Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
"Otto von Guericke" e.V. (AiF)
Hauptgeschäftsstelle
Bayenthalgürtel 23
50968 Köln

Sicherung der Qualität von Tiefkühlprodukten bei den Verweilzeiten im TUL-Prozess durch kontrollierte wärmedämmende Maßnahmen

Schlussbericht

AiF-Nr. 13308 N

Das Vorhaben AiF-Nr. 13308 N wurde aus
Mitteln des BMWA
über die AiF gefördert

Bundesministerium
für Wirtschaft und Arbeit

Inhalt

Seite

Verzeichnis der Bilder ... 6
Verzeichnis der Tabellen ... 8
Liste der Symbole ... 9
Verzeichnis der Begriffe und Abkürzungen ... 10

1 Einleitung ... 11
1.1 Aufgabenbeschreibung & Problemstellung ... 11
1.2 Ziel der Arbeit ... 12

2 Vorgehensweise ... 13
2.1 Messeinrichtung ... 15
2.1.1 Temperaturmessung ... 15
2.1.1.1 Thermoelemente ... 15
2.1.1.2 Temperatur-/Feuchte-Sensor ... 15
2.1.2 Wärmestromsensor ... 16
2.1.3 Infrarotmessgerät ... 16

3 Ausgangssituation ... 17
3.1 Wirtschaftliche Bedeutung von TK-Produkten ... 17
3.2 Temperatureinfluss auf das Tiefkühlprodukt ... 19
3.2.1 Unmittelbare Schäden ... 19
3.2.2 Mittelbare Schäden ... 19
3.3 Temperaturkontrollanforderungen ... 20
3.4 Einzelhandel ... 22

4 Physikalische Vorgänge ... 25
4.1 Wärmeübertragung ... 25
4.1.1 Wärmeleitung ... 25
4.1.1.1 Stationäre Wärmeleitung ... 26
4.1.1.2 Instationäre Wärmeleitung ... 27
4.1.2 Konvektion ... 27
4.1.2.1 Freie Konvektion ... 28
4.1.2.2 Erzwungene Konvektion ... 28
4.1.3 Wärmestrahlung ... 29

5 Wärmedämmung ... 30
5.1 Organische Dämmstoffe ... 31
5.1.1 Natürlich organische Dämmstoffe ... 31
5.1.2 Künstlich organische Dämmstoffe ... 31
5.2 Anorganische Dämmstoffe ... 31
5.3 Wärmeschutztechnische Kenngrößen ... 33
5.3.1 Berechnung des Wärmestromes und der Wärmestromdichte ... 33
5.3.2 Wärmedurchgangskoeffizient ... 35
5.3.3 Wärmeübergangswiderstände ... 36
5.3.4 Wärmeaustauschfläche ... 37
5.3.5 Temperaturdifferenz ... 38

6 Experimenteller Teil ... 39
6.1. Bestimmung der Isoliereigenschaften eines Wärmedämmsystems ... 39
6.1.1 Durchführung ... 39
6.1.2 Anordnung der Sensoren ... 41
6.1.3 Ablauf ... 41
6.2 Wärmedämmsystem Nr. 1 ... 43
6.2.1 Versuch 1 ... 44
6.2.2 Versuch 2 ... 48
6.3 Wärmedämmsystem Nr. 2 ... 52
6.3.1 Versuch 3 ... 53
6.3.2 Versuch 4 ... 55
6.4 Wärmedämmsystem Nr. 3 ... 57
6.4.1 Versuch 5 ... 58
6.4.2 Versuch 6 ... 60
6.5 Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich ... 62
6.5.1 Vergleich der drei Dämmsysteme ... 62
6.5.2 Einfluss von Luftschichten in bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizienten ... 62
6.6 Untersuchungsprofil zur Messung von Kerntemperaturen ... 66
6.6.1 Vorgehensweise am Beispiel TK-Spinat ... 67
6.6.1.1 Spezifische Wärmemenge ... 68
6.6.1.2 Spinat ohne Dämmung (Versuch 7) ... 69
6.6.1.3 Spinat mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 8) ... 70
6.6.1.4 Spinat mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 9) ... 71
6.6.1.5 Spinat mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 10) ... 72
6.6.1.6 Vergleich der Erwärmungszeiten aus Versuch 7 bis 10 ... 73
6.6.2 Messung von Oberflächentemperaturen mittels Wärmebildkamera ... 75
6.6.3 Taupunkt ... 82
6.6.3.1 Berechnung des Taupunktes ... 82
6.6.3.2 Taupunktbeobachtungen am Beispiel Spinat ... 83

6.6.4 TK-Kräuter ... 84
6.6.4.1 Kräuter ohne Dämmung Versuch 11 ... 85
6.6.4.2 Kräuter mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 12) ... 86
6.6.4.3 Kräuter mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 13) ... 87
6.6.4.4 Kräuter mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 14) ... 88
6.6.4.5 Zusammenfassung der Versuche 11 bis 14 ... 89

6.6.5 TK-Tortellini ... 91
6.6.5.1 Tortellini ohne Dämmung Versuch 15 ... 93
6.6.5.2 Tortellini mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 16) ... 94
6.6.5.3 Tortellini mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 17) ... 95
6.6.5.4 Tortellini mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 18) ... 96
6.6.5.5 Zusammenfassung der Versuche 15 bis 18 ... 97

7 Diskussion der Ergebnisse ... 98

8 Zusammenfassung ... 102

Literaturverzeichnis ... 105

Anhang A Wärmeübergangskoeffizienten der Dämmung Nr. 1 ... 107
A.1 Versuch Nr. 1 an Wärmeaustauschfläche A ... 107
A.2 Versuch Nr. 2 man Wärmeaustauschfläche B ... 108

Anhang B Unterschied zwischen Kern-, Luftschicht- und Oberflächentemperatur ... 109
B.1 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: Ecke oben ... 109
B.2 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: Seitenkante Mitte ... 110
B.3 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: im Zentrum der Ladeeinheit ... 111

Anhang C Spezifische Wärmekapazität von Eis ... 112

Anhang D TK-Tortellini ... 113
D.1 Untersuchung an TK-Tortellini ohne Dämmung am Messpunkt: Ecke oben ... 113
D.2 Untersuchung an TK-Tortellini mit Dämmung Nr. 3 ... 114
D.3 *U*-Wert des Wellpappkartons ... 115

Verzeichnis der Bilder

Bild 1 Tiefkühlkost Absatzentwicklung in Deutschland 1971-2001 17
Bild 2 Tiefkühlkost Pro Kopf Verbrauch in Deutschland 1971-2001 18
Bild 3 Thermocontainer zum Transport von Kühl- und Tiefkühlwaren 22
Bild 4 Kommissionier-Rollwagen 23
Bild 5 Wärmedurchgang in einer ebenen Wand 25
Bild 6 Stationäre Wärmeleitung in einer einschichtigen Wand 26
Bild 7 Stationäre Wärmeleitung in einer mehrschichtigen ebenen Wand 27
Bild 8 Wärmeübertragung durch freie Konvektion an einer ebenen Wand 28
Bild 9 Wärmeaustauschflächen der Dämmung 37
Bild 10 Temperaturmesspunkte 38
Bild 11 Standort der Untersuchungen 40
Bild 12 Messpunkte der Temperatur- und Feuchtesensoren & des Wärmestromsensors.. 41
Bild 13 Anordnung der TK-Produkte auf dem Rollwagen 42
Bild 14 Wärmedämmung Nr. 1 43
Bild 15 Versuch 1: Wärmedämmung Nr. 1 44
Bild 16 Versuch 1: U_v-Wert 45
Bild 17 Versuch 2: Wärmedämmung Nr. 1 48
Bild 18 Versuch 2: U_h-Wert 49
Bild 19 Wärmedämmung Nr. 2 52
Bild 20 Versuch 3: Wärmedämmung Nr. 2 53
Bild 21 Versuch 3: U_v-Wert 54
Bild 22 Versuch 4: Wärmedämmung Nr. 2 55
Bild 23 Versuch 4: U_h-Wert 56
Bild 24 Wärmedämmsystem Nr. 3 57
Bild 25 Versuch 5: Wärmedämmung Nr. 3 58
Bild 26 Versuch 5: U_v-Wert 59
Bild 27 Versuch 6: Wärmedämmung Nr. 3 60
Bild 28 Versuch 6: U_h-Wert 61
Bild 29 Messpunkte der Kerntemperaturen 66
Bild 30 TK-Spinat 67
Bild 31 Versuch 7: Spinat ohne Dämmung 69
Bild 32 Versuch 8: Spinat mit Dämmung Nr. 1 70
Bild 33 Versuch 9: Spinat mit Dämmung Nr. 2 71
Bild 34 Versuch 10: Spinat mit Dämmung Nr. 3 72
Bild 35 Thermographie TK-Spinat am Beginn der Messung 76
Bild 36 Thermographie TK-Spinat 5. Minute 77
Bild 37 Thermographie TK-Spinat 10. Minute 77
Bild 38 Thermographie TK-Spinat 20. Minute 78

Bild 39 Thermographie TK-Spinat 30. Minute ... 78
Bild 40 Thermographie TK-Spinat 40. Minute ... 79
Bild 41 Thermographie TK-Spinat 50. Minute ... 79
Bild 42 Thermographie TK-Spinat 60. Minute ... 80
Bild 43 Thermographie TK-Spinat 61. Minute mit Einblick in die zweite Lage ... 81
Bild 44 TK-Kräuter ... 84
Bild 45 Versuch 11: Kräuter ohne Dämmung ... 85
Bild 46 Versuch 12: Kräuter mit Dämmung Nr. 1 ... 86
Bild 47 Versuch 13: Kräuter mit Dämmung Nr. 2 ... 87
Bild 48 Versuch 14: Kräuter mit Dämmung Nr. 3 ... 88
Bild 49 TK-Tortellini Packstück ... 91
Bild 50 TK-Tortellini: Anordnung der Packungen im Wellpappkarton ... 92
Bild 51 TK-Tortellini ... 92
Bild 52 Versuch 15: Tortellini ohne Dämmung ... 93
Bild 53 Versuch 16: Tortellini mit Dämmung Nr. 1 ... 95
Bild 54 Versuch 17: Tortellini mit Dämmung Nr. 2 ... 96
Bild 55 Versuch 18: Tortellini mit Dämmung Nr. 3 ... 97
Bild 56 Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmedämmsysteme ... 99
Bild A.1 Verlauf der α-Werte an Fläche A der Dämmung Nr. 1 ... 107
Bild A.2 Verlauf der α-Werte an Fläche B der Dämmung Nr. 1 ... 108
Bild B.1 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt Ecke oben ... 109
Bild B.2 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt Seitenwand Mitte ... 110
Bild B.3 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt im Zentrum der Ladeeinheit ... 111
Bild C.1 Spezifische Wärmekapazität von Eis ... 112
Bild D.1 5 Kerntemperaturen am Messpunkt Ecke oben (Tortellini ohne Dämmung) ... 113
Bild D.2 Tortellini mit Dämmung Nr. 3 ... 114
Bild D.3 *U*-Wert des Wellpappkartons ... 115

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 Europäische Richtlinien und nationale Verordnungen Temperaturregistriergeräten und Thermometern 20
Tabelle 2 Wärmeleitfähigkeit in W/(mK) ausgesuchter Stoffe bei 20 °C 26
Tabelle 3 Wärmeleitvermögen von Schaumstoff aus Styropor 30
Tabelle 4 Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten 62
Tabelle 5 Versuch 7: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat 69
Tabelle 6 Versuch 8: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat 70
Tabelle 7 Versuch 9: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat 71
Tabelle 8 Versuch 8: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat 72
Tabelle 9 Erwärmungszeit TK-Spinat 73
Tabelle 10 Vergleich der errechneten und messtechnisch erfassten Erwärmungszeit am Messpunkt Ecke oben (Spinat) 75
Tabelle 11 Versuch 11: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter 85
Tabelle 12 Versuch 12: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter 86
Tabelle 13 Versuch 13: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter 87
Tabelle 14 Versuch 14: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter 88
Tabelle 15 Erwärmungszeit TK-Kräuter 89
Tabelle 16 Vergleich der errechneten und messtechnisch erfassten Erwärmungszeit am Messpunkt Ecke oben (Kräuter) 90
Tabelle 17 Versuch 15: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 93
Tabelle 18 Versuch 16: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 95
Tabelle 19 Versuch 17: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 96
Tabelle 20 Versuch 18: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 97
Tabelle 21 Erwärmungzeit TK-Tortellini 98
Tabelle 22 TK-Spinat, TK-Kräuter und TK-Tortellini am Messpunkt Ecke oben 100
Tabelle 23 Vergleich der theoretisch und messtechnisch bestimmten Erwärmungszeit von TK-Spinat und TK-Kräutern 102
Tabelle D.1 Anhang D.1: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 113
Tabelle D.2 Anhang D.2: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini 114

Liste der Symbole

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
Q	Wärme, Wärmemenge	J
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m²
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
U	Wärmedurchgangskoeffizient *(ehemals k)*	W/(m² K)
R_T	Wärmedurchgangswiderstand *(ehemals 1/k)*	(m² K)/W
R	Wärmedurchlasswiderstand	(m² K)/W
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	kJ/kg K
ϑ, T	Temperatur	°C, K
$\Delta\vartheta$, ΔT	Temperaturdifferenz	°C, K
a	Temperaturleitfähigkeit	m²/s
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m² K)
R_{si}, R_{se}	Wärmeübergangswiderstand	(m² K)/W
A	Fläche	m²
m	Masse	kg
t	Zeit	min
ρ	Rohdichte	kg/m³
d	Wandstärke, Schichtdicke	m
f	relative Luftfeuchte	%
E	Sättigungsdampfdruck	mbar
e	Wasserdampfpartialdruck	mbar
τ	Taupunkttemperatur	°C

Die Kehrwerte der „Widerstände“ heißen „Koeffizienten“.

α = Alpha; Δ = Delta; ϑ =Teta; λ = Lamda; ρ = Rho

Indizes

T = Transmission (Durchgang)
si = surface interior (Innenoberfläche)
se = surface exterior (Außenoberfläche)
h = horizontal
v = vertikal

Verzeichnis der Begriffe

Wärmedämmung

Die Wärmedämmung beinhaltet den Wärme- sowie den Kälteschutz. Beiden ist die Funktion ein System von seiner Umgebung thermisch zu isolieren zugeordnet. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Wärmedämmung“ und „Dämmung“ als thermischer Schutz des Tiefkühlgutes vor dem aus seiner Umgebung, aufgrund eines Temperaturgefälles, einfallenden Wärmestroms definiert.

Wärmestrom

Der Wärmestrom $\dot{Q}$ in W ist eine massenbezogene Größe, die an einen Stofftransport durch eine Fläche A in m² pro Zeit gebunden ist. Die Intensität eines Wärmestroms wird durch den thermischen Energiebetrag angegeben, der ein Flächenstück in einer Zeiteinheit durchströmt, welches senkrecht zur Strömungsrichtung steht.

Richtung des Wärmestroms

Der zwischen einem System und seiner Umgebung auftretende Wärmestrom läuft immer in Richtung eines Temperaturgefälles. Je nach Richtung des Temperaturgradienten ist dieser positiv (Wärmestrom $\dot{Q} > 0$) oder negativ (Kältestrom $\dot{Q} < 0$). Im Folgenden wird der Kältestrom ebenfalls als Wärmestrom bezeichnet.

1 Einleitung

Das vorrangige Ziel beim Transport und der Handhabung von Tiefkühlprodukten ist, gemäß der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel (TLMV) beziehungsweise der ersten Verordnung zur Änderung der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel, die Einhaltung der Produkttemperaturen. Die Einhaltung der Produkttemperatur muss von der Herstellung bis zur Verbringung in die Verkaufskühlmöbel des Einzelhandels gewährleistet werden. Durch ständige technische und organisatorische Verbesserungen kann heute eine nahezu lückenlose Kühlkette garantiert und überwacht werden. Oftmals erweist sich jedoch die Zeit von der Warenannahme bis zur Verbringung der Ware in die Präsentationskühlgeräte im Handel als Schwachstelle in der geschlossenen Kühlkette. Hier kann es leicht zu ungewollten Unterbrechungen der Kühlkette kommen. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Wärmedämmsysteme untersucht, die die Gefahr einer Kühlunterbrechung vermeiden sollen.

1.1 Aufgabenbeschreibung & Problemstellung

Nach der Anlieferung im Einzelhandel kommt es zur Zwischenlagerung der Ware in ungekühlten Wareneingangszonen, bevor diese dann dem Verbraucher in den Präsentationskühltruhen zu Kauf angeboten werden. Diese Verfahrensweise beinhaltet folgende Problematik:

1. Die Zwischenlagerung in nicht ausreichend temperierten Bereitstellungszonen kann bei längerer Verweilzeit der Produkte zur unerlaubten Produkterwärmung und damit zu Qualitätsverlusten und zum Verkaufsverbot der Ware führen.

2. Erfolgt der Aufenthalt der Tiefkühlprodukte in einer Umgebung mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit, kommt es zur Kondensatbildung an der Oberfläche der Packung und dem Verbraucher wird signalisiert, dass bei diesem Produkt eine Erwärmung stattgefunden hat und er wird gegebenenfalls von Kauf der Ware absehen, obgleich eine Schädigung des Produktes noch nicht erfolgt ist.

Um der Forderung einer ununterbrochenen Kühlkette Rechnung zu tragen und die oben genannten Probleme zu unterbinden, werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Wärmedämmsysteme in Hinblick auf ihrer Wirksamkeit an drei unterschiedlichen TK-Lebensmitteln untersucht. Die Zweckmäßigkeit dieser Systeme wird messtechnisch überprüft und ermöglicht somit einen Vergleich der einzelnen Ausführungen.

Angestrebt wird die Entwicklung eines einfachen Berechnungsverfahrens, das möglichst auf wenigen bzw. leicht zu ermittelnden Parametern basiert, um die effiziente Auswahl eines Dämmsystems zu erleichtern.

1.2 Ziel der Arbeit

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur weiteren Absicherung der Kühlkette im Bereich des Warenumschlags beim Handel zu leisten, indem an drei verschiedenen Wärmedämmsystemen untersucht werden soll, wie diese das Auftauverhalten von drei Tiefkühl(TK)-Produkten unterschiedlicher Beschaffenheit verzögern, um aus den Ergebnissen ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für den sinnvollen Einsatz von Dämmsystemen entwickeln zu können. Das Berechnungsverfahren soll dem Hersteller, dem Logistikdienstleister und dem Handel bei der Auswahl einer geeigneten Dämmvariante zum Erhalt der Qualität von tiefgefrorenen Lebensmitteln bei der Warenannahme im Handel helfen.

Um dieses Ziel zu erreichen wird die vorliegende Arbeit in einen messtechnischen und einen theoretischen Teil untergliedert.

Im messtechnischen Teil wird neben der Ermittlung der wärmespezifischen Eigenschaften der Wärmedämmsysteme ihre Wirkung im Vergleich zum ungedämmten System untersucht.

Im theoretischen Teil ist vorrangig ein Konzept für das angestrebte vereinfachte Berechnungsverfahren zu entwickeln, das auf möglichst wenigen bzw. einfach und schnell zu ermittelnden Parametern basieren soll.

Abschließend ist die Gültigkeit des Berechnungsverfahrens anhand der Untersuchungsergebnisse zu überprüfen.

2 Vorgehensweise

Beim Umschlag von tiefgefrorenen Lebensmitteln aus der klimatisierten Lagerung im Beförderungsmittel in ungekühlte Wareneingangsbereiche des Einzelhandels kommt es rasch zum Anstieg der Produkttemperaturen und zum Verlust der Produktqualität. Vorrangiges Ziel der Untersuchung ist es, eine Aussage über die Verlängerung der Umschlagszeit[1] bis zum Erreichen der zulässigen Produktgrenztemperatur von -15 °C in den oben genannten Bereitstellungsräumen unter Anwendung von Wärmedämmsystemen an Kommissionier-Rollwagen (Bild 4) zu erhalten.

Die Beobachtungen werden an praxisnahen TK-Lebensmitteln durchgeführt. Hierzu stehen folgende drei Produkte zur Verfügung.

1. TK-Kräutersortiment
2. TK-Rahmspinat
3. TK-Fertiggericht: Tortellini

Sie wurden unter Berücksichtigung einer unterschiedlichen Rohdichte gewählt, um das Auftauverhalten verschiedener Produktgruppen zu bestimmen.

Im experimentellen Teil dieser Arbeit werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Bestimmung der isolierenden Wirkung (*U*-Wert Bestimmung) der unterschiedlichen Dämmsysteme.

2. Einfluss von Luftschichten zwischen der Wärmedämmung und den Packstücken in bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizienten des gesamten Dämmsystems (Luftschicht und Dämmung).

3. Untersuchung des Auftauverhaltens für den Temperaturbereich von -20 °C bis -15 °C von TK-Produkten ohne Dämmung.

4. Ermittlung der kritischen Randbereiche an der Ladeeinheit.

---

[1] Umschlagszeit ist die Zeit in Minuten die bei einem Temperaturanstieg um 5 °C von einer Anfangstemperatur -20 °C bis zu einer Endtemperatur -15 °C in ungekühlten Umgebungen benötigt wird.

5. Untersuchung des Auftauverhaltens unter Wärmedämmsystemen im Hinblick auf die Verlängerung der Erwärmungszeit für den Temperaturbereich von -20 °C bis -15 °C.

6. Untersuchung von Kondensatbildung und Raureif an der Oberfläche der Packungen.

Im theoretischen Teil wird das Konzept für den angestrebten Berechnungsansatz aus der Erfassung der produktspezifischen Eigenschaften wie:

1. der enthaltenden Wassermenge
2. der Wärmemenge und
3. der Annahme eines homogenen Auftauverhaltens

für die Berechnung der theoretischen Erwärmungszeit der TK-Waren erprobt.

Abschließend wird die Gültigkeit der Ergebnisse ausgehend vom Berechnungsansatz anhand der Untersuchungen überprüft.

Für die messtechnische Ermittlung der Daten wird die nachstehende Messeinrichtung angewandt.

2.1 Messeinrichtung

2.1.1 Temperaturmessung

Es werden zwei unterschiedliche Verfahren der Temperaturmessungen angewandt. Zum einen wird mit Thermoelementen ein berührungsbezogenes zum anderen durch Feuchte-/Temperatur - Sensoren ein berührungsfreies Aufnehmen der Daten erreicht.

2.1.1.1 Thermoelemente

Um genaue Kenntnisse über die Temperaturverläufe der TK-Produkte beim Verlassen der geschlossenen Kühlkette zu ermitteln, werden Thermoelemente Typ K Nickelchrom-Nikel (NiCr-Ni) verwendet deren Messbereich von -200 °C bis +1100 °C reicht. Für die Untersuchungen sind die Thermoelemente für den Bereich von -38 °C bis +38 °C mit Hilfe geeichter Thermometer kalibriert worden. Für den kalibrierten Temperaturbereich wird eine Messgenauigkeit von 1 % erreicht.

2.1.1.2 Feuchte-/ Temperatur – Sensor

Die Aufnahme der relativen Feuchte und der Temperatur der Umgebungsluft sowie der Luft unter dem Wärmedämmsystem erfolgt durch einen Feuchte-/Temperatur – Sensor (Hydroclip), der ein kontaktloses Erfassen der Daten ermöglicht.

2.1.2 Wärmestromsensor

Aus dem einfließenden Wärmestrom, bezogen auf ein Flächenstück A in m² und einer Zeiteinheit, ergibt sich die Wärmestromdichte $\dot{q}$. Sie wird mit einem Wärmestromsensor aufgenommen. Ihm obliegt folgende Gleichung:

$$\dot{q} = \dot{Q} / A \qquad \text{(Gl. 1)}$$

mit :

$\dot{q}$	=	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	=	Wärmestrom
A	=	Wärmeaustauschfläche

2.1.3 Infrarotmessgerät

Mittels Infrarot-Messtechnik lassen sich die Oberflächentemperaturen (Wärmestrahlen) eines beliebigen Objektes messen und visualisieren. Die Messgenauigkeit ist abhängig von dem Emissionsgrad und damit von der Oberflächenbeschaffenheit des untersuchten Objektes. Die Vorteile der Infrarotmessung sind, dass es eine berührungslose Messung ist, es liegt eine sehr kleine Zeitkonstante vor und sie ist zerstörungs- und rückwirkungsfrei (verfälscht das Ergebnis nicht, weil es dem Objekt keine Energie entzieht und zufügt).

3 Ausgangssituation

3.1 Wirtschaftliche Bedeutung von TK-Produkten

Nach Angaben des Deutschen Tiefkühlinstituts (dti) ist der Markt von Tiefkühlkost auf stetem Erfolgskurs. Der mengenmäßige Absatzverlauf der vergangenen 30 Jahre verdeutlicht die Verbraucherakzeptanz von Tiefkühlkost (Bild 1 und Bild 2).

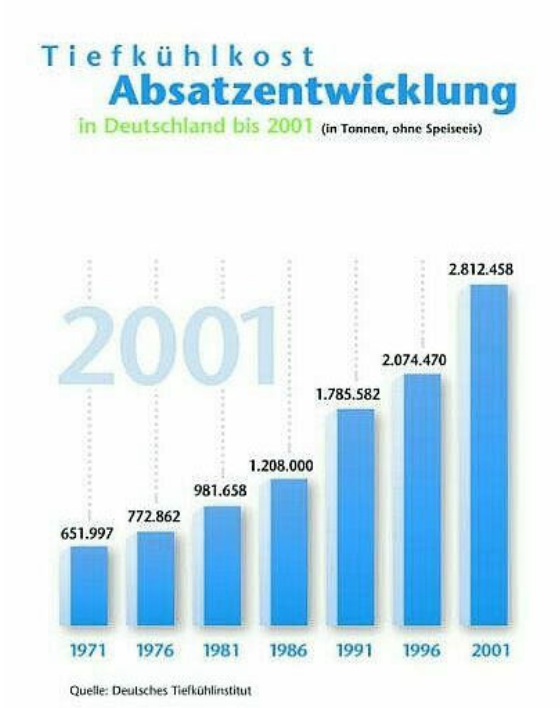

Bild 1 Tiefkühlkost Absatzentwicklung in Deutschland 1971-2001[1]

Die drei wesentlichen Gründe für die gewachsene Nachfrage von TK-Produkten sind nach einer im *Tiefkühl-Report* [3] veröffentlichten Umfrage, erhoben von der *Küche*, *Catering inside* und dem *Deutschen Tiefkühlinstitut*, zum einen die gleich bleibende Qualität, die ganzjährige Verfügbarkeit und die große Zeitersparnis bei der Zubereitung von Mahlzeiten. Neben den Privathaushalten sind auch die Außer-Haus-Betriebe, wie Betriebsküchen, Hotels und Restaurants ein großer Abnehmer von TK-Produkten. Dieses positive Wachstum wird von der TK-Industrie mit einer großen Sortimentsbreite honoriert. Mit der Vielfalt des TK-Sortiments steigt auch der differenzierte Anspruch an die Distribution der Waren, da jedes TK-Produkt unterschiedliche Ansprüche zum Erhalt seiner Qualität[2] vorgibt und fordert.

2 Unter der Qualität von tiefgefrorenen Lebensmitteln wird deren Beschaffenheit [11] verstanden. Sie umfasst den Genusswert (sensorische Qualität), die ernährungsphysiologische Qualität, den Gesundheitswert (hygienisch-toxikologische Qualität) und den Eignungswert (z. B. Haltbarkeit).

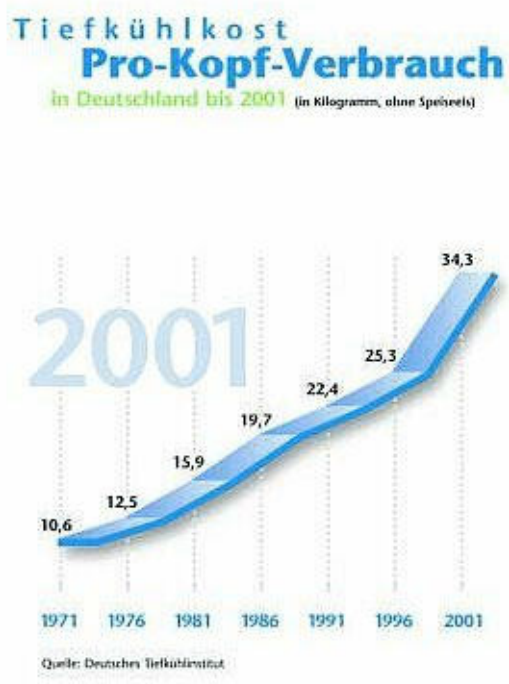

Bild 2 Tiefkühlkost Pro Kopf Verbrauch in Deutschland 1971-2001 [1]

Damit die Produkte den Verbraucher letztendlich in einem qualitativ hochwertigen Zustand erreichen, erfordert der Umgang mit TK-Ware beim Hersteller, Distributionsunternehmen und Handel vor allem die Einhaltung der produktspezifischen Temperaturen. Die in der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel (TLMV) [4] und der ersten Änderung der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel [4] festgelegten Produkttemperaturen müssen zwingend eingehalten werden.

Im § 2 „Anforderungen an das Herstellen und Behandeln“ Abs. 4 der TLMV heißt es: „Nach dem Tiefgefrieren muss die Temperatur bis zur Abgabe an den Verbraucher an allen Punkten des Erzeugnisses ständig bei minus 18 °C oder tiefer gehalten werden. Von dieser Temperatur sind folgende Abweichungen nach oben zulässig:

1. beim Versand kurzfristige Schwankungen von höchstens 3 °C,
2. beim örtlichen Vertrieb und in den Tiefkühlgeräten des Einzelhandels ... Abweichungen von höchstens 3 °C.“.

Die TLMV beinhaltet jedoch keine Aussage über den Zeitraum, der die gewährte Toleranz der Temperaturschwankung bestimmt. Gegenwärtig liegt es im Ermessen des Verantwortlichen, wie lang er die TK-Ware ohne aktive Kühlung nach der Anlieferung verweilen lässt.

3.2 Temperatureinfluss auf das Tiefkühlprodukt

Eine langfristige Zwischenlagerung im Einzelhandel, außerhalb der geschlossenen Kühlkette, kann am Packgut mittelbare und unmittelbare Schäden hervorrufen und demzufolge Einbußen in der Qualität bewirken. Die sensorischen und ernährungsphysiologischen Veränderungen, die in Folge einer Erwärmung des Produktes auftreten, werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Für weiterführende Informationen wird auf die im Literaturverzeichnis unter Punkt 10 angegebene Quelle verwiesen.

3.2.1 Unmittelbare Schäden

Ein Anstieg der Umgebungstemperatur führt zum Anschmelzen des TK-Lebensmittels.
Im Extremfall führt dies zu mikrobiologischen Problemen (Wachstum einer psychrophilen Keimflora bereits ab -12 °C) [5] und bei erneutem Einfrieren zur Bildung von großen Eiskristallen in der Struktur (Verklumpungen). Gleichzeitig erfolgen Veränderungen der sensorischen Merkmale wie der Farbe, dem Geschmack und der Textur.

3.2.2 Mittelbare Schäden

Bereits bei mittleren relativen Luftfeuchten und Umgebungstemperaturen von nur 0 °C kann es zur Kondensation von Feuchtigkeit an der Außenseite der Packung kommen. Sobald die Oberflächentemperatur der Verpackung unter dem Taupunkt liegt, schlägt sich an der Oberfläche der Tiefkühlpackung Raureif nieder. Bei hygroskopischen Materialien (Karton, Wellpappe) führt dies zum Erweichen und Festigkeitsverlusten. Bei zusätzlichen mechanischen Belastungen (z. B. Stößen) können Risse am Packmittel und Leckagen entstehen. Der Raureif kann sich bei zunehmender Verweilzeit verflüssigen und dem Verbraucher signalisieren, dass es hier zu einer Erwärmung gekommen ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird der Kunde vom Kauf des Produktes absehen, obwohl das Produkt selbst nicht geschädigt ist.

3.3 Temperaturkontrollanforderungen

Um den Erhalt der qualitätsbezeichnenden Merkmale von tiefgefrorenen Lebensmitteln zu sichern, ist eine unzulässige Temperaturerhöhung zu vermeiden. Hierbei muss darauf geachtet werden das der Warenumschlag, im Besonderen beim Be- und Entladen von Beförderungsmitteln, durch eine rasche Abwicklung erfolgt. Eine lückenlose Temperaturüberwachung der TK-Ware von Erzeuger bis hin zum Verkaufskühlmöbel muss gewährleistet sein, um Schwachstellen innerhalb der Kühlkette zu dokumentieren und zu vermeiden. Die amtlichen Überwachungen der Temperaturen erfolgen nach den EG-Richtlinien 92/1/EWG vom 13. Januar 1992 und der 92/2/EWG vom 13. Januar 1992 und deren Anhängen I und II [6], die in der „Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel“ vom 29. Oktober 1991 und der „Ersten Verordnung zur Änderung der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel“ von 16. November 1995 in nationales Recht umgesetzt worden sind [4], festgelegten Bestimmungen.

Tabelle 1 Europäische Richtlinien und nationale Verordnungen zu Temperaturregistriergeräten und Thermometern [6]

• Richtlinie 89/108/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über tiefgefrorene Lebensmittel
• Richtlinie 92/1/EWG der Kommission vom 13. Januar 1992 zur Überwachung der Temperaturen von tiefgefrorenen Lebensmitteln in Beförderungsmitteln sowie Einlagerungs- und Lagereinrichtungen
• Richtlinie 92/2/EWG der Kommission vom 13. Januar 1992 zur Festlegung des Probenahmeverfahrens und des gemeinschaftlichen Analyseverfahrens für die amtliche Kontrolle der Temperaturen von tiefgefrorenen Lebensmitteln
• Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel (TLMV) vom 29. Oktober 1991
• Erste Verordnung zur Änderung der Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel vom 16. November 1995

Bei den amtlichen Temperaturmessungen wird jedoch lediglich die umgebende Lufttemperatur erfasst. Im § 2a „Führen von Nachweisen“ Abs. 1 der TLMV [4] heißt es: „Der für die Beförderung Verantwortliche sowie der für die Einlagerungs- und Lagereinrichtungen Verantwortliche hat sicherzustellen, dass während des Betriebs die Lufttemperatur, der tiefgefrorene Lebensmittel ausgesetzt sind, mit den Lufttemperaturmessgeräten so häufig und in regelmäßigen Zeitabständen gemessen und aufgezeichnet wird, dass das Temperaturgeschehen nachvollziehbar ist.“.

