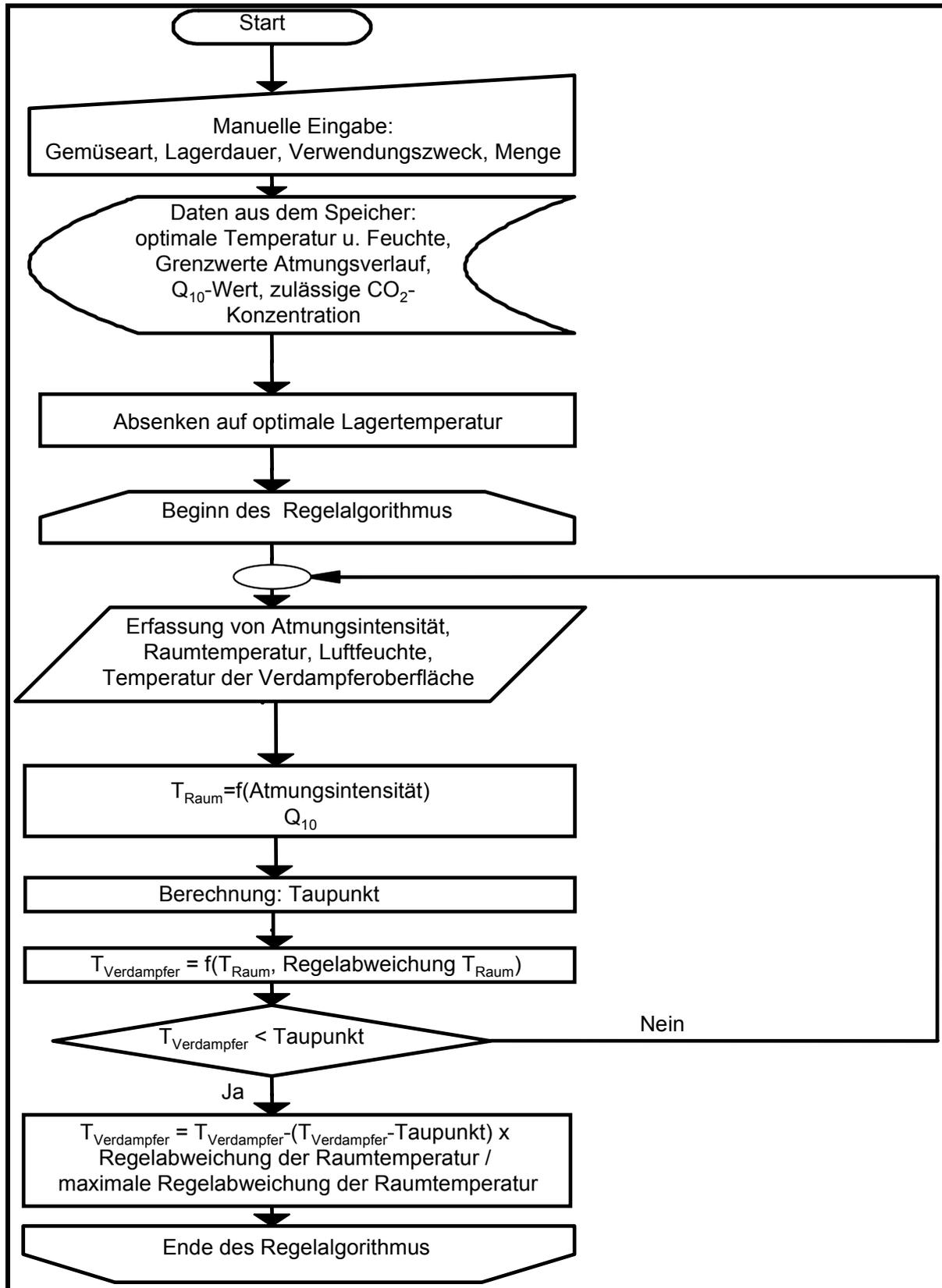


Abbildung 90: Vorschlag eines Ablaufdiagramms für die Temperaturregelung eines Kühlraums in Abhängigkeit von der Atmungsintensität des Lagergutes sowie der Taupunkttemperatur im Raum.

## 6 Zusammenfassung

Laut RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) erhöhen schnelle Temperaturschwankungen bei der Lagerung die Atmungsintensität von Obst und Gemüse überproportional. Lagerversuche von SEISENBERGER (1996) ergaben jedoch einen höheren Schwund, wenn Temperatur und Dampfdruckdefizit der Luft mit kleiner Hysterese schnell um ihren Mittelwert schwankten. In dieser Arbeit wurde die physiologische Reaktion von gelagertem Gemüse auf fluktuierende Temperaturen hinsichtlich Atmung und Transpiration untersucht. Dabei galt es zunächst festzustellen, ob sich die Stoffwechselintensität des Lagergutes bei schwankenden Temperaturen gemäß der Arrhenius-Gleichung bzw.  $Q_{10}$ -Regel verhält, oder ob es zu einer physiologischen Überreaktion kommt, wie bei RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) angedeutet. Andererseits sollte die Frage geklärt werden, inwiefern der Feuchtigkeitsentzug der Pflanzenorgane durch schwankende Lagertemperaturen erhöht wird. SEISENBERGER (1996) vermutet, dass die Hysterese und die Frequenz, mit der Temperatur und Luftfeuchte um ihren Mittelwert schwanken, ausschlaggebend für das Lagerergebnis sind als deren absolutes Niveau. Die vorliegenden Untersuchungen sollten nachweisen, ob es sich bei den Ergebnissen von SEISENBERGER (1996) um physiologische Unterschiede bezüglich des Transpirationsverhaltens des Lagergutes handelte oder ob die Unterschiede durch technische Begebenheiten ausgelöst wurden.

Um die physiologische Reaktion von gelagertem Gemüse einwandfrei zu erfassen, wurde eine vollautomatisierte, computergesteuerte Versuchsanlage entwickelt, in der unterschiedlich fluktuierende Klimabedingungen reproduzierbar erzeugt werden konnten und gleichzeitig Atmungs- und Transpirationsintensität des Lagergutes als Kriterien zur Beurteilung gemessen wurden. Die Anlage bestand aus 12 Acrylglassküvetten mit speziellem Einsatz, so dass jede Küvette einzeln klimatisiert werden konnte. In den Küvetten befanden sich Messsysteme zur Bestimmung von Temperatur und Luftfeuchte. Sinusförmige Temperaturschwankungen simulierten den Temperaturverlauf in einem Kühllager. Die Küvetten befanden sich in einem Kühlraum, der konstant auf 0,5 °C gehalten wurde. Der Temperaturmittelwert in den Küvetten wurde, wenn nicht anders erwähnt, auf 10 °C eingestellt. Die Hysterese, das heißt die Abweichung der Temperatur von ihrem Mittelwert und die Schwingungsdauer des sinusförmigen Temperaturverlaufs in den Küvetten wurden durch Heizelemente, welche sich an den Küvetteneinsätzen befanden, erzeugt und über die Software gesteuert. Die Abkühlung der Küvettenluft erfolgte über die Küvettenußenwand. Die Atmungsintensität wurde durch Infrarotabsorption bestimmt,

diejenige der Transpiration über kapazitive Feuchtefühler. Gearbeitet wurde mit einem offenen System, das heißt jede Küvette wurde von einer definierten Luftmenge durchströmt. Zur Verhinderung von Kondensation wurden sämtliche Messgasleitungen beheizt.

Es wurden Untersuchungen mit folgenden Gemüsearten durchgeführt:

- Blattgemüse: Feldsalat, Spinat
- Hülsenfrüchte: Stangenbohnen
- Wurzelgemüse: Radies
- Fruchtgemüse: Tomaten, Einlegegurken
- Zwiebelgemüse: Speisezwiebeln

Bei Feldsalat und Spinat wurden zunächst Schwingungsdauern von 40, 50 sowie 60 Minuten getestet kombiniert mit Hysterese von 1 und 2 K. Weder bei der Atmungsintensität noch beim Gesamtschwund ließen sich gesicherte Unterschiede zwischen konstanter und schwingender Temperaturführung bei gelagertem Blattgemüse nachweisen, ebenso wenig bei Einlegegurken sowie Stangenbohnen.

Dann wurden bei Spinat Auswirkungen der Hysterese von 1,5 sowie 3 K bei einer Schwingungsdauer von 6 Stunden mit denen bei konstanter Temperatur verglichen. Die Atmungsintensität wurde immer beim Durchlaufen der Temperatur von 10 °C gemessen. Auch hier ergaben sich weder bei der Atmungsintensität noch bei der Transpiration gesicherte Unterschiede. Um Kondensation an den Küvettenwänden zu vermeiden, wurden bei Spinat die Einlagerungsmengen gestaffelt. Es wurden 10, 20, 38, 75, 150 sowie 300 g eingelagert. Bei 75, 150 sowie 300 g verliefen die Atmungsraten relativ konstant. Bei den geringeren Einlagerungsmengen zeigte sich eine steigende Tendenz im Atmungsverlauf, obwohl die Blätter stark getrocknet waren. Das Dampfdruckdefizit und damit die Wasserdampfabgabe in den Küvetten hing zwar von der eingelagerten Menge an Spinat ab, nicht aber der Transpirationskoeffizient selbst. Bis zu einer Einlagerungsmenge von 38 g trat keine Kondensation an den Küvettenwänden auf. Bei 75 g waren bereits wenige Kondensationstropfen zu sehen. Der prozentuale Gewichtsverlust sank mit zunehmender Einlagerungsmenge.

