

Anwendung der Thermo- graphie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte

Application of Thermography
to Optimise Climate Control during
Storage of Agricultural Products

Gefördert vom:



Mit Unterstützung durch:



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 45

Potsdam-Bornim 2005

Anwendung der Thermo- graphie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte

Application of Thermography
to Optimise Climate Control during
Storage of Agricultural Products

Gefördert vom:



Mit Unterstützung durch:



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 45

Potsdam-Bornim 2005

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

☎ 0331 5699-0
Fax 0331 5699-849
E-Mail atb@atb-potsdam.de
Internet www.atb-potsdam.de

Bearbeiter des ATB:

Dr.-Ing. Sabine Geyer
Dr.-Ing. Klaus Gottschalk
Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans Jürgen Hellebrand
Dr.-Ing. Horst Beuche, Dipl.-Ing. Hellen Jacobs, Dipl.-Ing. Ines Ficht,
Prof. Dr. sc. agr. Ralf Schlauderer, HS-Mathem. Ingolf-Gerrit Richter

Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen des Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema

Agrartechnik - Integrierter Umweltschutz in der Landwirtschaft

„Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren durch Entwicklung innovativer Sensorik und Gestaltung der Produktionsprozesse im Sinne eines integrierten Umweltschutzes“

Projektpartner:

Friweika e.G., Weidensdorf / Sachsen

Dipl.-Landwirt Arnulf Kern (Projektleitung)
Dipl.-Ing. Berger

KTBL-Versuchsstation Munster-Dethlingen

Dr. Rolf Peters (Projektleitung)
Dipl.-Ing. agr. Egbert Schorling

Typographische Gestaltung:

Christine Bronowski

Oktober 2005

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und Unterstützung des Projektträgers des BMBF, Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ).
BMBF-FKZ: 0339992 Teilprojekt 06 (5559)

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2005

Inhaltsverzeichnis

	Abstract	5
1	Einleitung	5
2	Klimasteuerung im Kartoffellager-Stand der Wissenschaft und Technik....	6
3	Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Thermographie	10
3.1	Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen der Thermographie	10
3.2	Aktuelle Anwendungen der Thermographie	14
4	Aufgabenstellung/Ziele	16
5	Material und Methoden	17
5.1	Konventionelle Messtechnik	17
5.2	Thermographie-Messtechnik	17
5.2.1	IR-Kamera	17
5.2.2	Auswertung der IR-Bilder	18
5.3	Versuchsstand und Messaufbau	20
5.3.1	Einzelkiste	20
5.3.2	Kartoffellager (FKL/VKL)	21
5.4.	Ansteuerung des Systems, Datenübertragung und –auswertung	26
5.5	Zwangsbelüftetes Lager	28
6	Einsatz der Thermographiemesstechnik im Kartoffellager zur Temperatur-/Klimaerfassung	31
6.1	Bewertung der gemessenen IR-Temperatur	31
6.1.1	Ermittlung der Korrekturgleichung	31
6.1.2	Fehlerquellen	34
6.2	Gezielte Klimasteuerungen an der Einzelkiste	35
6.2.1	Erwärmen	36
6.2.2	Kühlen	37
6.2.3	Geregeltes Klima	38
6.2.4	Ungeregeltes Klima	38
6.3	Klimaerfassung während 2 Lagerperioden mit betriebseigener FKL- Klimasteuerung	39
6.3.1	Langzeit-Temperaturerfassung	39

6.3.2	Kurzzeit-Temperaturerfassung/Klappenversuche	44
6.4	Sonstige Ergebnisse	46
6.4.1	Abtrocknungsphase im Kartoffellager	46
6.4.2	Keimung der Knollen.....	49
6.4.3	Vergleich mit einem zwangsbelüfteten Lager.....	49
6.5	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	51
7	Einsatz der Thermographie im Kartoffellager zur Klimasteuerung	57
7.1	Auswertung der Arbeitsweise der betriebsinternen Klimasteuerung	57
7.2	Maßnahmen zur Optimierung der Klimasteuerung mit Hilfe der Thermographie.....	58
7.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	66
8	Ökonomische und umweltrelevante Bewertung	67
9	Zusammenfassung	72
10	Literaturverzeichnis	75
	Anhang.....	78
	Bornimer Agrartechnische Berichte.....	79

Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte

Abstract

One of the most important goals during storage of potatoes is the maintenance of the potato quality. Additionally, it is obvious to reduce stock costs which comprise energy and other costs. For achieving this goal the conditions for a favourable store climate must be maintained during the storage period.

In stores with a storage capacity e.g. up to 15,000 tons of potatoes and storage box pile heights up to 8.5 m placed on a ground area of approx. 5000 m² the keeping of a well adapted climate control may arise to an exceptional problem. Everywhere in the store the desired temperature should remain between 4 and 5 °C.

By means of the infrared thermography technology it is possible to determine the temperature distribution in the store from a thermographic image. The current temperatures can be read out and their changes can be analysed. The air conditioning processes in a free convective ventilated store can be examined and the effectiveness of the ventilation dampers can be controlled by using this technology. The air flow can instantly be recognized because the wood surfaces of the bins react quickly to the changes of temperatures. In this way seized temperature levels can be used directly for a ventilation control.

1 Einleitung

Zu den vorrangigen Zielen der Kartoffellagerhaltung gehören die Minimierung lagerbedingter Verluste sowie die Sicherung der Kartoffelqualität über die Lagerperiode hinweg. Gleichzeitig sind niedrige Lagerhaltungskosten sowie Aspekte der Umweltentlastung durch Energieeinsparung und Emissionsminderung klimarelevanter Gase wichtige Nebenbedingungen für eine auch längerfristige Wettbewerbsfähigkeit. Um diesen Zielen näher zu kommen, wurde in den letzten Jahren die Technik der Lagerhaltung weitgehend verbessert (JANSEN 2000, LEPPACK 1993, SCHEER 1993). Die Einführung von Kistenlagern anstelle von Haufenlagern gewährleisteten die Erhaltung einer höheren Kartoffelqualität während der Lagerung (PÖTKE 2002, LEPPACK 2000). Zusätzlich wird eine Vielzahl von Belüftungsmodellen und Belüftungssteuerungen angeboten mit dem Anspruch, die Qualität der Kartoffeln während der Lagerperiode zu erhalten (LEPPACK 1994, SCHORLING 2001, SCHIERHORN 1998). Konvektiv belüftete Lager (FKL) arbeiten dabei wirtschaftlicher und umweltschonender als zwangsbelüftete Kartoffellager. Dieses Lüftungsprinzip nutzt die natürliche freie Konvektion aus, ohne zusätzliche maschinelle Lüftungseinrichtungen (GOTTSCHALK 1998).

Voraussetzung für eine erfolgreiche Qualitätssicherung bei der Lagerung landwirtschaftlicher Produkte ist die Einhaltung relevanter Klimaparameter während der Lagerperiode

(GOTTSCHALK 1998, LANDRY et al. 2001, JAYAS et al. 2001, MALTRY 1998). Eine bestangepasste Klimatisierung erfordert eine möglichst hohe Anzahl an Messfühlern (Sensoren) an geeigneten Positionen im Lagerhaus, um den Zustand der Produkte möglichst genau zu erfassen. Traditionell werden Temperatursensoren und Feuchtesensoren gemäß gemessenen oder vermuteten Strömungsverläufen in das Lagergut platziert bzw. an der Zuluft- und Abluftseite angeordnet. Die so gemessenen Temperaturdaten liefern nur lokale Informationen zu den Produktzuständen.

Durch Einsatz einer Infrarot-Thermographie-Kamera (IR-Kamera) lässt sich ein großflächiges Gesamtbild über die lokalen Unterschiede der Temperaturverläufe an der Oberfläche des Lagerguts gewinnen (EBERT 1962). Ein weiterer Vorteil ist, dass dabei die Oberflächentemperaturen berührungslos ermittelt werden.

Deshalb soll in diesem Vorhaben untersucht werden, ob sich die Oberflächentemperatur der Produkte als Informationsquelle zur Steuerung eines Belüftungsregimes eignet. Es ist zu untersuchen, ob mit thermographisch ermittelten Online-Temperaturdaten eine höhere Qualität in der Klimasteuerung zu erreichen ist. Somit könnte die Thermographie eine zukunftsweisende Komponente für eine solche Steuerung werden. Diese optimierte innovative Steuerungstechnik eröffnet die Möglichkeit, die für die Klimatisierungsvorgänge benötigte Energie zu reduzieren und damit sowohl Kosteneinsparungen als auch umweltrelevante Verbesserungen zu erreichen.

2 Klimasteuerung im Kartoffellager – Stand der Wissenschaft und Technik

Kartoffeln sind lebende Objekte, deren Qualität während der Lagerung am ehesten erhalten werden kann, wenn Temperatur, Feuchte und Geschwindigkeit der Umgebungsluft während der verschiedenen Lagerperioden „optimal“ sind. Je nach Sorte liegen die Lagerbedingungen für Speisekartoffeln bei Temperaturen von 3 °C bis 5 °C und 95 % Luftfeuchte. In den Kartoffeln entwickelt sich durch deren Lebensvorgänge unter anderem Wärme. Auf diese Weise finden zwischen den Kartoffelknollen und der in den Hohlräumen zwischen den Kartoffeln befindlichen Luft elementare Wärme- und Stofftransportvorgänge statt (GOTTSCHALK 1994).

Diese Wärme- und Stofftransportvorgänge werden heutzutage mit Hilfe mathematischer Modelle berechnet und teilweise bei der Belüftungsteuerung in Algorithmen berücksichtigt (GOTTSCHALK 1994, GOTTSCHALK 1998, PÖTKE et al. 1999), allerdings war dies nicht immer so. Die Technik der Lagerhaltung von Kartoffeln hat sich damit im letzten Jahrhundert maßgeblich verändert und verbessert.

Während noch um die Jahrhundertwende Kartoffeln in Erdgruben, Kellern und Mieten eingelagert wurden, existiert heutzutage eine Vielzahl von Lagerungs- und Belüftungsverfahren für die Langzeitlagerung von Kartoffeln (Tabelle 1) (JANSEN 2000).

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Lagerverfahren nach Schumann 1999, (JANSEN 2000)

Art der Stapelung	Lüftungsprinzip	Lüftungsverfahren	Druckverhältnisse in der Schüttung	System der Luftzuführung 1)	Art der Zuluft	Technische Lösungen für die Luftzuführung
Lagerung in loser Schüttung	Freie Lüftung	Auftriebslüftung (max. 1,5 m Schütthöhe)	Unterdruck durch Auftrieb	offen	Frischlufte	Luken, Tore
	technische Belüftung	Zwangsdurchlüftung	Unterdruck oder Gleichdruck oder Überdruck	offen oder geschlossen	Frischlufte Mischlufte Umlufte	Überflurkanäle oder Unterflurkanäle
Lagerung in Behältern	Freie Lüftung	Freie konvektive Lüftung (FKL)	Überdruck durch Auftrieb	offen	Frischlufte	Luken
		Sonstige Formen freier Lüftung				
	Kombinierte Belüftung	Wahlweise Kombination von Elementen freier Lüftung und technischer Belüftung				
	Technische Belüftung	Raumbelüftung	Unterdruck oder Gleichdruck	offen oder geschlossen 2)	Frischlufte Mischlufte Umlufte	Schlitzwand Wurflüftung Wand- und Leckenlüfter
Zwangsdurchlüftung		Überdruck	Einsatz seitlich geschlossener Behälter	Schlitzwand Unterflurkanäle		
1) offen = Zu- und Ablüftung über Luken möglich geschlossen = Zu- und Abluft nur über Ventilatoren 2) Einsatz seitlich geschlossener Behälter						

Im Wesentlichen unterscheiden sich die Verfahren in der Art der Stapelung (lose Schüttung oder Behälterlagerung) und des Lüftungsprinzips; das heißt, ob die Lüftung frei durch Auftrieb oder mit Hilfe zusätzlicher maschineller Lüftungseinrichtungen erreicht wird (**Bild 2.1**).

Bei der Zwangsbelüftung wird die Luft - auch im Kistenkern - mit Hilfe von Ventilatoren direkt ausgetauscht und so eine schnelle Abkühlung, Abtrocknung und Kühllhaltung erreicht. Projektierte Luftmengen, anfangs 35 – 60 m³/t h, wurden zur Beschleunigung der Abtrocknungsbelüftung in den folgenden Jahren auf über 100-150 m³/t h und für die Abtrocknungslüftung bei auf 300 m³/t h erhöht (LEPPACK 1997). Eine aktive Einflussnahme auf das Lagerklima ist somit gegeben.

Bei der freien konvektiven Lüftung werden keine Einrichtungen zur Zwangsbelüftung sowie keine Kühl-, Heiz-, oder Befeuchtungseinrichtungen benötigt. Die Belüftung der Kisteninhalte (Lagergut) wird durch Eigenventilation (freie Konvektion) in Kombination mit gesteuerter natürlicher Belüftung (Luken, Klappen) unter Berücksichtigung des Außenklimas (Temperaturen, Luftfeuchten, Windgeschwindigkeiten und -richtungen) erreicht. Die freie Konvektion entsteht durch Temperaturunterschiede zwischen umgebender Luft und dem Lagergut mit seiner Eigenerwärmung. Diese Belüftungsart erfordert keine Investitionen an Belüftungseinrichtungen (Ventilatoren), sowie keine Energiekosten für die Belüftung. Eine gezielte Belüftung wird lediglich durch geeignete Klappenanordnungen am Lagerhaus und deren Steuerung erreicht.