Die Lufttemperatur ist in der Regel jedoch nicht analog der Kerntemperatur der TK-Ware (s. Anhang Bild B.1 bis B.3). Somit können die wahren Temperaturen (Kerntemperaturen) der Erzeugnisse nicht registriert werden. Eine Ermittlung der Kerntemperaturen erfolgt lediglich im Fall einer begründeten Beanstandung. Die Bestimmung der tatsächlichen Temperatur (Kerntemperatur) kann nur durch das Einführen eines Messfühlers erfolgen. Die kontrollierte Packung wäre dann jedoch nicht mehr verkehrsfähig.

Aus der Sicht des Verbrauchers wäre eine ersichtliche Kenntlichmachung über den Temperaturverlauf des TK-Produktes über die gesamte Transportkette wünschenswert. Hierzu könnten
Temperatur- oder Temperatur-Zeit-Indikatoren, die den Einfluss von Umgebungstemperaturen oder die Kombination von Temperatur und Zeit messen und durch einen irreversiblen Farbumschlag visualisieren, auf tiefgefrorene Lebensmittel angebracht werden. Derartige Indikatoren haben jedoch den Nachteil, dass sie lediglich die Oberflächentemperatur erfassen.

3.4 Einzelhandel

Der Umschlag von TK-Ware beim Handel erweist sich, wie Eingangs beschrieben, oft als Schwachstelle in der geschlossenen Kühlkette. Je nach Größe des Einzelhandels und der Umschlagsmenge von TK-Produkten stehen nicht immer Kühlräume für die Zwischenlagerung der tiefgefrorenen Waren, vor deren Verbingung in Verkaufkühltruhen, zur Verfügung. Teilweise sind die Wareneingangsbereiche so dimensioniert, dass sie lediglich eine geringe Abweichung zur Außentemperatur und der Temperatur der Verkaufsräume aufweisen. Kommt es nach der Anlieferung der Ware zu längeren Zwischenlagerungen in diesen Zonen ist die Einhaltung der geschlossenen Kühlkette selten zu erfüllen.

In den Wareneingangszonen führt neben der fehlenden technischen Ausstattung häufig auch menschliches Versagen zu Unterbrechungen in der Kühlkette.

Bild 3 Thermocontainer zum Transport von Kühl- und Tiefkühlwaren [2]

Oftmals ist das Personal nicht ausreichend geschult und verfügt somit nicht über ausreichende Kenntnisse über die Temperaturempfindlichkeit der Produkte. Bei der Zwischenlagerung in ungekühlten Bereichen lassen sich Einbußen der Produktqualität somit kaum vermeiden.

Die grundsätzlichsten Fehler bei der Handhabung sind:

1. Nach der Warenannahme wird das zuständige Personal durch eine andere Tätigkeit (z. B. die Entgegennahme eines Telefonates) abgelenkt und die Produkte werden nicht unmittelbar nach der Anlieferung sachgerecht eingelagert.

2. Wird die Ware unmittelbar nach der Anlieferung in die Verkaufsräume gefahren um dort direkt in die Präsentationskühlgeräte einsortiert zu werden, kommt es aufgrund des für diesen Arbeitsabschnitt benötigten Zeitaufwands (Ein- und Umsortieren der Artikel) zu Erwärmungen der Produkte.

3. Gelegentlich kommt es zu einer Zwischenlagerung auf den Rampen im Außengelände der Wareneingangszonen. Hier sind die Produkte den Witterungseinflüssen ohne Schutz ausgesetzt.

Bild 4 Kommissionier-Rollwagen [2]

Um umschlagsbedingte Temperaturerhöhungen der Waren zu vermeiden, wäre eine Standardisierung der Warenahme beim Handel hinsichtlich des thermischen Schutzes durch gekühlte Wareneingangzonen oder durch die Einrichtung von Kühlräumen erstrebenswert.

Um die Gefahr einer Kühlunterbrechung vorzubeugen werden vereinzelt sogenannte Thermocontainern (Bild 3) eingesetzt. Im allgemeinen erfolgt aber die Anlieferung von TK-Produkten im Handel auf Paletten oder auf Kommissionier-Rollwagen[3] (Bild 4).

[3] Grundfläche 820 x 710 mm
Nutzhöhe 1350 mm

4 Physikalische Vorgänge

4.1 Wärmeübertragung

Wenn zwischen einem System und seiner Umgebung ein Temperaturunterschied vorliegt, so strebt dieses System nach der Lehre der Thermodynamik ein thermisches Gleichgewicht an. Vom Wärmeren wird ein Wärmestrom auf das Kältere (oder umgekehrt) übergehen bis beide die gleiche Temperatur besitzen. Die Übertragung von Wärme erfolgt über die gemeinsame Systemgrenze immer in Richtung eines Temperaturgefälles.

Wärmeübertragung ist eine Energieform, die als molekulare Bewegung vorliegt. Dabei unterscheidet man drei Arten des Wärmetransportes: Wärmeleitung, konvektiver Wärmeübergang und Wärmestrahlung. Sind zwei Fluide verschiedener Temperatur durch einen festen Körper (ebene Wand) getrennt, so vollzieht sich die Wärmedurchgang (Bild 5) in drei Schritten:
1. Konvektion – 2. Wärmeleitung – 3. Konvektion.

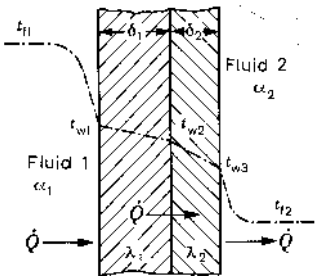

Bild 5 Wärmedurchgang in einer ebenen Wand [12]

4.1.1 Wärmeleitung

Unabhängig davon, ob ein Stoff fest, flüssig oder gasförmig ist, besitzt er die Fähigkeit Wärme weiterzugeben. Die beste Wärmeleitung (innerhalb eines Materials) erfolgt in Metallen und die schlechteste in Luft. Wärme zu leiten wird für jedes Material mit der Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben. Liegt zwischen zwei Systemen, die direkten Kontakt miteinander haben eine Temperaturdifferenz vor, streben diese nach den Gesetzen der Wärmelehre ein thermisches Gleichgewicht an. Es erfolgt ein Wärmestrom vom wärmeren zum kälteren (oder umgekehrt) System.

Tabelle 2 Wärmeleitfähigkeit in W/(mK) ausgesuchter Stoffe bei 20 °C [7]

Stoff	λ in W/(mK)	Stoff	λ in W/(mK)
Silber	427	Polyethylen	≈0,40
Kupfer	399	Wasserstoff	0,179
Aluminium (99%)	220	Holz (trocken)	0,1 ... 0,2
Eisen	81	Gummi	0,15
Legierte Stähle	13 ... 48	Papier	0,12
Mauerwerk	0,5 ... 1,3	Schaumstoffplatten	0,02 ... 0,09
Wasser	0,598	Luft	0,0257

Die Wärmeleitfähigkeit ist keine Konstante, sondern hängt von der lokalen Temperaturdifferenz ab. Es sind hierbei zwei grundsätzliche Fälle zu unterscheiden.

4.1.1.1 Stationäre Wärmeleitung

Bei der stationären Wärmeleitung liegt über den gesamten Zeitraum ein konstantes Temperaturgefälle ϑ_1 und ϑ_2 pro Abstand zwischen den beiden Endflächen $(\vartheta_1 - \vartheta_2)/l$ vor.
So das der Wärmestrom $\dot{Q}$ = konstant ist.

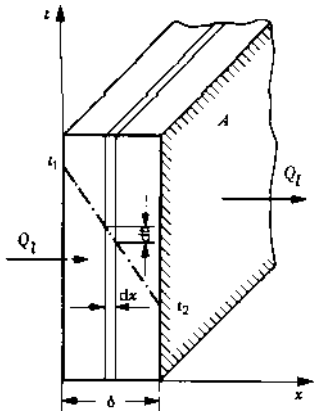

Bild 6 Stationäre Wärmeleitung in einer einschichtigen Wand [12]

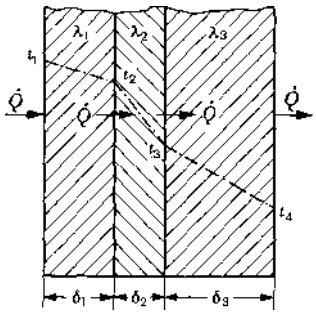

Bild 7 Stationäre Wärmeleitung in einer mehrschichtigen ebenen Wand [12]

4.1.1.2 Instationäre Wärmeleitung

Hierbei geht man von einem Körper aus, der eine Endtemperatur ϑ_2 habe, welche wärmer ist als seine Anfangstemperatur ϑ_1. Im Zuge der Wärmeleitung wird der Temperaturunterschied ausgeglichen und der Körper nimmt eine einheitliche Temperatur ($\vartheta_1 = \vartheta_2$) an. Das Temperaturgefälle ist weder örtlich noch zeitlich konstant.
Eine maßgebliche Größe für die zum Ausgleich der Temperatur benötigte Zeit ist die Temperaturleitfähigkeit a in m²/s die sich als $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ ergibt.

4.1.2 Konvektion

Die Konvektion setzt bewegte Teilchen (Luft, Wasser, u.s.w.) voraus, welche die Wärme transportieren. Beim Energieaustausch zwischen zwei Systemen, die durch eine Systemgrenze getrennt sind, wird diese Wärme häufig durch ein Gas transportiert. Im energieabgebenden Prozessbereich wird die Energie von einem Fluid 1 aufgenommen und über den Wärmestrom an die Systemgrenze transportiert. Die Systemgrenze gibt an das Fluid 2 des energieaufnehmenden Mediums die Energie ab und diese wird wiederum über den Wärmestrom transportiert. Die Konvektion besteht somit aus einem Energie- und Massentransport (Stofftransport).

4.1.2.1 Freie Konvektion

Bei der freien Konvektion findet der Wärmestrom aufgrund von Dichteunterschieden meist als Folge von Temperaturunterschieden statt. Der Wärmeübergangskoeffizient α hängt hauptsächlich von Temperaturdifferenz ab. Eine kalte Oberfläche (ebene Wand) bedingt eine Abwärtsströmung (Bild 8).

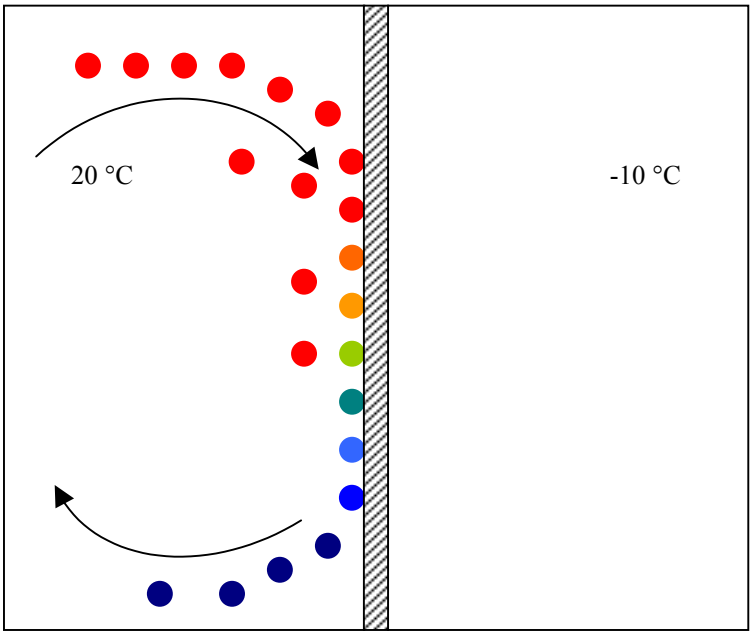

Bild 8 Wärmeübertragung durch freie Konvektion an einer ebenen Wand

4.1.2.2 Erzwungene Konvektion

Unter einer erzwungenen Konvektion versteht man, dass die Einwirkung einer äußeren Kraft, z. B. eine Pumpe oder Ventilator, eine Ortsänderung der Stoffteilchen eines Mediums hervorruft. Hierbei ist der α-Wert von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums und der Beschaffenheit von der Oberfläche abhängig.

4.1.3 Wärmestrahlung

Der Unterschied zwischen der Wärmestrahlung und der konvektiven Wärmeübertragung sowie der Wärmeleitung ist, dass sie nicht an Materie gebunden und somit auch im leeren Raum möglich ist. Hierbei wird Wärme in Form von elektromagnetischen Wellen transportiert, ohne dass ein direkter Kontakt zur Wärmequelle besteht. Wärmestrahlungen sind z. B. die Sonnenstrahlen und die Heizkörperstrahlung.

Die Wärmestrahlung bezeichnet die Abstrahlung von Wärmeenergie. Alle Körper senden entsprechend ihrer Temperatur elektromagnetische Wellen aus, bei Temperaturen unter 600 °C liegt dieses Spektrum im unsichtbaren kurzwelligen Bereich. Systeme verschiedener Temperaturen stehen im Strahlungswechsel miteinander. Wird ein Feststoff, ein Gas oder eine Flüssigkeit mit Wärmestrahlung bestrahlt so dringt sie hindurch, wird reflektiert oder absorbiert.

5 Wärmedämmung

Wärmedämmende Materialien haben die Aufgabe den Wärmeaustausch zwischen einem temperaturempfindlichen Packgut und seiner Umgebung zeitlich zu verzögern. Die Dauer der Wärmeaustauschverzögerung ist jedoch zeitlich begrenzt. Die Eigenschaft Wärme zu leiten, ist durch die Wärmeleitfähigkeit λ gekennzeichnet. Sie ist im Wesentlichen abhängig von:

- der Art, Größe und Anordnung der Poren oder Zellen,
- dem Druck und der Gasart in den Zwischenräumen (Poren),
- der Struktur der festen Bestandteile,
- der Rohdichte und
- der Temperatur.

Allgemein haben Dämmstoffe (Tabelle 3) mit niedriger Dichte ein höheres Wärmeleitvermögen und Dämmstoffe mit hoher Dichte, eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 3 Wärmeleitvermögen von Schaumstoff aus Styropor [11]

Schaumstoffrohdichte in kg/m³	Mittlere Schaumstofftemperatur in °C		
	+ 10 °C	± 0 °C	- 50 °C
	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)		
15	0,037	0,036	0,029
20	0,035	0,033	0,028
25	0,034	0,031	0,027
30	0,033	0,031	0,027

Die isolierende Wirkung eines Dämmstoffes ist im wesentlichen durch seinen Wärmedurchgangskoeffizienten (*U*-Wert), welcher sich aus dem Wärmedurchlasswiderstand und den Wärmeübergangswiderständen zusammensetzt (Gl. 9), beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeübergangskoeffizient sind variable Größen, die von der Temperaturdifferenz (Innen- und Außentemperatur des Systems) und den Luftströmungsverhältnissen der Umgebung abhängen.

Wärmedämmstoffe werden aus sehr unterschiedlichen Materialien hergestellt, denen jedoch eines gemein ist. Durch Lufteinschlüsse im Material haben sie ein großes Volumen bei einem geringen Gewicht. Die in den Hohlräumen eingeschlossene Luft bewirkt die geringe Wärmeleitfähigkeit. Sie untergliedern sich nach ihrem Werkstoff in zwei verschiedene Gruppen.

5.1 Organische Dämmstoffe

5.1.1 Natürlich organische Dämmstoffe

Natürlich organische Wärmedämmmaterialien bestehen aus Kohlenstoffverbindungen wie z. B. Gummi, Zellulosefaserdämmstoffe, Holz, Kork, Kokosfasern und Flachs. Diese Materialien kommen vorwiegend in der Bautechnik zum Einsatz und sind für die vorliegende Arbeit ohne Bedeutung.

5.1.2 Künstlich organische Dämmstoffe

Künstlich organische Dämmstoffe werden aus Mineralöl gewonnen. Diese synthetisch hergestellten Schaumstoffe wie z. B. Polyurethan und Styropor werden sowohl im Bauwesen als auch im Bereich der Lebensmittel(LM)-Verpackungen eingesetzt. Die Hauptvorzüge von Schaumstoffen liegen in ihrem geringen Eigengewicht, dem Stoßdämpfungsvermögen und ihrem thermischen Isolationsverhalten. Neben dem Einsatz als Wärmeschutz-Transport-Verpackung werden sie auch als Verpackungseinsätze (Polstermittel) für konstruktive Schutzverpackungen verwendet. Ebenso wie die oben genannte Wärmedämmstoffgruppe findet diese im Folgenden keine weitere Betrachtung, da sie nicht für den Einsatz an Rollwagen geeignet sind.

5.2 Anorganischen Dämmstoffe

Unter den anorganischen Wärmedämmstoffen, versteht man jene Werkstoffe, die aus den in der Natur vorkommenden Rohstoffen, durch eine Weiterverarbeitung gebildet werden (z. B. Mineralwolle, Steinwolle, Schaumglas). Die Gruppe der anorganischen Dämmstoffe haben ihren Einsatz in der Bautechnik und somit werden sie im Folgenden nicht näher Beschrieben.

Die für die Untersuchung bereitgestellten Wärmedämmsysteme wurden nach den lebensmittelspezifischen Anforderungen (Hygiene, Migration, usw.) und der werkstofftechnischen erforderlichen Eigenschaften wie Festigkeit, Wärmeleitung und der Handhabbarkeit, vom *Institut für BFSV* ausgewählt und bereitgestellt.

An sie werden folgende Anforderungen gestellt:

- niedrige Wärmeleitfähigkeit
- hoher Wärmedurchlasswiderstand
- ausreichende Festigkeit
- geringes Eigengewicht
- Einmalverwendung oder ggf. Mehrwegfähig

5.3 Wärmeschutztechnische Kenngrößen

5.3.1 Berechnung des Wärmestromes und der Wärmestromdichte

Der Wärmestrom $\dot{Q}$ errechnet sich als Quotient aus der transportierten Wärme Q und der Zeit t.

Wärmestrom $\dot{Q}$ in Watt

$$\dot{Q} = Q / t \qquad \text{(Gl. 2)}$$

mit: Q = Wärmemenge
t = Zeit

Der übertragende Wärmestrom beim *konvektiven Wärmeübergang* errechnet sie sich nach der Gleichung:

Wärmestrom $\dot{Q}$ in Watt

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 3)}$$

mit: α = Wärmeübergangskoeffizient
A = Wärmeaustauschfläche
ΔT = Temperaturdifferenz

Hieraus folgt durch Einsetzen von Gl. 3 in Gl. 1 die Wärmestromdichte aus:

Wärmestromdichte $\dot{q}$ in W/m²

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Der übertragende Wärmestrom durch einen ebenflächig begrenzten Körper (*Wärmeleitung*) errechnet sie sich nach der Gleichung:

Wärmestrom $\dot{Q}$ in Watt

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 5)}$$

mit: λ = Wärmeleitfähigkeit
d = Wandstärke
ΔT = Temperaturdifferenz

Durch Einsetzen von Gl. 5 und Gl. 11 in Gl. 1 ergibt sich:

Wärmestromdichte $\dot{q}$ in W/m²

$$\dot{q} = \frac{1}{R_n} \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Der durch Konvektion und Wärmeleitung auf die Ladeeinheit einwirkende Wärmestrom ergibt sich aus folgender Gleichung:

Wärmestrom $\dot{Q}$ in Watt

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 7)}$$

mit : U = Wärmedurchgangskoeffizient
A = Wärmeaustauschfläche
ΔT = Temperaturdifferenz

Durch Einsetzen von Gl. 5 in Gl.1 errechnet sich die Wärmestromdichte als:

Wärmestromdichte $\dot{q}$ in W/m²

$$\dot{q} = U \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 8)}$$

5.3.2 Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangkoeffizient U für eine ebene Wand ist die zentrale Größe für die isolierende Wirkung des Dämmmaterials. Seine Bestimmung ist in der DIN EN ISO 6946 [9] und der DIN EN ISO 7345 [8] geregelt. Er errechnet sich wie folgt:

Wärmedurchgangskoeffizient U in W/(m²K)

$$U = 1 / R_{\mathrm{T}} \qquad \text{(Gl. 9)}$$

wobei der *Wärmedurchgangswiderstand* R_{T} in (m²K)/W einer mehrschichtigen Wand durch

$$R_{\mathrm{T}} = R_{\mathrm{si}} + R_1 + R_2 + \ldots + R_n + R_{\mathrm{se}} \qquad \text{(Gl. 10)}$$

mit: R_{si} = innerer Wärmeübergangswiderstand
R_{se} = äußerer Wärmeübergangswiderstand
R_n = Wärmedurchlasswiderstand der n-Schicht

und der *Wärmedurchlasswiderstand* R_{n} in (m²K)/W der einzelnen Wand durch

$$R_{\mathrm{n}} = d / \lambda \qquad \text{(Gl. 11)}$$

mit: d = Schichtdicke
λ = Wärmeleitfähigkeit

definiert ist.

5.3.3 Wärmeübergangswiderstände

Die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} sind die Kehrwerte der Wärmeübergangskoeffizienten α_{si} und α_{se}. Die Wärmeübergangswiderstände hängen vom Strömungszustand des Fluids an den Wandoberflächen ab [9].

Wärmeübergangswiderstand R_{si} in (m²K)/W

$$R_{si} = 1/\alpha_{si} \qquad \text{(Gl. 12)}$$

Wärmeübergangswiderstand R_{se} in (m²K)/W

$$R_{se} = 1/\alpha_{se} \qquad \text{(Gl.13)}$$

5.3.4 Wärmeaustauschfläche

Die Wärmeaustauschfläche ist die Ebene in m² über die ein Wärmestrom auf ein System einströmt. An den Bezugsflächen (Bild 9) des Dämmsystems sind unterschiedliche Strömungen vorhanden. Für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs werden die Austauschflächen in Seitenflächen und Kopffläche unterteilt. Die Berechnung des Wärmestromes nach Gl. 7 berücksichtigt, dass die Wärmeleitung beginnend von der größeren Fläche A_{se} über die Wanddicke d auf die kleinere Fläche A_{si} bezogen ist. Hierbei wird die mittlere Wandfläche A_m angenommen.

$$A_m = \frac{A_{se} + A_{si}}{2} \qquad \text{(Gl. 14)}$$

Da die Wanddicke der Wärmedämmung jedoch sehr gering ist, kann die Berechnung der mittleren Übergangsfläche vernachlässigt und die äußere Oberfläche des Systems als Wärmeaustauschfläche festgelegt werden.

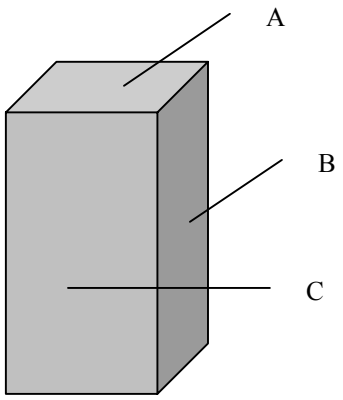

Bild 9 Wärmeaustauschflächen der Dämmung

mit: A = Kopffläche
B = Seitenfläche lang
C = Seitenfläche kurz

Die Flächen B und C werden aufgrund ihres geringen Flächenunterschieds (s. Abmessung Rollwagen) und unter der Annahme der gleichen Strömungsverhältnisse der Luft an den Oberflächen als gleichbedeutend angesehen.

5.3.5 Temperaturdifferenz

Bei der Wärmeübertragung wird für den jeweiligen Vorgang die Temperaturdifferenz wie folgt bestimmt. In Bild 10 sind die Messpunkte der lokalen Temperatur dargestellt. Für die kommenden Berechnungen werden die Messwerte der Messstellen T_0 bis T_4 bei einer Kerntemperatur des Packgutes von -15 °C (s. zulässige Produktgrenztemperatur nach TLMV [4]) eingesetzt.

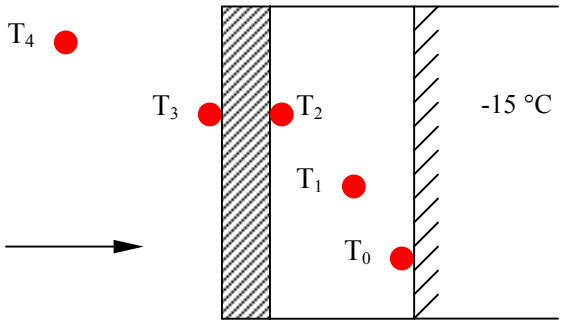

Bild 10 Temperaturmesspunkte

Konvektiver Wärmeübergang:
Beim äußeren konvektiven Wärmeübergang ist sie definiert durch die Differenz zwischen der Umgebungstemperatur T_4 und der Temperatur der äußeren Wärmeaustauschoberfläche T_3 der Dämmung. Die Innere errechnet sich aus der Differenz von $T_2 - T_1$.

Wärmeleitung:
Die Temperaturdifferenz für die Berechnung des Wärmeleitvermögens der Wärmedämmung ergibt sich aus der Differenz der äußeren und inneren Wandoberflächentemperatur ($T_3 - T_2$).

Wärmedurchgang:
Die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmedämmung ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur T_4 und der Lufttemperatur T_1 unter der Dämmung. Für die Berechnung des Wärmedurchgangs des gesamten Systems (Systemgrenze ist die einzelne Packung) wird die Temperaturdifferenz der Umgebungstemperatur T_4 und der Packungsoberfläche T_0 eingesetzt.

6 Experimenteller Teil

6.1 Bestimmung der Isoliereigenschaft eines Wärmedämmsystems

Zur Bestimmung des Isolierverhaltens eines Wärmedämmsystems sind folgende Angaben von Bedeutung:

1. die Wandstärke
2. die Wärmeübergangswiderstände
3. der Wärmedurchlasswiderstand

Mit diesen Kennwerten lässt sich der Wärmedurchgangskoeffizient nach Gl. 9 berechnen.
Die messtechnische Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände ist sehr umfangreich.
Sie lassen sich jedoch durch Messen der Wärmestromdichte und durch Einsetzen dieser in Gl. 4 und Gl. 12/13 errechnen.

Im Folgenden werden diese Daten messtechnisch an den drei Wärmedämmsystemen ermittelt.

6.1.1 Durchführung

Die Bestimmung der Isoliereigenschaft der Wärmedämmung erfolgt durch die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Um diesen messtechnisch zu prüfen, wird das Dämmsystem mit Temperatur- und Feuchte-Sensoren an den in Bild 12 benannten Messpunkten versehen.
Vor der Messung werden die Thermoelemente auf die Temperatur der Probe (Dämmmaterial/ TK-Produkt) herabgekühlt. Dies erfolgt durch das Anbringen der Thermoelemente an den genannten Messstellen und der anschließenden Einlagerung in den Kühlraum (-24 °C Lufttemperatur) für mindestens 18 Stunden.

Für die Untersuchungen ist der Rollwagen mit einem sortenreinen TK-Produkt bestückt (Bild 13). Die gewählte Anordnung stellt den Idealfall für die Bestückung eines Rollwagens dar. Hierbei entstehen so gut wie keine Lufträume zwischen den Packstücken und die Wärmeaustauschfläche der TK-Produkte ist so gering wie möglich.

Auf Grund der verschiedenen Strömungsverhältnisse der Luftschichten an der Oberfläche der Dämmungen werden die Untersuchungen je einmal in Richtung eines vertikalen (Fläche A) und eines horizontalen (Fläche B/C) Wärmestromes durchgeführt. Für die Berechnung des Wärmedurchgangs nach Gl. 8 wird der gemittelte $\overline{U}$ -Wert eingesetzt. Er berechnet sich wie folgt:

$$\overline{U} = \frac{U_{\mathrm{v}} \cdot A_{\mathrm{v}} + U_{\mathrm{h}} \cdot A_{\mathrm{h}}}{A_{\mathrm{v}} + A_{\mathrm{h}}} \qquad \text{(Gl. 15)}$$

Für die Untersuchung wird ein Standort (Bild 11) gewählt, der den in der Praxis üblichen Beschaffenheit entspricht. Es handelt sich hierbei um den Wareneingangsbreich einer Betriebsküche. Die durch den Standort bedingete Sonneneinstrahlung auf die Untersuchungsobjekte konnte nicht verhindert werden.

Bild 11 Standort der Untersuchungen

6.1.2 Anordnung der Sensoren

In Bild 12 ist die Anordnung der Sensoren für die Aufnahme der Daten dargestellt.

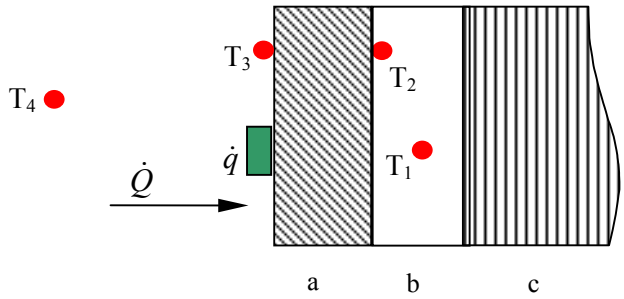

Bild 12 Messpunkte der Temperatur- und Feuchtesensoren & des Wärmestromsensors

mit:	a	=	Wärmedämmsystem
	b	=	Luftschicht
	c	=	TK-Packung
	T_1	=	Lufttemperatur und rel. Feuchte unter der Thermohaube (LE)[4]
	T_2	=	Wandtemperatur der Thermohaube innen
	T_3	=	Wandtemperatur der Thermohaube außen
	T_4	=	Lufttemperatur und rel. Feuchte der Umgebung
	$\dot{q}$	=	Wärmestromsensor (horizontal/vertikal)

6.1.3 Ablauf

In Versuch 1 wird der auf die Wärmeaustauschfläche A wirkende Wärmestrom (vertikal) und der sich hierbei ergebende Wärmedurchgangskoeffizient (U_v) ermittelt. Analog erfolgt im Versuch 2 die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U_h), welcher sich aus dem auf die Wärmeaustauschfläche B wirkenden Wärmestrom (horizontal) ergibt. Die Wärmeaustauschfläche C wird der Fläche B gleichgesetzt. Um eine Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur und der Lufttemperatur unter der Thermohaube zu erreichen, wird bei Versuch 1 der Rollwagen mit TK-Kräutern und bei Versuch 2 mit TK-Spinat bestückt (Bild 13).

[4] LE: Ist die Kurzbezeichnung für Ladeeinheit. In dieser Arbeit bezeichnet sie die Position des Sensors. Die Messkurven mit dem Hinweis (LE) sind unter der Wärmedämmung (Dämmhaube) aufgezeichnet worden.

Bild 13 Anordnung der TK-Produkte auf dem Rollwagen

Bei dieser Anordnung (Bild 13) ergibt sich ein Luftraum unter der Bezugsfläche A zwischen den Packungen und der Wärmedämmung von 5 cm und ein Luftraum unter der Bezugsfläche B von 1,5 cm.

Die Ermittlung der spezifischen Dämmungskennwerte der Dämmsysteme erfolgt gleichzeitig mit der Messung von Kerntemperaturen der verschiedenen TK-Proben. Zur besseren Lesbarkeit der Diagramme sind die Kerntemperatur-/Zeitverläufe der TK-Waren und die zur *U*-Wert Bestimmung notwendigen Messdaten der Dämmung getrennt voneinander dargestellt. Der Temperaturverlauf derjenigen Messstelle (Kerntemperaturen der TK-Produte), die zuerst die Grenztemperatur erreicht, liefert die Zeit für die rechnerische Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten.

6.2 Wärmedämmsystem Nr. 1

Das Wärmedämmsystem Nr. 1 ist eine Thermohaube der Firma *PLANOTEX* Kunststoff GmbH & Co. KG. Dieses System (Bild 14) ist eine aluminiumbedampfte, kaschierte Luftpolsterfolie mit einer Materialstärke von 0,003 m**.** Sie ist einteilig (Volumenreduktion durch Zusammenfalten), hat ein geringes Eigengewicht (1,5 kg), was ein leichtes Handling unterstützt, und wird vom Hersteller mit einem Reflektionsvermögen von Infrarotstrahlung mit 90 % angegeben.

Dieses Modell der Wärmedämmung ist für Europaletten, Düsseldorfer-Paletten, Einwegpaletten und Kommissionier-Rollwagen einsetzbar. Die Thermohaube wird manuell an der jeweiligen Ladeeinheit angebracht und durch Klettverschlüsse fixiert. Sie ist im Mehrweg einsetzbar.

Bild 14 Wärmedämmung Nr. 1

Die vorliegende Ausführung (Bild 14) umschließt den Rollwagen bis auf die Bodenfläche vollflächig.

Beschreibung der Ausführung:

1.	Abmessungen der Thermohaube (L x B x H)	=	0,75 m x 0,81 m x 1,35 m
2.	Wärmeaustauschfläche A	=	0,61 m²
3.	Wärmeaustauschfläche B	=	1,09 m²
4.	Wärmeaustauschfläche C	=	1,01 m²
5.	Wandstärke	=	0,003 m

Die Bestimmung der Wärmeleitung bei der Dämmhaube erfolgt durch die Aufnahme der Oberflächentemperaturen der Innen- und der Außenseite und der Erfassung des Wärmestroms.