Für die Untersuchung von Stangenbohnen bei einer Schwingungsdauer von 6 Stunden und gestaffelten Hysterese von 0,5 bis 5 K wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 1,98 ermittelt. Mit Hilfe der  $Q_{10}$ -Regel wurden theoretische Atmungskurven bei schwankenden Temperaturen simuliert und mit den tatsächlichen Messwerten verglichen. Bis zu einer Hysterese von 4 K folgten die Messwerte den berechneten Kurven. Bei 4,5 K und 5 K

Hysterese war eine Übersteuerung der Atmung der Bohnen zu beobachten. Bei der Wasserdampfabgabe konnte festgestellt werden, dass die Spannweite der Schwankung in der Wasserdampfabgabe mit steigender Hysterese der Schwankung der Lufttemperatur größer wurde. Das Dampfdruckdefizit lag bei größerer Hysterese höher als bei geringerer. Es konnte aber keine direkte Abstufung in Abhängigkeit von der Hysterese der Temperaturschwankung festgestellt werden. Insgesamt zeigte sich die Tendenz, dass der prozentuale Gewichtsverlust der Stangenbohnen mit steigender Hysterese größer wurde.

Bei Radies wurden zunächst Schwingungsdauern von 1, 6 sowie 12 Stunden getestet kombiniert mit den Hysteresen 2 K und 3 K und mit konstanter Temperaturführung verglichen. Es wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 2,25 bestimmt. Generell lagen die gemessenen Atmungsraten auf der mit Hilfe der  $Q_{10}$ -Regel berechneten Kurven. Bei der Schwingungsdauer von einer Stunde reagierte die Atmung der Radies zu Beginn der Messung verzögert auf die Temperaturänderung. Die Schwankungsbreite der Wasserdampfabgabe wurde mit zunehmender Schwingungsdauer größer, und zwar im oberen Bereich. Bei den drei einwirkenden Schwingungsdauern hatten diejenigen Radies den geringsten Schwund, die bei schwankender Temperatur mit 2 K Hysterese gelagert wurden.

Der Vergleich konstanter Temperaturführung mit schwankenden Temperaturen (Hysterese 3 K) und gestaffelten Schwingungsdauern von 3 bis 12 Stunden zeigte, dass die Atmung der gelagerten Radies stets den berechneten Kurven folgte. Sowohl im Gesamtschwund als auch im Kondenswasser konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich bei Einlegegurken und Speisezwiebeln. Für Zwiebeln wurde ein  $Q_{10}$ -Wert von 1,42 ermittelt.

Auf eine Temperaturänderung von 1 K pro Stunde reagierte die Atmung gelagerter Radies ebenfalls gemäß der  $Q_{10}$ -Regel. Die vorherige Temperaturerhöhung auf bis zu 15 °C schien sich bei der anschließenden Absenkung nicht auf die Atmung auszuwirken. Der Transpirationskoeffizient änderte sich bei Temperaturen zwischen 2 und 5 °C rasch und bei höherer Temperatur langsamer.

Bei Tomaten wurden Auswirkungen einer kurzen Schwingungsdauer mit kleiner Hysterese, einer langen Schwingungsdauer mit großer Hysterese und konstanter Temperatur getestet. Die Atmungsrate gelagerter Tomaten bei konstanter Temperatur war etwas höher als bei kurzer Schwingungsdauer mit kleiner Hysterese. Die Kurve der Atmungsrate bei langer Schwingungsdauer mit großer Hysterese schwang

sinusförmig um die Kurve der Atmungsrate bei konstanter Temperatur. Die Wasserdampfabgabe bei konstanter Temperatur war völlig identisch mit der bei kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese. Das Dampfdruckdefizit in den Küvetten war bei kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese geringfügig niedriger als bei konstanter Temperatur. Bei langer Schwingungsdauer und großer Hysterese schwang das Dampfdruckdefizit um das bei konstanter Temperatur, aber nicht als Mittelpunkt sondern nach oben verschoben. Die Transpirationskoeffizienten bei konstanter Temperatur sowie bei kurzer Schwingungsdauer mit kleiner Hysterese glichen sich im Untersuchungsverlauf an. Bei langer Schwingungsdauer und großer Hysterese lagen sie unter denen der weiteren Varianten und veränderten sich mit der Temperatur bzw. mit dem Dampfdruckdefizit.

Da sich bei keiner der untersuchten Gemüsearten, die bei unterschiedlich fluktuierenden Temperaturen gelagert wurden, Unterschiede hinsichtlich Atmung und Transpiration absichern ließen, wurde das Problem rechnerisch betrachtet. Eine Simulation der Ergebnisse von RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) ergab unrealistische  $Q_{10}$ -Werte für die betreffenden Gemüsearten. Somit kann die Hypothese widerlegt werden, dass Temperaturschwankungen, solange sie sich nicht im schädigenden Bereich bewegen, die Atmung von gelagertem Gemüse überproportional erhöhen. Die Ergebnisse von RUBIN (zit. in SABUROW und ANTONOW 1953) beruhen demnach entweder auf Messungenauigkeiten oder erhöhter Mikroorganismenatmung. Ein direkter Mittelwertsvergleich der simulierten Atmungskurven der vorliegenden Untersuchungen zeigte, dass sich lediglich die absolute Abweichung der Gemüsetemperatur, nicht aber deren Geschwindigkeit auf die Atmung auswirkt. Nach den Berechnungen lag die Atmungsintensität der Varianten, die bei konstanter Temperatur gelagert wurden, nur geringfügig niedriger als die der bei schwankender Temperatur gelagerten. Diese Unterschiede konnten mit den vorhandenen Mitteln nicht nachgewiesen werden.

Die theoretische Betrachtung der Transpiration ließ ebenfalls darauf schließen, dass die Geschwindigkeit der Temperaturabweichung keinen Einfluss auf die Transpirationsintensität des Lagergutes hat. Auch hier lag der Feuchtigkeitsverlust bei den konstanten Varianten um einzelne Gramm niedriger als bei den schwingenden. Bei keiner der durchgeführten Untersuchungen konnte dieser geringfügige Unterschied nachgewiesen werden. Also muss der erhöhte Feuchtigkeitsverlust bei den Untersuchungen von SEISENBERGER (1996) im direkt gekühlten Raum im Vergleich zum Mantelkühlraum durch andere Faktoren zustande gekommen sein, z. B. durch Undichtigkeiten im direkt gekühlten Lagerraum. Es könnten die Oberflächentemperaturen der Mantelinnenwand und der Verdampferrohrschlange unterschiedlich

gewesen sein. Mit großer Wahrscheinlichkeit war die Differenz zwischen Wandtemperatur und Kühlraumluft kleiner als die Differenz zwischen Verdampferoberfläche und Kühlraumluft, was zur Folge hatte, dass im Mantelkühlraum weniger Wasser auskondensiert ist als im direktgekühlten Raum. Weiterhin könnten unterschiedliche Windgeschwindigkeiten geherrscht haben, welche die Transpiration ebenfalls unterschiedlich beeinflusst haben könnten. Beim Mantelkühlraum steht der kühlende Luftstrom nicht direkt mit der Lagerluft in Verbindung und deshalb werden Temperatur und Luftfeuchte im Innern des Raumes nicht unmittelbar durch den Wärmeeinfall von außen beeinflusst. Darüber hinaus wird beim Mantelkühlsystem die Eisbildung an der Verdampferrohrschlange verhindert, wodurch bei direkt kühlenden Systemen dem Lagergut viel Wasser entzogen wird.

In der Diskussion werden sowohl experimentelle als auch rechnerische Ergebnisse mit Arbeiten aus der Literatur verglichen. Es werden Erklärungsmöglichkeiten auf molekularbiologischer Ebene erörtert und Hinweise auf zukünftige Forschungsgebiete gegeben. Aus den Erkenntnissen dieser Arbeit werden Empfehlungen für die praktische Lagerung abgeleitet.