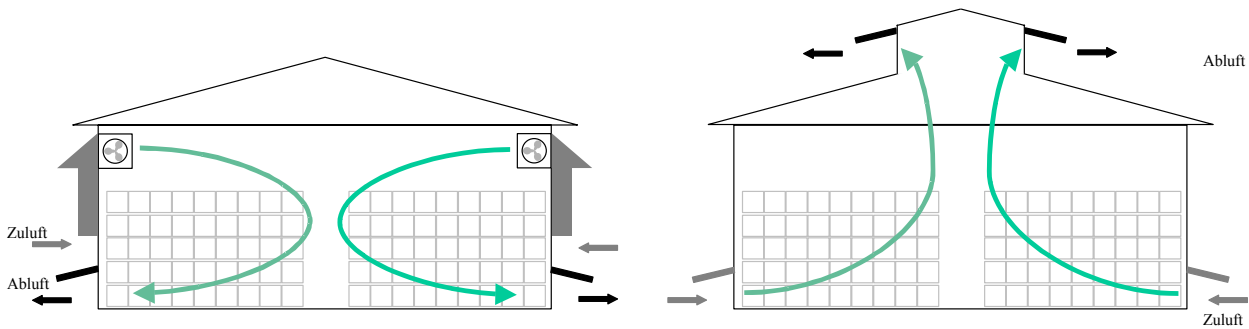


Bild 2.1: Lüftungsprinzipien von Kistenlagern für Kartoffeln; links mit Zwangsbelüftung über Ventilatoren, rechts freie konvektive Lüftung (FKL).

Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Kartoffeln und Umgebungsluft ist, umso stärker ist die Luftbewegung. Nach Berechnungen von MALTRY (1998, GOTTSCHALK 1994) wird bei einer Temperaturdifferenz von mindestens 2 K die zur Belüftung minimal erforderliche Lüfrate von $30 \text{ m}^3/\text{t h}$ erreicht. Voraussetzung dafür ist eine geringe Schütthöhe von ca. 1 m in den Behältern. Andere Berechnungen gehen von einem durchschnittlichen atmungsbedingtem ständigen Luftauftrieb im Kartoffellager von 0,50 bis $0,75 \text{ m}^3/\text{t h}$ aus (SCHIERHORN 1998).

Kistenlager für Kartoffeln mit dem FKL-Prinzip sind etwa seit 1971 im Einsatz (SCHUH-MANN 2001) Einerseits wird berichtet, dass sich dieses Lüftungsprinzip im allgemeinen bewährt, andererseits es aber bei schwierigen Partien und langfristiger Lagerung nicht befriedigend arbeitet. Die starke Abhängigkeit vom Außenklima und vom Lagerhausstandort stellt dabei ein erhebliches Risiko dar.

FKL-Befürworter schätzen die „sanfte“ Kühlung der FKL-Lagerung: Es kommt oft eine Belüftungsart zum Einsatz, die von PÖTKE et.al. 1999 und LEPPACK 1997 als „Kellereffekt“ bezeichnet wird. Dabei werden nur die Lüftungsöffnungen über der Stapeloberfläche geöffnet. Es wird davon ausgegangen, dass kühlere Außenluft im Lagerraum zum Boden absinkt und dabei aus den wärmeren Kartoffeln Wärme aufnimmt. Die absinkende, kühlere Luft bildet dabei mit der aufsteigenden (durch Wärmeabgabe der Knollen und Atmungsabgänge mit Feuchtigkeit angereicherten und damit leichteren) Luft eine Strömung aus.

FKL-Befürworter bezeichnen die Zwangsbelüftung als „Lüftungsstress“ für Kartoffeln (LEPPACK 1997) vor allem wenn sich beim Belüftungsvorgang für die lagernden Kartoffeln die Luftgeschwindigkeit, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sehr plötzlich ändern und damit das biologische System der Knollen über die veränderte Atmungsintensität zur Reaktion gezwungen wird.

Demgegenüber steht die Ansicht der FKL-Kritiker, dass bei der Raumbelüftung von Kistenlagern ein großer Anteil der Zuluft auf kurzem Wege zu den Abluftöffnungen gelange, ohne den Kisteninhalt zu durchströmen. Erhöht werden könne er nur, wenn der Weg

zu den Abluftklappen durch geeignete Anordnungen der Kistenstapel für die Abluft erschwert wird. Besteht diese Behinderung nicht, tauscht die Zuluft nur mehr oder weniger schnell die Raumluft aus. Eine Fortsetzung der Belüftung nützt nach einem Luftaustausch nur wenig, weil die Wärme und Feuchtigkeit aus dem Kisteninhalt nur sehr langsam nachgeliefert werden kann. Auch die Erhöhung der Luftmenge könne nur wenig zum Wirkungsgrad beitragen. Folglich müsste immer erst der thermisch verursachte Wärmeaustausch zwischen dem Kisteninhalt und der Raumluft abgewartet werden, bevor die Raumluft sinnvoll gegen die Außenluft ausgetauscht wird. Der Auftrieb könne zwar durch die ständige Einhaltung einer großen Temperaturdifferenz im Lagerraum verstärkt werden, aber mit dem Nachteil einer überhöhten Temperatur in der obersten Kiste (LEPPACK 1994).

Die Meinungen über die beiden Lüftungsvarianten und speziell über das FKL-Lager sind also geteilt. Fest steht aber, dass die Erhaltung eines ausgeglichenen Klimas in einem Großkistenlager für Kartoffeln nicht einfach zu realisieren ist. Lagergrundflächen bis zu 5000 m² und Kistenstapelhöhen bis zu 8,5 m stellen die Klimasteuerung vor die große Herausforderung, überall im Lager die angestrebte optimale Temperatur von z.B. 5 °C aufrecht zu erhalten. Insbesondere bei FKL-Lagern zeigt es sich, dass gegen Ende der Lagerperiode trotz erreichter und gehaltener Kartoffeltemperatur von durchschnittlich etwa 5,0 °C die Kartoffeltemperaturen in 1 m Höhe und 8,5 m Höhe über die normal bestehende Temperaturdifferenz von etwa 1,5 K hinaus stetig auseinander divergieren (**Bild 2.2**). Am Ende der Lagerperiode im April kann es deshalb vorkommen, dass die Kartoffeln in den untersten Schichten etwas zu kühl und in den obersten Schichten zu warm gelagert werden. Vor allem in den oberen Schichten ist vorzeitiges Auskeimen und weiterer Schwund durch Transpiration der Fall. Aufgrund solcher Belüftungsfehler ist Schwund bis zu 2,4 % zu erwarten (GOTTSCHALK et al. 2004).

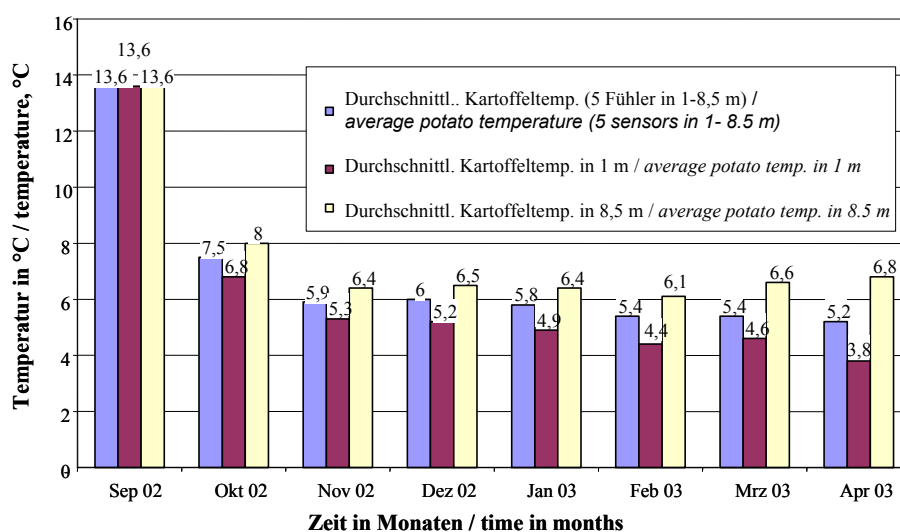


Bild 2.2: Temperaturverläufe im FKL-Lager während einer Lagerperiode; gegen Ende der Lagerperiode nehmen die Temperaturunterschiede zwischen den unteren und oberen Positionen im Stapel zu.

Bislang sind herkömmliche Klimasteuerungen nicht in der Lage, die Temperaturen so zu regeln, dass eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Lagerraum zu erreichen ist, sofern keine mechanischen Lüftungsgebläse zur Durchmischung der Luft eingesetzt werden. Die konventionelle Steuerung im FKL-Lager berücksichtigt meist nur die Durchschnittstemperatur einiger weniger Fühler, die in den Kartoffelkisten verteilt sind. Es wird nach der Außentemperatur gesteuert, wobei normalerweise für die Regelung des Kartoffellagerklimas Außentemperaturen von 0°C bis 5,5 °C verwendet werden. Die Frostgrenze wird auf -1°C eingestellt. Das Öffnen und Schließen der Klappen findet immer dann statt, wenn die entsprechenden Außenbedingungen vorliegen und eine Differenz zur eingestellten Solltemperatur der Kartoffeln im Lager besteht.


Steuralgorithmen für Lagerhäuser wurden anhand von Modellierungen entwickelt (GOTTSCHALK 1998, LANDRY et al. 2001, JAYAS et al. 2001, GOTTSCHALK et al. 1998, PÖTKE et al. 1999). So führt z.B. eine mit Fuzzy-Logik-Methoden gesteuerte Klimakontrolle zu besser ausgeglichenen Klimaverhältnissen als eine herkömmliche Klimasteuerung (LANDRY 2001). Weiterhin wurde versucht, die Atmungsrate der Kartoffeln (Austrag an CO₂) in ein Regelungsprogramm zu integrieren (MALTRY 1998).

Grundlage für die Optimierung der Klimasteuerung speziell in FKL Großkistenlagern ist nun die Erarbeitung eines Steuerungsalgorithmus, bei dem großflächig erfasste Temperaturdaten für die Klimasteuerung zur Verfügung stehen, und bei dem zusätzlich durch Luftströme hervorgerufene Temperaturänderungen an der Gutoberfläche mit einbezogen werden können. Eine Möglichkeit, diese Temperaturänderungen an den Oberflächen zu erfassen, bietet die Anwendung der Thermographie.

3 Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Thermographie

3.1 Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen der Thermographie

Alle Körper senden Wärmestrahlung aus. Das Spektrum und die Intensität dieser Strahlung hängen von der Temperatur ab. Die Wellenlängen der Wärmestrahlung liegen dabei im Infrarot-Bereich entsprechend dem Wellenlängenbereich $\lambda = 8,5$ bis $12 \mu\text{m}$. Die Thermographie ist ein Verfahren, das diese Wärmestrahlung visualisiert. Somit können Temperaturverteilungen auf den Oberflächen beliebiger Körper erfasst werden. Der hier interessierende Temperaturbereich liegt zwischen -10 °C und +30 °C.

Die Strahlungsleistung Φ hängt nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz sowohl von der Oberflächentemperatur T als auch vom Emissionsgrad der emittierenden Fläche A ab 

$$\Phi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4$$

Der Proportionalitätsfaktor σ ist eine Naturkonstante und nach Stefan-Boltzmann benannt: ($\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Der Emissionsgrad ε gibt die Beziehung zwischen der spezifischen Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers ($\varepsilon = 1$) und der eines realen Körpers bei derselben Temperatur wieder (**Bild 3.1**). Der Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$ ist eine Materialkenngröße, wobei im allgemeinen gilt:

$$\varepsilon(\lambda, T) < 1.$$

Er hängt ab von der Wellenlänge λ , der Temperatur T , dem Material und den Oberflächeneigenschaften sowie dem Abstrahlwinkel des zu untersuchenden Objekts.

Auf einem IR-Bild muss demnach jedem Gegenstand ein entsprechender Bereich mit einem definierten Emissionsgrad zugewiesen werden, der aus der Literatur oder nach eigenen Untersuchungen gewonnen wurde.

Daten zum Emissionsgrad landwirtschaftlicher Produkte sind noch wenig ermittelt. In Nachschlagewerken wie z.B. (EBERT 1962, KING 1987, LAROCCA 1996, SCHUSTER & KOLOBRODOV 2000, HELLEBRAND et al. 2002a) findet man den Emissionsgrad von Wasser, Holz, Papier und einigen anderen organischen Materialien. Die Emissionsgrade dieser Stoffe liegen im Bereich zwischen 0,80 und 0,95. Messungen zum Emissionsgrad von Äpfeln, Pfirsichen, Nektarinen, Tomaten und Kartoffeln liegen im Bereich von $0,95 \pm 0,04$ [HELLEBRAND et al. 2002b, HELLEBRAND et al. 2001, LUTZ et al. 1997) (**Tabelle 1**).

Tabelle 3.1: Emissionsgrade unterschiedlicher Materialien

Material	Emissionsgrad ε
Kartoffeln	0,85 - 0,92 (KING 1987, LAROCCA 1996, SCHUSTER 2000, HELLEBRAND et al. 2002a)
Holz	0,87 - 0,91 (KING 1987, LAROCCA 1996, SCHUSTER 2000, HELLEBRAND et al. 2002a, BEUCHE 2002)
Weißes Schreibpapier (Papiermarker)	0,94 - 0,95 (Flir Systems 2003)
Polyimidharzfolie	0,94
Geschwärzte Referenzplatte	0,92 (Flir Systems 2003)
Kupfer poliert	0,04 (BEUCHE 2002)

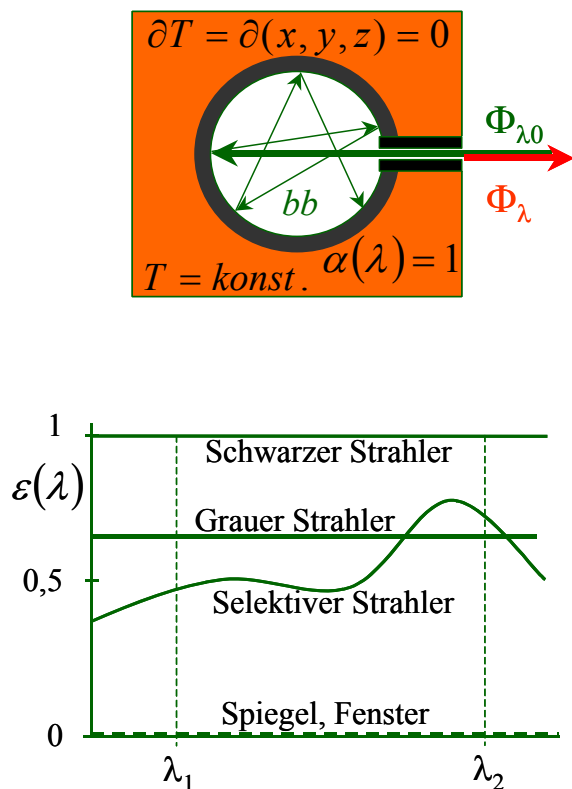


Bild 3.1: Der ‚Schwarze Strahler‘ ist das Idealbild des Wärmestrahlers. Er absorbiert und emittiert zu 100 % die gesamte Wärmestrahlung. (Emissionsgrad $\varepsilon = 1$).