6.2.1 Versuch 1

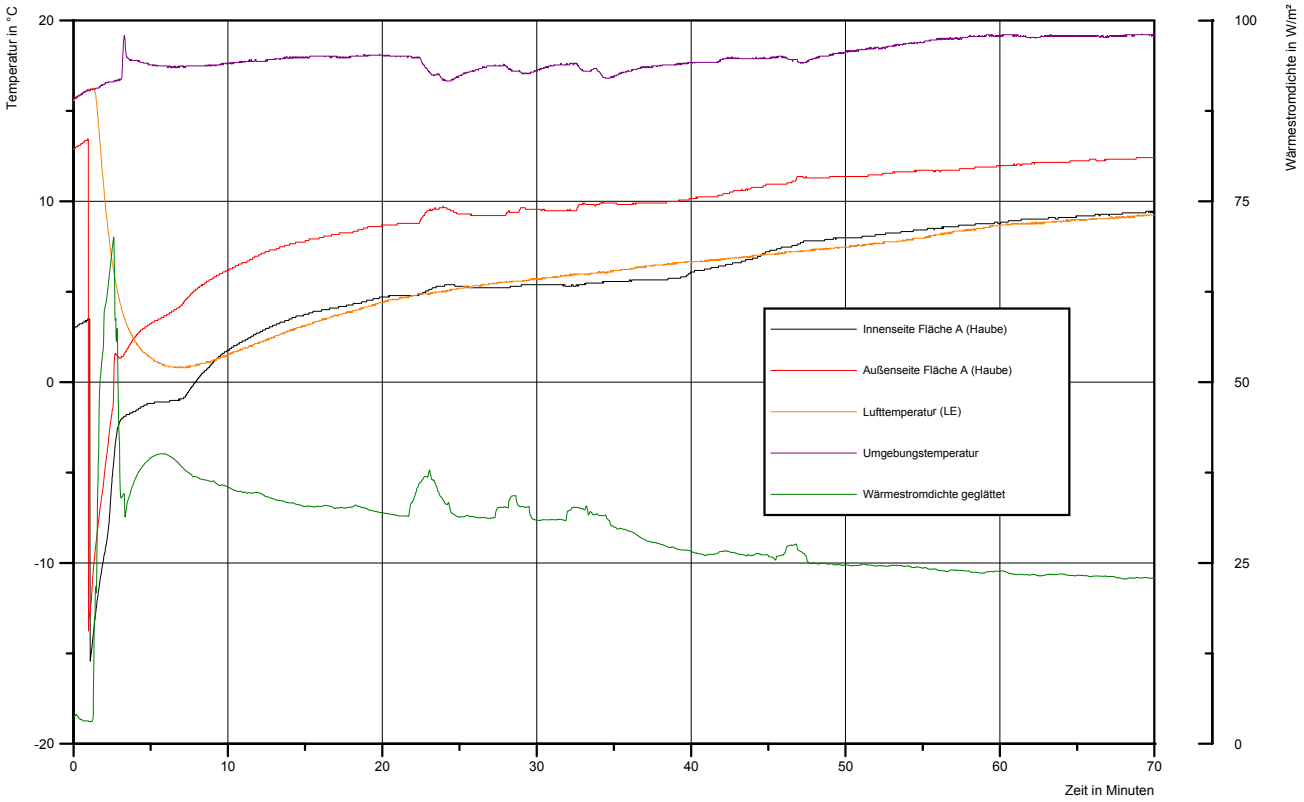

Bild 15 Versuch 1: Wärmedämmung Nr. 1

In Bild 15 sind die Temperaturverläufe an den benannten Messpunkten (Legende) abgebildet. Die Schwankungen der Umgebungstemperatur ergeben sich durch den Standort (Bild 11) des Messaufbaus. Er entspricht den in der Praxis üblichen Wareneingangsbereichen des Handels. Im Verlauf der Untersuchungen wurde in unregelmäßigen Abständen die Tür zum Außengelände geöffnet, so das regelmäßig kältere Luft von Draußen einströmen konnte.

Für die Berechnungen von Versuch 1 werden die Messwerte bei 14 Minuten festgelegt (s. Versuch 12). Aus den Messdaten lässt sich der U_v-Wert wie folgt bestimmen.

<u>Berechnung des vertikalen Wärmedurchgangskoeffizienten</u>

Durch Gl. 8 ergibt dann ein U_v-Wert von:

$$U_v = \frac{\dot{q}_v}{(T_4 - T_1)}$$

$$U_v = \frac{33\ \mathrm{W/m^2}}{(291{,}05\,\mathrm{K} - 275{,}95\,\mathrm{K})}$$

$$U_v = \underline{\underline{2{,}2\ \mathrm{W/m^2}}}$$

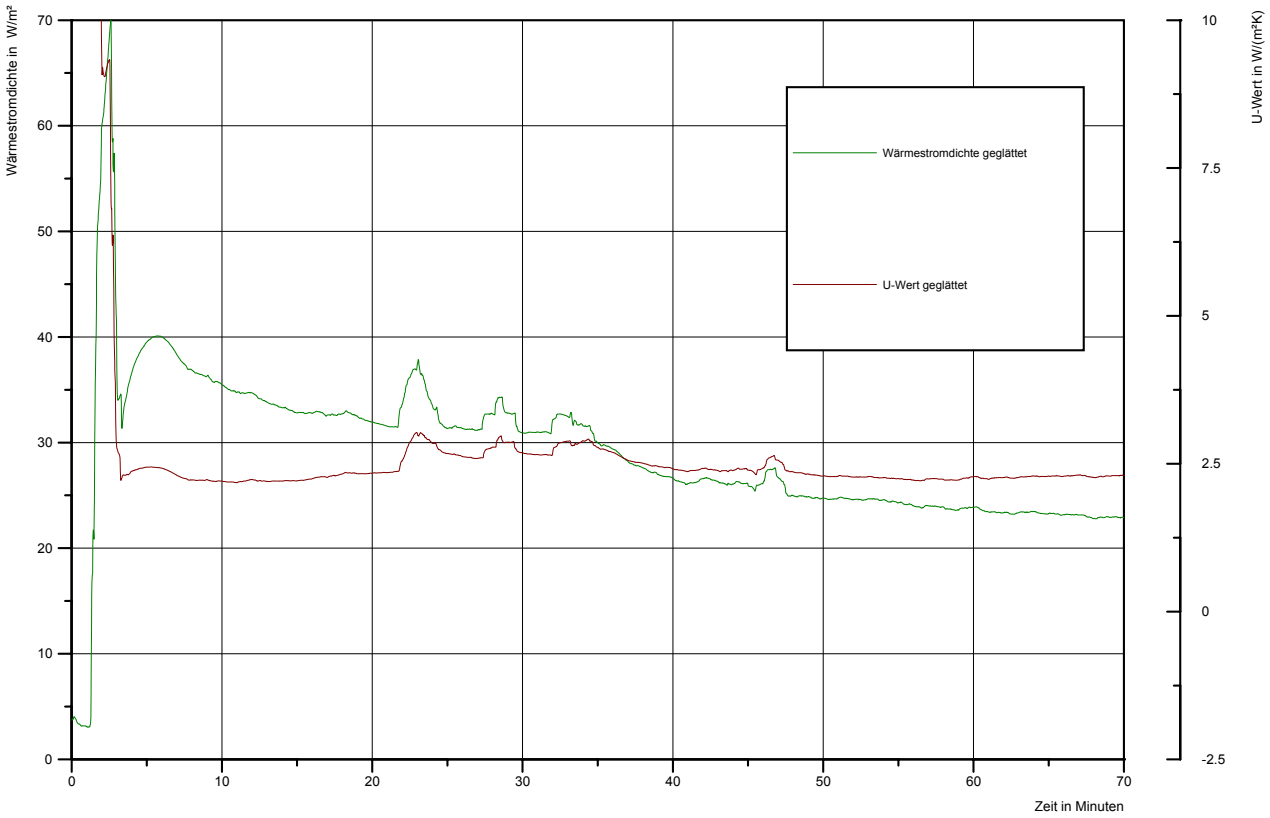

Bild 16 Versuch 1: U_v-Wert

Bild 16 zeigt den Verlauf des U_v –Wert in Zusammenhang mit der gemessenen Wärmestromdichte.

Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Durch Einsetzen in Gl. 4 ergeben sich für den konvektiven Wärmeübergang die Wärmeübergangskoeffizienten α_{si} und α_{se}.

$$\dot{q}_v = \alpha_{se} \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\alpha_{se} = \frac{33\ \mathrm{W/m^2}}{(291{,}05\,\mathrm{K} - 280{,}75\,\mathrm{K})}$$

$$\alpha_{se} = \underline{\underline{3{,}2\ \mathrm{W/(m^2K)}}}$$

$$\dot{q}_v = \alpha_{si} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\alpha_{si} = \frac{33\ \mathrm{W/m^2}}{(276{,}55\,\mathrm{K} - 275{,}95\,\mathrm{K})}$$

$$\alpha_{si} = \underline{\underline{55\,\mathrm{W/(m^2K)}}}$$

Die ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten decken sich mit den Literaturangaben [12] für die Strömungsverhältnisse von Luft.

Berechnung der Wärmeübergangswiderstände

Aus Gl. 12 und 13 folgt für:

$$R_{si} = 1/55\,\mathrm{W/(m^2K)}$$
$$R_{si} = \underline{\underline{0{,}018\,(\mathrm{m^2K})/\mathrm{W}}}$$

$$R_{se} = 1/3{,}2\,\mathrm{W/(m^2K)}$$
$$R_{se} = \underline{\underline{0{,}313\,(\mathrm{m^2K})/\mathrm{W}}}$$

Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes

Nach Gl. 6 ergibt sich der horizontale Wärmedurchlasswiderstand R_n mit:

$$\dot{q}_v = \frac{1}{R_n} \cdot (T_3 - T_2)$$

$$R_{\mathrm{Dämmung1_v}} = \frac{(280{,}75\,\mathrm{K} - 276{,}55\,\mathrm{K})}{33\,\mathrm{W/(m^2K)}}$$

$$R_{\mathrm{Dämmung1_v}} = \underline{\underline{0{,}13\,(\mathrm{m^2K})/\mathrm{W}}}$$

6.2.2 Versuch 2

Die Untersuchung und Berechnung des U_h-Wert der Dämmung Nr. 1 erfolgt analog zu Versuch 1.

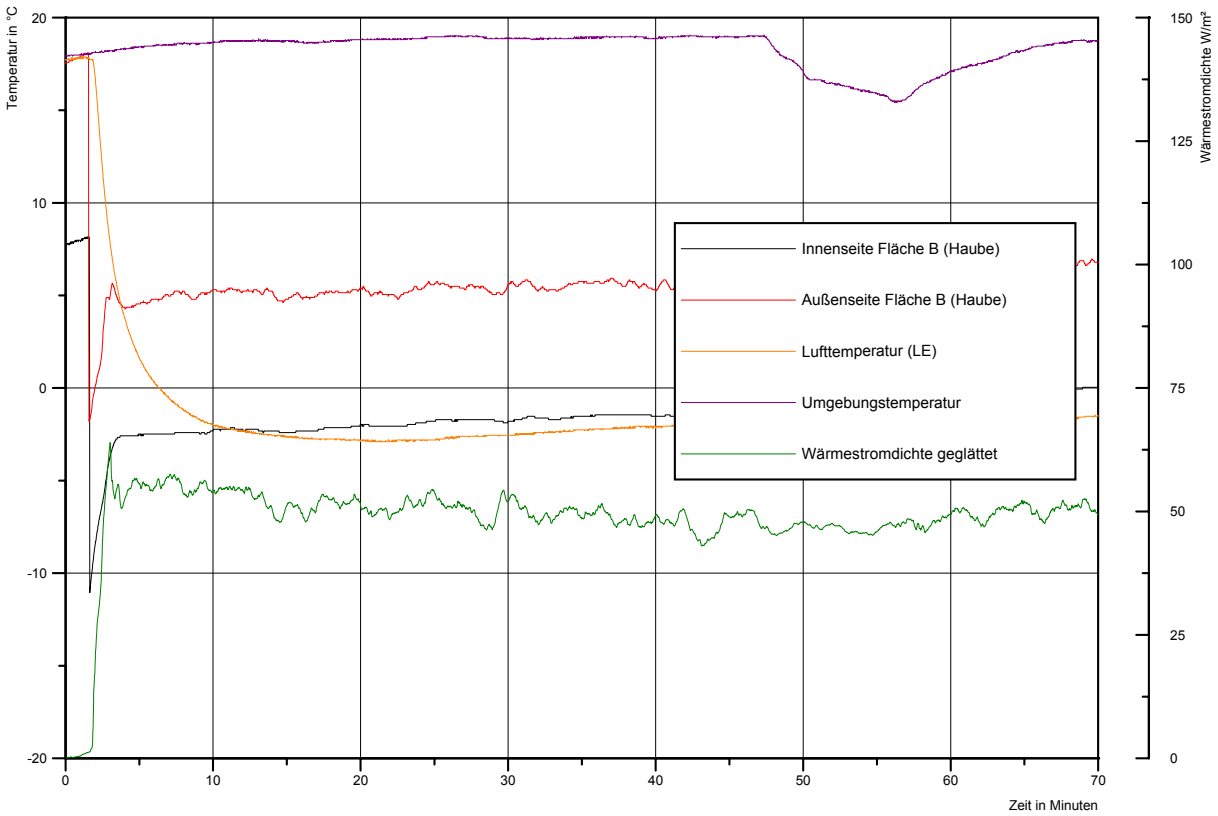

Bild 17 Versuch 2: Wärmedämmung Nr. 1

Bild 17 zeigt die Temperaturverläufe an den genannten Messpunkten. Für die Berechnung werden die Messwerte bei 30 Minuten verwendet (s. Versuch 8). Aus ihnen lässt sich der U_h-Wert wie folgt bestimmen.

<u>Berechnung des horizontalen Wärmedurchgangskoeffizienten</u>

Aus Gl. 8 errechnet sich ein U_h-Wert von:

$$U_h = \frac{\dot{q}_h}{(T_4 - T_1)}$$

$$U_h = \frac{52\,\mathrm{W/m^2}}{(292{,}05\,\mathrm{K} - 270{,}45\,\mathrm{K})}$$

$$U_h = \underline{\underline{2{,}4\,\mathrm{W/(m^2K)}}}$$

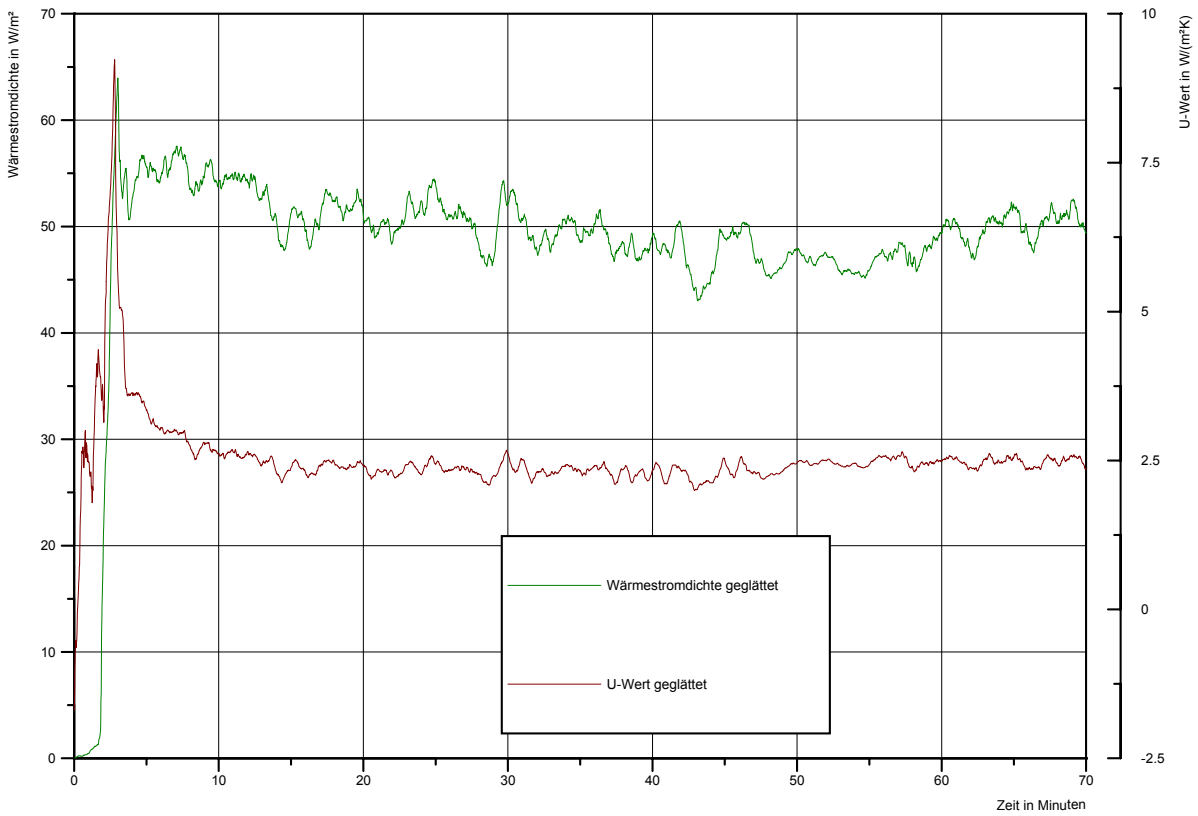

Bild 18 Versuch 2: U_h-Wert

Bild 18 zeigt den Verlauf der Wärmestromdichte und den horizontalen Wärmedurchgangskoeffizienten der Dämmung Nr. 2.

<u>Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten</u>

Für den konvektiven Wärmeübergang ergeben sich die Wärmeübergangskoeffizienten α_{si} und α_{se} aus Gl. 4 mit:

$$\dot{q}_h = \alpha_{se} \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\alpha_{se} = \frac{52\ \text{W/m}^2}{(292{,}15\,\text{K} - 278{,}25\,\text{K})}$$

$$\alpha_{se} = \underline{\underline{3{,}7\ \text{W/(m}^2\text{K)}}}$$

$$\dot{q}_{\mathrm{h}} = \alpha_{\mathrm{si}} / (T_2 - T_1)$$

$$\alpha_{\mathrm{si}} = \frac{52\,\mathrm{W/m^2}}{(271{,}35\,\mathrm{K} - 270{,}45\,\mathrm{K})}$$

$$\alpha_{\mathrm{si}} = \underline{\underline{57{,}8\,\mathrm{W/(m^2K)}}}$$

Der Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten über den gesamten Zeitraum ist im Anhang A dargestellt.

<u>Berechnung der Wärmeübergangswiderstände</u>

Aus Gl. 12 und 13 folgt für:

$$R_{\mathrm{si}} = 1/57{,}8\,\mathrm{W/(m^2K)}$$
$$R_{\mathrm{si}} = \underline{\underline{0{,}017\,\mathrm{(m^2K)/W}}}$$

$$R_{\mathrm{se}} = 1/3{,}8\,\mathrm{W/(m^2K)}$$
$$R_{\mathrm{se}} = \underline{\underline{0{,}263\,\mathrm{(m^2K)/W}}}$$

<u>Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes</u>

Für den Wärmedurchlasswiderstand im Dämmmaterial ergibt sich nach Gl. 6 ein R_n mit:

$$\dot{q}_{\mathrm{h}} = \frac{1}{R_{\mathrm{n}}}(T_3 - T_2)$$

$$R_{\mathrm{Dämmung1_h}} = \frac{(278{,}15\,\mathrm{K} - 271{,}36\,\mathrm{K})}{52\,\mathrm{W/(m^2K)}}$$

$$R_{\mathrm{Dämmung1_h}} = \underline{\underline{0{,}13\,\mathrm{(m^2K)/W}}}$$

Bezogen auf alle Wärmeübergangsflächen ergibt sich für die Wärmedämmung Nr.1 nach Gl. 15 ein durchschnittlicher $\overline{U}_1$-Wert von:

$$\overline{U}_1 = \frac{2{,}2\ \mathrm{W/(m^2K)} \cdot 4{,}2\ \mathrm{m^2} + 2{,}4\ \mathrm{W/(m^2K)} \cdot 0{,}61\ \mathrm{m^2}}{4{,}81\ \mathrm{m^2}}$$

$$\overline{U}_1 = \underline{\underline{2{,}23\ \mathrm{W/(m^2K)}}}$$

6.3 Wärmedämmsystem Nr. 2

Das Wärmedämmsystem Nr. 2 ist ebenfalls aus dem Hause der Firma *PLANOTEX* Kunststoff GmbH & Co. KG. Diese Ausführung (Bild 19) ist eine mit Polyethylen-Bändchen-Gewebefolie beidseitig kaschierte Luftpolsterfolie mit der Materialstärke von 0,003 m. Ebenso wie das Modell Nr. 1 ist sie einteilig und somit ermöglicht die Volumenreduktion durch Zusammenfalten eine leichte Handhabung für das Personal. Dieses Modell der Wärmedämmung ist an Europaletten, Düsseldorfer-Paletten, Einwegpaletten und Rollwagen anwendbar. Die Thermohaube wird manuell an der jeweiligen Ladungseinheit angebracht und durch Klettverschlüsse fixiert. Sie ist im Mehrwegsystem einsetzbar.

Bild 19 Wärmedämmung Nr. 2

Beschreibung der Ausführung:

1.	Abmessungen der Thermohaube (L x B x H)	=	0,75 m x 0,81 m x 1,35 m
2.	Wärmeaustauschfläche A	=	0,61 m²
3.	Wärmeaustauschfläche B	=	1,09 m²
4.	Wärmeaustauschfläche C	=	1,01 m²
5.	Wandstärke	=	0,003 m²
6.	Eigengewicht	=	2,5 kg

Die Rahmenbedingungen für die Ermittlung der Wärmeschutzkennwerte der Wärmedämmung Nr. 2 entsprechen denen aus Versuch 1 und 2. Die Bestimmung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt nach dem oben beschriebenen Weg.

6.3.1 Versuch 3

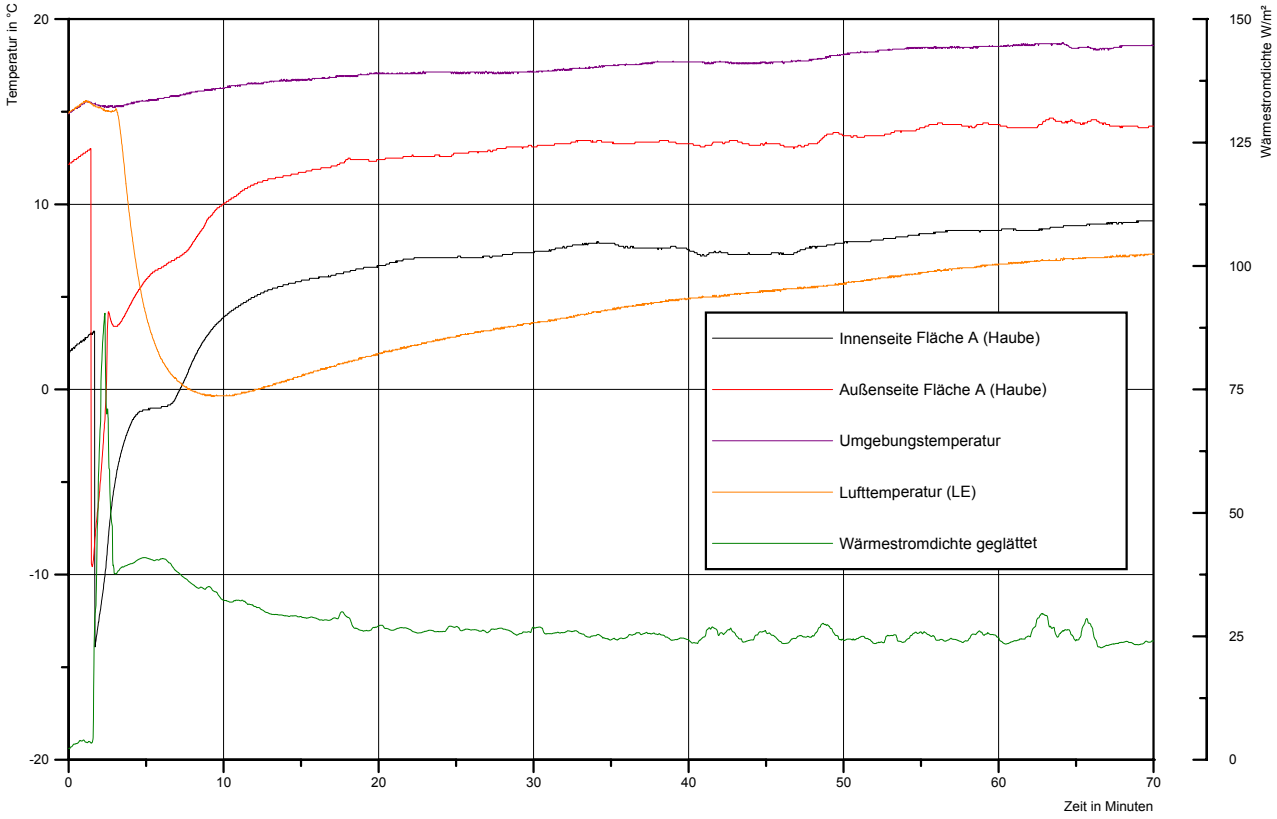

Bild 20 Versuch 3: Wärmedämmung Nr. 2

Bild 20 zeigt die Temperaturverläufe an den genannten Messpunkten. Folgende Messwerte ergaben sich bei der Untersuchung des Wärmedämmsystems Nr. 2 beim Erreichen der Grenztemperatur des TK-Produktes (Messwerte bei 18 Minuten, s. Versuch 13).

Wärmestromdichte	$\dot{q}$	=	30 W/m²
Lufttemperatur unter der Thermohaube	T_1	=	274,55 K
Wandtemperatur der Thermohaube (innen)	T_2	=	279,45 K
Wandtemperatur der Thermohaube (außen)	T_3	=	285,55 K
Lufttemperatur der Umgebung	T_4	=	290,05 K
U-Wert	U_v	=	1,9 W/(m²K)

Wärmeübergangskoeffizienten	α_{se}	=	6,7 W/(m²K)
	α_{si}	=	6,1 W/(m²K)
Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,149 (m²K)/W
	R_{si}	=	0,164 (m²K)/W
Wärmedurchlasswiderstand	$R_{\text{Dämmung } 2_v}$	=	0,20 (m²K)/W

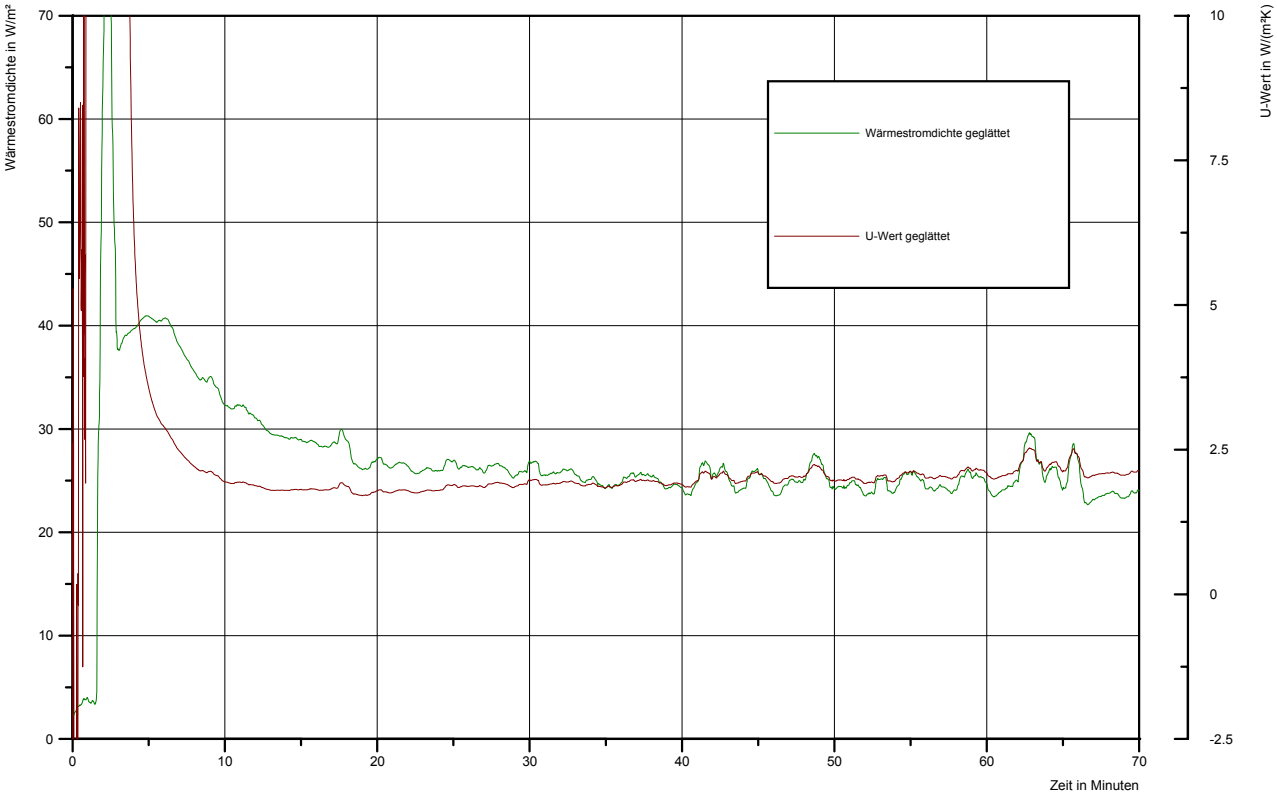

Bild 21 Versuch 3: U_v-Wert

In Bild 21 zeigt den U_v-Wert Verlauf der Wärmedämmung Nr. 2. Der sprunghafte Verlauf des U_v-Wertes ist z. B. auf die Luftzirkulation der Umgebung (Raum) zurück zu führen.

6.3.2 Versuch 4

In Versuch 4 wird der Wärmedurchgangskoeffizient an der Wärmeaustauschfläche B bestimmt. Der Rollwagen ist mit TK-Spinat befüllt.

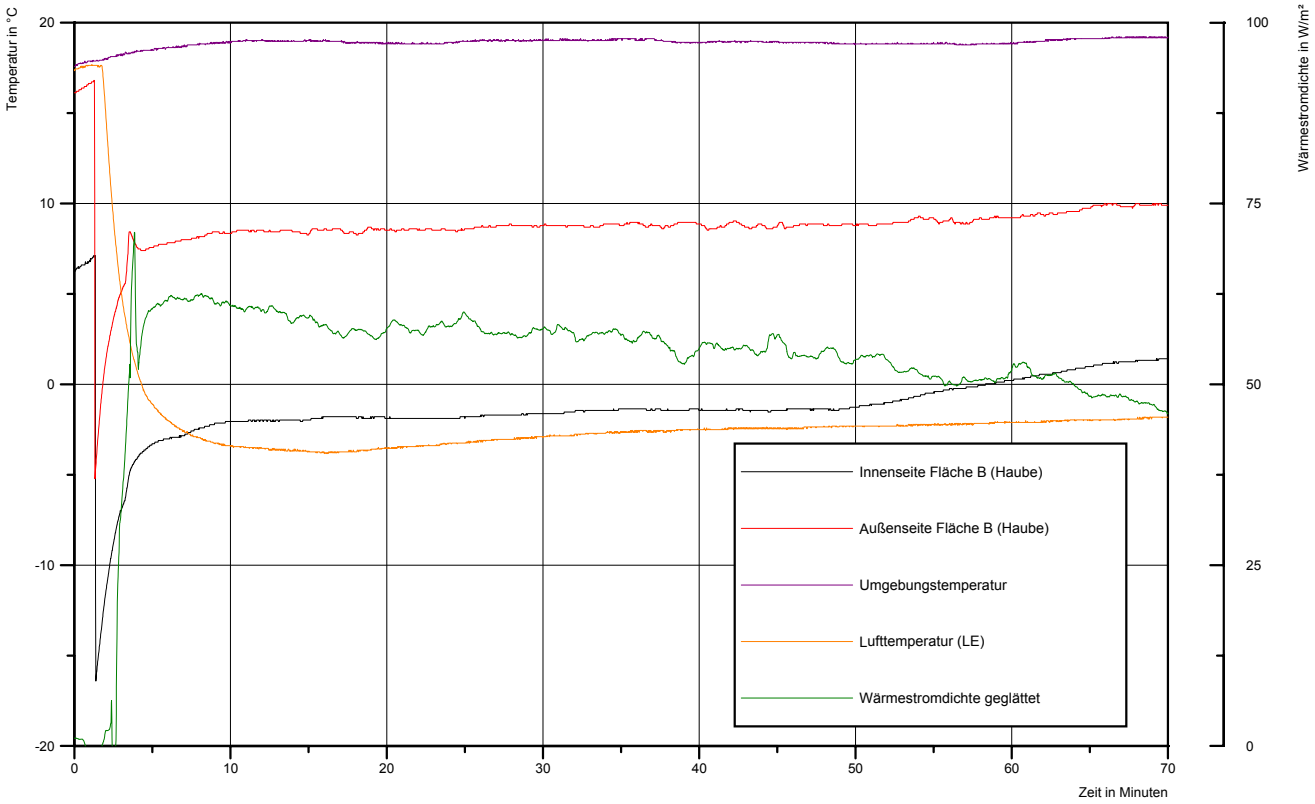

Bild 22 Versuch 4: Wärmedämmung Nr. 2

Bild 22 zeigt die Temperaturverläufe an den genannten Messpunkten. Für die Berechnung des U_h-Wert werden die Messwerte bei 27 Minuten verwendet (s. Versuch 9 Spinat mit Dämmung Nr. 2). Folgende Messwerte ergaben sich bei der Untersuchung des Wärmedämmsystems

Nr. 2 bei einem auf die Bezugsfläche B einströmenden $\dot{Q}$.