## 7 Summary

According to RUBIN (cited in SABUROW and ANTONOW 1953) fast deviations in temperature increase respiration intensity of stored vegetables over-proportionally. Storage experiments of SEISENBERGER (1996) resulted in higher losses, if temperature and vapour pressure deficit of the air fluctuated with small deviations quickly around their mean-value. The present work examined the physiological reaction of stored vegetables on fluctuating temperatures in respect to respiration and transpiration. The question was to find out, whether the metabolic intensity of the stored products behaves according to the Arrhenius-law upon temperature fluctuations or if there is the possibility of an over-reaction supposed by RUBIN (cited in SABUROW and ANTONOW 1953). Another question was to which extent the loss of humidity of stored plant organs will be increased by fluctuating temperatures. SEISENBERGER (1996) supposed that height and frequency of occurring deviations in temperature and humidity have a greater impact on the storage results than their absolute values. The present investigations are meant to prove whether SEISENBERGER's results (1996) derive from different transpirational behaviour of the products or from technical properties.

Recording the physiological reaction of stored vegetables in an unobjectionable way, a fully automatic, computer-controlled facility was developed allowing fluctuating temperatures being reproducibly generated and intensity of respiration and transpiration as means of characterisation being registered at the same time. The facility consisted of 12 acrylic cuvettes with special inlets rendering the climatic conditioning in each cuvette. Inside the cuvettes there were systems installed to measure temperature and humidity. Sinusoidal temperature fluctuations simulated temperature regimes in a cold store. The cuvettes were positioned in a cold store kept at a constant temperature of 0.5 °C. The mean temperatures in the cuvettes were 10 °C. The heights of the temperature deviations and their frequencies were generated by heating elements mounted at the inlets of the cuvettes and controlled by the software used. Cooling down was guaranteed by the outer walls of the cuvettes. The intensity of respiration was determined by infrared-absorption, the one of transpiration by capacitive sensors. We worked with a flow through system. Avoiding condensation all gas pipes were heated.

Investigations were carried out using the following vegetables:

- Leafy vegetables: lamb's lettuce, spinach
- Legumes: runner beans
- Root vegetables: radishes
- Fruit vegetables: tomatoes, pickling cucumbers
- Bulbous vegetables: onions

Investigations with lamb's lettuce and spinach were carried out combining frequencies of once per 40, 50 and 60 minutes with deviations of 1 and 2 K. Neither respiration nor total weight loss showed distinct differences between constant and fluctuating temperature regimes. Pickling cucumbers and runner beans had similar results.

After that effects of 1.5 K and 3 K deviations with a frequencies of once per six hours on spinach were compared to those of constant temperatures. Respiration intensity was recorded when temperature fluctuations passed 10 °C. Like previous results there were no differences in respiration and transpiration. Avoiding condensation in the cuvettes the amount of stored spinach was graduated. We stored 10, 20, 38, 75, 150 and 300 g per cuvette. Using 75, 150 and 300 g respiration remained relatively constant. Using a lesser amount resulted in a slight increase in respiration, though the leaves were severely dried out. Water vapour deficit and transpiration rate in the cuvettes depended on the amount of stored spinach but not the transpiration coefficients. Condensation occurred already with the amount of 75 g. Weight loss decreased with increasing amount of leaves stored.

Investigations using runner beans stored at temperature fluctuations with a frequency of once per 6 hours and graduated deviations a  $Q_{10}$ -value of 1,98 was determined. Simulations of respiration intensity at fluctuating temperature regimes calculated by Arrhenius' law were compared to our measurements. Up to a deviation of 4 K the observed measurements followed the calculated curves. With the deviations of 4.5 and 5 K the respiration showed over-reactions. As far as the transpiration was concerned a raise in spread with increasing deviations of the air temperature. Water vapour deficit increased with the deviations. A direct graduation dependent on the height of the temperature deviations couldn't be proved though. Altogether there was a tendency of higher weight loss of the beans with higher temperature deviations.

Radishes were investigated using frequencies of once per 1, 6 and 12 hours combined with deviations of 2 and 3 K compared to constant temperature regimes. A  $Q_{10}$ -value of 2.25 was determined. Generally the observed respiration rates corresponded with

the curves calculated by the Arrhenius-law. At the beginning of the measurements at a frequency of once per hour the reaction of the respiration of stored radishes on changes in temperature was delayed. The spread of transpiration increased with temperature deviations, especially in the upper part. With all three frequencies radishes being stored at temperature deviations of 2 K showed least weight loss.

Comparison of constant temperature regime to temperature fluctuations with a deviation of 3 K and graduated frequencies of once per 3 to 12 hours proved that respiration of the stored radishes followed the calculated curves. Weight loss as well as condensed water in the cuvettes didn't show significant differences between the variants tested. Pickling cucumbers and onions had similar results. The  $Q_{10}$ -value for onions was 1.42.

The respiration of radishes stored under temperature changes of 1 K per hour responded according to Arrhenius'-law. A preceding temperature rise up to 15 °C didn't seem to affect respiration when temperature was lowered afterwards. Transpiration coefficients changed quickly at temperatures between 2 and 5 °C and slower at higher temperatures.

Effects of quick temperature fluctuations with small deviations, slow fluctuations with high deviations and those of constant temperature regimes were investigated with tomatoes. Respiration proved to be slightly more intense at constant temperature than at quick fluctuations. The respiration rate of tomatoes under slow temperature fluctuations with high deviations oscillated around the curves of constant and quickly fluctuating temperatures. Transpiration rate at constant temperature was absolutely identical with that at quick temperature fluctuations. Water vapour deficit at quickly fluctuating temperatures was slightly lower than at constant temperatures. Frequency being slow with higher deviations water vapour deficit oscillated around the one at constant temperature with the mean being moved upwards. Transpiration coefficients at constant and quickly fluctuating temperatures adjusted during the experiment. Frequency being slow with higher deviations transpiration coefficients were lower than the ones of the other variants and varied with temperature and water vapour deficit.

As none of the vegetables investigated under fluctuating temperature regimes showed any significant differences in respiration and transpiration, the problem was approached mathematically. A simulation of the respiration intensities measured by RUBIN (cited in SABUROW and ANTONOW 1953) resulted in  $Q_{10}$ -values being unrealistic for the vegetables concerned. Thus the hypothesis of temperature

fluctuations increasing respiration of stored vegetables over-proportionally can be disproved. Maybe the results of RUBIN (cited in SABUROW and ANTONOW 1953) were due to variations of the measurements or increased respiration of micro-organisms. Direct comparisons of arithmetic means of the simulations in the present work showed that only the absolute height of the temperature deviations had an affect on respiration, but not their frequency. According to the calculations being done respiration of vegetables stored at constant temperatures was supposed to be only slightly less intense than the one of vegetables stored at fluctuating temperatures. These small differences couldn't be distinguished with the present facilities.

The theoretical approach also implied that the frequency of temperature deviations does not have any influence on transpiration intensity of stored products. Humidity loss of variants stored under constant temperature conditions was single grams lower than the ones stored under fluctuating temperatures. None of the present investigations was able to distinguish this difference. Thus the increased transpirational loss in the directly cooled room compared to the jacketed system described by SEISENBERGER (1996) must have been the results of other factors, for example due to the lack of tightness. Surface temperatures of the inner wall of the jacketed room and the cooling coil of the directly cooled system could have been different. Most probably the difference between surface temperature of the inner wall and the air inside the room was smaller than that of the cooling coil and the air which resulted in a lowered condensation of water in the jacketed system than in the directly cooled system. Furthermore in the two systems compared there could have been different air velocities influencing transpiration to a variable extend. With the jacketed system the cooling air-stream isn't directly in contact with the air inside the storage room and that's why temperature as well as humidity inside the store are not immediately influenced by heat incidence from outside. Over and above that the jacketed system prevents icing of the cooling coil, due to which a lot of humidity is lost by the stored products.

In the discussion experimental as well as mathematical results are compared to results mentioned in literature. Explanations on the basis of molecular biology are discussed and hints given for further investigations. Conclusions and recommendations are made for practical storage.

## 8 Literaturverzeichnis

Adamicki, F. (1977): Respiration rate of onion bulbs depending on the temperature, O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration of the atmosphere. *Acta Horticulturae* 62, S. 15-22

Åpeland, J und H. Baugerød (1971): Factors affecting weight loss in carrots. *Acta Horticulturae* 20, S. 92-97

Artes, F, Garcia, F., Marquina, J., Cano, A. und J.P. Fernandez-Trujillo (1998): Physiological responses of tomato fruit to cyclic intermittent temperature regimes. *Postharvest Biology and Technology* (14) S. 283 - 296

Artés, F., Aparicio, J., Esceriche, A.J. und J.G. Marin (1993): Respiratory activity, ethylene emission and temperature quotient in cold stored grapefruit. *COST94, Postharvest Treatment of Fruit and Vegetables: systems and operation for Post-Harvest*. S. 109-118

Belker, N. (1996): Maschinengekühlte Lager. In: Böttcher, H. (1996).

Ben-Yehoshua, S. (1987): Transpiration, Water Stress and Gas Exchange. In: Weichmann (1987). S. 113-170

Berg, L. van den und C.P. Lentz (1971): Moisture Loss of Vegetables under Refrigerated Storage Conditions. *Can. Inst. Food. Technol. J.* (4), S. 143-145

Bertram, A. (1996): Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. *Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft* 284, 195 S.