Das thermographische Messverfahren bietet einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren:

Durch den Einsatz einer Infrarot-Thermographie-Kamera (IR-Kamera) lässt sich ein großflächiges Gesamtbild über die lokalen Unterschiede der Temperaturverläufe an der Oberfläche des Lagerguts gewinnen. Dies ist eine Alternative zu einer hohen Anzahl lokal verteilter konventioneller Sensoren, die unter Umständen nur schwierig an ihren Einsatzort gebracht bzw. wieder entfernt werden können: Kartoffellager erreichen oftmals eine Stapelhöhe von 8,5 m.

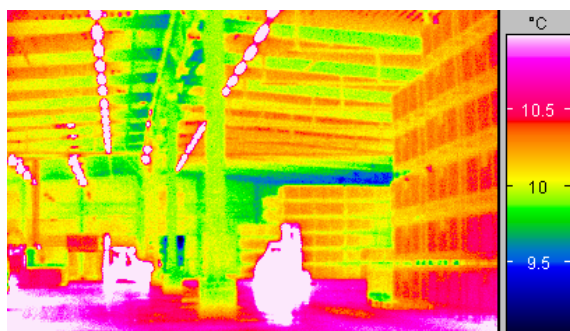


Bild 3.2: Infrarot-Großaufnahme des Kartoffellagers Weidensdorf im September 2001

Eine Infrarot-Kamera muss zwar auch an ihrem Einsatzort gewartet werden (1 x im Jahr), aber das Einsetzen und Herausnehmen der Sensoren mit meterlangen Kabeln, die zum Teil schwierig zu handhaben sind, entfällt.

Die Thermographie bietet weiterhin die Möglichkeit, Aufwärm-, und Abkühlvorgänge sowie weitere Lagerklimatisierungsprozesse in Form von Filmsequenzen zu visualisieren.

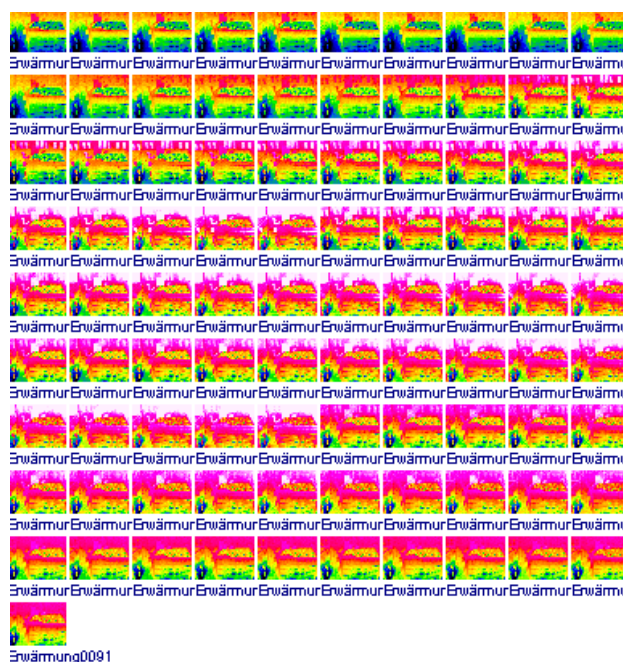


Bild 3.3: Filmsequenz eines Aufwärmprozesses in der Klimakammer (Taktfrequenz: 1 Aufnahme/Minute)

Dabei kann eine Aufnahmetaktfrequenz bis zu 50 Aufnahmen/Sekunde eingestellt werden.

Des Weiteren können mit der IR-Kamera schnell geringste Temperaturunterschiede erfasst werden. Die Temperaturbereiche auf dem IR-Bild können verändert werden und so partiell Einzelheiten auf dem Infrarotbild herausgestellt werden. Beispielsweise stellt das Bild 3.4. die gleiche Thermographieaufnahme der Reihen S 5 bis S 8 des Kartoffel-lager Weidensdorf am 11.12.2001 dar. Im linken Bild wurde ein Temperaturbereich von 1,0 °C bis 6,6 °C, im rechten ein Temperaturbereich von 0,9 bis 4,3 °C eingestellt. Im eingengten rechten Temperaturbereich lässt sich sehr gut darstellen, wie „wärmere“ Kartoffeln unter einer Schicht kälterer Kartoffeln (ca. 4°C) an der Oberfläche liegen. Außerdem erkennt man gut, wie die kalte Luft (ca. 2 °C) von unten nach oben steigt. Die Hallendecke ist relativ warm und weist annähernd die Temperatur der Kartoffeln auf. (Anmerkung: Es handelt sich hierbei um eine qualitative Auswertung, bei der der Auswertemodus der nachfolgenden Untersuchungen noch nicht berücksichtigt wurden.)

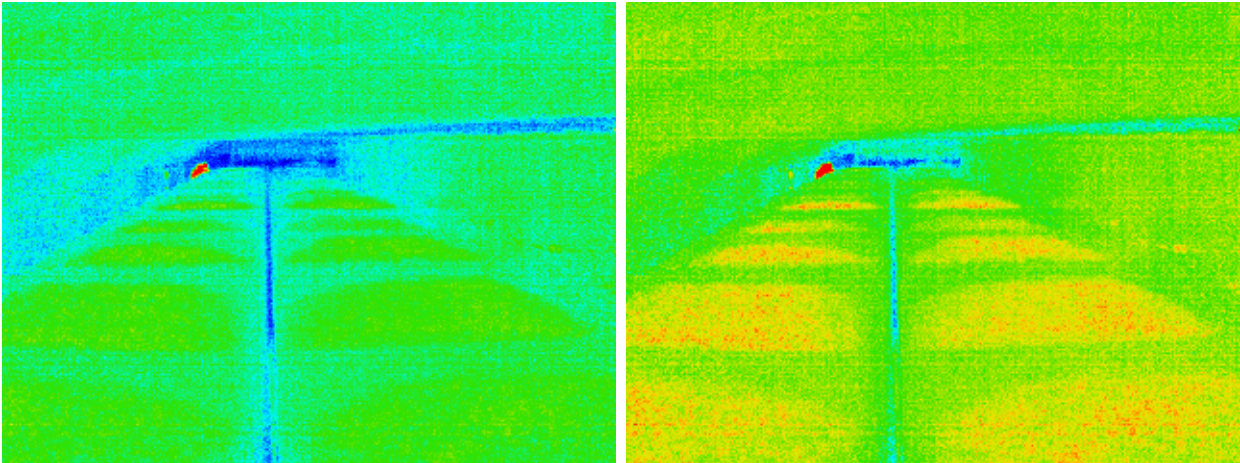


Bild 3.4: Thermographieaufnahme des Kartoffellager Weidensdorf am 11.12.2001
eingestellter Temperaturbereich links: 1,0 °C bis 6,0 °C, rechts 0,9 °C bis 4,3 °C

Allerdings sind der Thermographie auch Grenzen gesetzt.

Mit einer Thermographiekamera wird ausschließlich nur die Oberflächentemperatur gemessen, sie gibt keinen oder kaum einen Hinweis darüber, welche Temperaturen im Innern des Messkörpers vorliegen.

Wie die nachfolgenden Untersuchungen noch zeigen werden, erfordert die Interpretation der Thermographieaufnahmen viel Erfahrung. Auch die Auswertung der IR-Daten ist zumindest am Anfang sehr aufwendig.

Nicht zu vergessen sind die Kosten der Infrarot-Technik (Infrarot-Bildsensor, Germaniumoptik, spezielle Auswertesoftware), die den Einsatz einer IR-Kamera überlegenswert machen.

3.2 Aktuelle Anwendungen der Thermographie

Bereits klassische Anwendungsbereiche der Thermographie sind die Bestimmung der Temperaturverteilung bei Gebäuden, Motoren und Tieren, auf die an dieser Stelle nur verwiesen sei. Infolge sinkender Kosten im Verlauf der letzten zehn Jahre wuchs die Anwendungsbreite der Thermographie, insbesondere im Industriebereich, in der Medizin und im Sicherheitsbereich. Als ein berührungsloses Messverfahren zur Bestimmung von Temperaturverteilungen wird sie in einigen Industriezweigen sowohl für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben als auch in der Produktionskontrolle eingesetzt. In der Medizin erlangte sie jüngst größte Bedeutung, bei der Ermittlung von eventuell infizierten Personen mit dem SARS-Virus („severe acute respiratory syndrome“) bei der Einreise auf asiatischen Flugplätzen. So konnten beispielsweise am Hongkonger Flughafen in kurzer Zeit Personen mit erhöhter Körpertemperatur aus großen Menschenmassen sehr schnell identifiziert und zu weiteren Untersuchungen weitergeleitet werden. Pro Person wurde eine Messzeit von 1 Sekunde angesetzt. Ein Alarmsignal ertön-

te, falls die kritische Körpertemperatur (= Durchschnittstemperatur einer gesunden Person + 1°C) überschritten wurde (<http://www.thermotemp.de/to11.htm>, September 2004).

Thermographie als Regeleinheit wird bereits bei großflächiger Waldbrandüberwachung und im Bereich der Müllaufbereitung angewendet. So lösen beispielsweise erhöhte Temperaturen auf dem Müllberg einen Feueralarm aus (MONTEITH et al. 1962). Allerdings sind bei dieser Regelung relativ große Temperaturdifferenzen gegeben und somit nicht mit einer Klimasteuerung in einem Kartoffellager zu vergleichen.

Praxisreife Anwendungslösungen für den Pflanzenbau, für die Tierhaltung und für den Bereich der Nachernte sind nicht bekannt. Infrarot-Temperaturmessungen an Pflanzenteilen wurden erstmalig vor ca. 40 Jahren veröffentlicht (TANNER 1963, DANNO et al. 1978).

Dagegen gibt es erst nur einzelne Ergebnisse im Feld der Biologie, Landwirtschaft und Landtechnik. Einige Autoren wandten sich der Frage zu, die Thermographie als zerstörungsfreie Messtechnik in der Qualitätsbestimmung bei Obst und Gemüse einzusetzen (BEVERLY et.al. 1987, TOLLNER et al. 1993, INQUE 1990). INQUE veröffentlichte 1990 Infrarotbild-Untersuchungen zum Trockenstress von Kulturpflanzen und zu Transpirationsraten von Blättern (INQUE et.al. 1990, NILSSON 1995). Über thermographisch bestimmte Temperaturänderungen von Getreidepflanzen infolge Krankheitsbefall und Luftbewegung (Wind) berichteten NILSSON 1995 und DALEY 1995. Thermographie wurde weiterhin zur Untersuchung des Wassertransportes in Pflanzenblättern angewendet (ZOHAR et.al. 1998) sowie zur Bestimmung der Wärmebildung in einzelnen Zellen (LINKE et al. 1999).

Am ATB wurden 1999 die ersten Arbeiten zur Untersuchung der Qualität landwirtschaftlicher Produkte mittels Thermographie aufgenommen. So wurden Emissionsgradbestimmungen von Obst und Gemüse durchgeführt sowie mittels Thermographie deren Frischegrad und Bearbeitungszustand analysiert. (HELLEBRAND et al. 2000, BREHME et al. 2003).

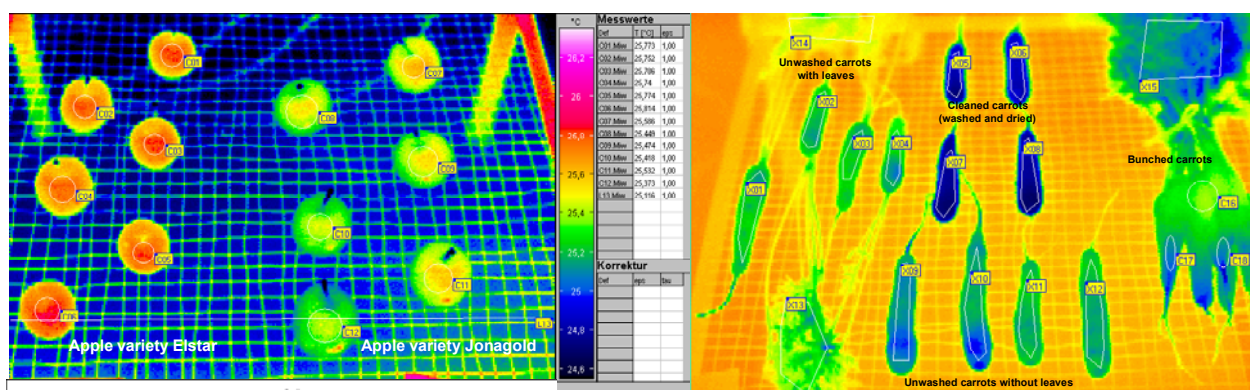


Bild 3.5: Infrarot-Aufnahmen von unterschiedlichen Apfelsorten sowie unbehandelten und gewaschenen Möhren (HELLEBRAND et al. 2000, BREHME et al. 2003)

Untersuchungen zur Trächtigkeitsbestimmung von Kühen wurden nicht weiter verfolgt (KERN 2001). Derzeit laufen am ATB zeitgleich noch Untersuchungen zur Ermittlung von Krankheitsbefall an Getreidepflanzen.