Wärmestromdichte	$\dot{q}$	=	60 W/m²
Lufttemperatur unter der Thermohaube	T_1	=	270,06 K
Wandtemperatur der Thermohaube (innen)	T_2	=	271,45 K
Wandtemperatur der Thermohaube (außen)	T_3	=	281,92 K
Lufttemperatur der Umgebung	T_4	=	292,15 K
U-Wert	U_h	=	2,7 W/(m²K)
Wärmeübergangskoeffizienten	α_{se}	=	5,9 W/(m²K)
	α_{si}	=	43,2 W/(m²K)

Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,169 (m²K)/W
	R_{si}	=	0,023 (m²K)/W
Wärmedurchlasswiderstand	$R_{\text{Dämmung } 2_h}$	=	0,18 (m²K)/W

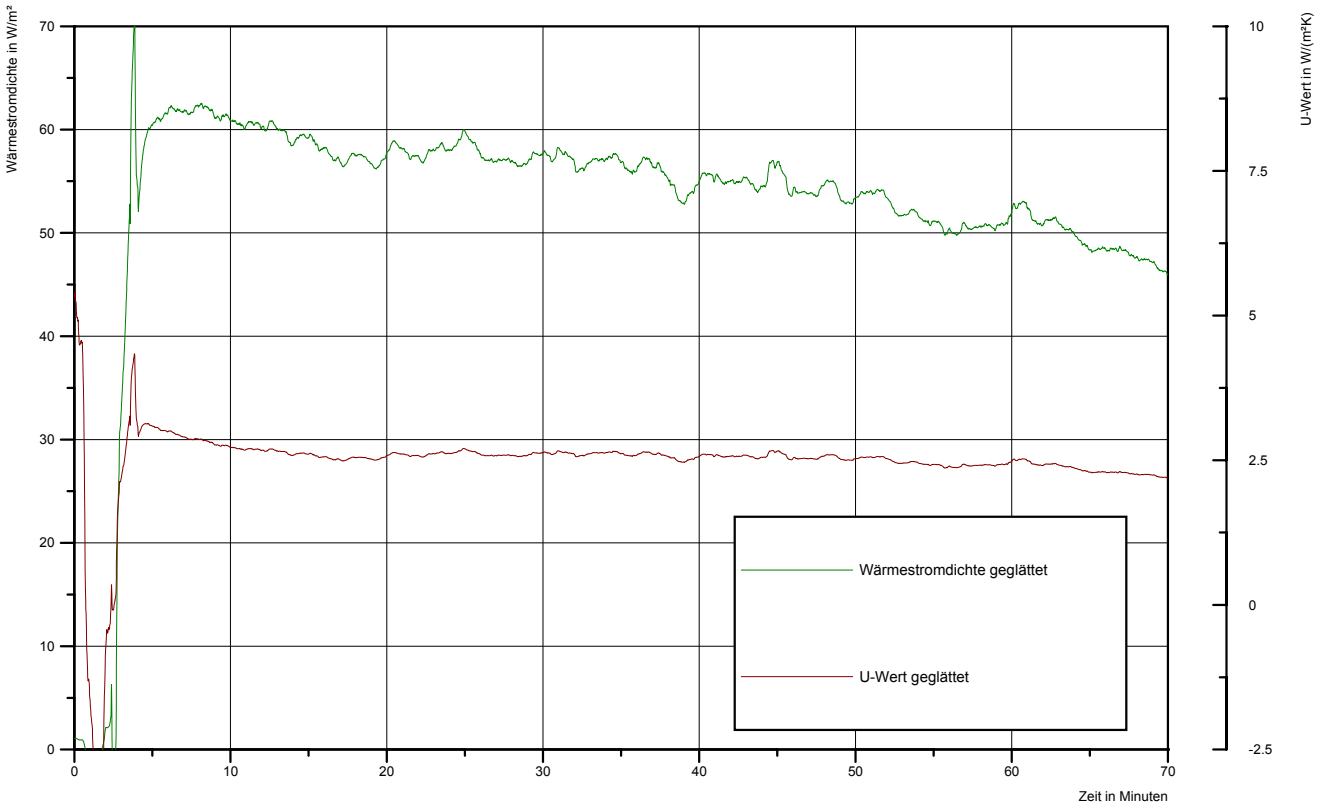

Bild 23 Versuch 4: U_h-Wert

Aus den messtechnisch erfassten Temperaturverläufen und der Wärmestromdichte ergibt sich der in Bild 23 dargestellte Lauf des horizontalen Wärmedurchgangskoeffizienten.

Bezogen auf alle Wärmeübergangsflächen ergibt sich für die Wärmedämmung Nr. 2 nach Gl. 15 ein durchschnittlicher $\overline{U}_2$-Wert von:

$$\overline{U}_2 = \frac{2{,}7\ \text{W/(m²K)} \cdot 4{,}2\ \text{m²} + 1{,}9\ \text{W/(m²K)} \cdot 0{,}61\ \text{m²}}{4{,}81\ \text{m²}}$$

$$\overline{U}_2 = \underline{\underline{2{,}59\ \text{W/(m²K)}}}$$

6.4 Wärmedämmsystem Nr. 3

Von der *BEUMER* Maschinenfabrik GmbH & Co. KG in Beckum wird eine PE-Stretch-Folienhaube als Untersuchungsobjekt (Bild 24) bereitgestellt. Neben der Eignung für die Sicherung palettierter Ladeeinheiten ist sie ebenso an Kommissionier-Rollwagen anwendbar. Die Stretchhaube hat eine Materialdicke von 120 µm. Im Gegensatz zu den vorangegangen Wärmedämmsystemen ist sie transparent und lediglich zur Einmalverwendung nutzbar.

Bild 24 Wärmedämmsystem Nr. 3

An diesem Wärmedämmsystem wird vornehmlich der Einfluss der isolierenden Luftschicht zwischen Haube und Packstück untersucht. Es gibt Überlegungen, die bei einem definierten Luftraum, welcher durch das Anbringen von Kantenschonern an einer Ladeeinheit (Palette + Packstücke), durch Variationen in der Materialdicke der Kantenschoner, die isolierende Wirkung dieses Dämmsystems verbessern sollen. Der Einsatz von Kantenschonern wird in dieser Arbeit nicht beleuchtet, da durch die Konstruktion des Rollwagens eine mindest Luftschicht vorgegeben ist (siehe Punkt 6.1.3; Bild 13).
Die Seitenansicht (Bild 24) zeigt die vorhandene Luftschicht.

Beschreibung der Ausführung:

1.	Abmessungen der Thermohaube (L x B x H)	=	0,75 m x 0,81 m x 1,35 m
2.	Wärmeaustauschfläche A	=	0,61 m²
3.	Wärmeaustauschfläche B	=	1,09 m²
4.	Wärmeaustauschfläche C	=	1,01 m²
5.	Wandstärke	=	120 µm
6.	Eigengewicht	=	0,5 kg

Entsprechend der vorangegangenen Methodik wird die isolierende Wirkung dieses Wärmedämmsystems ermittelt.

6.4.1 Versuch 5

Für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten an der Bezugsfläche A wurden die in Bild 25 gezeigten Kurvenverläufe aufgenommen.

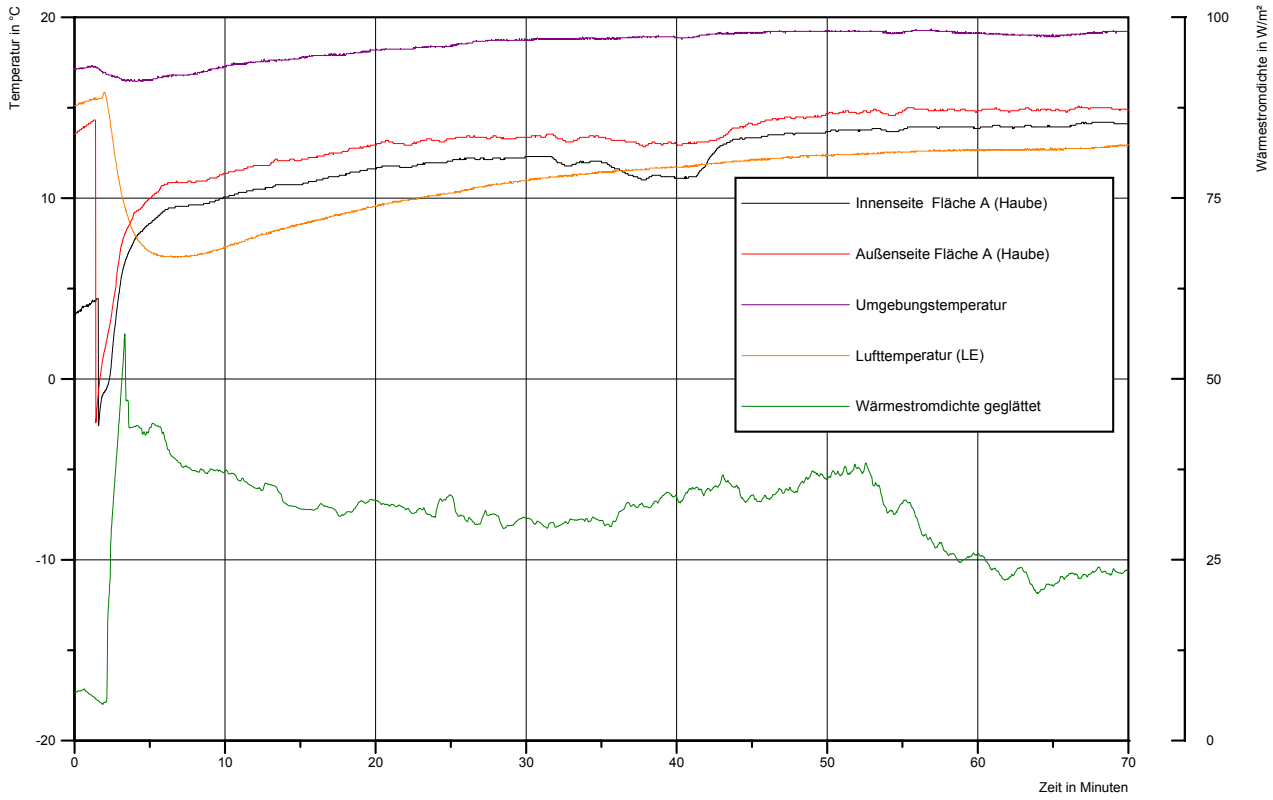

Bild 25 Versuch 5: Wärmedämmung Nr. 3

Für die Berechnung des U_v-Wertes werden die Messwerte bei 15 Minuten (s. Versuch 14) angesetzt.

Wärmestromdichte	$\dot{q}$	=	32 W/m²
Lufttemperatur unter der Thermohaube	T_1	=	281,65 K
Wandtemperatur der Thermohaube (innen)	T_2	=	283,95 K
Wandtemperatur der Thermohaube (außen)	T_3	=	285,15 K
Lufttemperatur der Umgebung	T_4	=	290,85 K
U-Wert	U_v	=	3,5 W/(m²K)
Wärmeübergangskoeffizienten	α_{se}	=	5,6 W/(m²K)
	α_{si}	=	13,9 W/(m²K)
Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,179 (mK)/W
	R_{si}	=	0,072 (mK)/W
Wärmedurchlasswiderstand	$R_{Dämmung\,3_v}$	=	0,04 (m²K)/W

Für den vertikalen Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich folgender Kurvenverlauf (Bild 26).

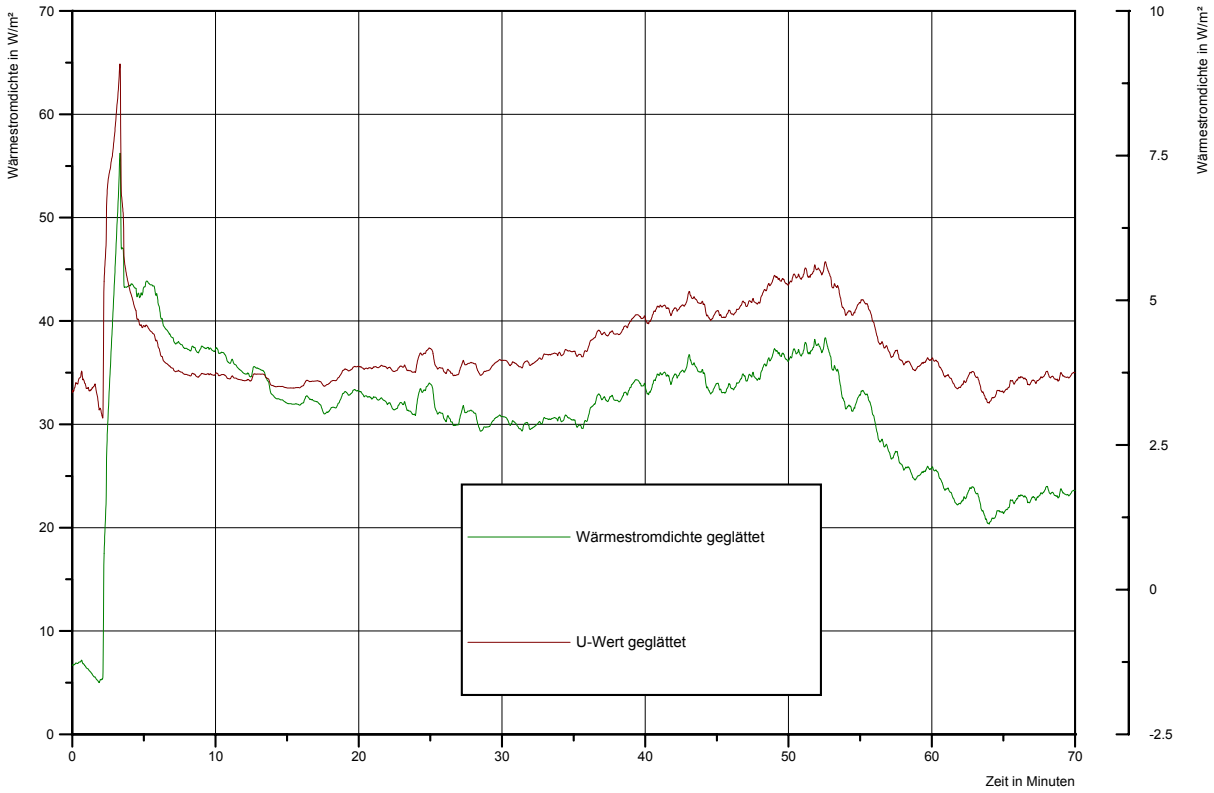

Bild 26 Versuch 5: U_v-Wert

Der sprunghafte Verlauf des U_v-Wertes ist auf die Luftzirkulation der Umgebung (Raum) zurück zuführen.

6.4.2 Versuch 6

Die Ermittlung der Messwerte zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Bezugsfläche B und deren Messkurvenverläufe sind in Bild 28 dargestellt.

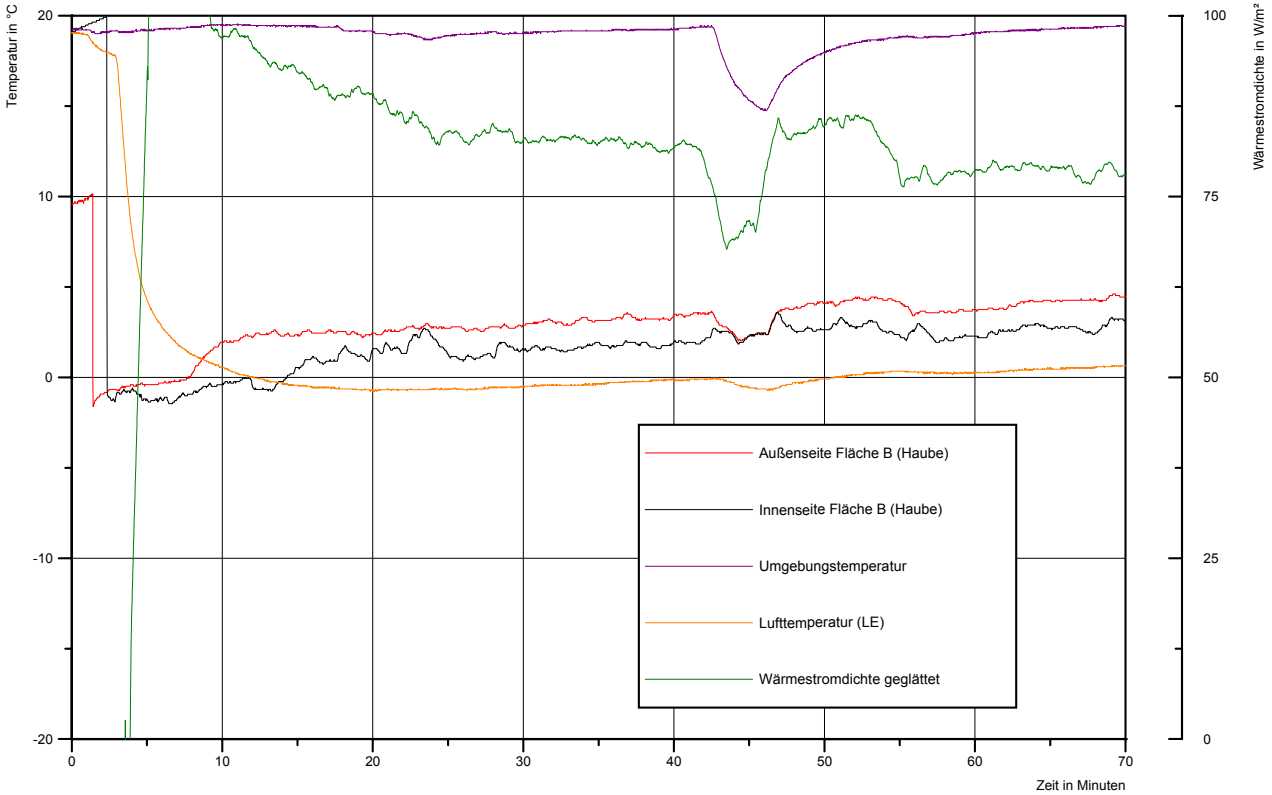

Bild 27 Versuch 6: Wärmedämmung Nr. 3

Beim Erreichen der zulässigen Grenztemperatur (-15 °C) des TK-Produktes bei 38 Minuten (s. Versuch 10) wurden folgende Messwerte am Wärmedämmsystem Nr. 3 erzielt.

Wärmestromdichte	$\dot{q}$	=	81 W/m²
Lufttemperatur unter der Thermohaube	T_1	=	272,95 K
Wandtemperatur der Thermohaube innen	T_2	=	274,95 K
Wandtemperatur der Thermohaube außen	T_3	=	276,35 K
Lufttemperatur der Umgebung	T_4	=	292,35 K
U-Wert	U_h	=	4,2 W/(m²K)

Wärmeübergangskoeffizienten	α_{se}	=	5,1 W/(m²K)
	α_{si}	=	40,5 W/(m²K)
Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,196 (m²K)/W
	R_{si}	=	0,025 (m²K)/W
Wärmedurchlasswiderstand	$R_{\text{Dämmung } 3_h}$	=	0,02 (m²K)/W

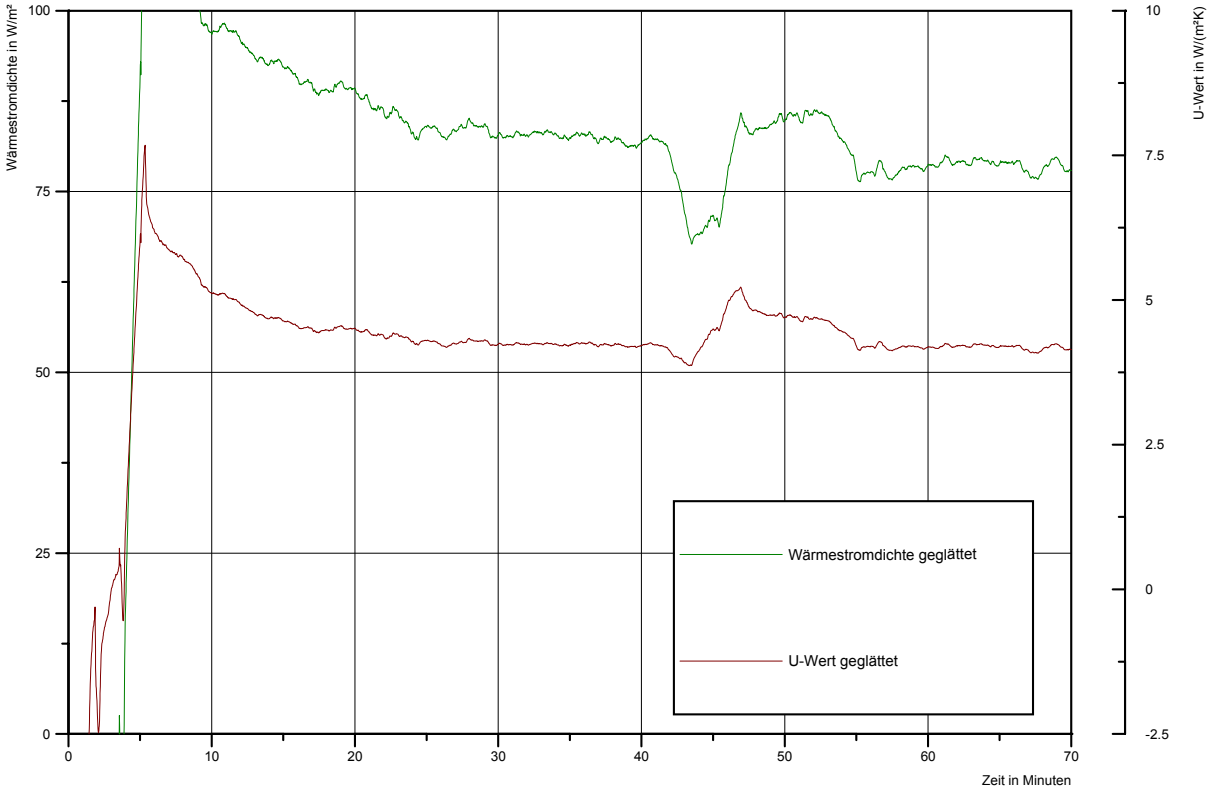

Bild 28 Versuch 6: U_h-Wert

Bild 28 zeigt den Kurvenverlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten bezogen auf die Wärmeaustauschfläche B.

Bezogen auf alle Wärmeübergangsflächen ergibt sich für die Wärmedämmung Nr. 3 nach Gl. 15 ein durchschnittlicher $\overline{U}_3$-Wert von:

$$\overline{U}_3 = \frac{4{,}2\,\text{W/(m²K)} \cdot 4{,}2\,\text{m}^2 + 3{,}5\,\text{W/(m²K)} \cdot 0{,}61\,\text{m}^2}{4{,}81\,\text{m}^2}$$

$$\overline{U}_3 = \underline{\underline{4{,}11\,\text{W/(m²K)}}}$$

6.5 Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich

6.5.1 Vergleich der drei Dämmsysteme

Die Bestimmung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der drei Wärmedämmsysteme ergab für:

Dämmung Nr. 1	$\overline{U}_1$	=	2,23 W/(m²K)
Dämmung Nr. 2	$\overline{U}_2$	=	2,59 W/(m²K)
Dämmung Nr. 3	$\overline{U}_3$	=	4,11 W/(m²K)

Der Vergleich zwischen den *U*-Werten zeigt, dass die Wärmedämmung Nr. 1 und Nr. 2 eine bis zu 60 % bessere Isolierung erzielen als die Wärmedämmung Nr. 3.

6.5.2 Einfluss von Luftschichten in bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizienten

Die Isolierende Wirkung von Luft (Tabelle 4) ist beim Berechnen von Wärmedurchgangskoeffizienten der Dämmsysteme ebenfalls zu beachten. Da zwischen der Wärmedämmung und den Packstücken eine Luftschicht vorhanden ist. In der DIN EN ISO 6946 [9] wird auf den Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten hingewiesen. Für ruhende Luftschichten sind darin folgende Wärmedurchlasswiderstände angegeben.

Tabelle 4 Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten [9]

Dicke der Luftschicht in mm	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22

Aus diesen Angaben (Tabelle 4) lässt sich ableiten, dass der Wärmedurchlasswiderstand einer Luftschicht umso größer ist, je dicker die Luftschicht ist.

Bei den Wärmedurchlasswiderständen von Luftschichten werden in der DIN EN ISO 6946 ruhende Luftschichten, schwach belüftete Luftschichten[5] und stark belüftete Luftschichten unterschieden. Die hier vorliegende Luftschicht unter der Dämmung definiert sich nach der Norm als schwach belüftete Schicht. Für diese Luftschichten gilt jeweils die Hälfte des entsprechenden Wertes nach Tabelle 4.

Am Beispiel der Wärmedämmung Nr. 2 wird der Einfluss einer Luftschicht zwischen den Packstücken und der Thermohaube rechnerisch verglichen. Aus Versuch 3 und 4 sind unter der Fläche A eine Luftschicht mit der Wandstärke von 5 cm und unter Fläche B und C von 1,5 cm gegeben.

Als Systemgrenzen werden die äußere Oberfläche der Wärmedämmung und die Oberfläche der Spinat-Packung angesetzt. Zum Zeitpunkt wo die Kerntemperatur der Spinatpackung -15 °C erreicht, beträgt die Oberflächentemperatur (T_0, s. Bild 10) der Folie -10 °C.

Für die Berechnung des U_v-Wertes:

1.	Wärmestromdichte	$\dot{q}_v$	=	30 W/m²
2.	Wärmedurchlasswiderstand der Thermohaube	$R_{\text{Dämmung } 2_v}$	=	0,20 (m²K)/W
3.	Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht[6]	R_{Luft}	=	0,105 (m²K)/W
4.	Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,149 (m²K)/W
		R_{si}	=	0,380 (m²K)/W

Für die Berechnung des U_h-Wertes:

1.	Wärmestromdichte	$\dot{q}_h$	=	60 W/m²
2.	Wärmedurchlasswiderstand der Thermohaube	$R_{\text{Dämmung } 2_h}$	=	0,18 (m²K)/W
3.	Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht[7]	R_{Luft}	=	0,085 (m²K)/W
4.	Wärmeübergangswiderstände	R_{se}	=	0,169 (m²K)/W
		R_{si}	=	0,115 (m²K)/W

[5] Schwach belüftete Luftschichten sind Schichten mit Belüftungsöffnungen, die für vertikale Luftschichten größer als 500 mm² und kleiner als 1500 mm² je Meter Länge der Luftschicht sind, bzw. die für horizontale Luftschichten größer als 500 mm² und kleiner als 1500 mm² je m² Oberfläche der Luftschicht sind.

[6] Aus Tabelle 4

[7] Aus Tabelle 4

Nach dem Berechnungsverfahren der DIN EN ISO 6946 [9] ergibt sich folgender U_v-Wert mit Berücksichtigung des Wärmedurchlasswiderstandes einer horizontalen Luftschicht von 50 mm und einem abwärts gerichteten $\dot{Q}$ aus Gl. 10 und Gl. 9 als:

$$R_{T_v} = R_{si} + R_{Dämmung} + R_{Luftschicht} + R_{se}$$

$$R_{T_v} = 0{,}380\,(m^2K)/W + 0{,}20\,(m^2K)/W + 0{,}105\,(m^2K)/W + 0{,}149\,(m^2K)/W$$

$$R_{T_v} = \underline{0{,}834\,(m^2K)/W}$$

$$U_v = \underline{\underline{1{,}19\ W/(m^2K)}}$$

und für U_h mit Berücksichtigung der vertikalen Luftschicht von 15 mm und einem horizontal gerichteten $\dot{Q}$ ein Wärmedurchgangskoeffizient mit:

$$R_{T_h} = R_{si} + R_{Dämmung} + R_{Luftschicht} + R_{se}$$

$$R_{T_h} = 0{,}115\,(m^2K)/W + 0{,}18\,(m^2K)/W + 0{,}085\,(m^2K)/W + 0{,}169\,(m^2K)/W$$

$$R_{T_h} = \underline{0{,}549\,(m^2K)/W}$$

$$U_h = \underline{\underline{1{,}82\ W/(m^2K)}}$$

Bezogen auf alle Wärmeaustauschflächen ergibt sich ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$\overline{U} = \frac{1{,}82\,W/(m^2K) \cdot 4{,}2\,m^2 + 1{,}19\,W/(m^2K) \cdot 0{,}61\,m^2}{4{,}81\,m^2}$$

$$\overline{U} = \underline{\underline{1{,}74\,W/(m^2K)}}$$

Durch die Berücksichtigung des Wärmedurchlasswiderstandes von Luftschichten erreicht das gesammte Dämmsystem (Thermohaube & Luftschicht) eine Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten von 33 %.

Nimmt man im Vergleich eine vertikale Luftschicht mit einer Wandstärke von 10 mm an, ergibt sich mit:

$$R_{T_h} = R_{si} + R_{Dämmung} + R_{Luftschicht} + R_{se}$$

$$R_{T_h} = 0{,}115\,(m^2K)/W + 0{,}18\,(m^2K)/W + 0{,}075\,(m^2K)/W + 0{,}169\,(m^2K)/W$$

$$R_{T_h} = \underline{0{,}539\,(m^2K)/W}$$

$$U_h = \underline{\underline{1{,}86\ W/(m^2K)}}$$

ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$\overline{U} = \frac{1{,}86\,W/(m^2K) \cdot 4{,}2\,m^2 + 1{,}19\,W/(m^2K) \cdot 0{,}61\,m^2}{4{,}81\,m^2}$$

$$\overline{U} = \underline{\underline{1{,}78\,W/(m^2K)}}$$

Eine Verringerung der horizontalen Luftschichtdicke um 5 mm würde den $\overline{U}$ -Wert um 2,3 % erhöhen.

6.6 Untersuchungsprofil zur Messung von Kerntemperaturen

Um den Einfluss der Wärmedämmung an einem TK-Produkt hinsichtlich einer Verzögerung des Auftauvorgangs zu bewerten, müssen zunächst die Randbedingungen der Untersuchungen definiert werden. Für die folgenden Untersuchungen wird für das Packgut eine Temperaturdifferenz von 5 °C (-20 °C bis -15 °C) und eine Prüfdauer von 70 Minuten festgelegt. Der gewählte Temperaturbereich entspricht der Temperaturführung[8] von tiefgefrorenen Lebensmitteln und dem in der TLMV [4] gewährten Temperaturanstieg auf -15 °C. Des Weiteren sind Kenntnisse über die Beschaffenheit der TK-Produkte hinsichtlich der im genannten Temperaturbereich vorhandenen Wärmemenge zu bestimmen.

Für die messtechnische Bestimmung der Kerntemperaturen werden die Thermoelemente mit einer Eindringtiefe von ca. 2,5 cm ins Produkt eingebracht. Die Thermoelemente werden vor Beginn der Messung auf die Temperatur des Erzeugnisses (TK-Produkt) herabgekühlt.

Die Kerntemperaturen werden an den im Bild 29 genannten Messpunkten ermittelt.

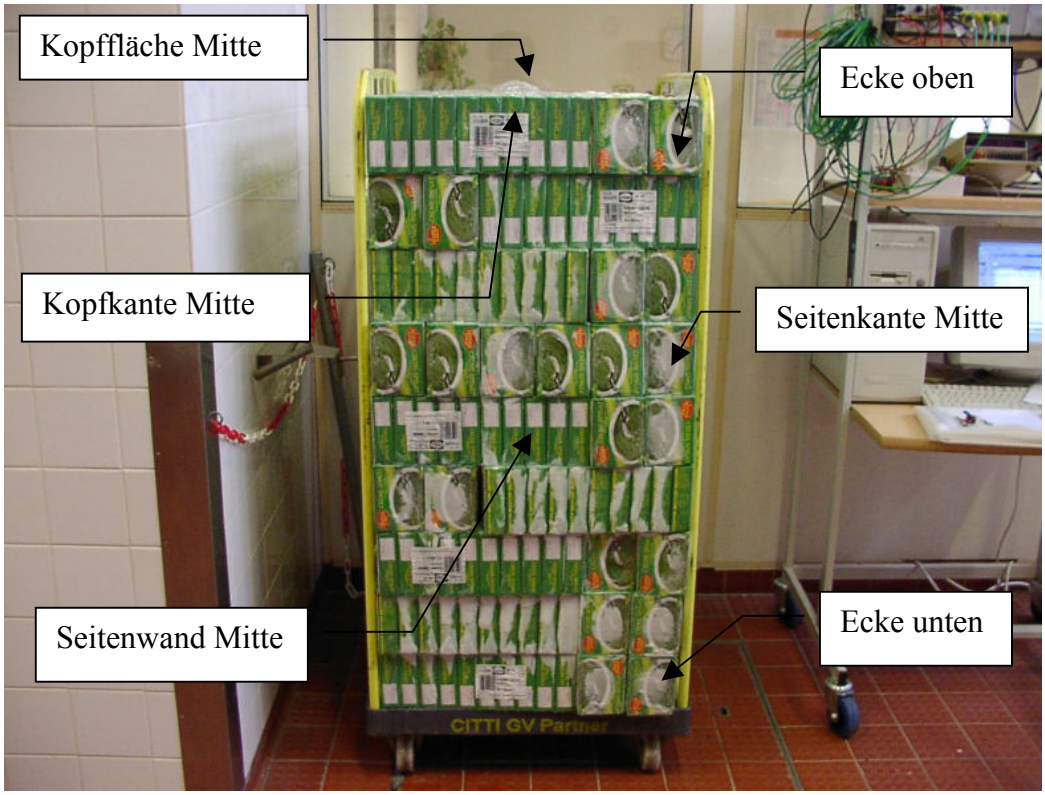

Bild 29 Messpunkte der Kerntemperaturen

[8] Bei der Beförderung von tiefgefrorenen Lebensmittel wird Anstelle der vorgeschrieben -18 °C [4] immer häufiger eine Transporttemperatur von -20 °C gewählt um eine Temperaturreserve zu erhalten.

Im Folgenden wird exemplarisch die Anwendung der Wärmedämmsysteme am Beispiel TK-Spinat durchgeführt. Hierbei werden folgende Randbedingungen festgelegt:

1. Anfangstemperatur des Packgutes T_{Anfang} = 253, 15 K
2. Zulässige Grenztemperatur des Packgutes T_{Ende} = 258,15 K
3. Annahme eines konstanten $\overline{U}$ -Wertes der jeweiligen Dämmung

6.6.1 Vorgehensweise am Beispiel TK-Spinat

Der Spinat setzt sich aus einer Einheit (Bild 30) von 10 Fertigpackung à 450 g Nettofüllmenge zusammen. Sie sind mit einer Schrumpffolie umhüllt.