Böttcher, H. (1986): Qualitätsveränderungen während der Lagerung von Gemüsebohnen (*Phaseolus vulgaris* L. var. *nanus* Juslen. Aschers). *Die Nahrung* 30(1986) 9, S. 921-939

Böttcher, H. (1988a): Qualitätsveränderungen während der Lagerung von Kopfsalat (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.). *Die Nahrung* 32 (1988) 1, S. 21-25

Böttcher, H. (1988b): Qualitätsveränderungen während der Lagerung von Kopfsalat (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.). *Die Nahrung* 32 (1988) 1, S.27-36

Böttcher, H. (1988c): Qualitätsveränderungen während der Lagerung von Spargel (*Asparagus officinalis* L.). *Die Nahrung* 32 (1988) 2, S. 179-187

Böttcher, H. (1991): Verringerte Verluste bei Gemüse im Nachernteprozess. *Gartenbau* 38(1991)11, S. 18-20

- Böttcher, H. (1996): Frischhaltung und Lagerung von Gemüse. Handbuch der Lebensmitteltechnologie. Ulmer, Stuttgart, 252 S.
- Botondi, R., Massantini, G. Anelli, G. und F. Mencarelli (1996): Postharvest Physiology of Red Chicory Stored at 0 °C and 6 °C. Italian Journal of Food Science 8: 4, S. 273-282
- Breidenbach, K. (1990): Der Kälteanlagenbauer. Band 2: Kälteanwendung, Stichwortregister. 3. Auflage. C.F. Müller, Karlsruhe. 643 S.
- Burton, W.G. (1982): Post-harvest physiology of food crops. Longman, London, New York. 339 S.
- Burzo, I. (1980): Influence of temperature level on respiratory intensity in the main vegetables varieties. Acta Horticulturae 116, S. 61-64
- Chau, K.V., Gaffney, J.J., und R.A. Romero (1988): A Mathematical Model for the Transpiration from Fruits and Vegetables. ASHRAE Transactions DA-88-20-1 (RP-370) 94, S. 1541-1551
- Chau, K.V., Romero, R.A., Baird, J.J. und J.J. Gaffney (1988): Transpiration Coefficients for certain Fruits and Vegetables. ASHRAE Transactions DA-88-20-2 (RP-370) 94, S. 1553-1562
- Davies, D.D. (1987): The co-ordination and integration of metabolic pathways. In: Palmer, J.M.(ed): The physiology and biochemistry of plant respiration. Cambridge, S. 159-170
- Dey, P.M. und J.B. Harborne (1997): Plant Biochemistry. Academic Press, London. 554 S.
- Diadem (1995–1996): Die PC-Werkstatt, Handbuch. Gesellschaft für Strukturanalyse, 9. Auflage
- Diaz-Perez, J.C. (1997): Changes in transpiration rates and skin permeance as affected by storage and stage of tomato fruit ripeness. In: Saltveit, M.E. (ed): Seventh international controlled atmosphere research conference. CA '97. Proceedings Volume 4: Vegetables and ornamentals, Davis, California, USA, 13-18 July, 1997. Postharvest horticulture series Nr. 18, S. 34-38
- Duque, P. und J.D. Arrabaca (1999): Respiratory metabolism during cold storage of apple fruit. 2. Alternative oxidase is induced at the climacteric. Physiologia Plantarum 107, S. 24-31
- Duque, P., Barreiro, M.G. und J.D. Arrabaca (1999): Respiratory metabolism during cold storage of apple fruit. 1. Sucrose metabolism and glycolysis. Physiologia Plantarum 107, S. 14-23

Engelhardt, C. (1996): Automatische Gasstoffwechsellmessung (Bedienungshandbuch). unveröffentlicht

Fockens, F.H. und H.F.T. Meffert (1972): Biophysical properties of horticultural products as related to loss of moisture during cooling down. J. Sci. Food. Agric. 23, S. 285-298

Fu, B. und T.P. Labuza (1997): Shelf Life Testing: Procedures and Prediction Methods. In: Marilyn C. Erickson, Yen-Con Hung (eds): Quality in Frozen Food. International Thomson Publishing; Chapman & Hall, New York, S. 377-415

Gaffney, J.J., C.D. Baird und K.V. Chau (1985): Influence of airflow rate, respiration, evaporative cooling and other factors affecting weight loss calculations for fruits and vegetables. ASHRAE Transactions 91, S. 690-707

Gerthsen, C., Kneser, H.O., und H. Vogel (1989): Physik. Springer, Berlin. 16. Aufl.

Gras (1991): Das Expansionsventil. C.F. Müller, Karlsruhe, 115 S.

Hayakawa, K.I. (1987): Temperature: Energy Flux in Stores. In Weichmann (1987), S. 181-202

Hentschel, U. (1997): Senkung der Verluste durch pilzliche Fäuleerreger an lagernden Zwiebeln und Möhren mit umweltschonenden Verfahren unter Einbeziehung der mikroklimatischen Bedingungen einer Kaltlagerzelle. Dissertation. Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Henze, J. und H. Hansen (1988): Lagerräume für Obst und Gemüse. KTBL-Schrift 327, Frankfurt/Main. 224 S.

Herner, R.C. (1987): High CO<sub>2</sub> Effects on Plant Organs. In: Weichmann (1987).

Hertog, M.L.A.T.M., Tijskens L.M.M., und P.S. Hak (1997): The effects of temperature and senescence on the accumulation of reducing sugars during storage of potato (*solanum tuberosum* L.) tubers: A mathematical model. Postharvest Biology and technology 10, S. 67-79

Heß, D. (1999): Pflanzenphysiologie. Ulmer, Stuttgart. 10. Auflage. 608 S.

Hicks, E.W. (1944): Note on the estimation of the effect of diurnal temperature fluctuation on reaction rates in stored foodstuffs and other materials. J. Counc. Sci. Ind. Research (Australia) 17, S. 111-114

Ito, T, Nakamura, R. und A. Inaba (1985): Changes of Respiration Rate in Several Kinds of Vegetables under Fluctuating Temperatures. Scientific Reports of the Faculty of Agriculture Okayama University 65, S. 33-37

- Ito, T. und R. Nakamura (1985): Fluctuating temperature tolerance of fresh fruits and vegetables. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 54(2), S. 257-264
- Ito, T. und R. Nakamura (1984): The effect of fluctuating temperature on chilling injury of several kinds of vegetables. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science (Japan)* (Sept. 84) 53(2), S. 202-209
- Janssen, J. und F. Schoedder (1980): Ableitung von Luftzustandsgrößen aus Meteorologischen Daten. *Grundl. Landtechnik* Bd. 30 Nr. 3, S. 81 - 90
- Kader, A.A. (1987): Respiration and Gas Exchange of Vegetables. In Weichmann (1987), S. 25-43
- Karlson, P. (1984): Kurzes Lehrbuch der Biochemie für Mediziner und Naturwissenschaftler. Thieme, Stuttgart, 12. Auflage, 450 S.
- Kindl, H. (1994): Biochemie der Pflanzen. Springer, Berlin. 4. Auflage, 459 S.
- Kraxner, U., Fritz, D. und J. Weichmann (1982): Hohe Luftfeuchte und Lagerverhalten einiger Wurzelgemüse. *Gartenbauwissenschaft* 47(4), S. 158-162
- Kuchling, H. (1986): Taschenbuch der Physik. Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 678 S.
- Labuza, T.P. (1979): A theoretical comparison of losses in foods under fluctuating temperature sequences. *Journal of food science* 44, S. 1162-1168
- Lentz, C.P. (1955): Humidification of Cold Storages: The Jacket System. *Can. J. Techn.* 33, S. 265-278
- Lentz, C.P. und E.A. Rooke (1957): Use of the Jacketed Room System for Cold Storage. *Food Techn.* 11, S. 257-259
- Lentz, C.P. und L. van den Berg (1973): Factors Affecting Temperature, Relative Humidity and Moisture Loss in Fresh Fruit and Vegetables. *ASHRAE Journal* August 1973, 13085, S. 55 - 60
- Lentz, C.P., Berg, van den L. und R.S. McCullough (1971): Study of factors affecting temperatures, relative humidity and moisture loss in fresh fruit and vegetable storage. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 4, S. 146-153
- Lundegårdh, H. (1960): Pflanzenphysiologie. VEB Gustav Fischer, Jena, 717 S.
- Marré, E. (1961): Phosphorylation in higher plants. In: Machlis, L. und W.R. Briggs (eds): *Annual Review of Plant Physiology* 12, S. 195-218