Wie die Literaturrecherche ergab, ist Thermographie als Komponente bei der Lagerung von landwirtschaftlichen Produkten nicht bekannt.

4 Aufgabenstellung

Die Anwendungsmöglichkeiten der Thermographie versprechen neue Impulse zur Auslegung und Optimierung einer Belüftungssteuerung zu geben. Die Gewinnung grundlegender Ergebnisse über die Einsatzmöglichkeiten der Thermographie zur Belüftungssteuerung in großen Kartoffellagerhäusern und deren praktischer Nachweis sind deshalb die Hauptziele dieses Projekts. Zur Nutzung der Vorteile der freien Lüftung soll anschließend eine neuartige Klimasteuerung entwickelt werden, die lokale Klimaänderungen erkennt und ausgleicht. Dies soll für ein Kartoffellager mit Großkisten untersucht werden, das mit einem „Freien Konvektiven Lüftungssystem“ (FKL) arbeitet.

Ein weiteres Ziel des Vorhabens ist es, aus den Daten von Thermographieaufnahmen Informationen zu den optimalen Positionen konventioneller Sensoren zur Sicherstellung einer optimalen Klimasteuerung (FKL-Klimaregelung) zu gewinnen.

Mit dem Vorhaben sollen weiterhin folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Eignen sich Infrarotbilder zur Gewinnung von Datensätzen für die Klimasteuerung?
- Eignen sich Infrarotkameras zur großräumigen Überwachung von Lagerhäusern?
- Sind mittels Thermographie geeignete Messstellen zu finden, um dann mit preiswerten Messfühlern eine besonders produktspezifische Klimatisierung zu erreichen?
- Können Infrarotkameras als Temperaturgeber für die Klimasteuerung dienen?
- Können eventuell Luftströmungen wie der „Kellereffekt“ nachgewiesen werden?
- Zu welchen betriebswirtschaftlichen und technologischen Konsequenzen würde die Anwendung von Infrarotkameras in Lagerhäusern führen?
- Welche Umweltwirkungen ergeben sich aus der Verwendung der innovativen Steuertechnik?

Daneben sollen die Daten zur Erarbeitung eines Steuerungsalgorithmus verwendet werden, bei dem großflächig erfasste Temperaturdaten für die Klimasteuerung zur Verfügung stehen, und bei dem zusätzlich durch Luftströme hervorgerufene Temperaturänderungen an der Gutoberfläche mit einbezogen werden können.

5 Material und Methoden

5.1 Konventionelle Messtechnik

Konventionell wurden Pt 100-Thermosensoren eingesetzt, die zur Datenerfassung an vernetzte Datenlogger angeschlossen waren. Die Sensoren wurden zur Ermittlung der Kartoffeltemperaturen an der Oberfläche und im Inneren der Kisten verwendet.

Oberflächensensoren wurden mittig an der Rückseite schwarz lackierter Aluminiumplatten angebracht, die als Referenz zur gleichzeitigen Ermittlung von thermographischen und konventionellen Messwerten dienen. Der Emissionsgrad der Referenzplatten beträgt $\varepsilon = 0,92$.

Daneben wurden Temperatur-Feuchte-Sensoren in unterschiedlichen Höhen des Versuchsstands zur Bestimmung von Lufttemperatur und -feuchtigkeit eingesetzt.

5.2 Thermographie-Messtechnik

5.2.1 IR-Kamera

Thermographische Aufnahmen wurden mit stationär installierten sowie mobil einsetzbaren IR-Kameras aufgenommen.

Für die stationären Versuche wurde die FPA (Focal Plane Array) Kamera ThermaCam SC 500 (FLIR Systems GmbH) eingesetzt, die in einem Wellenlängenbereich von 7,5 bis 13 μm arbeitet und eine Temperaturauflösung 0,07 $^{\circ}\text{C}$ bei 30 $^{\circ}\text{C}$ bietet. Ihre Messgenauigkeit liegt bei $\pm 2,0$ K. Die Kamera (Bild 5.1) kann bis zu 50 Bilder pro Sekunde aufnehmen und ist mit einem 45 $^{\circ}$ Weitwinkelobjektiv ausgerüstet.



Bild 5.1: IR-Kamera ThermaCam SC 500 am stationären Messplatz im Kartoffellager Weidendorf im Einsatz mit Feuchtigkeits- und Staubschutz

Für die mobilen Einsätze wurde eine ThermaCam PM 545 (FLIR Systems GmbH) mit Micro-Bolometer Array, ungekühlt, verwendet, die in einem Wellenlängenbereich von

7,5 bis 13 μm arbeitet und eine Temperaturauflösung 0,1 $^{\circ}\text{C}$ bei 30 $^{\circ}\text{C}$ bietet. Die Kamera kann bis zu 50 Bilder pro Sekunde aufnehmen und ist ebenfalls mit einem 45 $^{\circ}$ Weitwinkelobjektiv ausgerüstet.

Für die Untersuchungen standen für beide Kameras auch 24 $^{\circ}$ und 80 $^{\circ}$ Objektive zur Verfügung.

5.2.2 Auswertung der IR-Bilder

Infrarotbilder erfassen zweidimensional Oberflächentemperaturen von Objekten verschiedenster Materialien wie z.B. der Holzkisten oder der Kartoffeln, die sich zudem in unterschiedlichen Entfernungen befinden können. Lufttemperaturen im Raum werden nur dann erfasst, wenn sie an einer Oberfläche gemessen werden. Dazu wurden zusätzlich Papierfahnen mit definiertem Emissionsgrad um die Versuchsstände arrangiert. Diese besitzen eine geringe Wärmekapazität und reagieren deshalb sehr schnell auf Temperaturänderungen der Luft.

Die Auswertung der Infrarot-Bilder wurde mit Hilfe des Software-Paket ThermaCam® Researcher 2001 durchgeführt.

Mit Hilfe der Software wurden definierte, für die Temperaturermittlung interessante Bereiche des IR-Bildes ausgewählt (**Bild 5.2**). Abhängig von der Größe des interessierenden Messbereichs konnten Flächen oder Linien ausgewählt werden. Jedem Bereich wurde anschließend je nach Material der entsprechende Emissionsgrad (vgl. Tabelle 5.1.) zugeordnet. Auch die Entfernung des Messbereiches von der IR-Kamera, die zuvor rechnerisch ermittelt werden musste, wurde eingegeben.

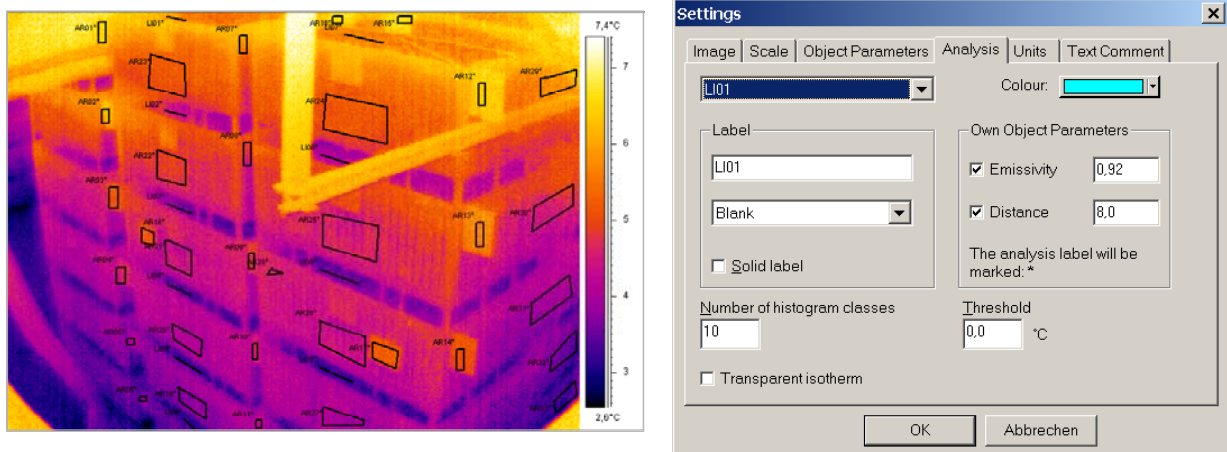


Bild 5.2: Infrarot-Bild mit eingeteilten Bereichen („Session“) und die Zuordnung von Emissionsgrad und Entfernung zu einem Bereich (Linie) in der Software

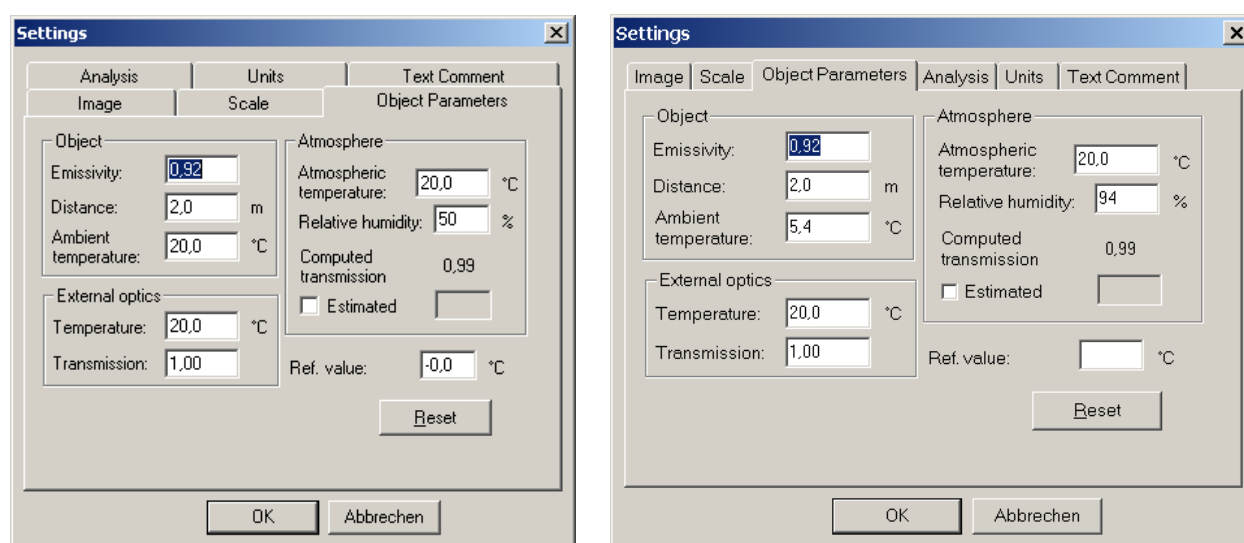
Die aus mehreren Bereichen entstandene „Session“ konnte auf alle weiteren Versuche übertragen werden, sofern keine Änderung des Messbildes auftrat (Siehe Fehlerquellen, Kap.6.1.)

Tabelle 5.1: Für die Auswertung der IR-Bilder verwendete Emissionsgrade.

Material	Emissionsgrad ϵ
weißes Papier/ Papiermarker	0,94
geschwärzte Referenzplatte	0,92
Holz	0,87
Kartoffeln	0,92

Die ThermaCam® Software berücksichtigt weiterhin die Umgebungsbedingungen der IR-Kamera (Temperatur und Luftfeuchte) (**Bild 5.3**). Diese Werte gehen bei der Umrechnung der IR-Daten in reale Temperaturen mit ein und beeinflussen auch den damit verbundenen Korrekturfaktor (vgl. Kap.5.5. oder 6.1).

Damit die thermographisch ermittelten Werte in reale Werte umgerechnet werden konnten, wurden zudem schwarz lackierte Aluminiumplatten mit bekanntem Emissionsgrad (Referenz; vgl. Kap5.1.) an den Außenseiten der Kisten angebracht sind, wobei ein Abstand von ca. 5 cm von den Kistenoberflächen eingehalten wurde, um eine freie Belüftung der Platten zu gewährleisten

**Bild 5.3:** ThermaCAM Menü zur Einstellung der Umgebungsbedingungen: links Standardeinstellung, rechts angepasste Einstellung

Die ThermaCAM® Software speichert die „Session“- Daten jeweils nur für ein Einzelbild in einer Excel-Tabelle ab. Um die Temperaturwerte nacheinander in einer Excel-Tabelle im zeitlichen Verlauf aufzeigen zu können, wurde ein entsprechendes Makro am ATB entwickelt.

5.3 Versuchsstand und Messaufbau

Messungen wurden sowohl an Einzelkisten als auch im Lagerverbund vorgenommen. Während im Kartoffellager für Einzeluntersuchungen auch die mobile Kamera zum Einsatz kam, wurde im Versuchsstand mit der Einzelkiste nur die stationäre Kamera eingesetzt.

5.3.1 Einzelkiste in der Klimakammer

Um unterschiedliche klimatische Veränderungen an einer Einzelkiste mit der IR-Kamera zu erfassen, wurden Messungen in einer Klimakammer (**Bild 5.4.**) des ATB unternommen. Dabei wurden die Positionen der Sensoren genau vermessen. Auf diese Weise können die an verschiedenen Stellen erfassten Temperaturen auch für Berechnungen in einem dreidimensionalen Modell verwendet werden.

Die Klimakammer hat Rauminnenmaße von 3,10 m x 3,62 m x 2,32 m. Der vergitterte Bodenbereich ist um 0,81 m erhöht; darunter befinden sich die Zuluftkanäle.

An der Decke befindet sich ein 0,20 m x 3,10 m breiter Entlüftungsspalt für die Abluft. Die Luft kann gezielt erhitzt, gekühlt oder je nach Außenbedingungen unmittelbar zugeführt werden.