Nachstehende gemittelte Angaben wurden für eine Packung (Packmittel + Packgut) erfasst:

1.	Abmessungen Faltschachtel (L x B x H)	0,145 m x 0,105 m x 0,045 m		
	Wärmeaustauschfläche A	0,015 m²		
	Wärmeaustauschfläche B	0,006 m²		
	Wärmeaustauschfläche C	0,005 m²		
2.	Masse der Packung	$\overline{m}_{Packgung}$	=	0,480 kg
3.	prozentualer Wassergehalt	$\overline{x}_{Wasser}$	=	87,5 %
4.	Wassergehalt	$\overline{m}_{Wasser}$	=	0,420 kg
5.	Rohdichte	ρ	=	700,6 kg/m³

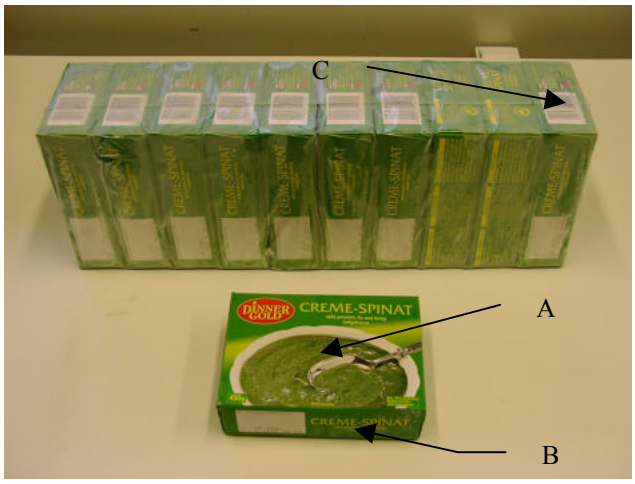

Bild 30 TK-Spinat

6.6.1.1 Spezifische Wärmemenge

Die einzelne Packung wird in erster Näherung als ein homogener Körper betrachtet, d. h. seine Temperatur wird als überall gleich betrachtet. Mit Gl. 16 wird die Speicherkapazität an Wärme für die oben genannten Temperaturdifferenz von 5 K berechnet.

$$Q = m \cdot c_P \cdot \Delta T \qquad \text{(Gl. 16)}$$

mit : m = Masse des Wassers[9]
c_p = spezifische isobare Wärmekapazität (Anhang C.1)
ΔT = Temperaturdifferenz

Aus Gleichung Gl. 16 ergibt sich für eine Packung Spinat im oben genannten Temperaturbereich eine Wärmemenge Q von:

$$Q = 0{,}420\ \text{kg} \cdot 2{,}05\ \text{kJ/kg K} \cdot 5\,\text{K}$$
$$Q = \underline{\underline{4{,}31\,\text{kJ}}}$$

Im Folgenden werden die Erwärmungsvorgänge von TK-Spinat nach kommender Reihenfolge untersucht.

1. ohne Dämmung (Versuch 7)
2. mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 8)
3. mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 9)
4. mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 10)

[9] Hier wird nur die Masse des Wassers betrachtet, da die Masse und Wärmekapazität der Trockenmasse eine untergeordnete Rolle spielen.

6.6.1.2 Spinat ohne Dämmung (Versuch 7)

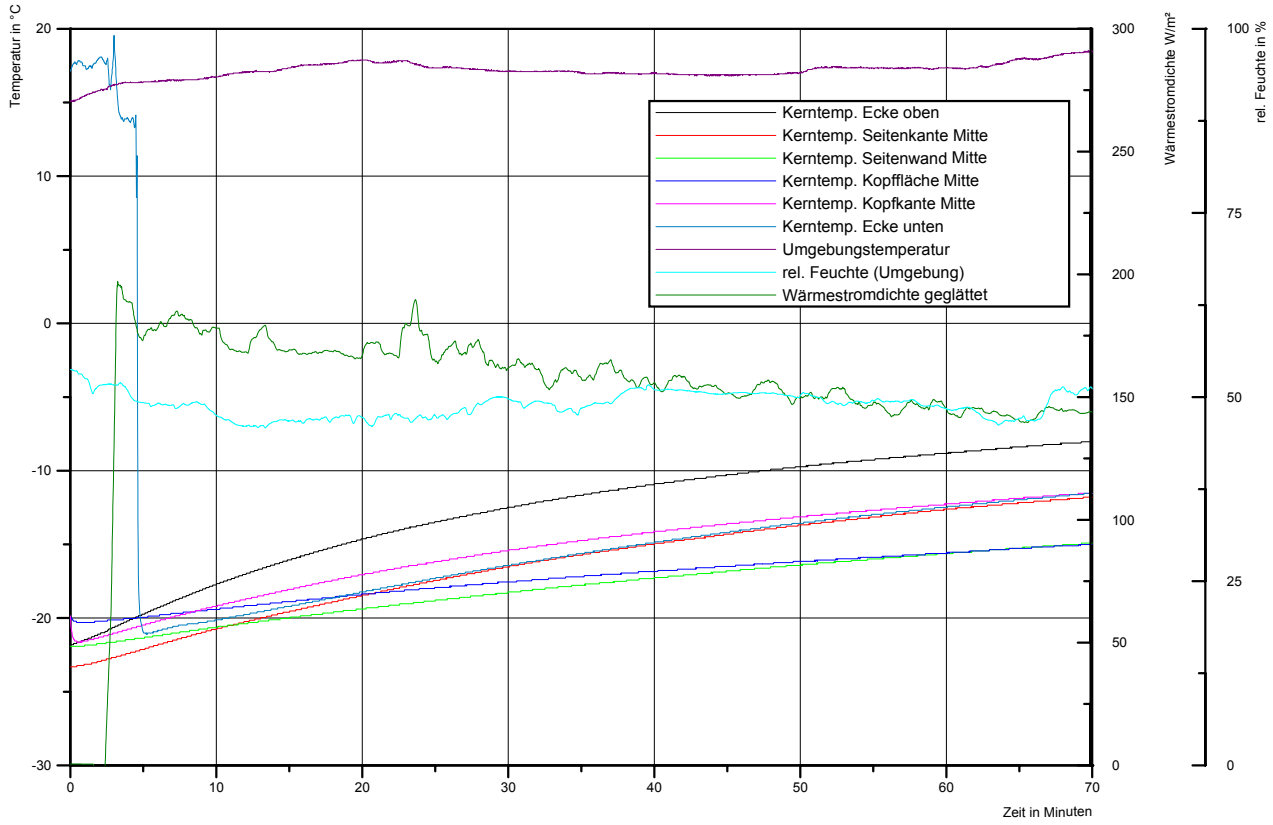

Bild 31 Versuch 7: Spinat ohne Dämmung

Aus Versuch 7 ergaben sich folgende Messwerte:

Tabelle 5 Versuch 7: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten ohne Dämmung
1	Ecke oben	14
2	Seitenkante Mitte	27
3	Seitenwand Mitte	54
4	Kopffläche Mitte	65
5	Kopfkante Mitte	27
6	Ecke unten	28

Mit Versuch 7 werden primär die Temperatur-/Zeitverläufe der Spinat Packungen der äußeren Lage und darüber hinaus die thermisch empfindlichsten Positionen der Packungen auf dem Rollwagen bestimmt werden. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen werden drei signifikante Messpunkte für die nachfolgenden Untersuchungen gewählt, da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Thermoelemente begrenzt ist. Die drei kennzeichnenden Messpunkte sind 1. Ecke oben, 2. Seitenkante Mitte und 3. die untere Ecke.

6.6.1.3 Spinat mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 8)

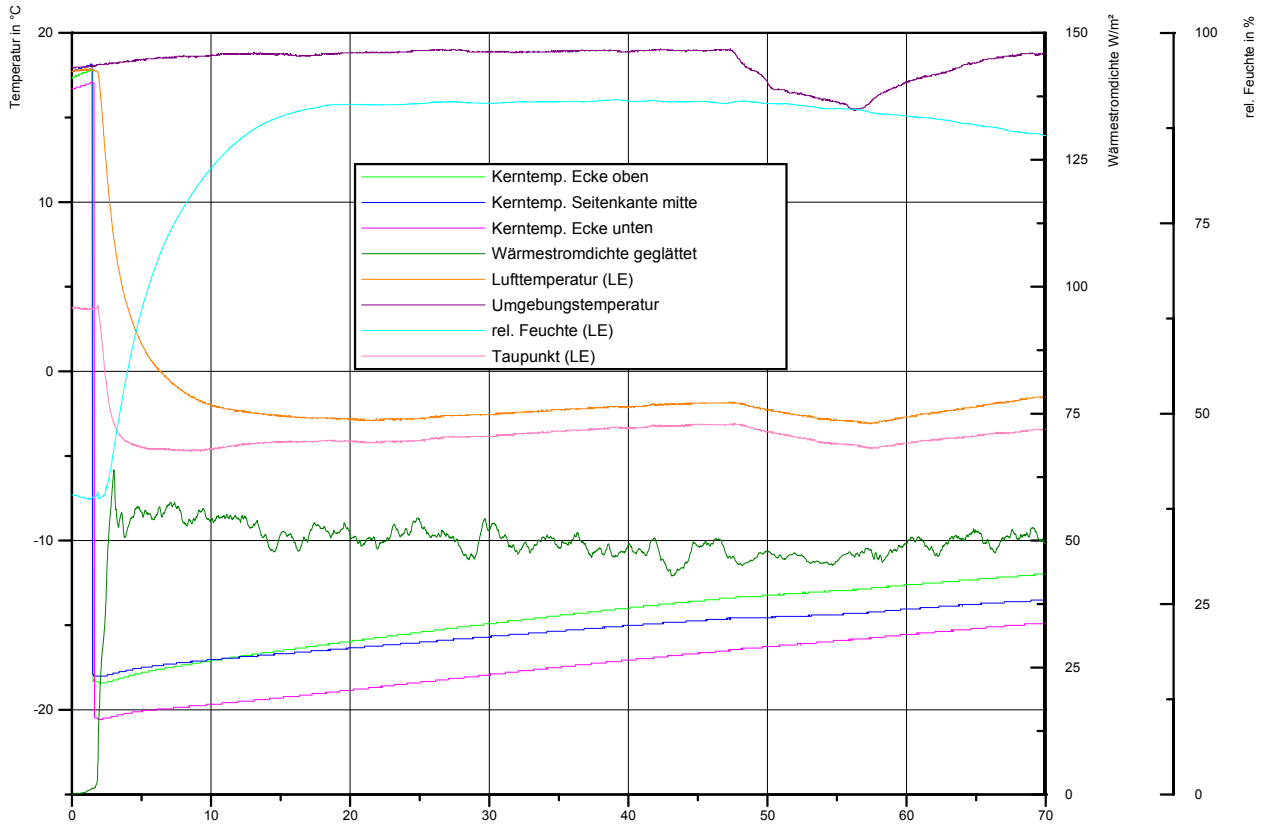

Bild 32 Versuch 8: Spinat mit Dämmung Nr. 1

Im Versuch 8 wurden unter der Anwendung der Dämmung Nr. 1 folgende Messwerte erzielt.

Tabelle 6 Versuch 8: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 1
1	Ecke oben	45
2	Seitenkante Mitte	62
3	Ecke unten	60

6.6.1.4 Spinat mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 9)

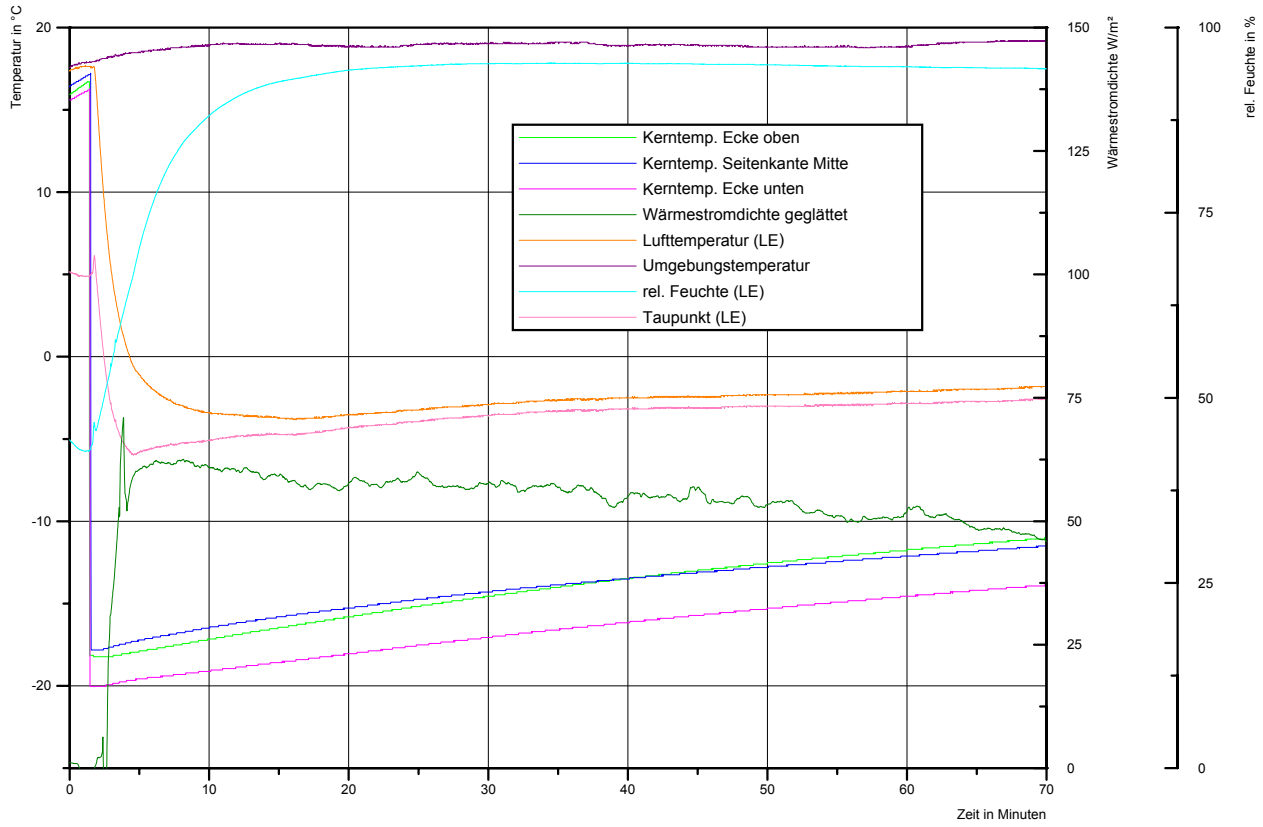

Bild 33 Versuch 9: Spinat mit Dämmung Nr. 2

Die Zeit bis zum Erzielen der Grenztemperatur der einzelnen Messpunkte im Versuch 9 beträgt:

Tabelle 7 Versuch 9: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 2
1	Ecke oben	39
2	Seitenkante Mitte	43
3	Ecke unten	55

6.6.1.5 Spinat mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 10)

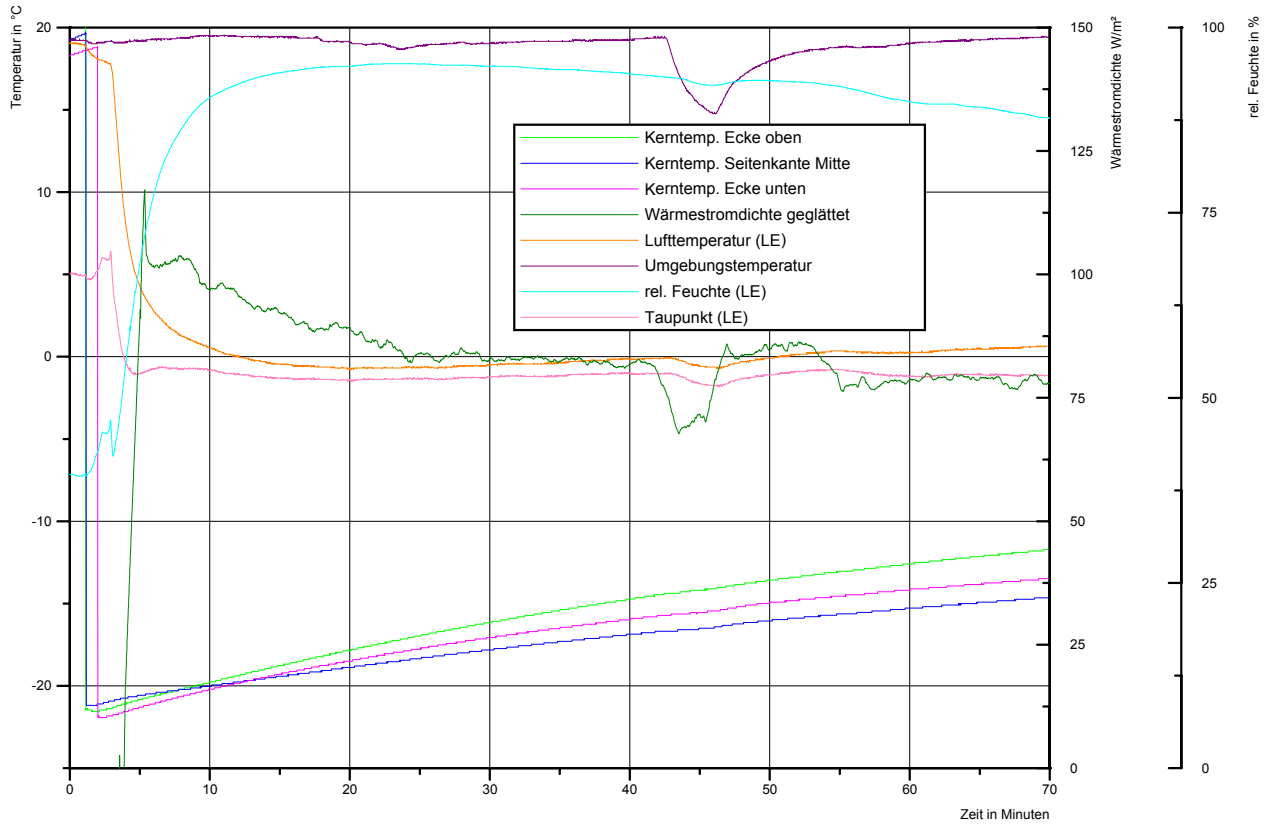

Bild 34 Versuch 10: Spinat mit Dämmung Nr. 3

Mit der Dämmung Nr. 3 erzielen die Kerntemperaturen des Spinates folgende Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur (Tabelle 8).

Tabelle 8 Versuch 8: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Spinat

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 3
1	Ecke oben	29
2	Seitenkante Mitte	55
3	Ecke unten	39

6.6.1.6 Vergleich der Erwärmungszeiten aus Versuch 7 bis 10

Aus den Versuchen 7 bis 10 ergaben sich folgende (Tabelle 9) Erwärmungszeiten.

Tabelle 9 Erwärmungszeit TK-Spinat

Messpunkt	Ohne Dämmung	Dämmung Nr. 1	Dämmung Nr. 2	Dämmung Nr. 3
	Zeit in Minuten			
Ecke oben	14	45	39	29
Seitenkante Mitte	27	62	43	55
Ecke unten	28	60	55	39

Aus den Versuchen 7 bis 10 (Tabelle 9) zeichnet sich der Messpunkt Ecke oben als kritischste Packung auf dem Rollwagen ab. Die Erwärmungsgeschwindigkeit dieser Packung ist im Vergleich zu den anderen Messpunkten (Seitenkante Mitte und Ecke unten) im jeweiligen Versuch durchschnittlich 1,7-mal schneller. Des Weiteren ist eine Verlängerung der Erwärmungszeit unter Anwendung von Wärmedämmsystemen zu erkennen.

Einige Kerntemperaturmesskurven beginnen (Bild 32 und Bild 33) teilweise mit Temperaturen über dem unter Abschnitt 6.6 festgelegten $T_{\text{Anfang}} =$ 253,15 K (-20 °C). Die Zeit der fehlenden Temperaturdifferenz wird aus vergleichbaren Messungen in Annäherung hinzu addiert.

Die theoretische Bestimmung der Zeit bis zum Erreichen der zulässigen Grenztemperatur des tiefgefrorenen Lebensmittels errechnet sich aus Gl. 2. Nach Abschnitt 6.6.1.1 steht für die Temperaturdifferenz von 5 Kelvin einer einzelnen Packung eine Wärmekapazität von 4,31 kJ zur Verfügung. Die beispielhafte Berechnung erfolgt für Versuch 7 eine Spinat-Packung (Ecke oben, Bild 29).

Bei dieser Packung wurden folgende Wärmestromdichten bezogen auf die jeweilige Wärmeaustauschfläche (Bild 30) messtechnisch erfasst.

1. Wärmeaustauschfläche A $\dot{q}_v = 174\ \mathrm{W/m^2}$
2. Wärmeaustauschfläche B $\dot{q}_h = 200\ \mathrm{W/m^2}$
3. Wärmeaustauschfläche C $\dot{q}_h = 200\ \mathrm{W/m^2}$

Die Zuordnung der Wärmestromdichten ergibt sich aus der Anordnung der Packung auf dem Rollwagen.

Hieraus ergibt sich nach Gl. 1 für die jeweilige Wärmeaustauschfläche ein Wärmestrom von:

1. Fläche A $\dot{Q}_A = 0{,}015\,\mathrm{m^2} \cdot 200\ \mathrm{W/m^2} = \underline{\underline{3{,}00\ \mathrm{W}}}$

2. Fläche B $\dot{Q}_B = 0{,}006\,\mathrm{m^2} \cdot 200\,\mathrm{W/m^2} = \underline{\underline{1{,}02\ \mathrm{W}}}$

3. Fläche C $\dot{Q}_C = 0{,}005\,\mathrm{m^2} \cdot 174\,\mathrm{W/m^2} = \underline{\underline{0{,}87\ \mathrm{W}}}$

Die Summe der auf die Packung einströmenden Wärmeströme folgt aus:

4. $$\dot{Q}_{\mathrm{Gesamt}} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_B + \dot{Q}_C = \underline{\underline{5{,}07\ \mathrm{W}}}$$

Durch Einsetzen in Gl. 3 berechnet sich die Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur einer Packung ohne Dämmung als:

5. $$t = \frac{4310\ \mathrm{J}}{5{,}07\ \mathrm{J/s}} = \underline{\underline{14{,}2\ \mathrm{min}}}$$

Vergleicht man die theoretisch errechnete Zeit für Versuch 7 (Spinat ohne Dämmung) bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Packung an der oberen Ecke mit der messtechnisch ermittelten so ergibt sich eine Abweichung von 1,2 %.

In Tabelle 10 sind die Abweichungen zwischen der experimentell (Versuch 7 bis 10) und rechnerisch bestimmten Erwärmungszeit der thermisch empfindlichsten Packung (Ecke oben) von Spinat zusammengefasst.

Tabelle 10 Vergleich der errechneten und messtechnisch erfassten Erwärmungszeit am Messpunkt Ecke oben (Spinat)

Versuch	$\dot{Q}$ in W pro Packung	Zeit in Minuten		Abweichung der errechneten Zeit in %
		gemessen	errechnet	
ohne Dämmung	5,07	14	14,2	1,2
Dämmung Nr. 1	1,34	45	53,6	19,1
Dämmung Nr.2	1,61	39	44,7	14,5
Dämmung Nr. 3	2,18	29	32,9	13,5

6.6.2 Messung der Oberflächentemperatur mittels Wärmebildkamera

Die Thermographie ist eine Methode zur berührungslosen Messung von Oberflächentemperaturen. Sie wird zum Auffinden von thermischen Schwachstellen an einem Objekt (hier kritische Packungen auf einer Ladeeinheit) genutzt. Aus den Messungen der Kerntemperaturen (Versuch 7-10) an den verschiedenen Positionen (Bild 29) der Ladeeinheit stellt sich die obere Ecke als kritischste Position heraus. Hier wird die Grenztemperatur (-15 °C) als erstes erreicht. Sie ist die Packung mit der größten Wärmeaustauschfläche. Der Wärmestrom wirkt hier über drei Wärmeaustauschflächen (A, B und C) auf das TK-Produkt ein.

Ergänzend zu den Messungen der Kerntemperaturen und den Informationen über die Zeiten bis zum Erreichen der zulässigen Grenztemperatur wird mit Hilfe der Infrarotmesstechnik die Verteilung der Oberflächentemperaturen an der Ladeeinheit gezeigt. Die Messgenauigkeit der IR-Messgeräte ist von dem Emissionsgrad der Objektoberfläche und vom Standort der Messung abhängig. Sind in der Umgebung Wärmequellen (z.B. Sonneneinstrahlung) vorhanden wird die absolute Messgenauigkeit beeinträchtigt. Die relative Messgenauigkeit zwischen den einzelnen Messpunkten am Objekt bleibt jedoch unverändert.

Bei der Auswertung der Thermographien ist jedoch zu vermerken, dass die Oberflächentemperaturen von der Schrumpffolie und der Faltschachtel gleichzeitig dargestellt sind. Es ist zu erwarten, dass die Temperaturen der Faltschachtel im Allgemeinen niedriger sind als die der Folie, da die Schrumpffolie eine Isolierung erzeugt.

Der Abstand zwischen Wärmebildkamera und dem Rollwagen beträgt 3,50 m (Bild 11, rechts im Bild befindet sich das Messgerät). Die Aufnahmen werden in einem Zeitraum von einer Stunde gemacht. Die horizontale Anordnung der Bilder ist aufgrund des Auswertprogramms nicht zu verändern.

In den folgenden Bildern (Bild 35 bis Bild 43) sind die Thermographien der Oberflächentemperatur der Ladeeinheit mit TK-Spinat über den Messzeitraum in Abständen von 10 Minuten dargestellt. Die Anordnung der Packstücke entspricht Bild 13.