- Meigh, D.F. (1974): Apple Scald. In Hulme, A.C. (ed.): The Biochemistry of fruits and their Products (1), S. 556-569
- Mempel, H. (2000): Mechanische Belastungen bei der Ernte und Aufbereitung von Möhren. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 356. 146 S.
- Osterloh, A., und P. Gröschner (1975): Lagerung von Obst und Gemüse. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 285 S.
- Patel, P.N., Pai, T.K. und S.K. Sastry (1988): Effects of Temperature, Relative Humidity and Storage Time on the Transpiration Coefficients of Selected Perishables. ASHRAE-Transactions 94, S. 1563-1587
- Pertierra Lazo, R. (1995): Tranpirationsstudien an gelagertem Gemüse. Dissertation. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. 223 S.
- Phan, C.T. (1987): Temperature: Effects on Metabolism. In Weichmann (1987), S. 173-180
- Picha, D.H. (1986): Weight Loss in Sweet Potatoes During Curing and Storage: Contribution of Transpiration and Respiration. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111(6), S. 889-892
- Pinske, V. (1990): Untersuchungen zur Schaltdifferenz der Kältetechnik bei der Obstkühlagerung. Archiv Gartenbau, Berlin 38 (1990) 4, S. 251-258
- Poulsen, N., Sorensen, J.N. und A.S. Johansen (1994): Influence on growth conditions on the value of crisphead lettuce 2. Weight losses during storage as affected by nitrogen, plant age and cooling system. Plant Foods for Human Nutrition 46, S. 13-18
- Pradet, A. und P. Raymond (1987): Adenylate energy charge, an indicator of energy metabolism. In Palmer, J.M.: The physiology and biochemistry of plant respiration, Cambridge University Press, S. 183-188
- Praeger, U. (2001): 'Statische' und 'dynamische' CA-Lagerung von Gemüse. Dissertation. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München. 193 S.
- Quast, P. (2000): Beeinflussung der Qualität und Fruchtgesundheit von Äpfeln. Küba Symposium über die kältetechnische Nacherntebehandlung von Obst vom 12. - 13. Mai, Dornbirn.
- Ravi, V. (1994): Respiration of intact and damaged sweet potatoes at different temperatures and relative humidities. Journal of Root Crops 20(2), S. 89-95

- Richter, G. (1996): Biochemie der Pflanzen. Thieme, Stuttgart. 522 S.
- Robinson, J.E., Browne, K.M. und W.G. Burton: (1975): Storage characteristics of some vegetables and soft fruits. *Annals of applied Biology* (1975) 81, S. 399-408
- Romero, R.A. und Chau, K.V. (1987): A Mathematical Simulation for Transpiration from Fruits and Vegetables in Bulk Storage. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 87-6007. 21 S.
- Ryall, A.L. und W.J. Lipton (1979): Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables. Vol. 1, vegetables and melons. AVI Publishing Co., Inc. Westport. 587 S.
- Saburow, N. und M. Antonow (1953): Die Lagerung und Verarbeitung von Obst und Gemüse. Deutscher Bauernverlag, Berlin. 464 S.
- Salunkhe, D.K. und B.B. Desai (1984): Postharvest Biotechnology of Vegetables. Vol. 1, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 208 S.
- Sastry, S.K. (1985): Moisture losses from perishable commodities: recent research and developments. *International Journal of Refrigeration* 1985 (8), S. 343-346
- Sastry, S.K. und D.E. Buffington (1983): Transpiration rates of stored perishable commodities: a mathematical model and experiments on tomatoes. *International Journal of Refrigeration* 6, S. 84-96
- Schaffner, D.W. und T.P. Labuza (1997): Predictive Microbiology: where are we, and where are we going? *Food Technology* 51(4) S. 95-99
- Scheer, A. (1994): Reducing The Water Loss of Horticultural And Arable Products During Long Term Storage. *Acta Horticulturae* 368(2), S. 511-522
- Schier, F. (2000): Untersuchung verschiedener Temperatur- und Feuchterege- lungen zur Konditionierung eines Apfelkühlraums mit Kontrollierter Atmosphäre. Küba Symposium über die kältetechnische Nacherntebehandlung von Obst vom 12. - 13. Mai, Dornbirn.
- Seisenberger, M. (1996): Untersuchungen zur Verbesserung des Lagerklimas für Gemüse. Dissertation an der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau der Technischen Universität München. 248 S.
- Seisenberger, M. (2000): persönliche Mitteilung
- Strasburger, E. (ed) (1983): Lehrbuch der Botanik. Gustav Fischer, Stuttgart. 32. Auflage, 1162 S.

- Tijskens, L.M.M., Hertog, M.L.A.T.M., van Kooten, O. und M. Simcic (1999): Advantages of non-destructive Measurements for Understanding Biological Variance and for Modelling the Quality of perishable Products. Deutsche Gesellschaft für Qualitätsforschung, 24. Vortragstagung, Freising-Weihenstephan, S. 13-24
- Ulrich, R. (1974): Organic Acids. In Hulme, A.C. (ed.): The Biochemistry of Fruits and their Products. vol.1, S. 89-116
- Vaadia, Y., Raney, F.C. und R.M. Hagan (1961): Plant water deficits and physiological processes. In Machlis, L. und W.R. Briggs (eds): Annual Review of Plant Physiology Vol. 12, S. 265-292
- Varoquaux, P., Albagnac, G. und B. Gouble (1996): Physiology of minimally processed fresh vegetables. In: Proceedings of the Australasian postharvest horticulture conference. Science and Technology. Department of natural Resources and Environment; Victoria, Australia. Melbourne, Australia: 1996, S. 437-443.
- Walker, K. (1985): Untersuchungen zum Lagerverhalten einiger Brassicaceae. Dissertation am Institut für landwirtschaftlichen und gärtnerischen Pflanzenbau der Technischen Universität München. 154 S.
- Walker, K., Fritz, D., und J. Weichmann (1987): Quantifizierung der Transpiration von gelagerten Radiesknollen. 1. Einfluß von N- und K- Ernährung der Pflanzen, physiologischem Alter der Knollen sowie Windgeschwindigkeit im Lager. Gartenbauwissenschaft 52(1) S. 35-38
- Weichmann, J. (1971): Automatische Gasstoffwechselfmessungen von Gemüse. Gartenbauwissenschaft 36, S. 251-258
- Weichmann, J. (1977): CA-Storage of celeriac. Acta Horticulturae 62, S. 109-118
- Weichmann, J. (1981): CA-storage of horseradish (*Armoracia rusticana* Ph. Gärtn., B. Bey et Scherb.). Acta Horticulturae 116, S. 171-178
- Weichmann, J. (ed) (1987): Postharvest Physiology of Vegetables. Food Science and Technology Series (24). Marcel Dekker; Inc., New York, Basel, 616 S.
- Weichmann, J. (1991): Frischhaltung, Lagerung und Transport. In: Krug, H. (1991) (ed): Gemüseproduktion. 2. Auflage. Paul Parey, Berlin, Hamburg. 541 S.
- Weichmann, J. (2000): Nacherntphysiologie und Sekundärstoffwechsel. Journal of Applied Botany 74, S. 126-130
- Weichmann, J., Tataru, D.P. und L. Garte (1975): Atmung von Einlegegurken nach verschiedenen Ernteverfahren. Gartenbauwissenschaft 2, S. 79-81

Wilkinson, B.G. (1974): Physiological Disorders of Fruit after Harvesting. In: Hulme, A.C. (ed): The Biochemistry of Fruits and their Products. vol. 1, S. 537-554

Willert, D. von, Matyssek, R. und W. Herppich (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Thieme, Stuttgart. S. 344

Yoo, K.S., Andersen, C.R. und L.M. Pike (1997): Internal CO<sub>2</sub> concentrations in onion bulbs at different storage temperatures and in response to sealing of the neck and base. Postharvest Biology and Technology 12, S. 157-163

Zaussinger, A. (1997): Die Temperatur- und Luftverteilung in einem Obstkühlageraum. Besseres Obst 24(12), S. 209-211

## 9 Anhang

### 9.1 Steuerdatei

```
{ Steuerdatei für den Betrieb eines Control 300 mit „Diadem“ }
{ ----- }
{ Einstellung der Schnittstelle: }
{ ----- }
{ Schnittstelle : COM2      }
{ Baudrate      : 4800      }
{ Datenbits     : 8         }
{ Parität       : keine     }
{ Stopbits      : 2         }
{ Handshake     : kein Handshake
{ ----- }
{ Konfiguration des Control 300:
{ ----- }
{ SC360          }
{ AD303          }
{ MD333 Geräteadresse 0 für Temperaturmessung }
{ MI334 Geräteadresse 0 Konstantstromquelle }
{ AE354 Geräteadresse 7 für Heizelemente }
{ AE354 Geräteadresse 5 für Magnetventile }
{ MD333 Geräteadresse 1 für Strömungscontrollermessung, CO2 und Luftdruck }
{ DA339 Geräteadresse 8 für Strömungscontrollerregelung }

{ ----- }
{               Initialisierung des Gerätes           }
{ ----- }
```