Zwei Holz-Kisten (Innenmaße 0,95 m x 0,95 m x 1,25 m) wurden mit Kartoffeln (Durchmesser etwa 8 cm) randvoll gefüllt. Die Kartoffelkisten wurden in der Klimakammer mit jeweils etwa 0,15 m Abstand von der Wand aufgestellt (Bild 5.5.). Zwischen den Kisten bestand ein Zwischenraum von 0,65 m.

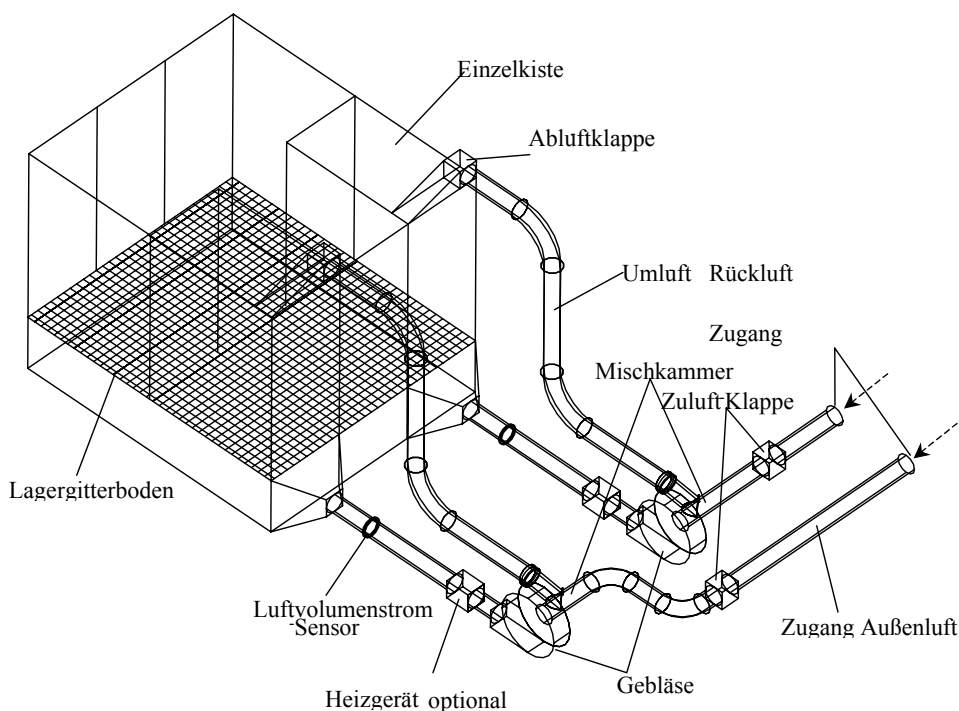


Bild 5.4: Klimakammer im ATB mit Möglichkeiten einer geregelten Klimasteuerung

Drähte wurden sowohl über den Kisten in einer Höhe von 1,80 m als auch zwischen den Kisten in unterschiedlichen Höhen gespannt, um Temperaturfühler und Papiermarkierungen zu befestigen.

Temperatursensoren wurden in 0,85 m Höhe (vom Boden weg) und in 1,30 m Höhe mittig zwischen den beiden Kisten angebracht.

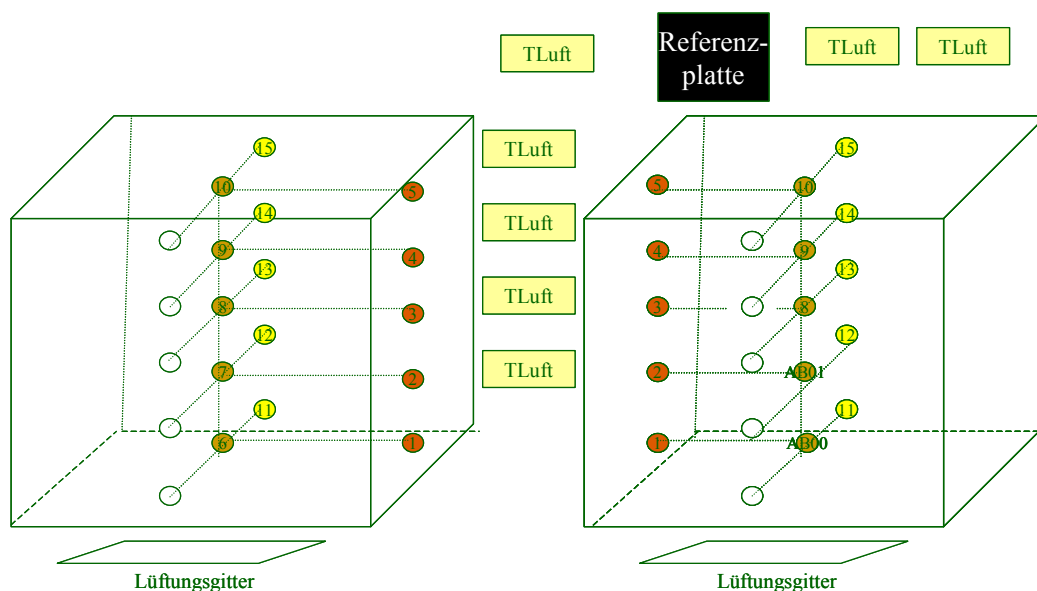


Bild 5.5: Kiste mit konventionellen Sensoren und Papiermarkern im Belüftungsversuchsstand

Papiermarkierungen befanden sich jeweils direkt neben Kisten in 0,72 m, 0,97 m, 1,33 m, 1,55 m und 1,80 m Höhe (vom Boden weg). Über der rechten Kartoffelkiste, die thermographisch überwacht wurde, und dem Zwischenraum wurden insgesamt 10 Papiermarker in 1,80 m Höhe gleichmäßig verteilt. Eine 0,23 x 0,21 m große schwarz beschichtete Metallplatte wurde als Referenz (Emissionsgrad 0,92) in 0,33 m Entfernung über der rechten Kartoffelkiste angebracht.

Pt 100-Sensoren wurden in beiden Kisten sowohl mittig als auch jeweils in der Mitte der Vorder-, Rück- und der dem offenen Raum zugewandten Seite eingesetzt. Die Fühler steckten jeweils etwa 5 bis 10 cm hinter der Oberfläche. Sensoren waren in 0,22 m, 0,44 m, 0,66 m, 0,88 m, und 1,10 m Höhe eingesetzt.

Die IR-Kamera wurde gegenüber der rechten Kartoffelkiste auf einem Stativ positioniert.

5.3.2 Kartoffellager (FKL / VKL)

Die Versuche wurden in der Firma FRIWEIKA in Weidensdorf /Sachsen durchgeführt.

FRIWEIKA besitzt seit dem Jahr 2000 ein 15.000 t-Großbehälterkartoffellager (mit 4 t-Behälter) mit VKL-Belüftungssystem (Variable konvektive Lüftung: Windbelüftung zur Abtrocknung und Auftriebsbelüftung zur Lagerklimatisierung). Hierbei wurde die freie

konvektive Lüftung nach Schierhorn abgewandelt, die den Kamineffekt der konvektiven Lüftung ausnützt und davon ausgeht, dass kalte Luft durch Luken in Deckennähe in die Halle einströmt, zu Boden fällt und aufgrund ihrer Erwärmung beim Vorbeiströmen an den zu kühlenden Kartoffeln noch oben wieder entweicht. In Weidensdorf wurde das System insoweit verändert, dass die Luft direkt von unten durch Luken in die Halle geleitet wird (LEPPACK 1997) Folgende Bauvorlagen erfüllen die Anforderungen der sog. variablen konvektiven Lüftung (MALÝ et al. 2004):

- Die Lagerhalle (106,5 m x 48,7 m x 8,5 m) wurde nach Auswertung meteorologischer Gutachten in Hauptwindrichtung Süd-West aufgebaut. Dadurch kann bei geöffneten Toren und Klappen eine sehr große Lüftungskapazität, vor allem beim Herunterkühlen der Kartoffeln auf Lagertemperatur, erreicht werden.
- Die Halle kann in der Nordhälfte durch flexible Folientrennwände in einzelne Lagerpartien abgeteilt werden. Im Abstand von 6 m ist bis etwa Reihe N 9/10 die Halle durch sog. „Gardinenstangen“ unterteilt, an denen mit Hilfe flexibler Folientrennwände unterschiedlich große Lagerpartien bzw. auch Einzellager abgeteilt werden können. In je eine Lagereinheit von 6 m passen genau zwei 4 t-Behältnisse mit ca. 5,9 m Platzbedarf nebeneinander und bis zu etwa 8 Kisten hintereinander sowie 6 - 7 Kisten übereinander (entspricht etwa 106-110 Kisten pro Lagerpartie).
- An den Giebelseiten sind je 6 Lüftungstore sowie an den Längsseiten untere Luken installiert und im First ist ein Dachhaus mit Luken zur Be- und Entlüftung vorhanden. Die Bodenluken mit den Abmessungen 5,00 m x 1,20 m befinden sich jeweils in einer 6 m Lagerpartie in Bodennähe. Die Dachluken haben die Abmessungen 2,50 m x 2,00 m und sind pro Lagersektion doppelt.

Die Kartoffeln werden in 4 t Behältnissen (2,35 m x 2,65 m x 1,00 m) gelagert. Sie werden in sogenannten 18 „Stapelreihen“ (2 Kisten/Stapelreihe) jeweils in der Nord- und Südhälfte der Halle gelagert. „Stapelnummern“ geben die Anzahl der Kisten von der Außenwand zur Hallenmitte an; es gibt maximal etwa 8 Stapelnummern. Die Behältnisse werden bis zu einer Höhe von 7 „Stapelschichten“ gestapelt.

Die Lagerhalle wird in vier Lüftungstechnische Einheiten von ca. 20 m Länge unterteilt (Lager 1 bis 4 von Westen nach Osten). Weiterhin wird zwischen Nord- und Südhälfte der Halle unterschieden (Sektion 1 (Süd), Sektion 2 (Nord)), so dass insgesamt 8 mögliche Lüftungstechnische Einheiten entstehen, die individuell zu führen sind. Da im Südwesten der Halle die Auskipfstation für Kartoffelkisten und die Waage positioniert sind, gibt es real nur 7 Klimaboxen. Es werden jeweils 5 Thermoelemente pro Klimabox/Sektion verteilt.

Im Dachhaus ist eine betriebseigene Wetterstation installiert: ein Windmessgerät für Windrichtung und Windstärke, ein Luftfeuchtemessgerät sowie Temperaturfühler für die Außenluft. Außerdem sind Elektromotoren für die automatische Bedienung der Klappen eingebaut.

FRIWEIKA besitzt eine betriebseigene Klimaregelung; in diese gehen mit ein:

- Messung der Außentemperatur im Westen, Osten, Norden und Süden (+ 0,5 m oberhalb der Klappen)
- Messung der Produkttemperatur
- Messung der relativen Luftfeuchte außen
- Messung der Windgeschwindigkeit außen
- Messung der Windrichtung

Geregelt bzw. gesteuert werden kann:

- Die Stellung der oberen und unteren Luken, jeweils getrennt pro Sektion
- Die oberen Klappen haben insgesamt 10 einstellbare Winkelschritte
- Die unteren Klappen haben x Winkelschritte
- Die Zeitdauer der oberen und unteren Klappen

Die Klimasteuerung bietet u.a. folgende allgemeine Funktionen (laut Herstellerangabe):

1. Bei Frost (Frostgrenze einstellbar von -1 °C und $+3\text{ °C}$) und bei zu hoher Windgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeitsgrenze einstellbar zwischen 1 und 12 m/s) schließen die Luken immer.
2. „Erfrischungs“-Funktion der unteren Klappen: danach können die unteren Klappen 3 % weit geöffnet werden bis zu viermal am Tag, einstellbar von 0 bis 60 Minuten.
3. Die Boden- und Dachklappen sind unabhängig von einander steuerbar. So können die Dachklappen geöffnet werden, wenn die Außentemperaturen zwischen dem einstellbaren Minimum-/Maximumbereich liegen und der Sollwert der Produkttemperatur im Produkt bereits überschritten wurde; d.h. Atmungswärme kann durch die Dachluken abgegeben werden. („Kellereffekt“).
4. Die Stellungen der Boden- und Dachklappen können aber auch miteinander gekoppelt werden. So kann die Bodenklappe halb geöffnet werden, wenn die Dachluke an der windstillen Seite geöffnet ist.

Es existieren insgesamt 4 Klappen- und 6 Lukenprogramme.

Für die Versuche wurden die Stapelreihen N8 a und b ausgewählt. (**Bild 5.6**). Die Infrarot-Kamera Thermacam SC 500 wurde am Verbindungsträger der Mittelbalkenkonstruktion in Höhe der Stapelreihen N 7 auf einem Stativkopf mit Revolvergriff an eine Haltevorrichtung geschraubt. Vorne an der Kamera befindet sich ein Schutztrichter. Die Kamera wurde außerdem noch in eine Kunststoffolie gehüllt zum Schutz gegen Verschmutzung, Kondenswasser und Niederschläge, die über die Dachklappen in die Halle gelangen (vgl. **Bild 5.1**). Zur thermographischen Ermittlung der Lufttemperaturen wurden um die Stapel Papiermarker verteilt. Zum Vergleich der thermographischen und konventionellen Messungen wurden zwei DIN A3 große, schwarz lackierte Aluminiumplatten jeweils in der 5. Stapelschicht der Reihen N8a und N8b aufgehängt.