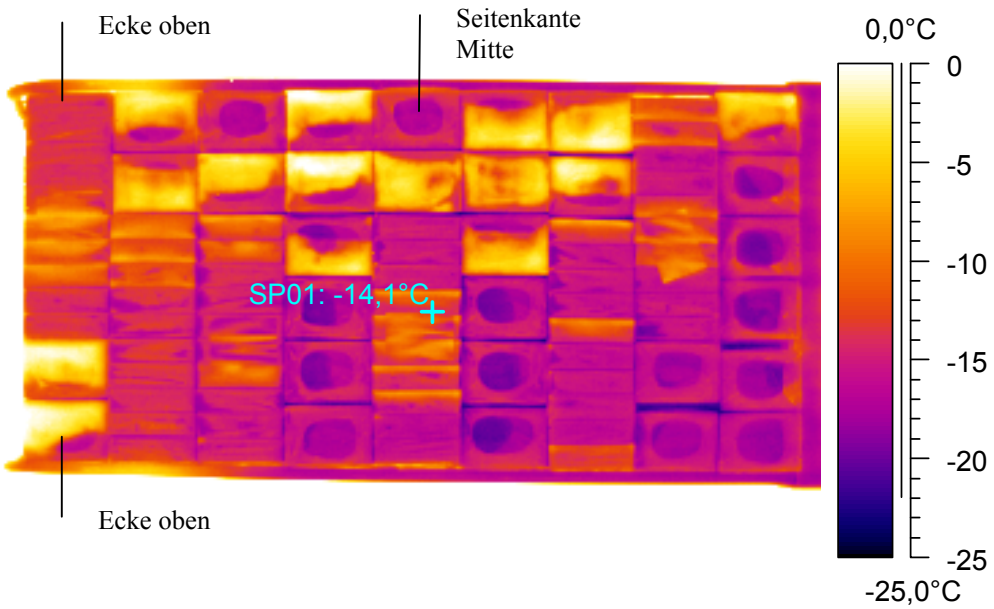

Bild 35 Thermographie TK-Spinat am Beginn der Messung

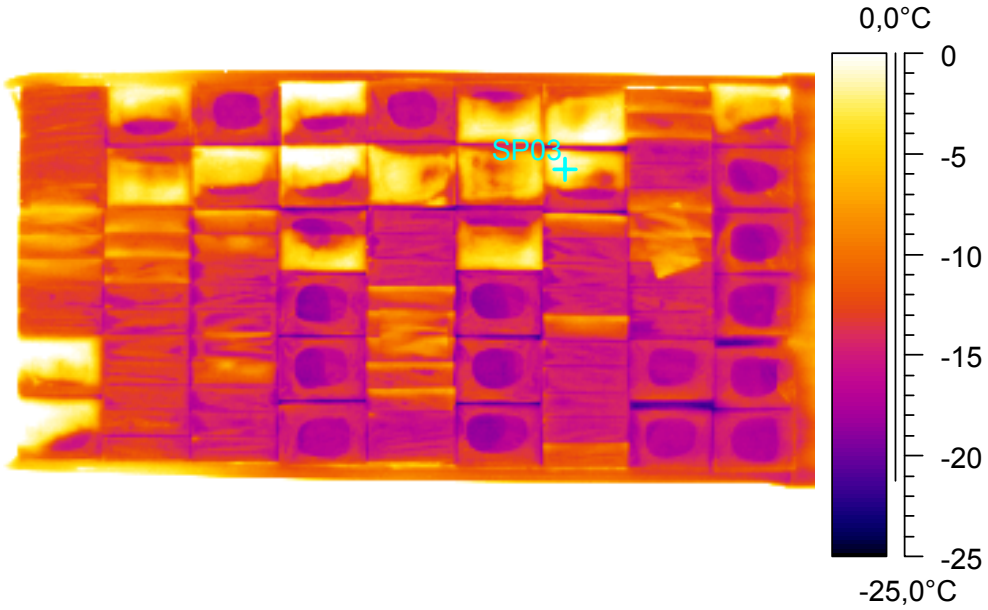

Bild 36 Thermographie TK-Spinat 5. Minute

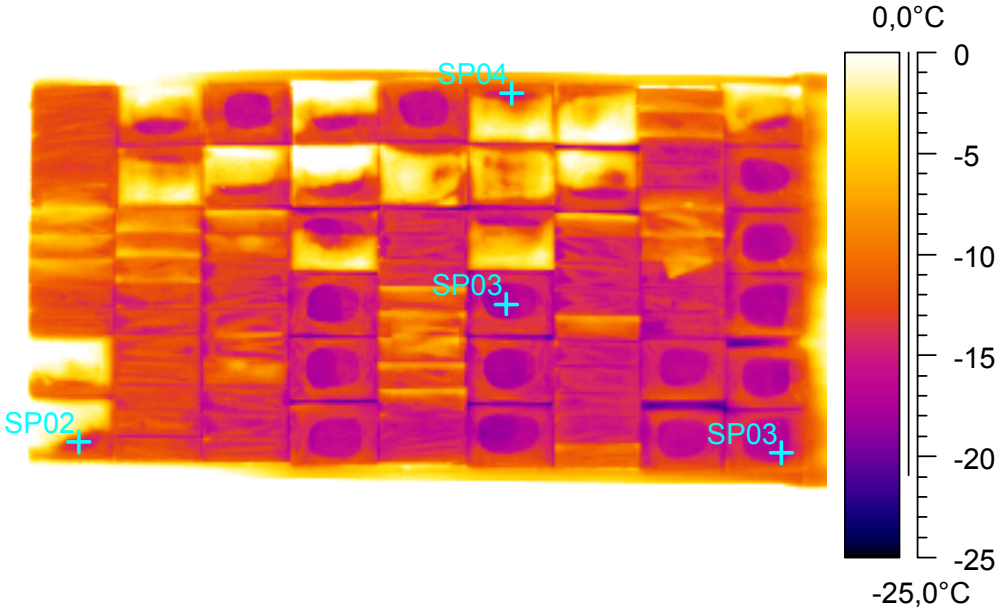

Bild 37 Thermographie TK-Spinat 10. Minute

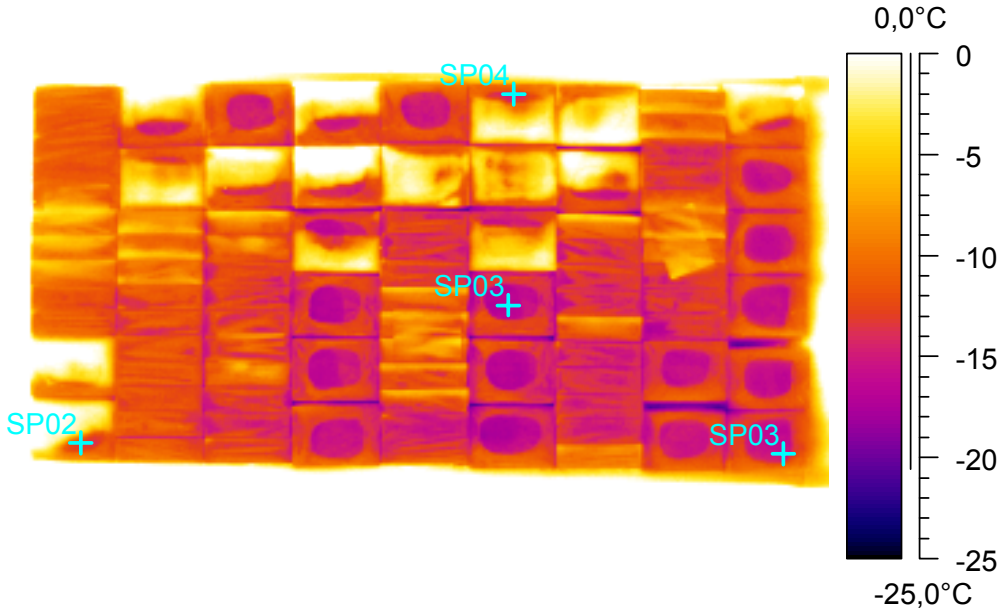

Bild 38 Thermographie TK-Spinat 20. Minute

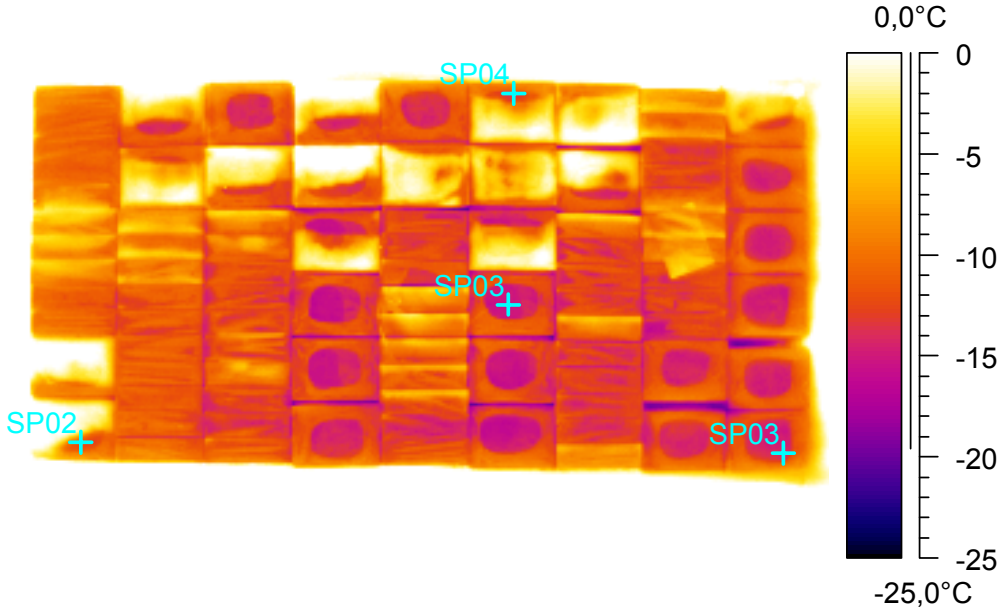

Bild 39 Thermographie TK-Spinat 30. Minute

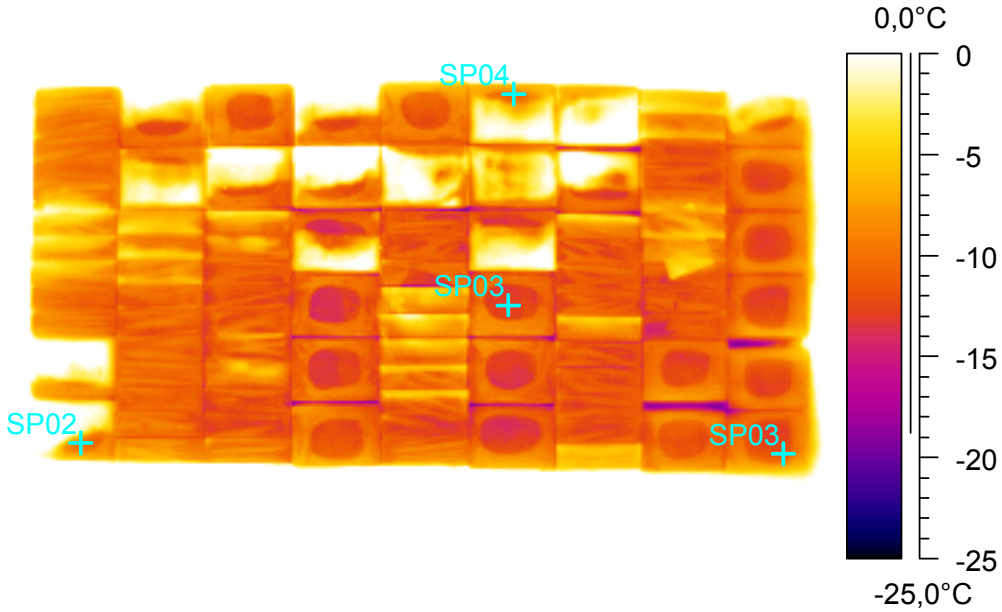

Bild 40 Thermographie TK-Spinat 40. Minute

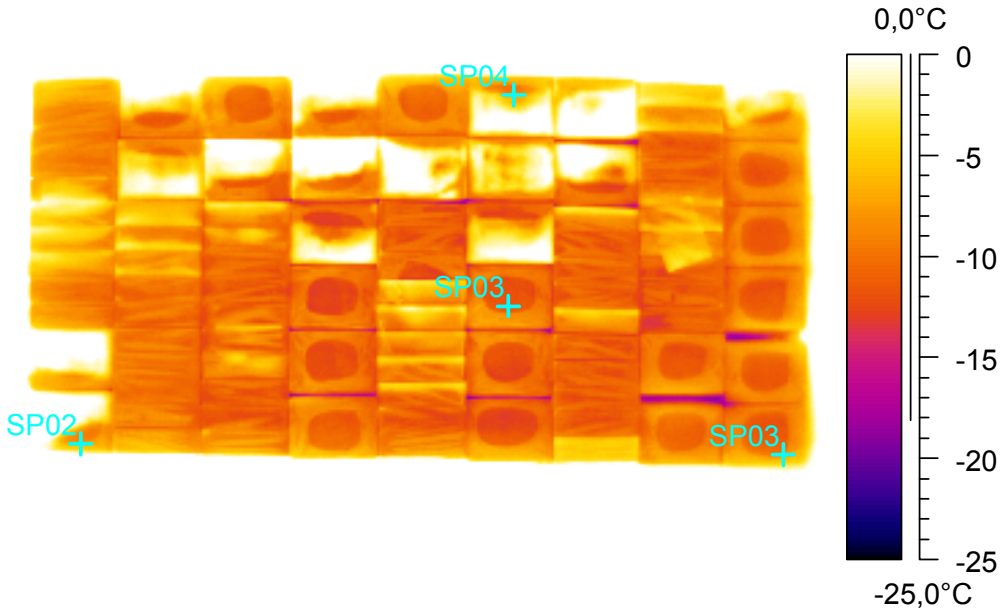

Bild 41 Thermographie TK-Spinat 50. Minute

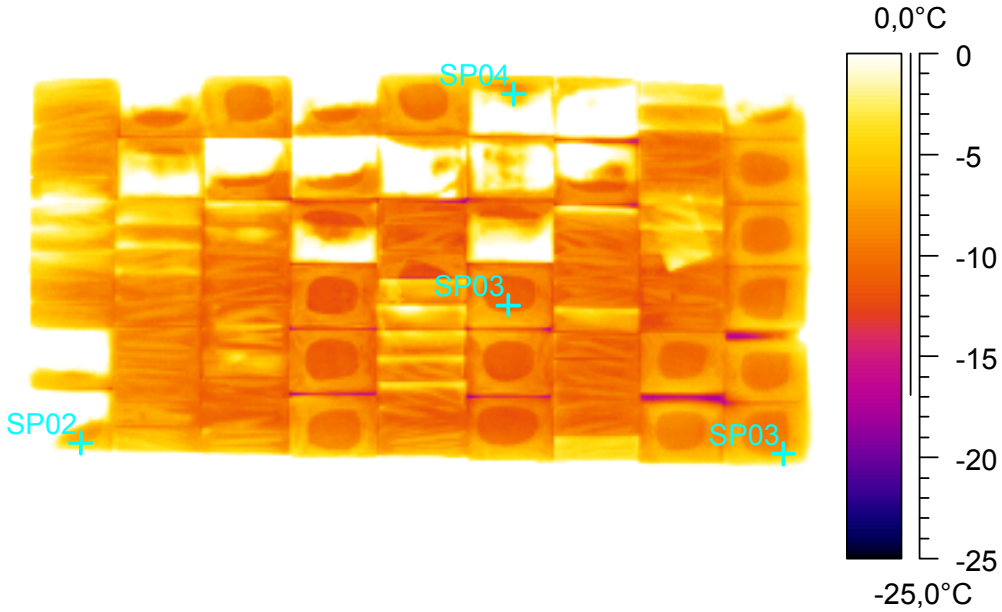

Bild 42 Thermographie TK-Spinat 60. Minute

Mit der Thermographie konnte erneut gezeigt werden wo die thermischen Schwachstellen der Packstücke auf dem Rollwagen sind. Die Packstücke in den oberen Ecken und an den Kanten erwärmten sich deutlich schneller als die in der Frontmitte.

Wie Eingangs beschrieben (s. Abschnitt Zielsetzung) erwärmen sich die Packstücke von außen nach innen. Entfernt man die Packstücke der äußeren Lage, so sieht man, dass im Inneren der Ladeeinheit noch wesentlich tiefere Temperaturen vorliegen. Bild 43 zeigt die Stellen der Entnahme der äußeren Lagen.

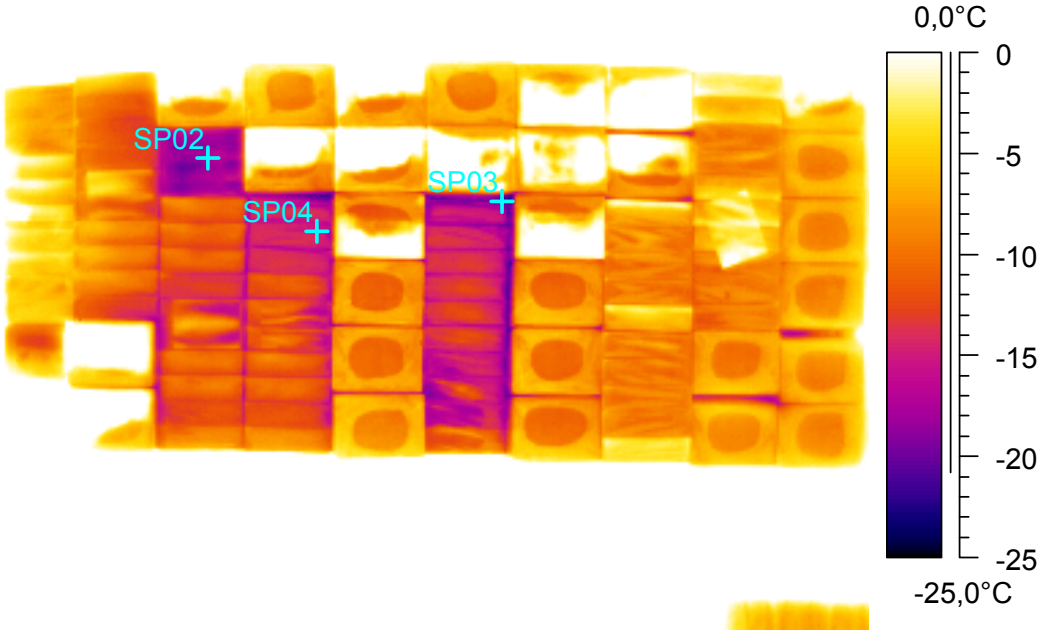

Bild 43 Thermographie TK-Spinat 61. Minute mit Einblick in die zweite Lage

Aus Bild 43 ist zu erkennen, das sich die Packstücke auf der Ladeeinheit nach innen hin selbst Isolieren. Das heißt, das sich im Zuge der Erwärmung der äußeren Lagen ein Wärmestrom ($\dot{Q} < 0$) aus den tiefer liegenden Lagen in die äußere Randschicht einstellt um das Temperaturgefälle auszugleichen.

6.6.3 Taupunkt

Werden TK-Produkte einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, kommt es sobald die Oberflächentemperaturen der Packungen den Taupunkt der Luft unterschreiten zur Kondensation von dem in der Luft befindlichen Wasser oder bei Temperaturen unter 0°C zur Bildung von Eis (Raureif) an der Oberfläche der Packungen (s. Punkt 2.2.2).

Die Taupunkttemperatur ist diejenige, bei der die relative Luftfeuchte bei unveränderter absoluter Luftfeuchte infolge von Abkühlung auf 100 % angestiegen ist. Dann besitzt die Luft den bei dieser Temperatur maximal möglichen (Sättigung) Gehalt an Wasserdampf. Sinkt die Temperatur unter den Taupunkt, dann ergibt sich ein Überschuss an Wasserdampf. Dieser wird als tropfbares Wasser (Kondenswasser) ausgeschieden.

Innerhalb der Palettenladung ist immer eine bestimmte Menge Luftfeuchte f eingeschlossen. Die Taupunkttemperatur ist demnach ein Kriterium dafür, ob an einer Oberfläche Tauwasser oder Reif anfällt oder nicht.

6.6.3.1 Berechnung des Taupunktes

Die Taupunktberechnung erfolgt online vom DIAdem® System (Messsoftware).
Sie beruht auf folgenden Ansatz:

Als relative Feuchte f wird das Verhältnis vom Partialdruck des Wasserdampfes e und dem Sättigungsdampfdruck E bezeichnet. Die folgende Formel gibt das Ergebnis in % wieder.

$$f = 100 \cdot \frac{e}{E}$$

Der Sättigungsdampfdruck wird mit der Magnus-Formel aus der Temperatur berechnet.

$$E = 6{,}1 \cdot 10^{\frac{a_1 \cdot \vartheta}{b_1 \cdot \vartheta}}$$

Die Parameter a_1 und b_1 gelten über Wasser bei Temperaturen oberhalb von 0 °C.
$a_1 = 7{,}45$
$b_1 = 235$

Somit kann aus der relativen Feuchte und der Temperatur der Partialdruck des Wasserdampfes berechnet werden.

$$e = \frac{f}{100} \cdot 6{,}1 \cdot 10^{\frac{a_1 \cdot \upsilon}{b_1 \cdot \upsilon}}$$

Die Beziehung zwischen dem Taupunkt τ und dem Partialdruck wird durch die Gleichung

$$\tau = \frac{b_1 \cdot \log \frac{e}{6{,}1}}{a_1 - \log \frac{e}{6{,}1}}$$

ausgedrückt.

6.6.3.2 Taupunktbeobachtung am Beispiel Spinat

In den Versuchen 8 bis 10 (Spinat mit Dämmung Nr. 1 bis 3) weist die Luft unterhalb der Dämmung einen hohen Anteil an relativer Luftfeuchtigkeit auf. Die Taupunkttemperatur liegt unter 0 °C. Bei allen Versuchen liegt eine Raureifschicht an der Oberfläche der Packungen vor.

6.6.4 TK-Kräuter

Die TK-Kräuter liegen in Kartonagen (Bild 44) mit 30 Packungen à 0,05 kg vor. Nachstehende Angaben wurden für eine Packung (Packmittel + Packgut) erfasst:

1.	Abmessungen Faltschachtel (L x B x H)	0,11 m x 0,09 m x 0,027 m		
	Wärmeaustauschfläche A	0,01 m²		
	Wärmeaustauschfläche B	0,002 m²		
	Wärmeaustauschfläche C	0,003 m²		
2.	Masse der Packung	$\overline{m}_{\text{Packgung}}$	=	0,065 kg
3.	prozentualer Wassergehalt	$\overline{x}_{\text{Wasser}}$	=	77,7 %
4.	Wassergehalt	$\overline{m}_{\text{Wasser}}$	=	0,050 kg
5.	Wärmemenge	Q	=	500 J
6.	Rohdichte	ρ	=	243,2 kg/m³

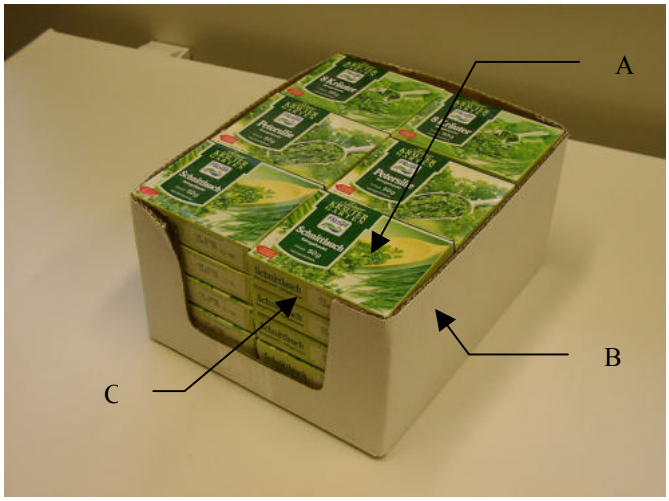

Bild 44 TK-Kräuter

Im Folgenden werden die Erwärmungsvorgänge der TK-Kräuter gemäß nachstehender Reihenfolge untersucht.

1.	ohne Dämmung	(Versuch 11)
2.	mit Dämmung Nr. 1	(Versuch 12)
3.	mit Dämmung Nr. 2	(Versuch 13)
4.	mit Dämmung Nr. 3	(Versuch 14)

6.6.4.1 Kräuter ohne Dämmung (Versuch 11)

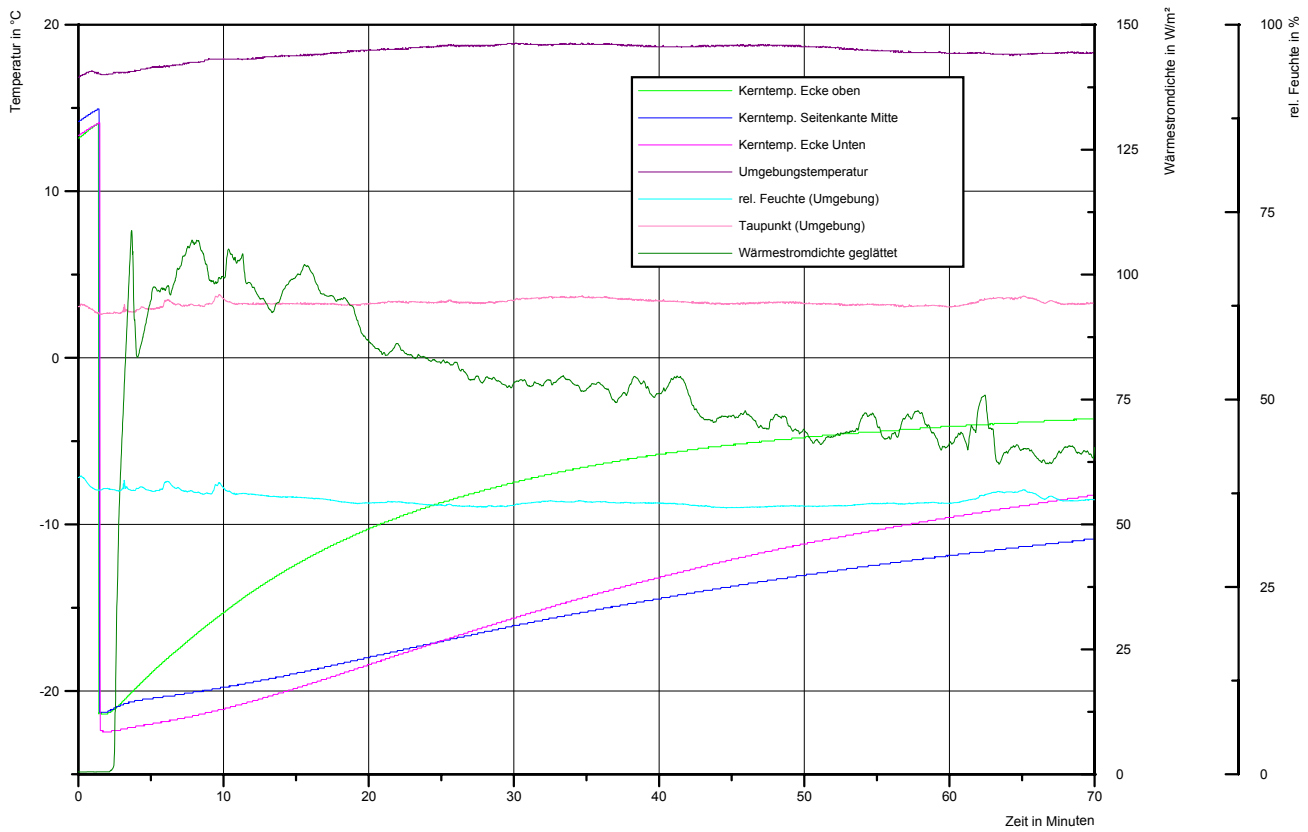

Bild 45 Versuch 11: Kräuter ohne Dämmung

In Versuch 11 wurden folgende Zeiten gemessen:

Tabelle 11 Versuch 11: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten ohne Dämmung
1	Ecke oben	7
2	Seitenkante Mitte	29
3	Ecke unten	18

6.6.4.2 Kräuter mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 12)

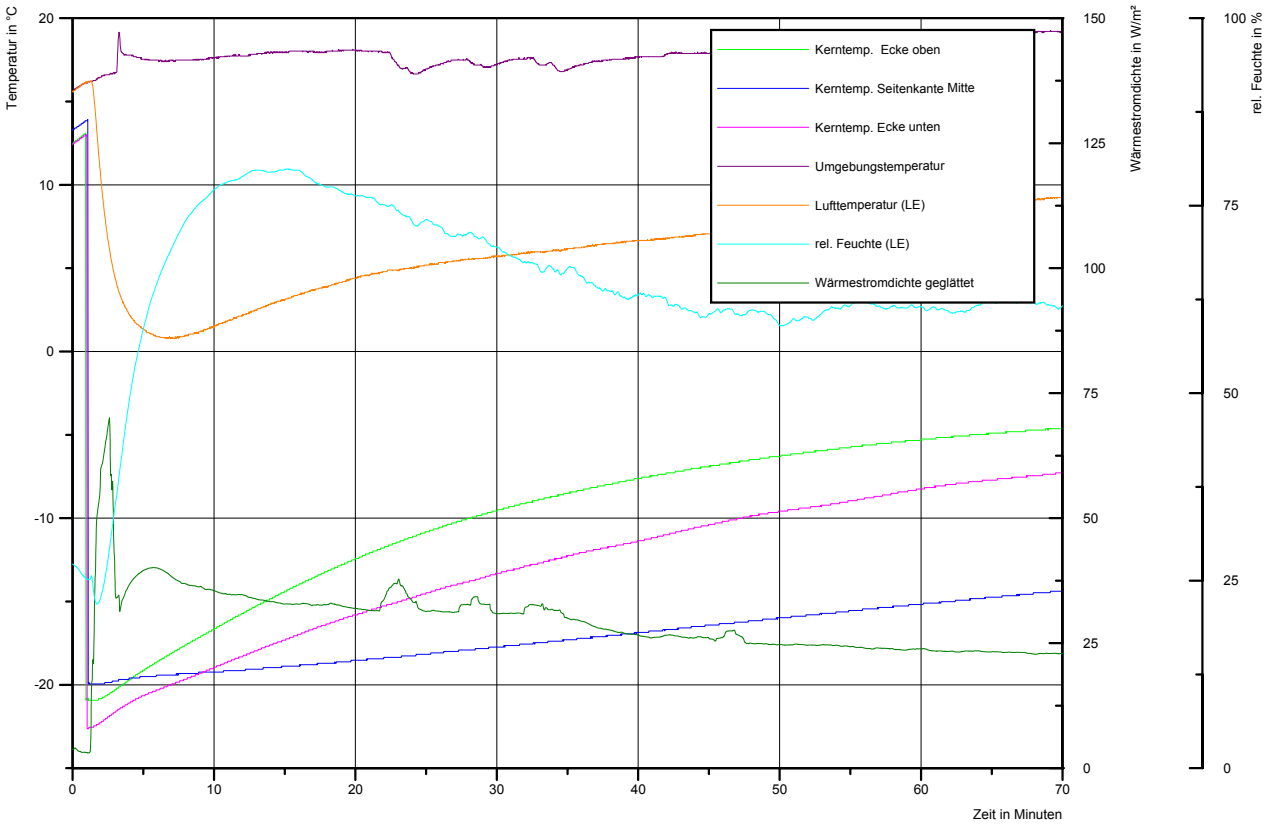

Bild 46 Versuch 12: Kräuter mit Dämmung Nr. 1

Bei Versuch 12 erreichten die Messwerte der benannten Positionen folgende Zeiten bis zum Erreichen der -15 °C.

Tabelle 12 Versuch 12: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter

Nummer	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 1
1	Ecke oben	10
2	Seitenkante Mitte	62
3	Ecke unten	16

6.6.4.3 Kräuter mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 13)

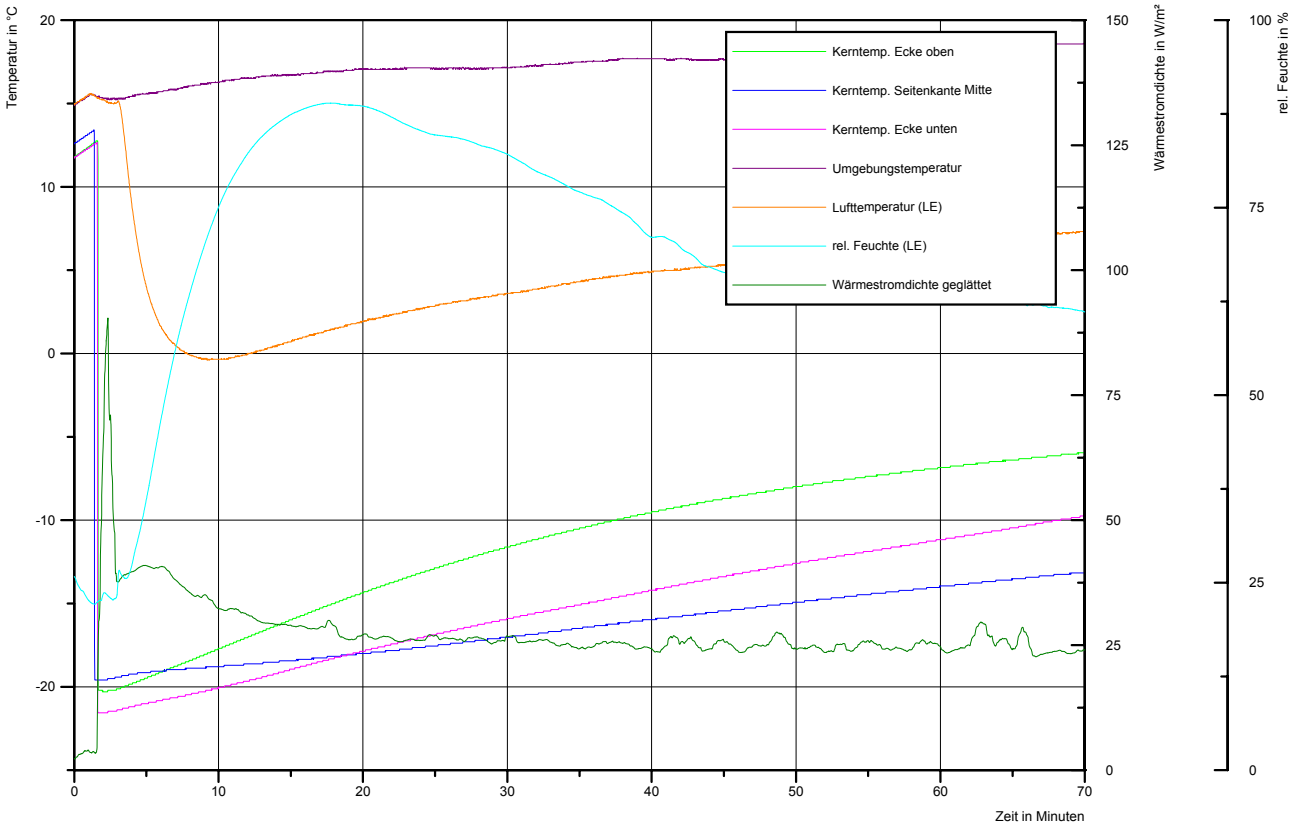

Bild 47 Versuch 13: Kräuter mit Dämmung Nr. 2

In Versuch 13 wurden nachstehende Zeiten erfasst.

Tabelle 13 Versuch 13: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 2
1	Ecke oben	14
2	Seitenkante Mitte	50
3	Ecke unten	25

6.6.4.4 Kräuter mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 14)

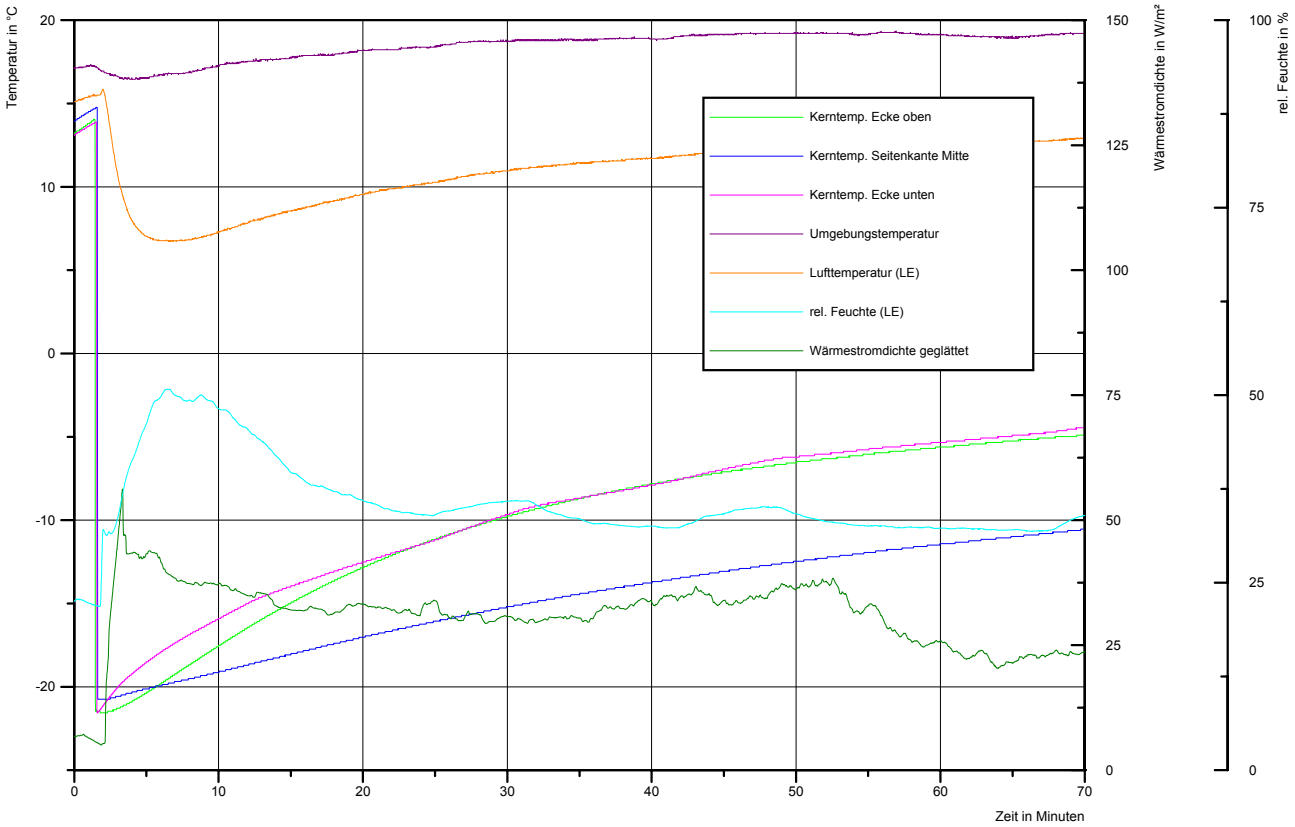

Bild 48 Versuch 14: Kräuter mit Dämmung Nr. 3

Die Kerntemperaturen erreichten folgende Zeiten bis zum Erzielen der zulässigen Grenztemperatur.

Tabelle 14 Versuch 14: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur der Kräuter

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 3
1	Ecke oben	9
2	Seitenkante Mitte	25
3	Ecke unten	9

6.6.4.5 Zusammenfassung der Versuche 11 bis 14

Die experimentelle Bestimmung der Erwärmungszeit ergab für TK-Käuter die in Tabelle 15 zusammengefassten Zeiten.

Tabelle 15 Erwärmungszeit TK-Kräuter

Messpunkt	Ohne Dämmung	Dämmung Nr. 1	Dämmung Nr. 2	Dämmung Nr. 3
	Zeit in Minuten			
Ecke oben	7	10	14	9
Seitenkante Mitte	19	62	50	25
Ecke unten	18	16	25	9

Erläuterung zu den Werten:

Die Ermittlung der Erwärmungszeiten am Beispiel TK-Kräuter zeigt erneut, dass die Packung mit der größten Wärmeaustauschfläche (Ecke oben) als erste die Grenztemperatur (-15 °C) erreicht. Unter Dämmung Nr. 1 wird eine Verlängerung der Erwärmungszeit von 43 %, bei der Dämmung Nr. 2 von 100 % und mit Dämmung Nr. 3 von 29 % erreicht. Diese Ergebnisse zeigen gut die Tendenz der zu erwartenden Wärmeschutzwirkung jedoch dürften aufgrund der theoretischen Betrachtung zwischen Dämmung Nr. 1 und Nr. 2 nicht so große Differenzen gemessen werden.

Bei der Messung der Kerntemperaturen von TK-Kräutern kam es zu Schwierigkeiten in der Positionierung der Thermoelemente im Packgut. Da der gefrorene Block (Packgut) kein homogener Körper ist, kann es zu Messungen von Lufträumen, die sich schneller erwärmen als das eigentliche Produkt, kommen. Dies erklärt die große Abweichung zwischen den in Versuch 12 und 13 gemessenen Werten.

Auf der Oberfläche der Packungen ist eine Benetzung mit Kondenswasser zu sehen

In Tabelle 16 sind die nach Gl. 2 errechneten und die aus Versuch 11 bis 14 erfassten Erwärmungszeiten für die kritischste Stelle an der Ladeeinheit zusammengefasst.

Tabelle 16 Vergleich der errechneten und messtechnisch erfassten Erwärmungszeit am Messpunkt Ecke oben (Kräuter)

Versuch	$\dot{Q}$ in W pro Packung	Zeit in Minuten		Abweichung der errechneten Zeit in %
		gemessen	errechnet	
Ohne Dämmung	1,60	7	5,2	-25,6
Dämmung Nr. 1	0,73	10	11,5	14,9
Dämmung Nr.2	0,60	14	13,9	-0,8
Dämmung Nr. 3	0,81	9	10,4	15,0

Erläuterung zu den Werten:

Liegt die theoretisch bestimmte Erwärmungszeit unter der gemessenen, bestätigt sich die unter 6.6.2 gezeigte Beobachtung, dass sich im Verlauf der Erwärmung der äußeren Randschicht ein Wärmestrom ($\dot{Q} < 0$) von den Packungen der zweiten Lage in die äußere einstellt. Die zugeführte Wärmemenge verlängert somit den Erwärmungsvorgang.

6.6.5 TK-Tortellini

TK-Tortellini stehen in Wellpappkartons (Bild 49) mit 10 Einzelpackungen (Bild 50 und Bild 51) à 750 g Nettogewicht zur Verfügung. Nachstehende Angaben wurden für eine Packung ermittelt:

1.	Abmessungen Wellpappkarton (L x B x H)	0,385 m x 0,240 m x 0,225 m		
	Wärmeaustauschfläche A	0,09 m²		
	Wärmeaustauschfläche B	0,05 m²		
	Wärmeaustauschfläche C	0,09 m²		
2.	Masse der Packung	$\overline{m}_{\text{Packgung}}$	=	0,768 kg
3.	prozentualer Wassergehalt	$\overline{x}_{\text{Wasser}}$	=	63,4 %
4.	Wassergehalt	$\overline{m}_{\text{Wasser}}$	=	0,487 kg
5.	Wärmemenge	Q	=	4,99 kJ
6.	Rohdichte	ρ	=	384,27 kg/m³

Bild 49 TK-Tortellini Packstück

Bild 50 TK-Tortellini: Anordnung der Packungen im Wellpappkarton

Bild 51 TK-Tortellini

Im Folgenden werden die Erwärmungsvorgänge der TK-Tortellini gemäß nachstehender Reihenfolge untersucht.