#### Init

```
{ Definition von <CR> als Zeilenendezeichen }
Set COM2 EOL=\013
Set COM2 To=50

{ Senden des Befehls '$CLR<CR>' zum Löschen aller Variablen und Felder }
{ Zu beachten ist hier, dass das auszugebende '$' Zeichen in der Form '$$' anzugeben
ist. }
Write COM2 "$$CLR"

{ Das Gerät antwortet auf diesen Befehl mit '0<CR>'. Diese Antwort wird }
{ nicht weiter benötigt und als Kommentar überlesen. }
Read COM2 "%C"

{ Dimensionierung des Haupttransferfeldes für die Analogmessung. }
```

```
{ Hier 28 Kanäle. Dieser Befehl wird wieder mit '0<CR>'quittiert. }
Write COM2 "$$DIM RF(5,31)"
Read COM2 "%C"
{ Übertragung der Parameter in das Haupttransferfeld. }
{ Initialisierung von Kanal 0. }
{ RF(0,X) : Kanaladresse = 16 * Geräteadresse + Kanalnummer }
{      bei MS308 : 255 }
{ RF(1,X) : 255 }
{      bei MS308 : Kanaladresse = 16 * Geräteadresse + Kanalnummer }
{ RF(2,X) : V-Wert + 32 * Filterwert + 128 * Modus }
{      Die Bedeutung der einzelnen Parameter sind dem }
{      Software Manual zum Control 300 zu entnehmen }
{ RF(3,X) : Einschwingzeit in ms }
{ RF(4,X) : Anzahl der Einzelmessungen für die Mittelwertbildung. }
{      Anzahl der Einzelmessungen = 2 ^ RF(4,X) }
Write COM2 "$$LET RF(0..4,0)"
Read COM2 "%C"

{ Hier werden die einzelnen Parameter übertragen. Nur der letzte }
{ Parameter wird vom Gerät mit '0<CR>' quittiert. }
{ Kanaladresse : hier Gerät 1 Kanal 0 }
Write COM2 "0"

{ Default }
Write COM2 "255"

{ V-Wert : 0 -> Verstärkung 1 }
{ Filterwert : 0 -> kein Filter }
{ Modus : 0 -> unipolar }
Write COM2 "0"

{ Einschwingzeit 0 ms }
Write COM2 "1"

{ Mittelwertbildung über 28 = 256 Einzelmessungen }
Write COM2 "2"

{ Gerät quittiert mit '0<CR>' }
Read COM2 "%C"
{ Initialisierung des 2. Messkanals: Gerät 0 Kanal 1 }
Write COM2 "$$LET RF(0..4,1)"
Read COM2 "%C"
Write COM2 "1"
Write COM2 "255"
Write COM2 "0"
Write COM2 "1"
Write COM2 "2"
```

Read COM2 "%C"

{ Initialisierung der 2. Karte MD333: }

{ Kanal 0, Karte 2: }

Write COM2 "\$\$LET RF(0..4,16)"

Read COM2 "%C"

Write COM2 "16"

Write COM2 "255"

Write COM2 "1"

Write COM2 "1"

Write COM2 "1"

Read COM2 "%C"

{ Kanal 1, Karte 2: }

Write COM2 "\$\$LET RF(0..4,17)"

Read COM2 "%C"

Write COM2 "17"

Write COM2 "255"

Write COM2 "1"

Write COM2 "1"

Write COM2 "1"

Read COM2 "%C"

{ Initialisierung der Relaiskarten }

Write COM2 "\$\$LET PA(1..2)"

Read COM2 "%C"

Write COM2 "6" {Geräteadresse der DV317 }

Write COM2 "32" {Anzahl der Kanäle d.h. Relais }

Read COM2 "%C"

{ Konfiguration AE Karten für Magnetventile und Heizelemente }

Write COM2 "\$\$DIM AL(16,1)"

Read COM2 "%C"

{ Geräteadresse für 1.AE Karte (Adresse 5): }

Write COM2 "\$\$LET AL(16,0)"

Read COM2 "%C"

Write COM2 "5"

Read COM2 "%C"

{ Konfiguration DA339 zur Durchflussregelung: }

Write COM2 "\$\$DIM A4(5,0)"

Read COM2 "%C"

```
{ Setzen der Geräteadresse für Da339 (Adresse 8): }
```

```
Write COM2 "$$LET A4(4,0)"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
Write COM2 "8"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
Write COM2 "$$LET PA(30)"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
Write COM2 "1" { Anzahl der Da-Karten }
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
End
```

```
{ ----- }
{           Einlesen der Messdaten           }
{ ----- }
```

```
Input
```

```
Set COM2 To=90
```

```
{ Starten des Messprogramms }
```

```
Write COM2 "$$RUN MEW"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
{ Abfragen der Messwerte Pt100 }
```

```
Write COM2 "$$SEN RF(5,0..11)"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
Read COM2 "%AR"
```

```
Read COM2 "%AR"
```

```
.
```

```
.
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
{ Abfragen der Messwerte Strömungscontroller, CO2 und Luftdruck }
```

```
Write COM2 "$$SEN RF(5,16..30)"
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
Read COM2 "%AR"
```

```
.
```

```
.
```

```
Read COM2 "%C"
```

```
End
```

```
{ ----- }
```

```
{           Ausgeben der Daten           }
{-----}
```

Output

```
{ Setzen der Ausgänge für die AE Karten }
{ Kanäle 0..11 Magnetventile }
Set COM2 To=50
Write COM2 "$$LET AL(0..11,0)"
Write COM2 "%AW"
.
.
Read COM2 "%C"

Write COM2 "$$LET AL(0..11,1)"
Write COM2 "%AW"
.
.
Read COM2 "%C"

{ Starten des Ausgabeprogramms für die AE Karten }
Write COM2 "$$RUN AL4"

{ Setzen der Ausgänge für die DA Karte. Ausgabe der Analogwerte }
Write COM2 "$$LET A4(0..1,0)"
Read COM2 "%C"
Write COM2 "%AR"
Write COM2 "%AR"
Read COM2 "%C"

{ Starten des Ausgabeprogramms für die DA Karte }
Write COM2 "$$RUN DA2"
Read COM2 "%C"
End
```

## 9.2 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Wärmeübertragung zwischen gasförmigen und festen Stoffen (Wärmedurchgang).....	28
Abbildung 2: Küvette mit Einsatz und Messtechnik.....	32
Abbildung 3: Messgasverlauf.....	33
Abbildung 4: Skizze der Versuchsanlage im Kühlraum von oben. 1-12: Reihenfolge der Küvetten.....	34
Abbildung 5: Schaltplan mit fünf Unterschaltplänen.....	36
Abbildung 6: Unterschaltplan Pt-100 Messung.....	37
Abbildung 7: Regelung der Temperatur in einer Küvette als Beispiel.....	38
Abbildung 8: Massendurchflussregelung im Unterschaltplan MFC.....	40
Abbildung 9: Messung von CO <sub>2</sub> im Unterschaltplan Analyse.....	41
Abbildung 10: Steuerung der Magnetventile im Unterschaltplan Magnetventile.....	42
Abbildung 11: Querschnitt-Darstellung der Anordnung der Thermoelemente in den Einlegegurkenfrüchten zur Bestimmung der Temperaturverteilung in den Früchten in der oberen und unteren Etage des Küvetteneinsatzes (Untersuchungen E6 und E7).....	61
Abbildung 12: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettenschacht und in Feldsalatnähe (Untersuchung F1).....	64
Abbildung 13: Atmungsraten von Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).....	65
Abbildung 14: Wasserdampfabgabe von gelagertem Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).....	67
Abbildung 15: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei gelagertem Feldsalat (Untersuchung F1).....	68
Abbildung 16: Transpirationskoeffizienten von gelagertem Feldsalat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung F1).....	69
Abbildung 17: Anteile an Gesamtschwund von gelagertem Feldsalat und Kondenswasser an den Küvettenwänden sowie deren Standardabweichung bei schwingenden Temperaturen bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung F1).....	71
Abbildung 18: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettenschacht und in Spinatnähe (Untersuchung S1).....	73
Abbildung 19: Temperaturverteilung des gelagerten Spinates in der oberen und unteren Etage bei einer Schwingungsdauer von 60 min und unterschiedlichen Hysteresen (Untersuchung S1c und e).....	75
Abbildung 20: Atmungsraten von Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).....	77