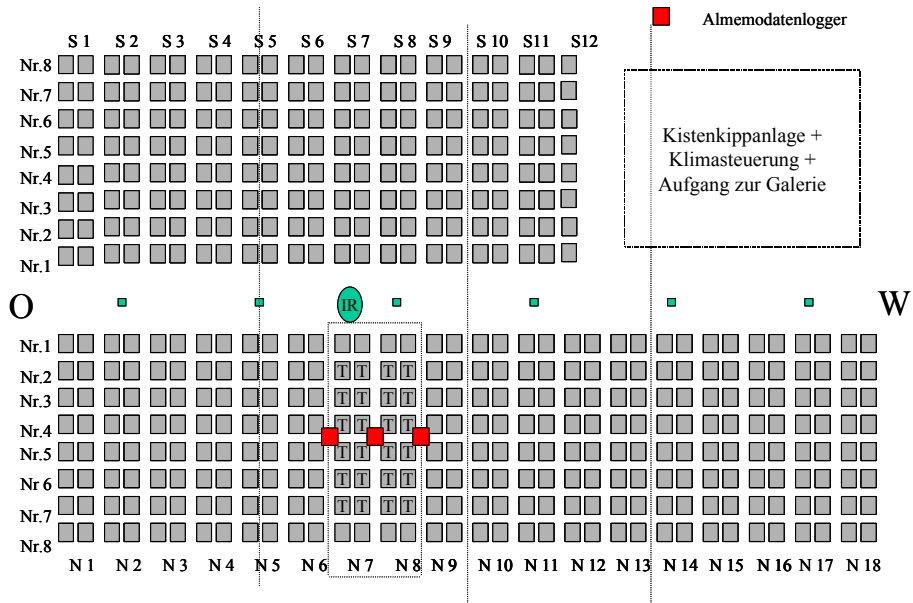


Bild 5.6: Kistenplan der Großkistenlagerhalle FRIWEIKA mit eingezeichneten Versuchskisten und Position der IR-Kamera

Konventionelle Pt 100 Sensoren wurden je nach Lagersaison unterschiedlich in den Kisten verteilt.

In der Lagersaison 2002/2003 befanden sich konventionelle Fühler in der 1., 3. und 5. Lagerschicht in den Stapelnummern 2 bis 7 der Reihen N 8a und b (**Bild 5.7**). Die Thermoelemente steckten etwa 20 cm unter der Kartoffeloberfläche. Ein weiterer Fühler zur Ermittlung der Zulufttemperatur befand sich in Nähe der Bodenluke. Die Lufttemperaturen in der Hallenmitte wurden in 1 m und etwa 9 m Höhe bestimmt.

Es wurden Kartoffeln der Sorte Solara eingelagert.

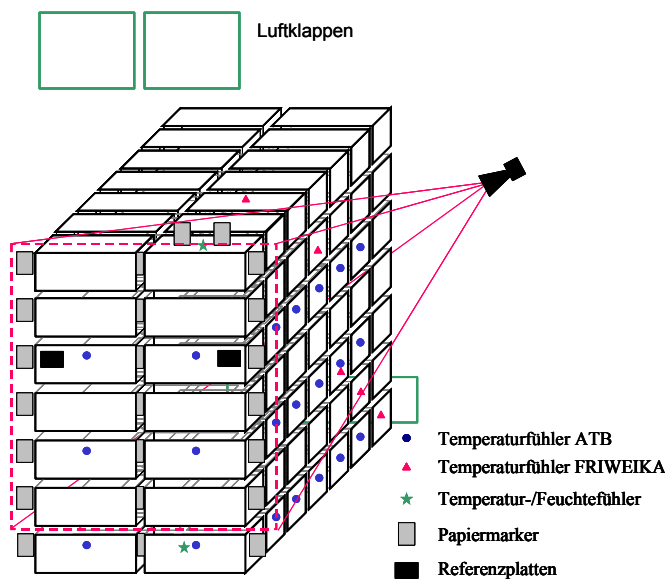


Bild 5.7: Stationärer Versuchsstand in der Großkistenhalle FRIWEIKA Lagersaison 2002/2003

In der Lagersaison 2003/2004 wurden konventionelle Fühler in der Reihe N8a in der 1. bis 5. Stapelschicht der Stapelnummern 3 bis 6 eingesetzt (**Bild 5.8**). Mit speziellen Einsteckröhren konnten hier die Sensoren mittig in die Kartoffelkisten eingebracht werden.

Weiterhin wurden Pt 100-Sensoren an der Oberfläche der Kisten eingesetzt:

- An der Vorderfront (Stapelnummer 2), die auch thermographisch überwacht wurde, in N8a, 1. und 4. Stapelschicht und in N8b, 6. Stapelschicht
- Auf der Kistenoberfläche der 7. Stapelschicht, in N8a 2. und 4. Stapelnummer und N8b 2. und 5. Stapelnummer
- Auf der Rückseite (Stapelnummer 8) vor der unteren Klappe in N8a und N8b in der 1. und 2. Stapelschicht

Die Lufttemperaturen wurden in 1m und etwa 9 m Höhe über den Kisten und in 10 m Höhe in Kameranähe bestimmt.

Es wurden die Kartoffelsorten Donella (N8a) und Marena (N8b) eingelagert.

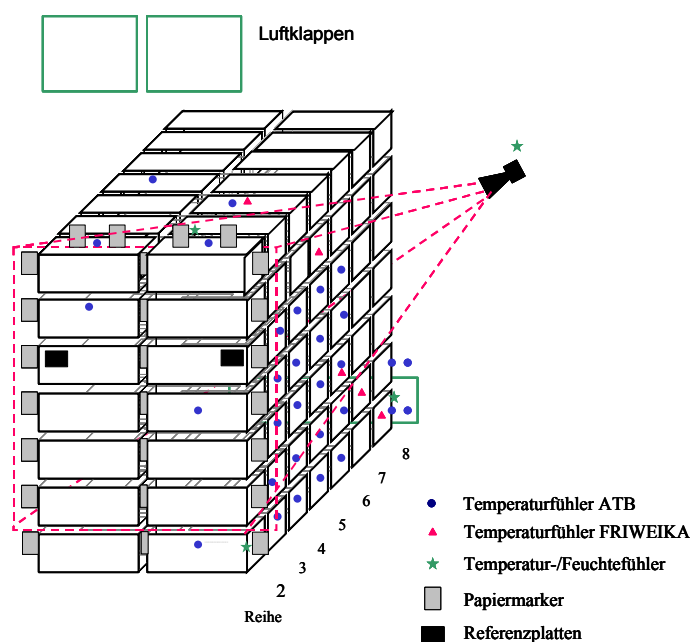


Bild 5.8: Stationärer Versuchsstand in der Großkistenhalle FRIWEIKA Lagersaison 2003/2004

In der Lagersaison 2004/2005 wurden nur noch wenige konventionelle Fühler in der Reihe N7a und N7b in der 1. und 7. Stapelschicht der Stapelnummern 2 und 8 eingesetzt (**Bild 5.8**). Zusätzlich wurden die FRIWEIKA Temperatursensoren zur Beobachtung der Temperaturen innerhalb des Stapels verwendet.

Außerdem wurde die Kameraeinstellung während der Lagersaison 2004/2005 verändert: die Kamera hatte nun einen senkrechten Blickwinkel auf die Stapel bei reduzierter

Kistenoberfläche im Gegensatz zu einem schrägen Blickwinkel mit großer Stapeloberfläche während der Lagerperioden zuvor (vgl. **Bild 7.7**).

Es wurden Kartoffeln der Sorte Prinzess (N7a) und der Sorten Prinzess, Milva und Sannira (N7b) eingelagert.

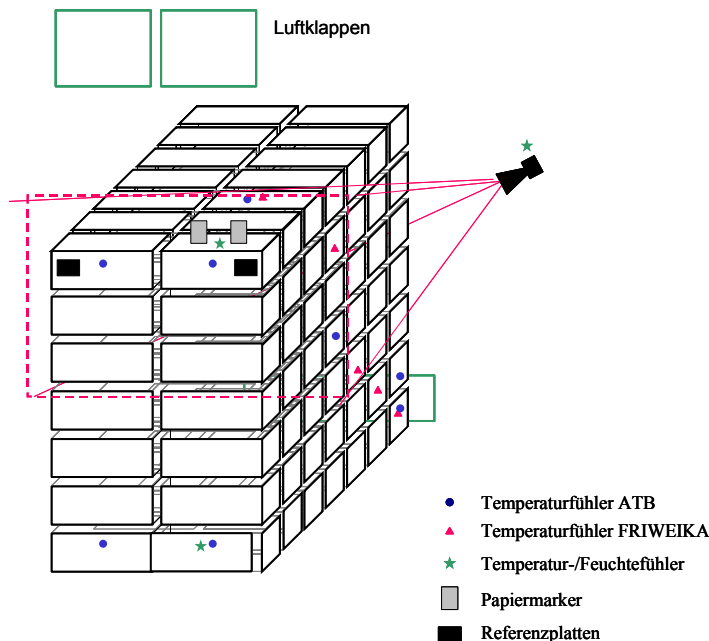


Bild 5.8: Stationärer Versuchsstand in der Großkistenhalle FRIWEIKA Lagerseason 2004/2005.

Anmerkung: Die Klimaerfassung an diesem Versuchsstand während der drei Lagerperioden wurden in Kombination mit einem weiteren Forschungsprojekt (Malý et.al. 2001) vorgenommen. Die Kartoffeln waren mit unterschiedlichen Erntemaschinen gerodet worden (SCHEIBE et.al. 2005). Dieser Einfluss hat auf die hier vorliegenden Untersuchungen zur Beurteilung der Thermographie als Regelungselement bei der Klimasteuerung keinen Einfluss.

5.4 Ansteuerung des Systems, Datenübertragung und -auswertung

Die konventionell erfassten Daten wurden von den vernetzten Datenloggern über Telefonkabel zu einem Datenerfassungsrechner übertragen. Die IR-Bilder wurden über Glasfaserkabel zum Datenerfassungsrechner übertragen (**Bild 5.7**).

Der Rechner wurde mittels der Software ‚PC Anywhere‘ (Symantec) über ISDN-Leitung vom ATB aus angesteuert und die Versuchsdaten wurden online zum Institut übermittelt.

Zusätzlich erlaubte diese Software Einblicke in das betriebseigene Klimadatencomputersystem (Wetterwerte, Lagertemperaturen, Klappenöffnungszeiten) zu nehmen und relevante Daten zur Auswertung herüberzuladen.

Die am ATB entwickelte Software ‚PoCli Control‘ („Potato Climate Control“) ermöglichte es, den Messtakt der thermographisch und konventionell ermittelten Temperaturwerte zu variieren. Damit wurde gewährleistet, dass Belüftungsvorgänge, wie eintretende Luftströme nach Öffnung der Klappen, in Filmsequenzen mit einem Aufnahmetakt von beispielsweise 1 Messwert/Minute visualisiert und ausgewertet werden konnten, während für die längerfristige Klimaüberwachung des Lagerguts ein niedrigerer Taktrhythmus (1 Messwert/Stunde) gewählt wurde.

Die mit konventioneller und thermographischer Messtechnik gewonnenen Klimadaten wurden mit den Klimadaten der FRIWEIKA-Klimasteuerung verknüpft, um weitere Belüftungszusammenhänge zu erkennen.

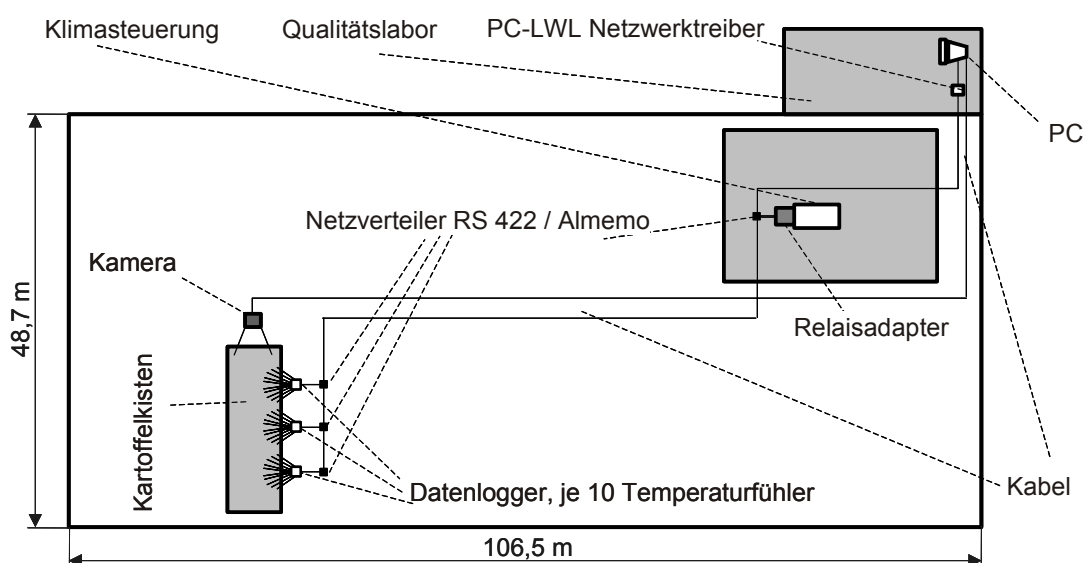


Bild 5.10: Übertragung der konventionell und thermographisch ermittelten Daten zu einem Datenerfassungsgerät, das diese online zum Institut übermittelt

Zur Erstellung eines dreidimensionalen Belüftungsmodell bzw. um die Temperaturverläufe im Raum, d.h. dreidimensional, auswerten zu können, wurde jedem Messpunkt ein Koordinatenpunkt zugeordnet (**Tabelle 5.2**). Als Nullpunkt wurde die linke untere Ecke der Kiste in der Reihe N8b zugeordnet. Die x-Achse ging Richtung N8a, die y-Achse nach oben und die z-Achse in Richtung nördlicher Hallenaußenwand.

5.5 Zwangsbelüftetes Lager

Die Versuche wurden im Kartoffellager Kuhlmann in Eimcke/Niedersachsen in Zusammenarbeit mit dem KTBL Dethlingen unter dem hilfreichen Mitwirken von Herrn Egbert Schorling unternommen.