1.	ohne Dämmung	(Versuch 15)
2.	mit Dämmung Nr. 1	(Versuch 16)
3.	mit Dämmung Nr. 2	(Versuch 17)
4.	mit Dämmung Nr. 3	(Versuch 18)

6.6.5.1 Tortellini ohne Dämmung (Versuch 15)

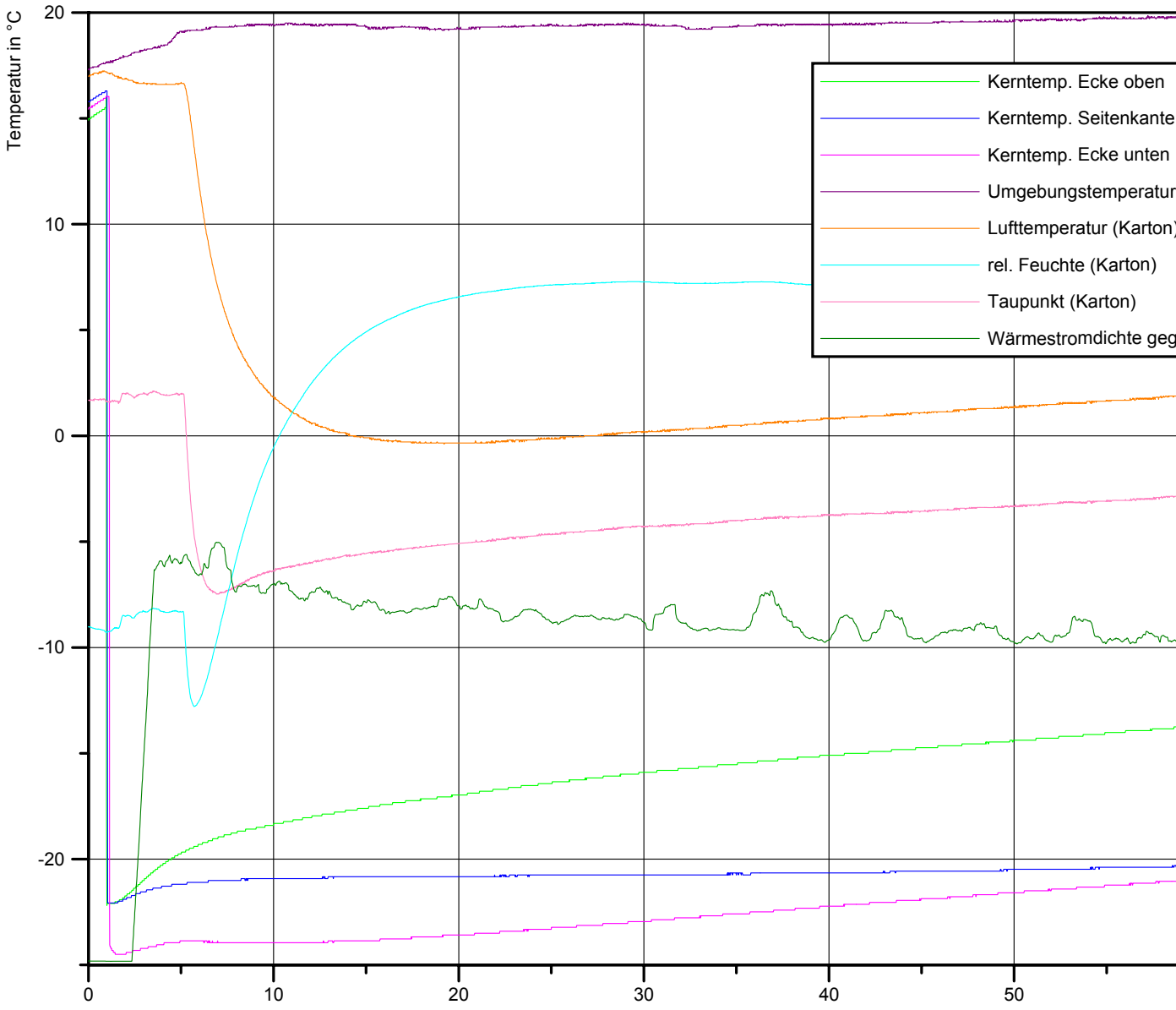

Bild 52 Versuch 15: Tortellini ohne Dämmung

Bild 52 zeigt den Verlauf der Kerntemperaturen der Untersuchung von TK-Tortellini ohne Dämmung. Für den Temperaturbereich von 5 K wurden nachstehende Erwärmungszeiten gemessen (Tabelle 17).

Tabelle 17 Versuch 15: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten ohne Dämmung
1	Ecke oben	38
2	Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten
3	Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten

6.6.5.2 Tortellini mit Dämmung Nr. 1 (Versuch 16)

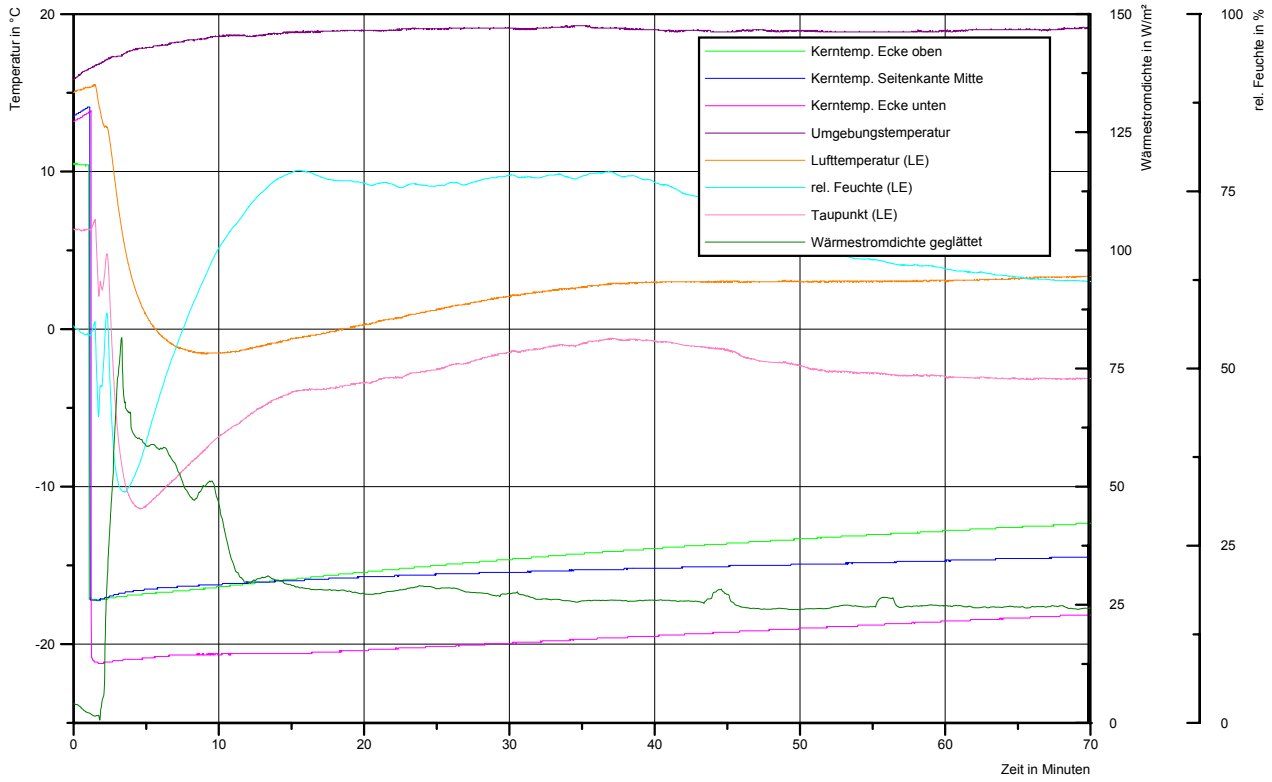

Bild 53 Versuch 16: Tortellini mit Dämmung Nr. 1

In Bild 53 sind der Temperaturverläufe von Tortellini unter der Dämmung Nr. 1 dargestellt. Für den Temperaturbereich von 5 K wurden folgende Erwärmungszeiten erfasst (Tabelle 18).

Tabelle 18 Versuch 16: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 1
1	Ecke oben	54
2	Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten
3	Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten

6.6.5.3 Tortellini mit Dämmung Nr. 2 (Versuch 17)

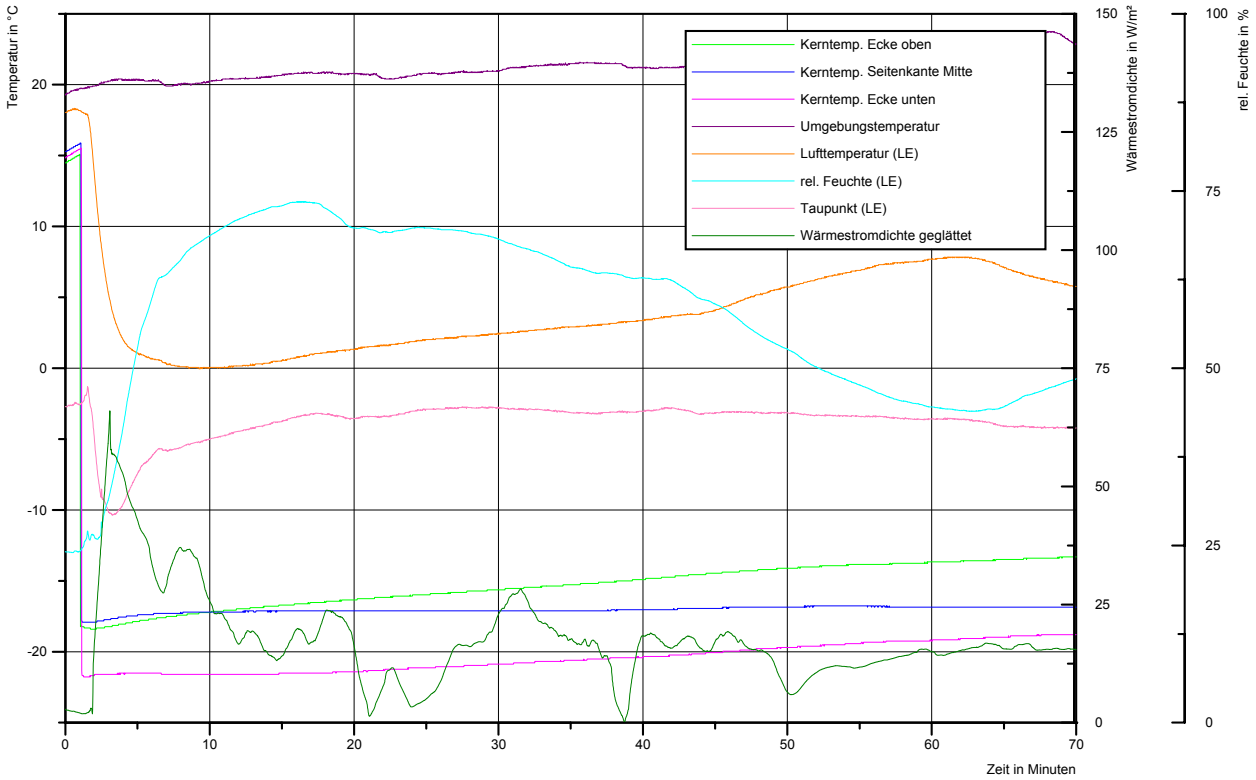

Bild 54 Versuch 17: Tortellini mit Dämmung Nr. 2

Bild 54 zeigt den Verlauf der Kerntemperaturen der Untersuchung von TK-Tortellini mit Dämmung Nr. 2. An den benannten Messpunkten wurden für den Temperaturbereich von 5 K die in Tabelle 19 genannten Zeiten bestimmt.

Tabelle 19 Versuch 17: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 2
1	Ecke oben	54
2	Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten
3	Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten

6.6.5.4 Tortellini mit Dämmung Nr. 3 (Versuch 18)

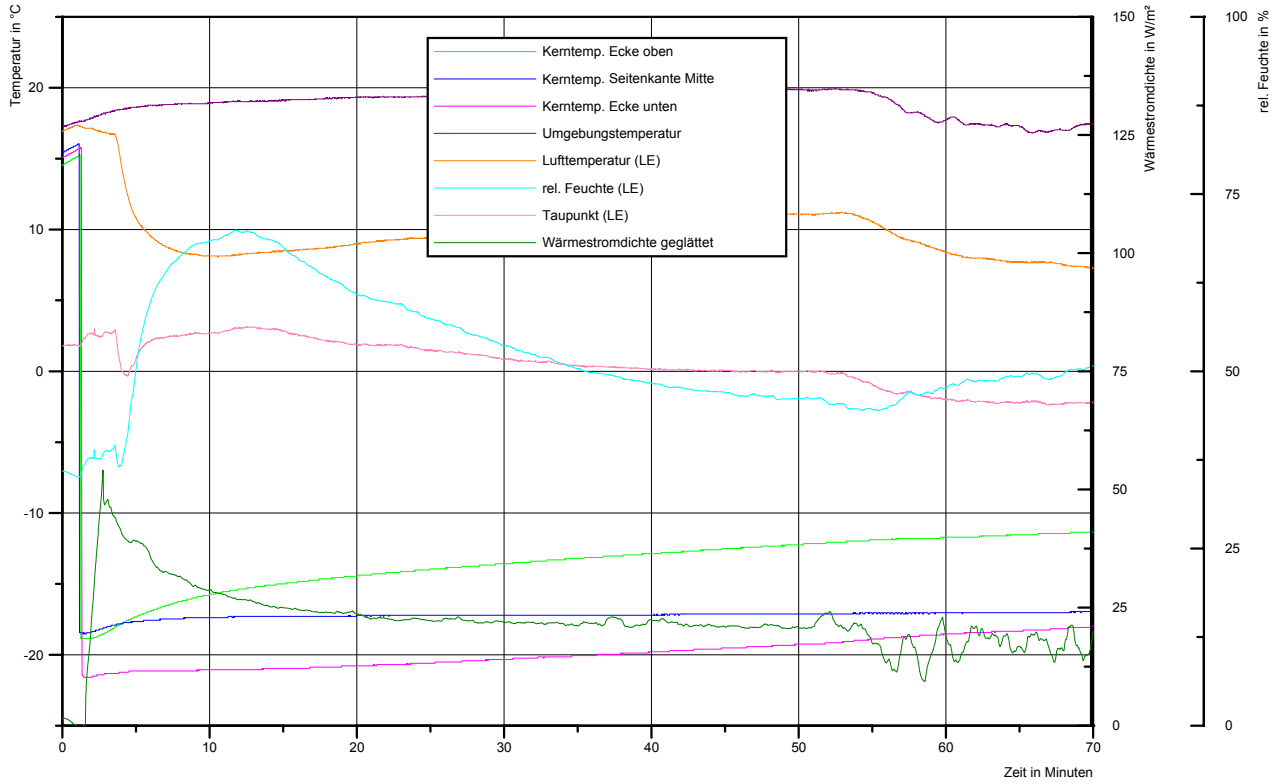

Bild 55 Versuch 18: Tortellini mit Dämmung Nr. 3

Bild 55 zeigt den Verlauf der Kerntemperaturen von Tortellini unter der Dämmung Nr. 3. Die Untersuchung ergab für den Temperaturbereich von 5 K folgende Erwärmungszeiten (Tabelle 20).

Tabelle 20 Versuch 18: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 3
1	Ecke oben	34
2	Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten
3	Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten

6.6.5.5 Zusammenfassung der Versuche 15 bis 18

Aus den Versuchen 15 bis 18 ergaben sich folgende (Tabelle 21) Erwärmungszeiten.

Tabelle 21 Erwärmungzeit TK-Tortellini

Messpunkt	Ohne Dämmung	Dämmung Nr. 1	Dämmung Nr. 2	Dämmung Nr. 3
	Zeit in Minuten			
Ecke oben	38	54	54	34
Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten
Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten	Grenztemperatur nicht überschritten

Erläuterung zu den Werten:

Ergänzend zu den Ergebnissen in Tabelle 21 soll an dieser Stelle auf den im Anhang D.1 (Untersuchung am Messpunkt Ecke oben ohne Dämmung) genannten Versuch der Erwärmungszeit von 5 Kerntemperaturen innerhalb einer Packung (Bild D.1) verwiesen werden. In dieser Untersuchung wurden Zeiten für die Temperaturdifferenz von 5 K von 50 bis 74 Minuten gemessen. Des Weiteren ergab eine Vergleichsmessung für Versuch 18 (Tortellini mit Dämmung Nr. 3) am Messpunkt Ecke oben eine Erwärmungszeit von 43 Minuten (Anhang D.2).

Die Messung der Kerntemperaturen von TK-Tortellini beinhaltete folgende Problematik. Zum einen gestaltete sich aufgrund der Produktgröße das Anbringen der Thermoelemente als schwierig und das mögliche Verrutschen der Sensoren konnte nicht vermieden werden. Diese Schwierigkeiten erklären die uneinheitlich Erwärmungszeiten unter gleichen Bedingungen (Anhang D.1).

Eine sichtbare Kondensatbildung an der Oberfläche der Packstücke (Wellpappkarton) ist nicht zu erkennen.

7 Diskussion der Ergebnisse

Wärmedämmsystem

Die messtechnische Bestimmung der Isoliereigenschaft der Wärmedämmsysteme ergab folgende Verteilung der Wärmedurchgangskoeffizienten (Bild 56). Vergleicht man die *U*-Werte miteinander so ergibt sich Wärmedämmung Nr. 1 als die Variante mit dem niedrigsten *U*-Wert. Wärmedämmung Nr. 1 verzögert somit den Wärmeaustausch zwischen dem Tiefkühlprodukt und seiner Umgebung am effektivsten.

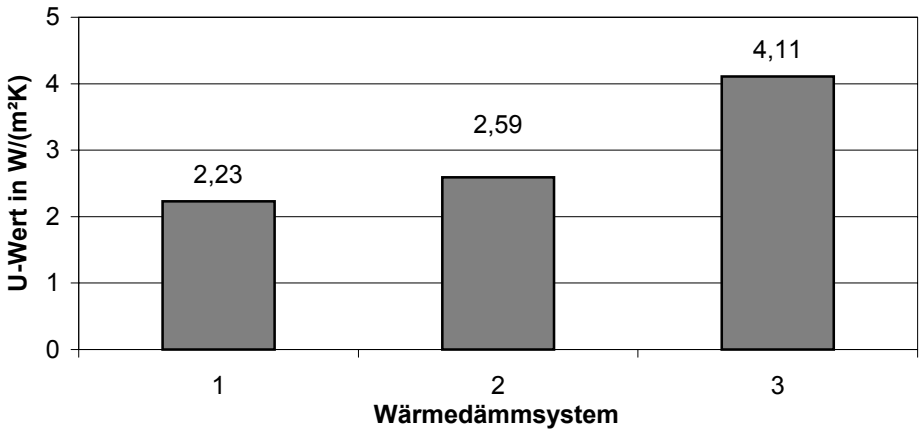

Bild 56 Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmedämmsysteme

Die Berücksichtigung der isolierenden Wirkung von Luftschichten erzielte bei der Berechnung des Wärmeschutzes für die Tiefkühlprodukte nach DIN EN ISO 6946 [9] folgendes Ergebnis. In der Berechnung unter 6.5.2 wurde durch die Berücksichtigung des Wärmedurchlasswiderstandes einer schwach belüfteten Luftschicht (Wandstärke 1,5 cm vertikal und 5 cm horizontal) unter der Wärmedämmung Nr. 2 eine Verbesserung des gesamt *U*-Wertes (Dämmung und Luftschicht) von 30 % erzielt. Der Untersuchungsansatz mit Hilfe von unterschiedlichen Luftschichtdicken den Wärmeschutz zu optimieren ist jedoch nur begrenzt möglich. Für eine Luftschicht von mehr als 2,5 cm wird nach Tabelle 4 kein höherer Wärmedurchlasswiderstand angegeben. Die Erhöhung einer Luftschichtdicke von 10 auf 15 mm erzielte lediglich eine Verbesserung des *U*-Wertes von 2,3 %.

In der Praxis sind die Kommissionier-Rollwagen (Bild 4) jedoch selten mit sortenreinen Packstücken bestückt. Die Kommissionierung von unterschiedlichen Packstücken mit unterschiedlichen Abmessungen ergibt somit keine einheitliche Oberfläche. Eine definierte Luftschichtdicke zwischen der Ladeeinheit und der Wärmedämmung wäre somit nicht gegeben. Die Betrachtung einer festgelegten Luftschichtdicke ist lediglich für einheitliche Objektoberflächen, d. h. für kubische Körper sinnvoll.

Erwärmungsverlauf der TK-Produkte

Um die thermischen Schwachstellen an einer Ladeeinheit zu bestimmen wurden Kerntemperaturmessungen an der gesamten äußeren Lage durchgeführt. Aus den Untersuchungen zeichneten sich bei allen drei Produktgruppen die oberen Ecken (Bild 29) als die kritischste Position ab. Sie haben die größte Wärmeaustauschfläche und erreichen im Durchschnitt 1,8-mal schneller die Grenztemperatur von -15 °C. In Tabelle 22 sind die Zusammenhänge zwischen der messtechnisch erfassten Erwärmungszeit und der Wärmestromdichte bezogen auf die Packung am Messpunkt Ecke oben zusammengefasst.

Tabelle 22 TK-Spinat, TK-Kräuter und TK-Tortellini am Messpunkt Ecke oben

Produkt	Messgröße	ohne Dämmung	Dämmung Nr. 1	Dämmung Nr. 2	Dämmung Nr. 3
Spinat	t in min	14	45	39	29
	$\dot{q}$ in W/m²	200	58	66	91
Kräuter	t in min	7	10	14	9
	$\dot{q}$ in W/m²	100	38	34	46
Tortellini	t in min	38	54	54	34
	$\dot{q}$ in W/m²	51	24	25	25

Der Vergleich der Erwärmungsgeschwindigkeit zwischen den drei TK-Produkten ohne Anwendung eines Wärmedämmsystems zeigt, dass die Tortellini wesentlich längere Erwärmungszeiten aufweisen. Die lange Wärmedämmzeit von Tortellini ist auf die Isolierung durch den Wellpappkarton mit U_{Umkarton} = 3 W/(m²K) (s. Anhang D.3), auf die Lufträume im Schlauchbeutel und die geringe Wärmeleitung durch die sehr kleinen Kontaktflächen zwischen den Tortellini-Stücken zurück zuführen.

Die Untersuchung zur Ermittlung der Erwärmungszeit unter Anwendung der Wärmedämmungen ergab, dass Dämmung Nr. 1 aufgrund des kleinsten *U*-Wertes tendenziell den bestmöglichsten Wärmeschutz erreicht. Infolge der Schwierigkeiten beim Positionieren der Thermoelemente im Packgut kam es bei den messtechnisch bestimmten Erwärmungszeiten zu Abweichungen, welche diesen Verlauf auf den ersten Blick nicht bestätigen.

Unter Berücksichtigung dieser Problematik bestätigt sich dennoch, dass die theoretische Betrachtung bzgl. des *U*-Wertes Dämmung Nr. 1 den effektivsten Wärmeschutz bietet. Betrachtet man die Reduzierung der gemessenen Wärmestromdichte im Vergleich zum ungedämmten System erreicht Wärmedämmung Nr. 1 die größte Reduzierung. Die gemessene Wärmestromdichte verringert sich durch den Einsatz einer Wärmedämmung zwischen 50 -70 %. Durch den somit erreichten Wärmeschutz wird der Sicherstellung der Qualität von TK-Produkten gegen unzulässiger Erwärmung Rechnung getragen.

Berechnung der theoretischen Erwärmungszeit

Für die theoretische Berechnung der Erwärmungszeit wird die Packung der oberen Ecke der Ladeeinheit angesetzt. Dies entspricht der Situation beim Einlagern der TK-Produkte in die Verkaufskühlmöbel, wo Einzelpackungen zeitweise auf den Truhen oder im z. B. im Einkaufswagen liegen und vom zuständigen Personal nacheinander in die Kühltruhen einsortiert werden. Sie ist die Packung mit der größten Wärmeaustauschfläche und somit die empfindlichste Einheit. Da die Packstücke in der Praxis selten so optimal auf dem Rollwagen angeordnet sind wie im Versuchsaufbau (Bild 13) kann für die theoretische Berechnung der Erwärmungszeit der Wärmestromeinfluss aus den inneren Lagen vernachlässigt werden. Maßgeblich für die theoretische Berechnung ist somit die Wärmeaustauschfläche, die Wärmemenge des Packgutes und der Wärmestrom.

Vergleicht man die errechneten Erwärmungszeiten mit den messtechnisch bestimmten so ergeben sich teilweise Unterschiede von bis zu 19 % (Tabelle 23). Diese sind auf die Annahme einer konstanten und interpolierten Wärmestromdichte in den Berechnungen zurück zuführen. Durch die Positionierung des Thermoelementes können Abweichungen aufgrund der nicht homogenen Temperaturverteilung im Packgut von 1 bis 2 Minuten auftreten.

Tabelle 23 Vergleich der theoretisch und messtechnisch bestimmten Erwärmungszeit von TK-Spinat und TK-Kräutern

Produkt	Kenngröße		ohne Dämmung	Dämmung Nr. 1	Dämmung Nr. 2	Dämmung Nr. 3
Spinat	Zeit in Minuten	gemessen	14	45	39	29
		errechnet	14,2	53,6	44,7	32,9
	Abweichung		1,2 %	19,1 %	14,5 %	13,5 %
Kräuter	Zeit in Minuten	gemessen	7	10	14	9
		errechnet	5,2	11,5	13,9	10,4
	Abweichung		-25,6 %	14,9 %	-0,8 %	15 %

Unter Berücksichtigung der im Abschnitt 6.6.5.5 beschrieben Problematik der Kerntemperaturmessung und der minimalen Wärmeleitung und den gemessenen Erwärmungszeiten von Tortellini, lässt sich das angestrebte Berechnungskonzept unter der Annahme der zur Verfügung stehenden Wärmemenge und der messtechnisch bestimmten Wärmestromdichte die theoretische Erwärmungszeit zu bestimmen, an dieser Probe (Tortellini) nicht anwenden. Die Bündelung der Einzelpackungen (Schlauchbeutel) in einem Wellpappkarton erzielt jedoch den notwendigen Wärmeschutz für dieses Produkt, so dass ausgehend von den Untersuchungsergebnissen Stückgut (hier Tortellini) in Umverpackungen aus Wellpappe einen ausreichenden Wärmeschutz durch die Isolierung des Wellpappkartons erhalten.

Kondensation von Feuchtigkeit an Packungsoberflächen

Grundsätzlich ist bei allen drei Produkten die Kondensation von Feuchtigkeit an der Oberfläche der Packstücke mit oder ohne Anwendung eines Wärmedämmsystems nicht zu vermeiden. Die Untersuchungen ergaben, dass es bei der Zwischenlagerung von TK-Produkten ohne Wärmedämmung in ungekühlten Räumen bereits bei relativen Luftfeuchten von 40 % rLf zu Kondensation von Feuchtigkeit an den Außenseiten der Packungen kommt. Die Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit unterhalb der Wärmedämmsysteme ergab Werte bis zu 90 % rLf. Bei den Kräutern kam es vornehmlich zur Kondensatbildung, die jedoch unter Anwendung der Dämmsysteme minimal verringert werden konnte. An der Außenseite der Spinat Packungen bildete sich bei allen Versuchen eine Raureifschicht aus. Diese bewirkte eine zusätzliche Isolierung des Packgutes. Bei den Tortellini kam es zu keinem Feuchtigkeitsniederschlag an der Außenseite des Wellpappkartons, da seine Oberflächentemperaturen über dem Taupunkt lagen.

8 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war, den Erhalt der Qualität von Tiefkühlprodukten, in bezug auf eine Verzögerung der Erwärmungszeit, bei der Zwischenlagerung in ungekühlten Wareneingangsbereichen des Handels bis zur Verbringung in die Präsentationskühlmöbel, unter Anwendung von drei Wärmedämmsystemen zu prüfen. Ferner galt es ein einfaches Berechnungsverfahren für die Auswahl einer optimalen Wärmedämmung zu entwickeln.

Hierbei war zunächst die Untersuchung der wärmespezifischen Eigenschaften der Wärmedämmsysteme zu bestimmen. Neben der Ermittlung von thermisch empfindlichen Stellen an einer Ladeeinheit, wurden Erwärmungsvorgänge an drei verschieden Tiefkühlprodukten mit und ohne Wärmedämmung messtechnisch untersucht und anhand der Ergebnisse die Zweckmäßigkeit der Wärmedämmsysteme bestimmt. Ferner galt es ein einfaches auf wenigen bzw. leicht zu ermittelnden Parametern basierendes Berechnungsverfahren zu entwickeln, um eine geeignete Auswahl einer Wärmedämmung zu simplifizieren. Für die Konzeption des Berechnungsverfahrens war die Ermittlung der Umgebungstemperatur, die Bestimmung der zur Verfügung stehenden Wärmemenge des tiefgefrorenen Lebensmittels und die messtechnisch erfasste Wärmestromdichte von Bedeutung.

Die Überprüfung des Berechnungsansatzes, an den drei TK-Proben erwies sich als nicht allgemeingültig. Der Ansatz bestätigte sich lediglich am Beispiel TK-Kräuter und TK-Spinat. Bei den TK-Tortellini kam er jedoch zu keinem aussagekräftigen Ergebnis. Schlussfolgernd aus diesen Ergebnissen ist zu vermerken, dass für TK-Produkte die in Faltschachteln verpackt und in einem Block tiefgefroren werden der Berechnungsansatz annähernd anwendbar und für stückiges Packgut, aufgrund der sehr geringen Wärmeleitung durch die minimalen Kontaktflächen, in Schlauchbeuteln und Faltschachteln nicht verwertbar ist. Sind jedoch mehrere Einzelpackungen, z. B. 10 Schlauchbeutel Tortellini in einem Wellpappkarton verpackt, ist durch die isolierende Wirkung des Umkartons ein langfristiger ausreichenden Wärmeschutz gewährleistet.

Von den drei Wärmedämmsystemen erwies sich die Variante Nr. 1 dicht gefolgt von Nr. 2 als diejenige mit dem besten Dämmvermögen. Welches Wärmedämmmodel nun in der Praxis angewendet wird, hängt von den zu schützenden Produktsortiment und der Ausstattung der Bereitstellungsräume des Handels ab. Grundsätzlich sollte man jedoch beachten das thermisch empfindliche Produkte wie TK-Kräuter zwischen Produkten mit einer höheren Wärmemenge (z. B. Spinat) eingebettet werden, um während der Zwischenlagerung in ungekühlten Bereichen von der isolierenden Wirkung den umliegenden Packstücken zu profitieren.

Stehen im Handel Kühlräume für die Zwischenlagerung zur Verfügung reicht der erzielte Wärmeschutz von Dämmung Nr. 3. Fehlt die Einrichtung dieser Räume, z. B. in kleinen Handelsketten, sollte je nach bestellter Ware (Umverpackung ja oder nein) die bestmögliche Wärmedämmung verwendet werden.

Die Wahl ob ein Dämmsystem im Mehrweg oder Einweg bevorzugt wird, ist abhängig von den persönlichen Entscheidungen der Anwender. Ein grundlegender Entschluss liegt allein in der Wahl einer transparenten oder undurchsichtigen Wärmedämmung. Bei der Warenannahme und der visuellen Kontrolle der Lieferung ist das Wärmedämmsystem Nr. 3 aufgrund seiner Displaywirkung zu favorisieren. Benötigt man jedoch den bestmöglichen Schutz (vornehmlich Produkte mit geringer Wärmemenge) ist eindeutig die Dämmung Nr. 1 zu empfehlen, die die optische Warenkontrolle jedoch nicht ermöglicht.

Die Frage bezüglich der Investitionssumme bei der Entscheidung für eines der geprüften Wärmedämmsysteme bedarf einer gesonderten Kalkulation, die in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden soll. An dieser Stelle seien lediglich als Anhaltspunkt die geschätzte Kosten stichpunktartig erwähnt.

<u>Dämmung Nr. 1 und Dämmung Nr. 2:</u>

- Der Preis einer Thermohaube liegt zwischen 7,50 - 8,50 €/m². Daraus ergibt sich ein Preis pro Thermohaube von ca. 36,- bis 41,- €. Es sind Umlaufzeiten von bis zu 1 1/2 Jahren bekannt. Für das manuelle Anbringen der Thermohaube sind zusätzlich Personalkosten hinzuzurechnen.

<u>Dämmung Nr. 3:</u>

- Ein Stretchhaube liegt je nach Foliendicke zwischen 1,40 -1,70 €/kg. Der Preis für eine Haube liegt somit bei ca. 0,70 - 0,85 €/Haube. Zusätzlich würden die Kosten für die Haubenstretchanlage[10] mit 150 000,- € hinzukommen

[10] Preis ohne die zusätzlich notwendige Fördertechnik.

Unabhängig von der Wahl eines geeigneten Wärmedämmsystems zu Schutz vor unzulässigen Erwärmungen der TK-Produkte sollten bei der Handhabung dieser Waren folgende Grundsätze befolgt werden.

- kurze Umschlagzeiten
- falls vorhanden grundsätzlich sofortige Einlagerung im Kühlraum
- Packstücke so dicht wie möglich auf dem Ladungsträger anordnen
- thermisch empfindliche Packstücke zwischen anderen Packstücken einbetten
- minimale Oberflächen, d. h. möglichst kubusförmig um eine geringe Wärmeaustauschfläche zu erhalten
- vor Zugluft schützen
- Mitarbeiterschulung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe der geprüften Wärmedämmsysteme ein weiterer Beitrag zur Absicherung der geschlossenen Kühlkette im Bereich des Warenumschlags beim Handel geleistet werden kann.