Abbildung 21: Wasserdampfabgabe von gelagertem Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).....	78
Abbildung 22: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei Spinat (Untersuchung S1). .....	79
Abbildung 23: Transpirationskoeffizienten von Spinat bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1).....	80
Abbildung 24: Temperaturverläufe im Luftschacht mit Phasenverschiebungen von je 15 min bei Spinat (Untersuchung S2). Die Schwingungsdauer betrug 6 h, die Hysteresen 0 K, 1,5 K und 3 K. ....	81
Abbildung 25: Atmungsrate von gelagertem Spinat bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und unterschiedlichen Hysteresen (Untersuchung S2). Gespeichert wurde immer beim Durchlaufen von 10 °C.....	83
Abbildung 26: Wasserdampfabgabe von gelagertem Spinat bei einer Schwingungsdauer von 6 Stunden und Hysteresen von 3 K (a), 1,5 K (b) und konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2).....	84
Abbildung 27: Dampfdruckdefizit bei gelagertem Spinat in den Gefäßen bei einer Schwingungsdauer von 6 h und Hysteresen von 3 K (a) und 1,5 K (b) und bei konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2). .....	85
Abbildung 28: Transpirationskoeffizienten von gelagertem Spinat bei einer Schwingungsdauer von 6 h und Hysteresen von 3 K (a) und 1,5 K (b) und konstantem Sollwert (a und b) (Untersuchung S2).....	86
Abbildung 29: Schwund von gelagertem Spinat und Kondenswasser bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von 6 h und unterschiedlichen Hysteresen sowie deren Standardabweichungen (Untersuchung S2). .....	87
Abbildung 30: Atmungsraten von Spinat bei gestaffelten Einlagerungsmengen (Untersuchung S3). .....	89
Abbildung 31: Transpirationskoeffizienten von Spinat bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen (Untersuchung S3). .....	90
Abbildung 32: Dampfdruckdefizit bei gestaffelten Einlagerungsmengen von Spinat (Untersuchung S3).....	91
Abbildung 33: Schwund und Kondenswasser in den Küvetten bei gestaffelten Einlagerungsmengen von Spinat (Untersuchung S3).....	92
Abbildung 34: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettenschacht und in Stangenbohennähe (Untersuchung B1).....	94
Abbildung 35: Verteilung der Oberflächentemperatur gelagerter Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Küvette bei unterschiedlichen Hysteresen und einer Schwingungsdauer von 40 min (Untersuchung B1a).....	95
Abbildung 36: Verteilung der Oberflächentemperatur gelagerter Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Küvette. Schwingungsdauer 50 min (Untersuchung B1b).....	96

---

Abbildung 37: Verteilung der Oberflächentemperatur der gelagerten Stangenbohnen in der oberen und unteren Etage in der Küvette bei unterschiedlichen Hystereseen und einer Schwingungsdauer von 60 min (Untersuchung B1c).....	97
Abbildung 38: Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hystereseen (Untersuchung B1).....	99
Abbildung 39: Wasserdampfabgabe gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hystereseen (Untersuchung B1).....	100
Abbildung 40: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hystereseen bei gelagerten Stangenbohnen (Untersuchung B1).....	101
Abbildung 41: Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hystereseen (Untersuchung B1).....	102
Abbildung 42: Anteile an Schwund von gelagerten Stangenbohnen und Kondenswasser in den Küvetten sowie deren Standardabweichungen bei schwingender Temperatur bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung B1).....	104
Abbildung 43: Temperaturverläufe in den oberen Etagen in Bohnennähe bei Temperaturschwankungen im Luftschaft mit gestaffelten Hystereseen (Untersuchung B2).....	105
Abbildung 44: Gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hystereseen von 0,5 K bis 2,5 K (Untersuchung B2).....	107
Abbildung 45: Gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hystereseen von 3 K bis 5 K.....	108
Abbildung 46: Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hystereseen (Untersuchung B2).....	109
Abbildung 47: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hystereseen bei Stangenbohnen (Untersuchung B2).....	110
Abbildung 48: Transpirationskoeffizienten gelagerter Stangenbohnen bei Temperaturschwankungen von sechs Stunden Schwingungsdauer und gestaffelten Hystereseen (Untersuchung B2).....	111
Abbildung 49: Schwund gelagerter Stangenbohnen sowie Kondenswasser in den Küvetten bei Temperaturschwankungen mit einer Schwingungsdauer von sechs Stunden und gestaffelten Hystereseen (Untersuchung B2).....	112

Abbildung 50: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Luftschacht und in Radiesnähe bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung R1).	114
Abbildung 51: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von einer Stunde (Untersuchung R1a).	116
Abbildung 52: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von sechs Stunden (Untersuchung R1b).	117
Abbildung 53: Gemessene und berechnete Atmungsraten von gelagerten Radies bei Temperaturschwankungen mit Hysteresen von 2 K und 3 K und einer Schwingungsdauer von 12 Stunden (Untersuchung R1c).	118
Abbildung 54: Wasserdampf-Nettoabgabe gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K (Untersuchung R1).	120
Abbildung 55: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen von 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K bei gelagerten Radies (Untersuchung R1).	122
Abbildung 56: Transpirationskoeffizienten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit Schwingungsdauern von einer Stunde, sechs Stunden sowie 12 Stunden, kombiniert mit Hysteresen von 0 K (konstanter Sollwert), 2 K sowie 3 K (Untersuchung R1).	123
Abbildung 57: Anteile an Gesamtschwund gelagerter Radies und Kondenswasser in den Küvetten sowie deren Standardabweichungen bei schwingender Temperatur bezogen auf den Schwund bzw. Kondenswasser bei konstanter Temperatur (Untersuchung R1).	124
Abbildung 58: Berechnete und gemessene Atmungsraten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).	127
Abbildung 59: Wasserdampfabgabe (a), Dampfdruckdefizit (b) sowie Transpirationskoeffizienten (c) von Radies bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).	129
Abbildung 60: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Radies im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2).	130

Abbildung 61: Schwund gelagerter Radies sowie Kondenswasser an den Küvettenwänden und deren Standardabweichungen bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit 3 K Hysterese und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2). .....	131
Abbildung 62: Temperaturverlauf, gemessene und berechnete Atmungsrate von gelagerten Radies bei einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde (Untersuchung R3). .....	133
Abbildung 63: Temperaturverlauf, Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von Radies bei einer Temperaturänderung um 1 K pro Stunde (Untersuchung R3). .....	134
Abbildung 64: Atmungsraten von gelagerten Tomaten bei Temperaturschwankungen mit kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese (15 min/0,2 K), langer Schwingungsdauer und großer Hysterese (24 h/3 K) sowie konstanter Temperatur (Untersuchung T1). .....	136
Abbildung 65: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von gelagerten Tomaten bei Temperaturschwankungen mit kurzer Schwingungsdauer und kleiner Hysterese (15 min/0,2 K), langer Schwingungsdauer und großer Hysterese (24 h/3 K) sowie konstanter Temperatur (Untersuchung T1). .....	137
Abbildung 66: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs im Küvettenschacht und in Einlegegurkennähe (Untersuchung E1). Dargestellt ist ein repräsentativer Ausschnitt von drei Stunden Messdauer. ....	139
Abbildung 67: Atmungsraten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1). .....	141
Abbildung 68: Wasserdampfabgabe gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1). .....	143
Abbildung 69: Dampfdruckdefizit bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen bei Einlegegurken (Untersuchung E1). .....	144
Abbildung 70: Transpirationskoeffizienten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung E1). .....	145
Abbildung 71: Atmungsraten (a), Wasserdampfabgabe (b), Dampfdruckdefizit (c) sowie Transpirationskoeffizienten (d) gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen und einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C (Untersuchung E2). .....	147
Abbildung 72: Schwund und Kondenswasser gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen und einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten bei einer Kühlraumtemperatur von 0,5 °C (Untersuchung E2). .....	148
Abbildung 73: Atmungsraten (a), Wasserdampfabgabe (b), Dampfdruckdefizit (c) sowie Transpirationskoeffizienten (d) gelagerter	

Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen bei einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten sowie im Kühlraum (Untersuchung E3).....	150
Abbildung 74: Schwund und Kondenswasser gelagerter Einlegegurken bei gestaffelten Einlagerungsmengen bei einer Temperatur von 10 °C in den Küvetten sowie im Kühlraum (Untersuchung E3).....	151
Abbildung 75: Berechnete sowie gemessene Atmungsraten gelagerter Einlegegurken bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E4). ..	153
Abbildung 76: Wasserdampfabgabe (a), Dampfdruckdefizit (b) sowie Transpirationskoeffizienten (c) von Einlegegurken bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E4). ..	155
Abbildung 77: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Einlegegurken im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. (Untersuchung E4). ..	156
Abbildung 78: Schwund sowie Kondenswasser gelagerter Einlegegurken und deren Standardabweichungen bei konstantem Temperaturverlauf sowie Temperaturschwankungen mit 3 K Hysterese und gestaffelten Schwingungsdauern. ....	157
Abbildung 79: Temperaturverlauf in der Küvettenluft sowie im Innern der einzeln gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E5).....	159
Abbildung 80: Temperaturverlauf in der Küvettenluft sowie im Innern der im Stapel gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und sechs Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E6). Pro Frucht wurden drei Thermolemente eingestochen. ....	161
Abbildung 81: Temperaturverlauf in der Küvettenluft sowie im Innern der im Stapel gelagerten Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und drei Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E 7). Pro Frucht wurde ein Thermolement ins Zentrum eingestochen.....	163
Abbildung 82: Temperaturverlauf in der Luft und in den Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). ..	165
Abbildung 83: gemessene und berechnete Atmungsraten gelagerter Speisezwiebeln bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). ..	167
Abbildung 84: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten von Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). ..	169