Die Kartoffelhalle ist zweigeteilt und besteht aus einer Lager- und Sortierstation. Die an den Außenwänden und dem Dach mit Polyurethanschaum isolierte Halle (Außenmaße 30 m x 32 m) fasst 2000 t Kartoffeln. Sie hat eine Firsthöhe von 8,2 m und eine Traufhöhe von 9,8 m. Klappenöffnungen (Maße 0,8 m x 2,05 m) befinden sich 0,5 m und 7,2 m über dem Boden. Das Lager ist in 4 Sektionen eingeteilt und kann jeweils mit Hilfe eines zweipropellerigen Lüfters zwangsbelüftet (Wurfbelüftung) werden (**Bild 5.11** und **5.12**). Umluftgebläse im Lager unterstützen den Prozess. Die Kartoffeltemperatur wurde über Einsteckfühler gemessen, die sich nur in der obersten Stapelschicht befanden und zur Regelung benutzt.

Die Kartoffeln werden in 1 m x 2 m x 1m großen Holzkisten in 5 Stapelschichten gelagert.

Zum Besuchszeitpunkt Anfang März 2003 wurden die Kisten im Abstand von 15 Minuten zwangsbelüftet.

Da sich zu diesem Zeitpunkt die ThermaCamSC500 am stationären Messplatz in Weidendorf befand, wurde nur die mobile ThermaCam PM 545 mit Weitwinkelobjektiven von 24 ° und 80 ° für Messungen eingesetzt.

Die Zeitreihen wurden manuell erfasst, d.h. im Zeittakt von 30 Sekunden wurde ein Bild per Knopfdruck aufgenommen.

Tabelle 5.2: Positions-Koordinaten (xyz) der konventionell und thermographisch erfasst Messpunkte (Auszug aus der Datensammlung der Lagersaison 2002/2003)

Lagersaison 2002/2003	horizontaler Abstand zur linken unteren Ecke Stapel 8b		
	x	y	z
Konventionelle Daten			
Luft			
Luft/Feuchte-Thermometer in 1 m	2,73 m	0,85 m	0,00 m
Luft/Feuchte-Thermometer in 9 m	3,33 m	9,05 m	0,59 m
Zuluft Klappe unten	1,33 m	0,75 m	18,65 m
Referenzplatte 1	4,65 m	5,63 m	0,00 m
Innentemperaturen			
Reihe 8a, Nr 2/ 1.Stsch	4,13 m	0,94 m	1,18 m
Reihe 8a, Nr 2/ 3.Stsch	4,13 m	3,44 m	1,18 m
Reihe 8a, Nr 2/ 5.Stsch	4,13 m	5,94 m	1,18 m
Reihe 8a, Nr 7/ 1.Stsch	4,13 m	0,94 m	13,43 m
Reihe 8a, Nr 7/ 3.Stsch	4,13 m	3,44 m	13,43 m
Reihe 8a, Nr 7/ 5.Stsch	4,13 m	5,94 m	13,43 m
Infrarot-erfasste Daten			
Papier N8.A auf 7. Schicht	4,57 m	9,26 m	0,00 m
Referenzplatte 1	4,65 m	5,63 m	0,00 m
Kistenfront N8.A, 5. Schicht	4,13 m	5,63 m	0,00 m
Kistenseite N8.A, 5. Schicht	5,45 m	5,63 m	2,15 m
Kartoffeln N8.A, 5. Schicht	4,13 m	6,10 m	0,15 m
Kartoffeln N8.A, 7. Schicht	4,13 m	8,60 m	0,15 m
FRIWEIKA-Fühler			
FRIWEIKA Fühler 1	1,33 m	0,94 m	15,88 m
FRIWEIKA Fühler 2	1,33 m	2,19 m	13,43 m
FRIWEIKA Fühler 3	1,33 m	3,44 m	10,98 m
FRIWEIKA Fühler 4	1,33 m	7,19 m	8,53 m
FRIWEIKA Fühler 5	1,33 m	8,44 m	10,98 m

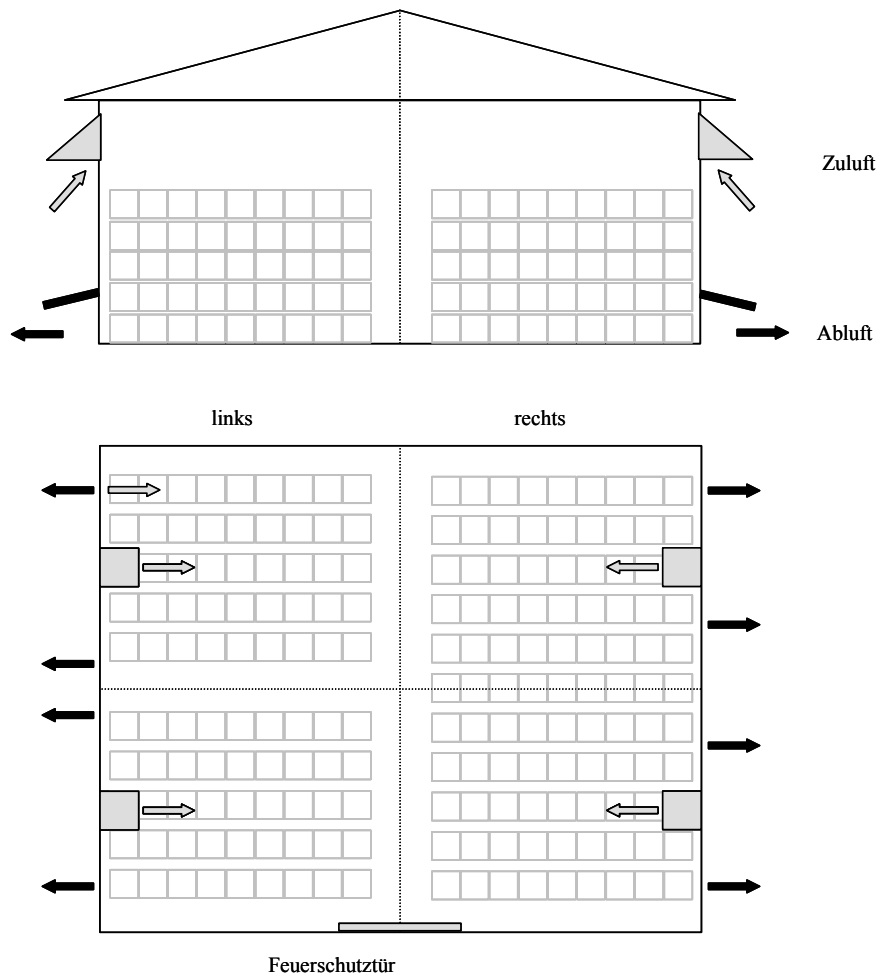


Bild 5.11: Schemazeichnung des Kartoffellagers Kuhlmann in Eimcke (ohne Sortierhalle). Die Zuluft kann über 4 Gebläse über den Kartoffeln verteilt werden



Bild 5.12: Die Gebläse im Kartoffellager Kuhlmann sind über den Kartoffeln angeordnet

6 Einsatz der Thermographiemesstechnik im Kartoffellager zur Temperatur-/Klimaerfassung

6.1 Bewertung der gemessenen IR-Temperaturen

6.1.1 Ermittlung einer Korrekturgleichung

Die bei unterschiedlichen Belüftungsvorgängen an der Referenzplatte konventionell und thermographisch ermittelten Temperaturverläufe wurden gegenübergestellt (**Bild 6.1**). Die IR-Daten waren zuvor entsprechend den Vorgaben der ThermaCam Software korrigiert worden, die Umgebungsbedingungen der Kamera waren standardmäßig eingestellt (**Tabelle 6.1**).

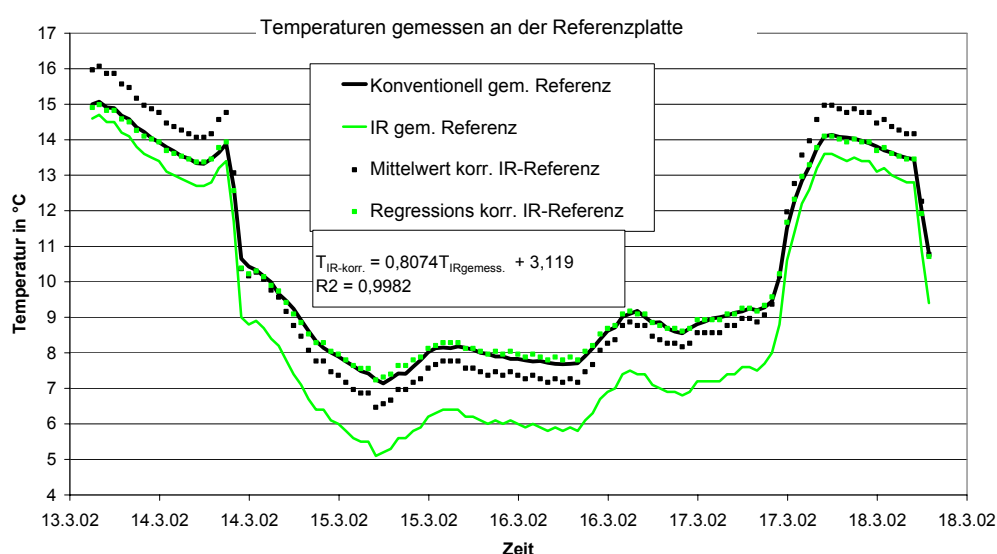


Bild 6.1: Temperaturerfassung mit konventioneller und thermographischer Messtechnik an einer Referenzplatte in der Klimakammer sowie Korrektur über Mittelwertabgleich und linearer Regression

Beim Vergleich der beiden Messmethoden zeigte sich, dass die an der Referenzplatte gemessenen Temperaturen trotz Korrektursoftware der Infrarotkamera nicht gänzlich übereinstimmten. Die thermographisch erfassten Temperaturwerte (**Bild 6.1**, helle Linie) waren deutlich niedriger als die konventionell gemessenen Werte (schwarze Linie). Zusätzlich war eine temperaturabhängige Abweichung von bis zu ca. 2 K zu beobachten. Diese absolute Differenz zwischen den Messmethoden, die von den Kameraherstellern mit einer Messgenauigkeit von ± 2 K angegeben wird, blieb allerdings über dem untersuchten Temperaturbereich nicht konstant, vielmehr erhöhte sie sich mit sinkenden Temperaturen.

Zunächst wurde versucht, die Temperaturdifferenz über eine Mittelwertabgleichung zu korrigieren (**Bild 6.1**, gepunktete schwarze Linie). Dabei blieb jedoch der temperaturabhängige Fehler bei einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 1,37 K mit $\pm 0,58$ K erhalten. Diese Methode wurde nicht weiter verfolgt.

Um den Temperatureinfluss zwischen thermographisch und konventionell ermittelten Daten zu kompensieren, wurden die IR-Daten den konventionellen Daten zeitgleich gegenübergestellt (**Bild 6.2**). Es zeigte sich, dass die lineare Regressionsgerade eine gute Korrekturmöglichkeit der thermographisch erfassten Daten darstellt. So verminderte sich die Abweichung von der (als richtig gewerteten) konventionellen Temperatur auf $0\text{ K} \pm 0,09\text{ K}$ (**Bild 6.1** gepunktete helle Linie).

Bild 6.2 zeigt weiterhin auf, dass gerade im Temperaturbereich von 4 bis 6°C (Kartoffel-lagertemperaturen) die Differenz zwischen thermographisch und konventionell gemessenen Werten relativ groß ist.

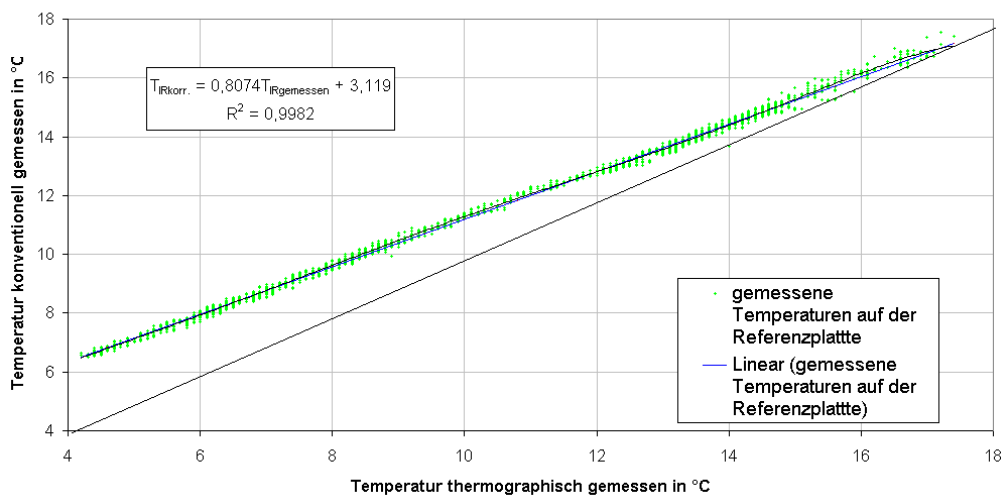


Bild 6.2: Zusammenhang zwischen thermographisch und konventionell ermittelten Werten an der Referenzplatte in der Klimakammer im März 2002

Tabelle 6.1: Standardeinstellungen der Umgebungsbedingungen der IR-Kamera in der ThernaCAM Software.