Literaturverzeichnis

[1] DTI DEUTSCHES TIEFKÜHLINSTITUT E.V.: Tiefkühlmarkt Deutschland. URL: http://www.tiefkühlinstitut.de, Juli 2002

[2] URL: http://www.tm-rolli.de (Dezember 2002)

[3] TK-REPORT: Tiefkühlkost ist erste Wahl (S. 32-33), August 2001

[4] KLEIN, RABE, WEISS: Lebensmittelrecht auf CD-ROM: Textsammlung. Hamburg: Behr´s Verlag, 23. Ausgabe (Jahr); Grundwerk 1996

[5] BUCHNER, Norbert: Verpackung von Lebensmitteln, Lebensmitteltechnologische, verpackungstechnische und mikrobiologische Grundlagen: Springer, 1999

[6] PEILNSTEINER, Jan; TRUSZKIEWITZ, Günter: Handbuch Temperaturgeführte Logistik. Hamburg: Behr´s Verlag, 1. Auflage 2002, S. 202

[7] BAEHR, Hans D.; STEPHAN, Karl: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 3. Auflage 1998, S. 518-519 (Auszug)

[8] NORM DIN EN ISO 7345 Januar 1996. Wärmeschutz: Physikalische Größen und Definitionen

[9] NORM DIN EN ISO 6946 November 1996. Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient Berechnungsverfahren

[10] TIMM, Fritz; HERRMANN, Karl: Tiefgefrorene Lebensmittel. Berlin, Wien [u. a.]: Blackwell-Wissenschafts-Verlag 2 Auflage 1996, S. 242

[11] PRANKEL, W.: Wärmedämmende Verpackungen aus Polystyrol-Schaumstoff für verderbliche Lebensmittel und andere thermisch empfindliche Versandgüter. Erschienen in: Verpackungsrundschau 1983 Nr. 10, S. 71

[12] CERBE, Günter; HOFFMANN, H. J.: Einführung in die Wärmelehre: von der Thermodynamik zur technischen Anwendung. München, Wien: Hanser 9. Auflage 1990

[13] KUCHLING, Horst: Taschenbuch der Physik.: Carl Hanser Verlag München Wien: Fachbuchverlag Leibzig im Carl Hanser Verlag 17. Auflage 2001

Anhang A

Wärmeübergangskoeffizienten der Dämmung Nr. 1

A.1 Versuch 1 an Wärmeaustauschfläche A

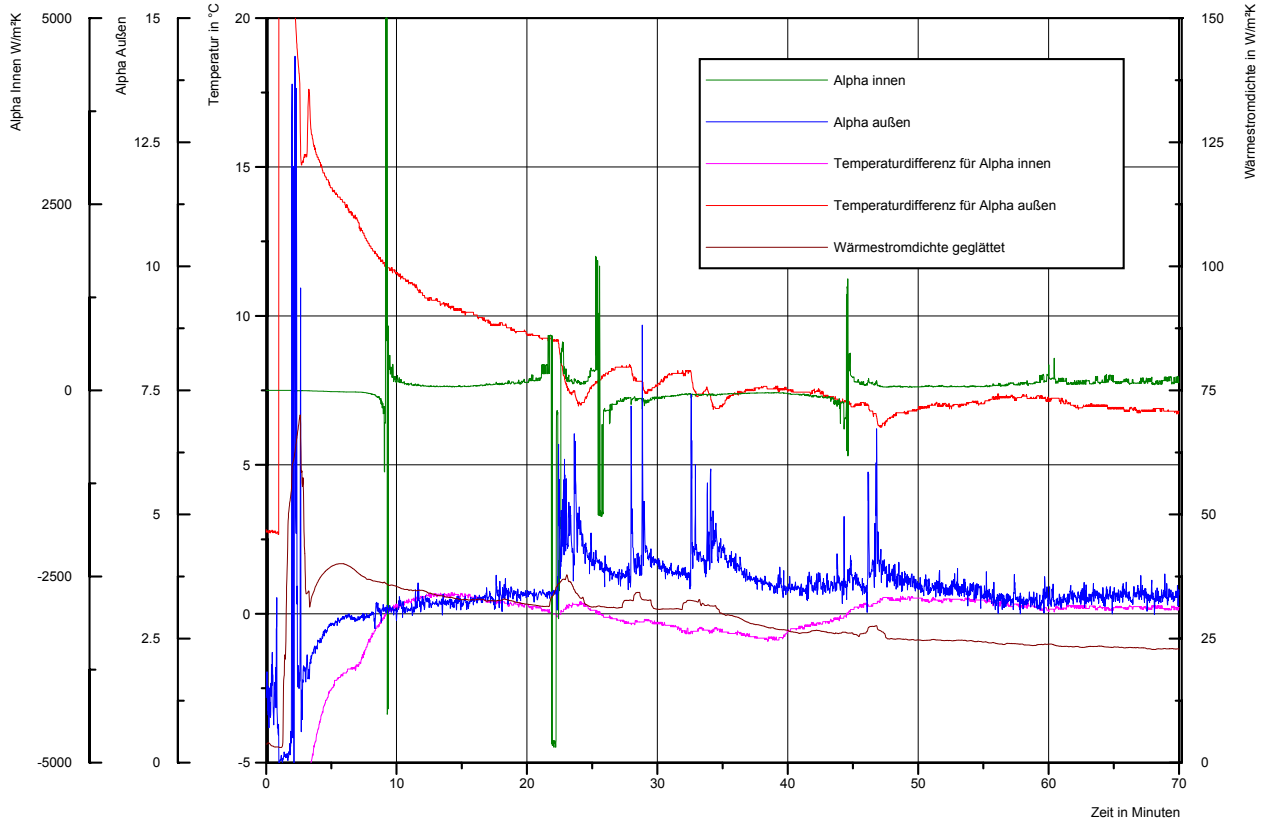

Bild A.1 Verlauf der α-Werte an Fläche A der Dämmung Nr. 1

A.2 Versuch 2 an Wärmeaustauschfläche B

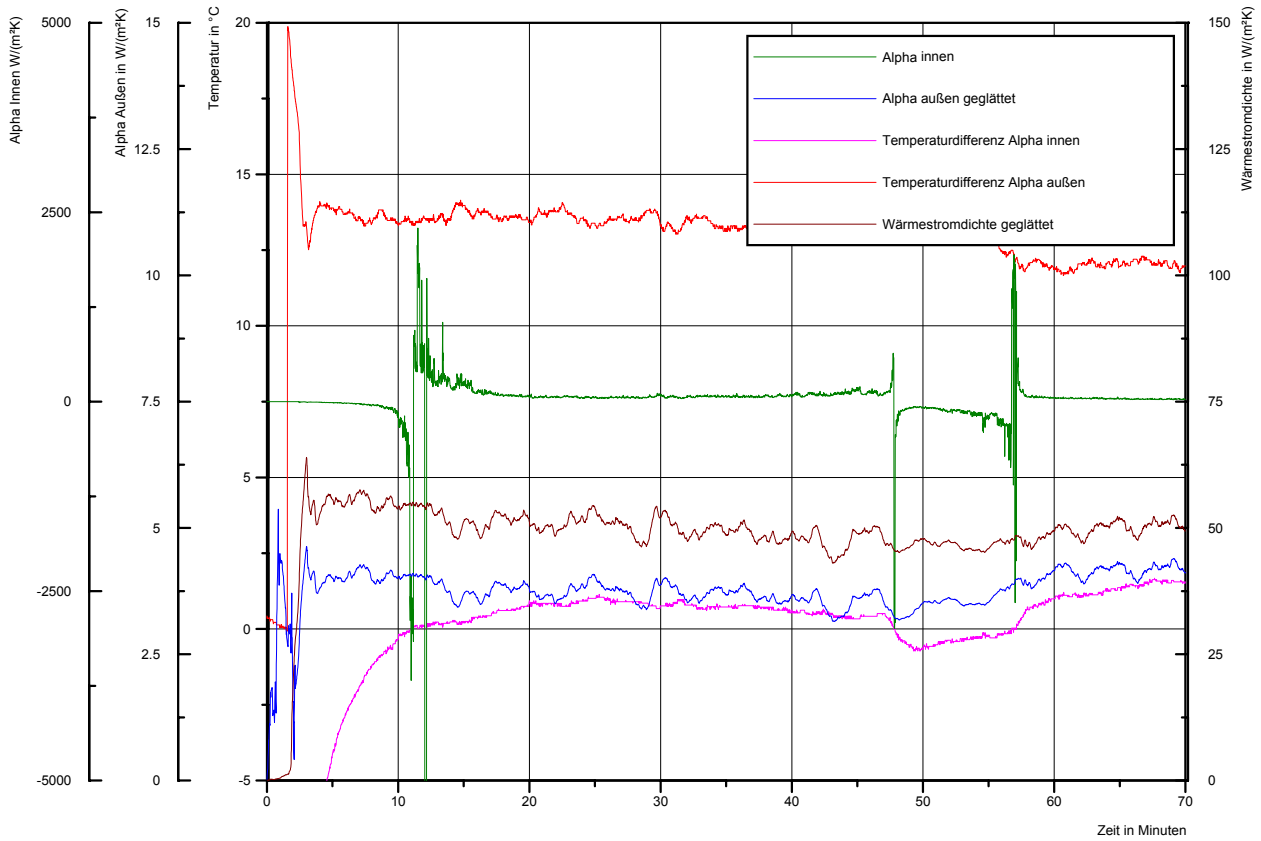

Bild A.2 Verlauf der α-Werte an Fläche der Dämmung Nr. 1

Anhang B

Unterschied zwischen Kern-, Luftschicht- und Oberflächentemperatur

B.1 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: Ecke oben

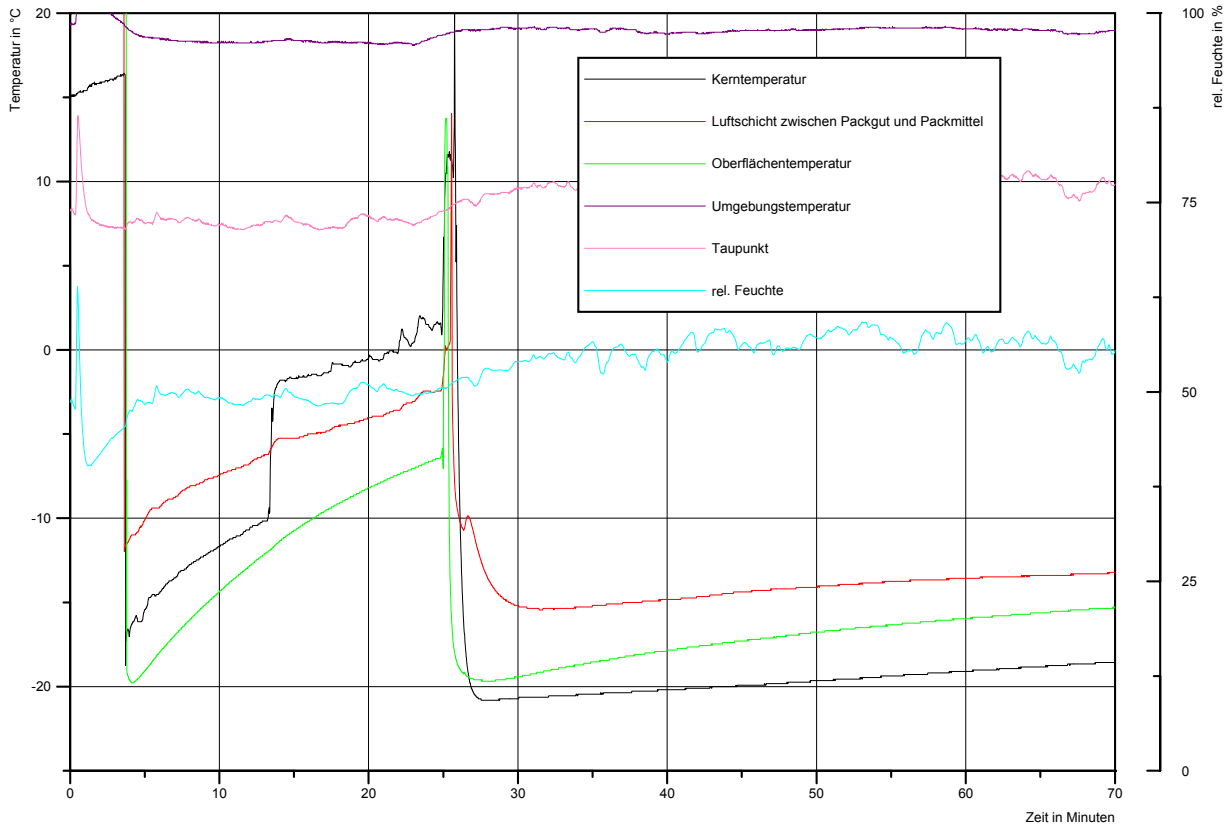

Bild B.1 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt Ecke oben

Bild B.1 zeigt die Unterschiede der einzelnen Messpunkte. Bei der 25. Minute wurden die Thermoelemente erneut an die Probe angebracht, da sich das Thermoelement bei der Kerntemperaturmessung in der 13. Minute gelöst hatte. Während die Oberflächentemperatur die -15 °C Grenztemperatur bereits erreicht, ist die Produktkerntemperatur noch im zulässigen Temperaturbereich.

B.2 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: Seitenkante Mitte

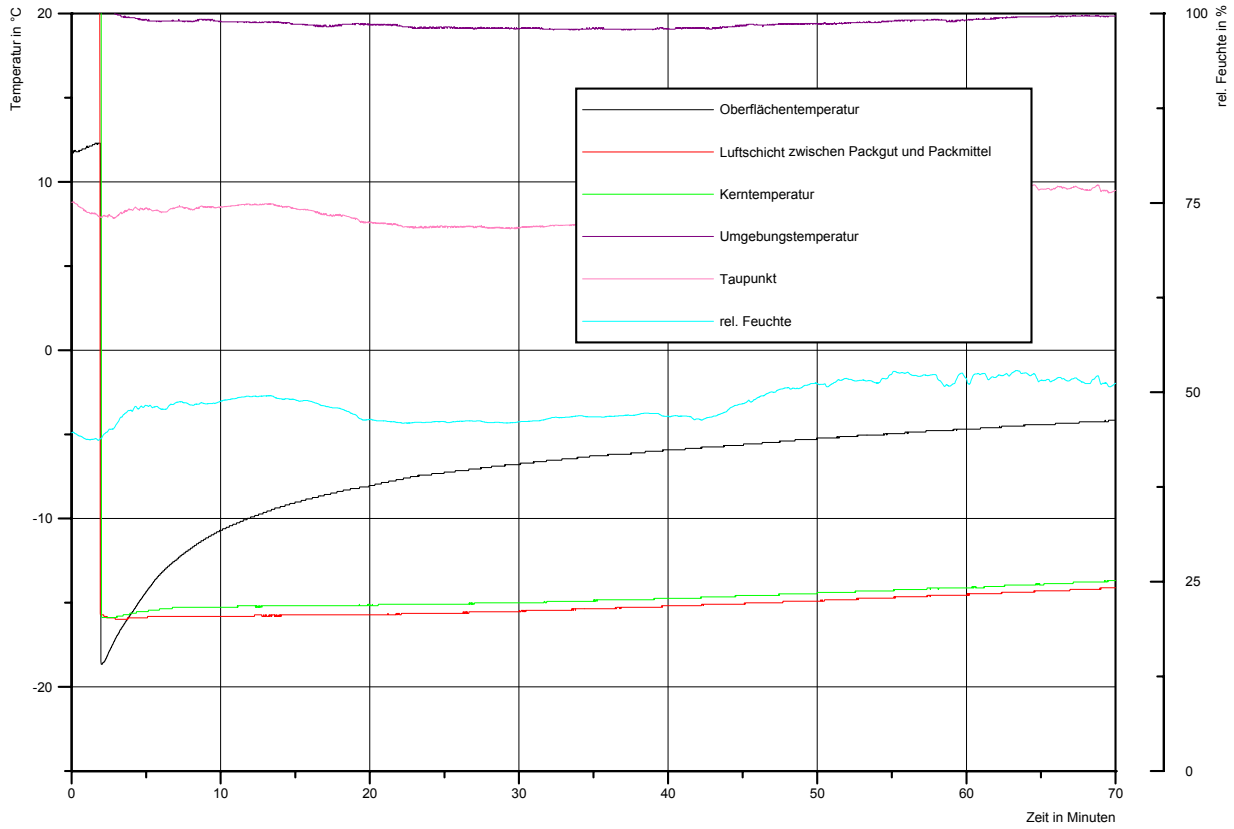

Bild B.2 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt Seitenwand Mitte

Bild B.2 zeigt die Unterschiede der einzelnen Messpunkte. Während die Oberflächentemperatur rasch ansteigt bleiben die Temperaturen der Luftschicht und vom Packgut länger unterhalb der zulässigen Grenztemperatur von -15 °C obwohl die Messung derselbigen erst bei -16 °C begann.

B.3 Untersuchung an TK-Kräuter am Messpunkt: im Zentrum der Ladeeinheit

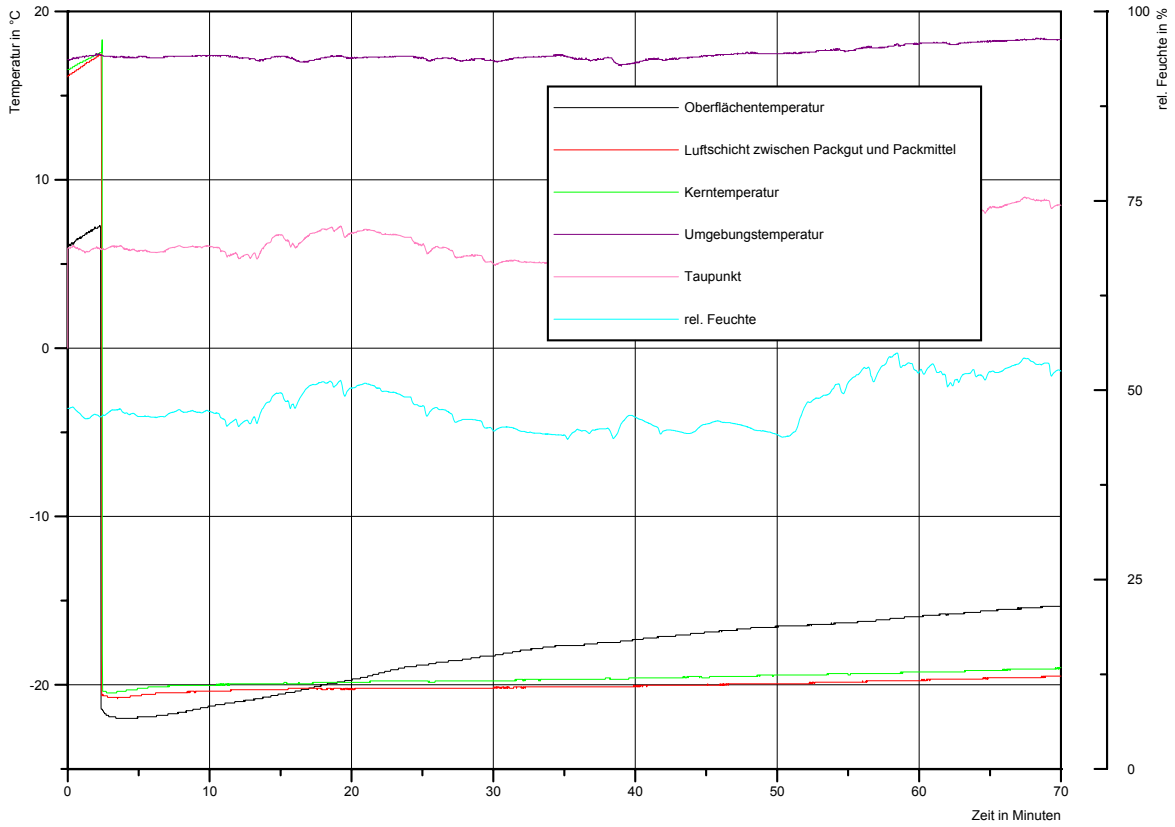

Bild B.3 Unterschied Oberflächen-, Luftschicht- und Produktkerntemperatur am Messpunkt im Zentrum der Ladeeinheit

In Bild B.3 zeigt sich erneut der Unterschied zwischen Oberflächen- und Kerntemperatur. Die Lage der Packung (im Zentrum der Ladeeinheit) zeigt darüber hinaus, dass die Temperaturen über den gesamten Messverlauf unterhalb der Grenztemperatur liegen.

Anhang C Spezifische Wärmekapazität c_p von Eis

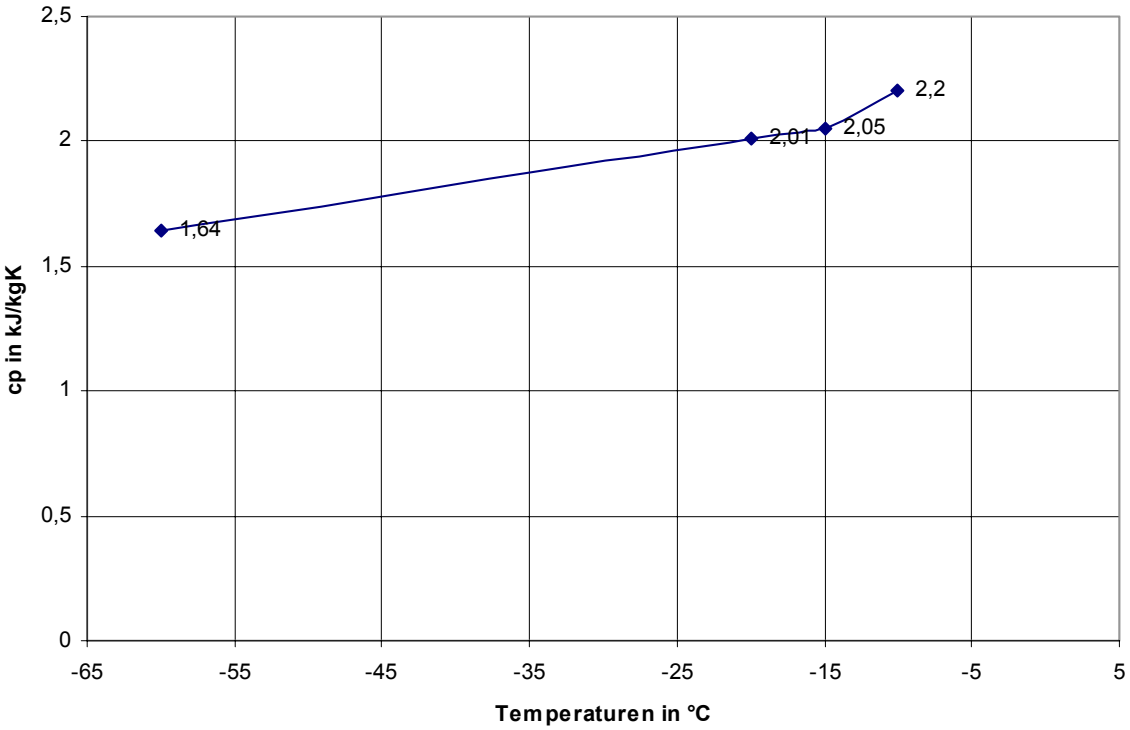

Bild C.1 Spezifische Wärmekapazität von Eis ([7], [12] und [13])

Anhang D TK-Tortellini

D.1 Untersuchung an TK-Tortellini ohne Dämmung am Messpunkt: Ecke oben

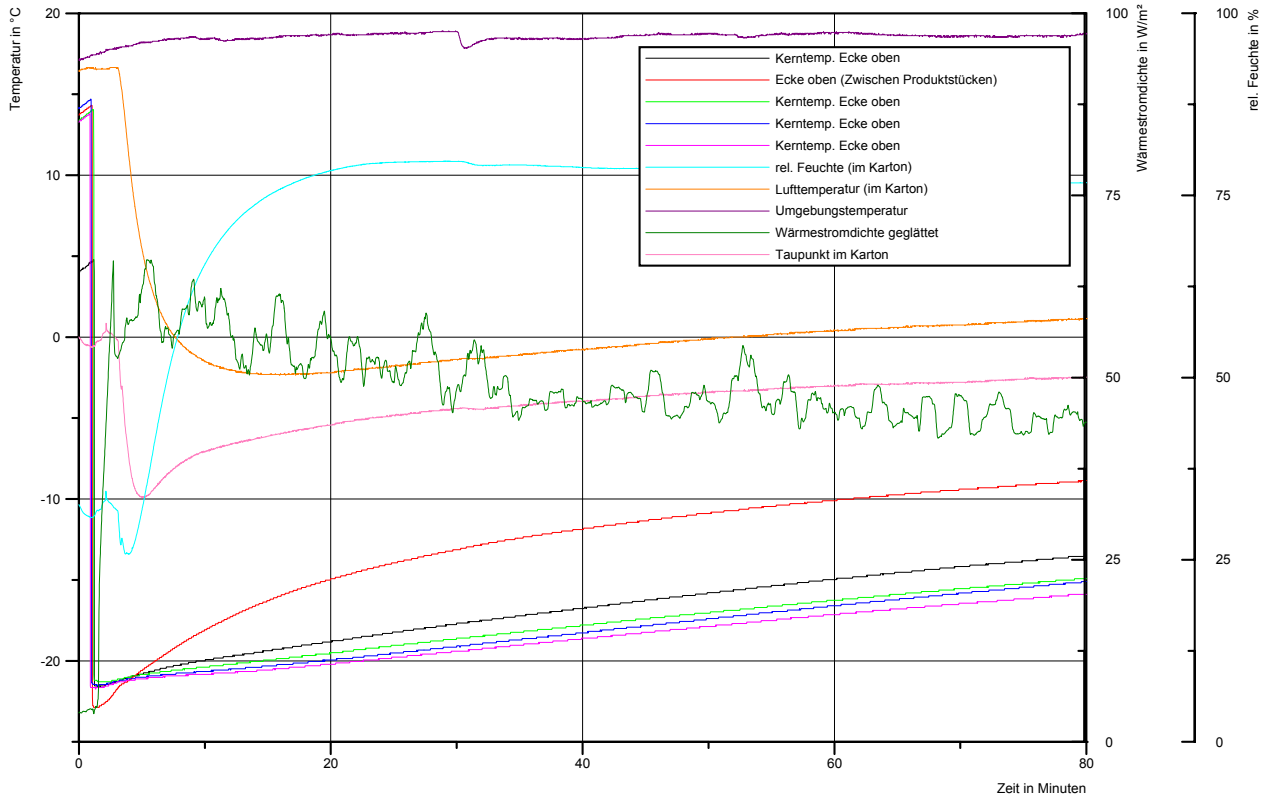

Bild D.1 5 Kerntemperaturen am Messpunkt Ecke oben (Tortellini ohne Dämmung)

Tabelle D.1 Anhang D.1: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten ohne Dämmung
1	Ecke oben	50
2	Ecke oben (zwischen Produktstücken)	14
3	Ecke oben	65
4	Ecke oben	63
5	Ecke oben	74

D.2 Untersuchung an TK-Tortellini mit Dämmung Nr. 3

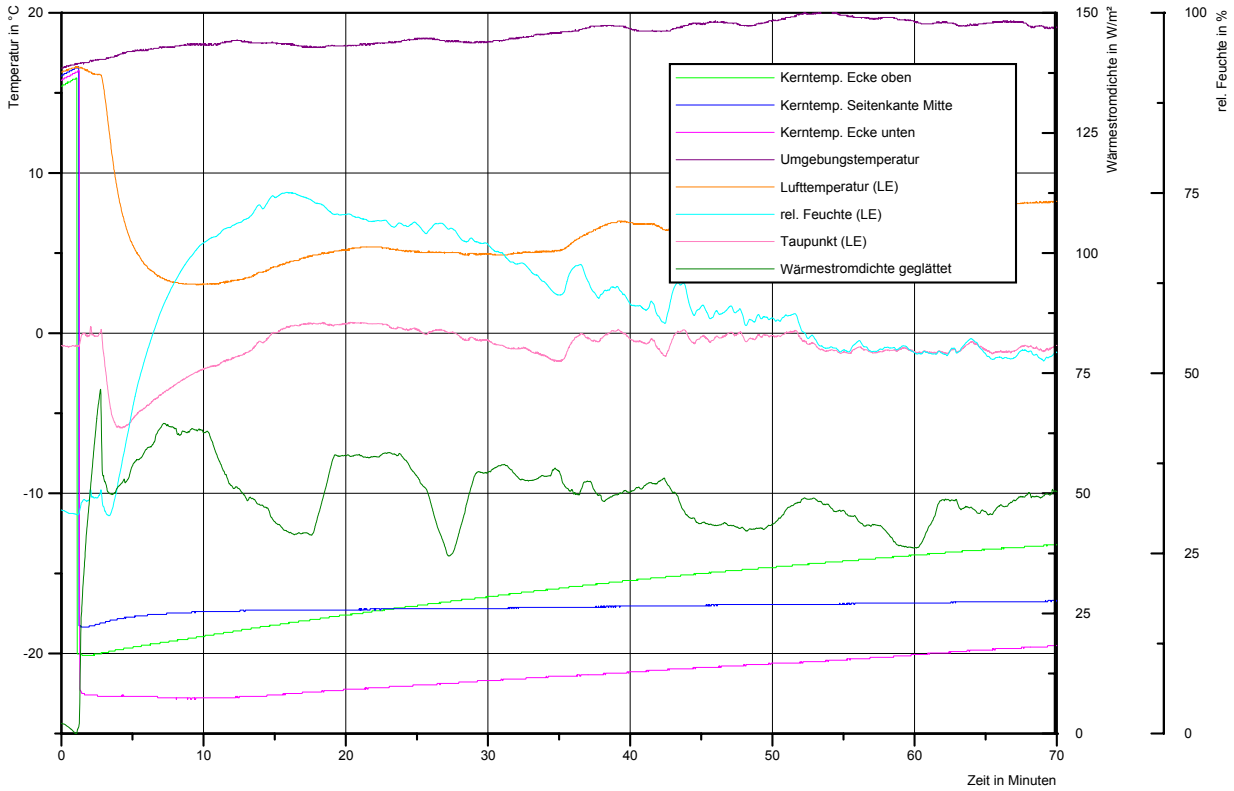

Bild D.2 Tortellini mit Dämmung Nr. 3

Bild D.2 zeigt den Verlauf der Messkurven von Tortellini unter der Dämmung Nr. 3. Der Messpunkt Ecke oben erreicht in 43 Minuten die zulässige Grenztemperatur von -15 °C. Messposition Nr. 2 und Nr. 3 überschreiten die Grenztemperatur während der Untersuchungszeit nicht.

Tabelle D.2 Anhang D.2: Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von Tortellini

Nr.	Messpunkt	Zeit in Minuten mit Dämmung Nr. 3
1	Ecke oben	43
2	Seitenkante Mitte	Grenztemperatur nicht überschritten
3	Ecke unten	Grenztemperatur nicht überschritten

D.3 *U*-Wert des Wellpappkartons

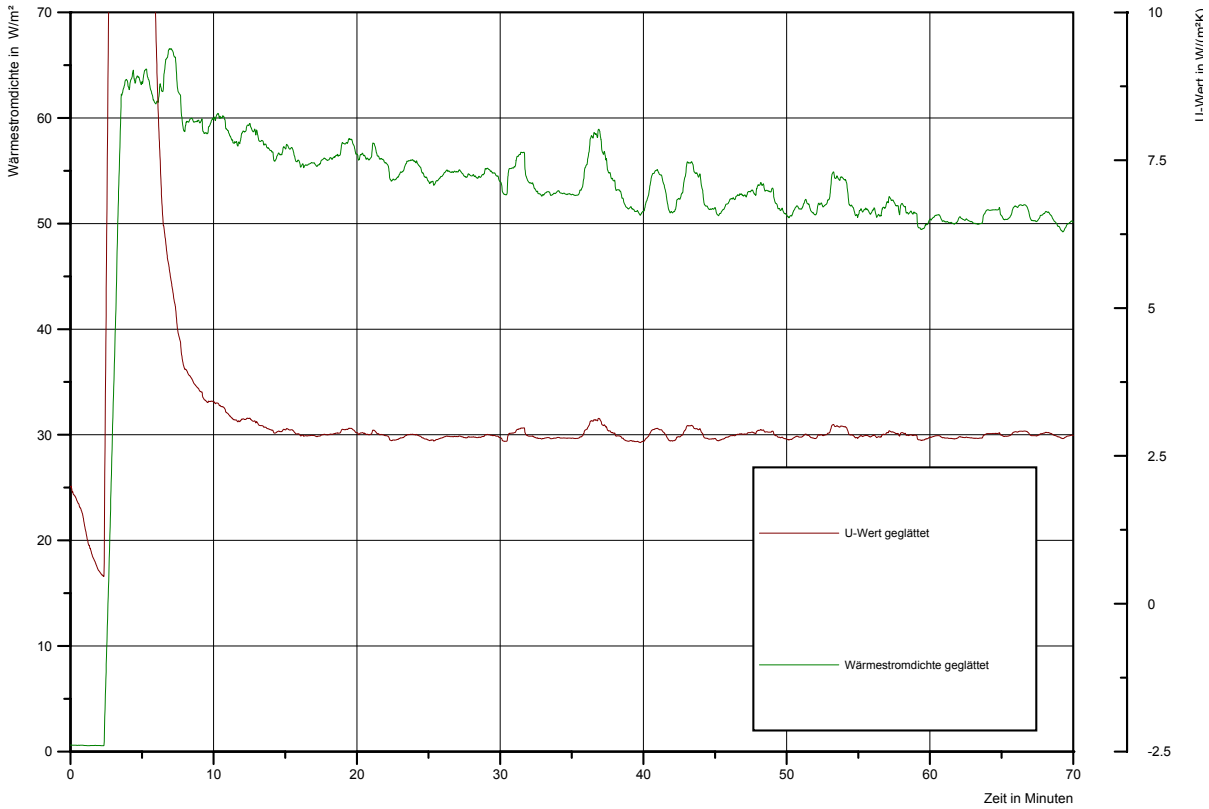

Bild D.3 *U*-Wert des Wellpappkartons

Bild D.3 zeigt den *U*-Wert Verlauf des Wellpappkartons. Er wurde nach dem unter Abschnitt 6.1.1 beschrieben Verfahren bestimmt und beträgt $U = 3$ W/(m²K).