Abbildung 85: Wasserdampfabgabe, Dampfdruckdefizit sowie Transpirationskoeffizienten gelagerter Speisezwiebeln im direkten Vergleich bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. (Untersuchung Z1). .....	171
Abbildung 86: Darstellung der Simulationsberechnungen mit Hilfe der $Q_{10}$ -Regel, um auf die Ergebnisse von RUBIN (1953) zu kommen. ....	186
Abbildung 87: Sigmoide Kinetik eines Enzyms mit allosterischer Regulation (verändert nach KARLSON 1984). .....	189
Abbildung 88: Massenstrom aus 1 m <sup>2</sup> Gemüseoberfläche sowie Gesamtwasserabgabe in 24 Stunden bei konstanten 10 °C oder schwankender Temperatur mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern. ....	196
Abbildung 89: Wärmedurchgang bei fluktuierenden Temperaturen.....	210
Abbildung 90: Vorschlag eines Ablaufdiagramms für die Temperaturregelung eines Kühlraums in Abhängigkeit von der Atmungsintensität des Lagergutes sowie der Taupunkttemperatur im Raum.....	215

### 9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittlicher prozentualer Gewichtsverlust unterschiedlicher Gemüsearten bei Einsatz von Schrumpfungssymptomen (verändert nach SALUNKHE und DESAI 1984). .....	18
Tabelle 2: Erntetermine und Temperaturführung bei Untersuchungen mit Feldsalat. ....	49
Tabelle 3: Erntetermine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Untersuchungen mit Spinat (S1 bis S4). .....	51
Tabelle 4: Erntetermine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Stangenbohnen.....	53
Tabelle 5: Erntetermine und Temperaturführung bei Radies (Untersuchungen R1 bis R6). .....	54
Tabelle 6: Einlagerungstermine, Temperaturführung und gelagerte Mengen bei Tomaten. Verglichen wurden Auswirkungen von kleinen schnellen Temperaturschwankungen (SEISENBERGER 1996) mit denen von großen langsamen (RUBIN zit. in SABUROW und ANTONOW 1953). Temperaturmittelwert war 13 °C. ....	57
Tabelle 7: Termine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Untersuchungen mit Einlegegurken der Sorte 'Crispina'. Temperaturmittelwert war 13 °C. ....	58
Tabelle 8: Termine und Bedingungen bei den Untersuchungen E2 und E3 mit Einlegegurken. ....	58
Tabelle 9: Einlagerungstermine, Temperaturführung sowie eingelagerte Stückzahlen bei Untersuchungen zur Staffelung der Schwingungsdauer mit Einlegegurken (Untersuchungen E4a bis E4e). .....	59

Tabelle 10:	Termine, Temperaturführung und eingelagerte Mengen bei Temperaturmessungen in Einlegegurkenfrüchten.....	62
Tabelle 11:	Termine, Temperaturführung und eingelagerte Stückzahlen bei Untersuchungen zur Staffelung der Schwingungsdauer mit Speisezwiebeln.....	62
Tabelle 12:	Spannweiten der Oberflächentemperaturen von gelagertem Spinat innerhalb der Küvette bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Schwingungsdauern und Hysteresen (Untersuchung S1). .....	74
Tabelle 13:	Durchschnittstemperaturen bei unterschiedlichen Einlagerungsmengen von Spinat ab sechs Stunden Messdauer. ....	88
Tabelle 14:	Minimal-, Maximal-, und mittlere Temperaturen im Luftschacht und in den Radiesknollen bei konstanter Temperatur sowie bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2). ....	125
Tabelle 15:	Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichungen der Atmungsraten gelagerter Radies bei Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung R2). ....	126
Tabelle 16:	Temperatur-Spannweite innerhalb einzeln gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung E5). ....	160
Tabelle 17:	Temperatur-Spannweite im Stapel gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und 6 h Schwingungsdauer (Untersuchung E6).....	162
Tabelle 18:	Temperatur-Spannweite im Stapel gelagerter Einlegegurkenfrüchte bei konstanter Temperatur sowie einer Hysterese von 3 K und drei Stunden Schwingungsdauer (Untersuchung E7). ....	164
Tabelle 19:	Minimal-, Maximal- und Mittlere Temperaturen in der Luft und in den Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). ....	166
Tabelle 20:	Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße des Atmungsverlaufs von Zwiebeln bei konstanter Temperatur sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern (Untersuchung Z1). ....	166
Tabelle 21:	Atmungsraten einiger Gemüsearten bei unterschiedlichen Temperaturen (aus ROBINSON et al. 1975, BÖTTCHER 1996, HENZE und HANSEN 1988) .....	174
Tabelle 22:	Aus den von ROBINSON et al. (1975) gemessenen Atmungsraten berechnete $Q_{10}$ -Werte.....	175
Tabelle 23 :	Betrag der Erhöhung der effektiven im Vergleich zur mittleren Temperatur bei Temperaturschwankungen mit unterschiedlichen Hysteresen bei $Q_{10}$ -Werten von 1,5 bis 10 (Verändert nach HICKS 1944). Ein Nahrungsmittel mit dem $Q_{10}$ -Wert 2 hat z.B. bei 10 °C	

---

	± 5 K dieselbe Stoffwechselintensität wie bei konstanten 10,42 °C.....	183
Tabelle 24:	Mittelwerte der rechnerisch simulierten Atmungsraten gelagerter Radies und Speisezwiebeln bei konstanter Temperatur von 10 °C sowie Temperaturschwankungen mit einer Hysterese von 3 K und gestaffelten Schwingungsdauern.....	183
Tabelle 25:	Atmungsintensitäten bei stabiler und schwankender Temperatur nach RUBIN (1953).....	184
Tabelle 26:	Veränderung von Sättigungsdampfdruck und Dampfdruckdefizit bei einem gleichbleibenden Wasserdampfdruck von 549,68239 Pa, welcher einer relativen Luftfeuchte von 90 % bei 0 °C entspricht.....	193

Herzlich bedanken möchte ich mich bei ...

... Herrn Prof. Dr. J. Weichmann für die Überlassung dieses Themas, für seine stetige Diskussionsbereitschaft, wertvolle Anregungen und ganz besonders dafür, dass er es so gut verstanden hat, mich immer wieder neu zu motivieren.

... Frau J. Weichmann und Max Weichmann für die hervorragende Kommunikation während seiner zeitweiligen Abwesenheit.

... Herrn Prof. Dr. J. Meyer für die Übernahme des Koreferates.

... Herrn Prof. Dr. G. Forkmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

... allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Gemüsebau, ohne deren Hilfe, sei es beim Anbau des Gemüses, bei der Ernte oder beim Aufbau der Versuchsanlage, diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Anton Brumer für seine Geduld und Hilfsbereitschaft bei der handwerklichen Umsetzung meiner Ideen.

... Frau Heide Becher und Frau Margarete Müller für die herzliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe und für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Nicht zu vergessen ist auch die erstklassige Versorgung mit kulinarischen Köstlichkeiten und Stricksachen gegen die (Lager-) Kälte.

... meiner Kollegin Ulrike Praeger für die gute Zusammenarbeit.

... allen Personen, die mich durch Ratschläge, Anregungen, Diskussionen, Korrekturlesen, Drucker zur Verfügung stellen oder einfach durch aufbauende Worte unterstützt haben.

... ganz besonders bei Hans Peter für seine Hilfe als „Privathotline“ bei Computerproblemen, für die vielen wertvollen Diskussionen und einfach dafür, dass er immer für mich da war.

## Lebenslauf

### Zur Person

Name Claudia Willging  
 Anschrift Alte Straße 35  
 D-74629 Pfedelbach

geboren am 13.12.1965 in Stuttgart  
 Familienstand ledig  
 Staatsangehörigkeit deutsch

### Ausbildung

Grundschule 1972-1976 Silcherschule in Stuttgart-Rot  
 Gymnasium 1976-1985 Stuttgart-Rot/Korntal-Münchingen  
 Abschluß: Abitur

### Studium

WS 1985 bis SS 1992 Gartenbauwissenschaften an der  
 Technischen Universität München Weihenstephan  
 Abschluss als Diplom-Agraringenieurin

(Zierpflanzenbau) 1988 Praktikum im Betrieb Franke in Freising

1988 -1989 Auslandsaufenthalt in Neuseeland (Praktikum bei  
 DSIR in Auckland, Tätigkeit in einer Containerbaumschule)

### Berufserfahrung

16.11.1992 bis 30.06.1993 technische Leitung im  
 Nützlingszuchtbetrieb Hatto Welte, Insel Reichenau

- Büroorganisation, Versandabwicklung
- Korrespondenz mit Geschäftspartnern im Ausland
- Beratung der Anwender (Erwerbsgärtner und Privatkunden)

01.07.1993 bis 30.09.1996 Freilandgruppenleiterin bei Dehner  
 Gartencenter, Freising

- Warendisposition und Präsentation
- Organisation der Abteilung
- Mitarbeiterführung
- Verkauf und Kundenberatung

seit 01.10.1996 wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich  
 Nacherntephysiologie (Fachgebiet für Gemüsebau) an der  
 Technischen Universität München Weihenstephan