Version	ThernaCAM Researcher 2001
Distance	2
Distance Unit	Meter
Emissivity	0,92
Transmission	0,00
ExtOpticsTemperature	20,00°C
ExtOpticsTransmission	1,00
ReferenceTemperature	0,00°C
RelativeHumidity	50,00%

Auch im Kartoffellager Weidensdorf wurden während der Lagerperioden 2002/2003, 2003/2004 und 2004/2005 vergleichende Messungen zwischen konventioneller und thermographischer Messtechnik durchgeführt, um die IR-Daten zu korrigieren. Bei diesen Messungen war es nun möglich, über einen längeren Zeitraum die im Kartoffellager relevanten Temperaturbereiche mit in die Berechnung der Regressionsgerade einzubeziehen.

Zu Beginn der Lagerperiode 2002/2003 wurden zur genauen Korrektur der IR-Aufnahmen noch jeweils die Umgebungsbedingungen der Kamera (Luftfeuchte und Temperatur in 9 m Höhe) zum Messzeitpunkt mit eingegeben. Dies führte zu einer leicht verschobenen Veränderung der Regressionsgerade von $y = 0,6794x + 2,9927$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9113$.

Allerdings wurde diese Korrekturvariante wieder verworfen, da sie zu aufwendig und nur im nachhinein unternommen werden konnte. Da das Ziel dieser Arbeit unter anderem die Steuerung des Kartoffellagers mittels „live“ermittelten IR-Daten ist, muss ihre Korrektur möglichst schnell durchgeführt werden. Die Regressionsgerade mit den Standardumgebungsbedingungen der Kamera von $y = 0,6425x + 3,9437$ und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9157$ unterschied sich nur im Schnittpunkt mit der y-Achse um 1 K, so dass anschließend weiterhin mit den Standardumgebungsbedingungen der Kamera (**Tabelle 6.1**) gearbeitet wurde.

Bild 6.3 zeigt die Zusammenhänge zwischen konventionell und thermographisch ermittelten Werte an der Referenzplatte im Kartoffellager Weidensdorf während der Lagersaison 2002/2003 (Standardumgebungsbedingungen der Kamera). Nach der Korrektur der IR-Daten mit der dabei ermittelten Regressionsgerade sinkt die Differenz zwischen konventionellen und thermographischen Messwerten von einer mittleren Abweichung von $3,23 \text{ K} \pm 0,67 \text{ K}$ auf eine mittlere Abweichung von $0 \text{ K} \pm 0,32 \text{ K}$.

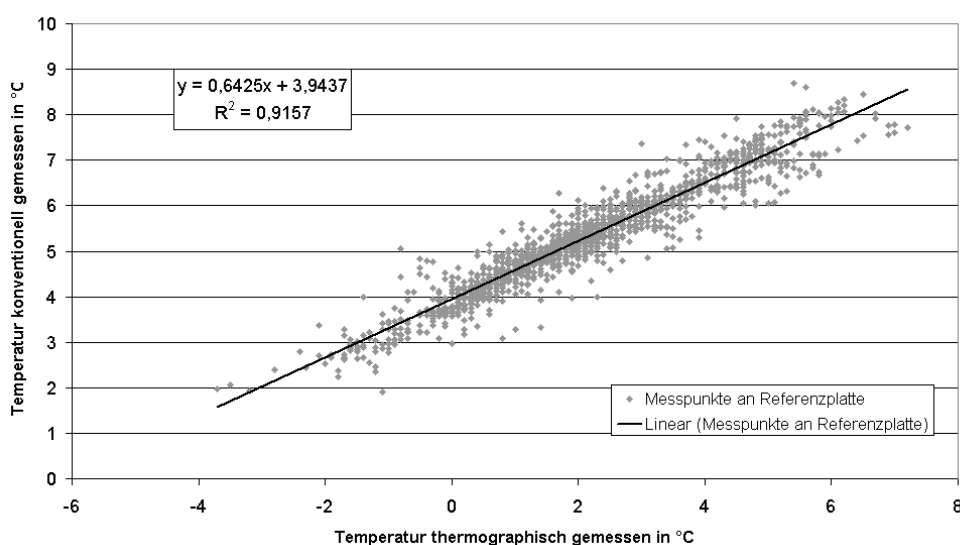


Bild 6.3: Zusammenhang zwischen thermographisch und konventionell ermittelten Werten an der Referenzplatte während der Lagersaison 2002/2003

Die Korrektur über die Regressionsgrade wurde anschließend auf alle gemessenen IR-Bereiche im IR-Bild /Session übertragen. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse sind mit korrigierten IR-Daten ermittelt worden.

6.1.2 Fehlerquellen und Störeinflüsse

Es wurden IR-Messungen während 3 Lagerperioden aufgezeichnet. Die Oberflächentemperaturen wurden jeweils aus den zuvor definierten „Sessions“ ermittelt. Dabei ergaben sich folgende Fehler und Fehlerquellen:

- Der Stativkopf der Kamera senkte sich (**Bild 6.4**) und die Messbereiche der Session mussten neu eingestellt werden.

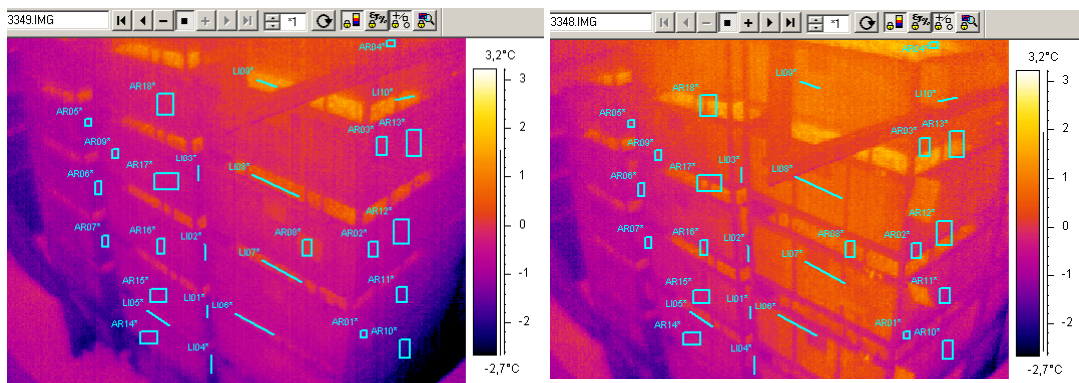


Bild 6.4: Verschiebung einer Session durch Absenkung der Kamera (links mit neu definierter Session, rechts vor der Kameraabsenkung 1 Minute vorher)

- Die Messflächen wurden durch Einlagerung weiterer Kisten (**Bild 6.5**) oder Vorhänge zugestellt bzw. verloren ihre Messgültigkeit durch Entfernen von Kisten

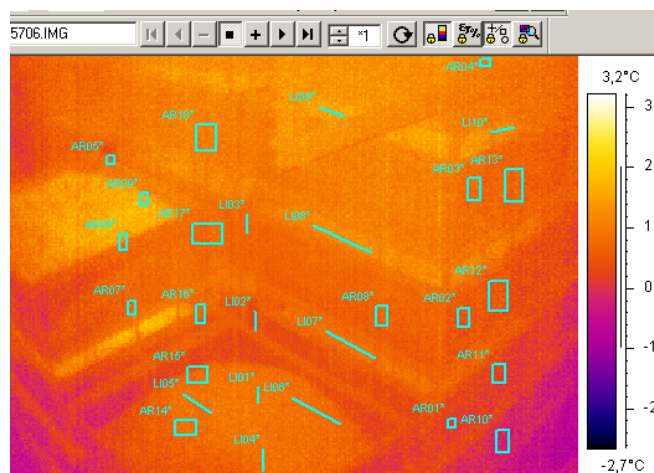


Bild 6.5: Mögliche Fehlerquelle bei der Auswertung von IR-Bildern durch Hinzustellen weiterer Kisten

- Die Temperaturerfassung auf den Kisten musste ausfallen, wenn die Kartoffelkisten zur Begasung mit Keimhemmungsmitteln von Vorhängen verdeckt wurden (**Bild 6.6**)

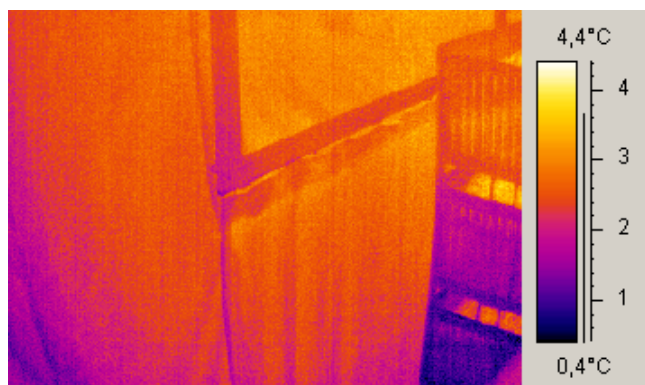


Bild 6.6: IR-Aufnahme des stationären Messstands während des Begasens der Kisten zur Keimhemmung

- Thermische Störquellen (Personen, Gabelstapler) im Bild (**Bild 6.7**). Solche Bilder wurden für die Auswertung der Temperaturverläufe nur nach genauer Prüfung verwendet bzw. verworfen

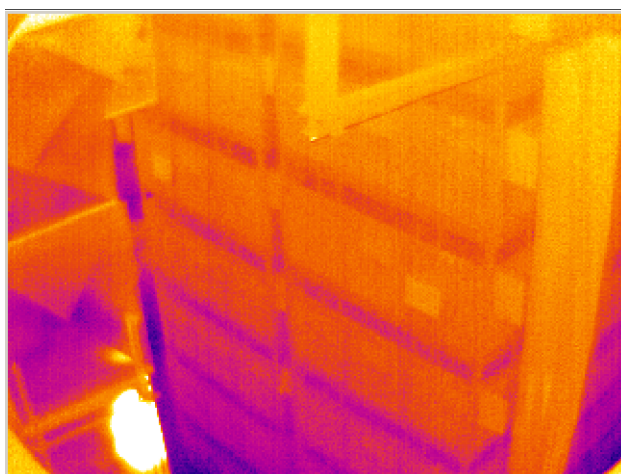


Bild 6.7: Gabelstapler und Vorhang im IR-Bild

6.2 Gezielte Klimasteuerungen an der Einzelkiste

In der Klimakammer (**Bild 5.4**) wurden gezielte Belüftungen an der Einzelkiste vorgenommen. Da der Versuchsstand erst im März 2002 für erste Messungen mit der IR-Kamera präpariert wurde, entsprachen die gemessenen Innentemperaturen der Kartoffelkiste nicht immer den vorgeschriebenen Lagertemperaturen für Kartoffeln.

Die Klimaänderungen wurden in Messtakten von 1 Aufnahme pro Minute bzw. pro Stunde vorgenommen.

Entsprechend der Verteilung der konventionellen Fühler wurde eine Session mit den entsprechend gelegenen Messbereichen gewählt (**Bild 6.8**).

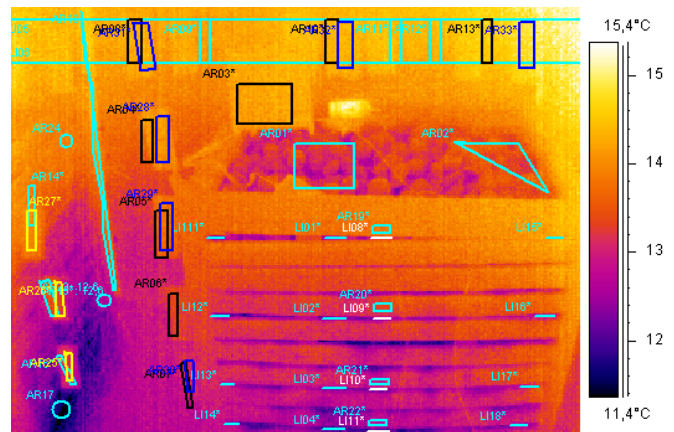


Bild 6.8: Auswerte-Session für die Klimakammer.

(Anmerkung: wegen verrutschter Papiermarker (Fehlerquelle!!) wurden zusätzliche Flächen für Papiermarker hinzugefügt)

Aus der Vielzahl der Daten ist an dieser Stelle eine Auswahl der Ergebnisse vorgenommen worden: es werden die Temperaturveränderungen in 66 cm Höhe, d.h. ungefähr in der Kistenmitte und in 1,10 m Höhe, d.h. auf der Kistenoberfläche dargestellt.

Die Gesamtheit der Daten geht zur Verrechnung in das dreidimensionale Rechenmodell. Die Ergebnisse hierzu werden in Kap. 7.2 beschrieben.

6.2.1 Erwärmen

Etwa 30 Minuten lang wurde 22 °C warme Luft der Klimakammer zugeführt. Die Temperaturentwicklungen an der Oberfläche und im Inneren der Versuchskiste sind in **Bild 6.9** dargestellt. Die im Messtakt von 1 Minute aufgenommenen IR-Daten zeigten in diesem kurzen Zeitabschnitt eine relativ hohe Schwankungsbreite; dennoch ist zu erkennen, dass unterschiedliche IR-Messbereiche die Erwärmung unterschiedlich wiedergeben:

- Eine Temperaturschichtung von oben nach unten ist eindeutig erkennbar: die in 66 cm gemessenen Temperaturen der Kartoffeln im Spalt sind niedriger als die in 110 cm Höhe
- Die in gleicher Höhe an der Holzfront gemessenen Temperaturen sind höher als die Kartoffeltemperaturen
- Die Referenzplatte in 1,58 m Höhe und der Papiermarker in 1,33 m Höhe zeigen die Erwärmung mit einer Temperaturdifferenz von etwa 2 K an, wobei der Papiermarker schneller auf die Temperaturänderung reagiert als die Referenzplatte

Es zeigt sich weiterhin, dass sich die Kartoffeltemperaturen in der Kistenmitte sowie an der Außenfront in 66 cm Höhe, konventionell gemessen, nicht oder nur marginal veränderten.

In der IR-Bildfolge ist die Erwärmung visuell auf der Kistenoberfläche sehr deutlich nach zu vollziehen (vgl. Kap.3, **Bild 3.3**).

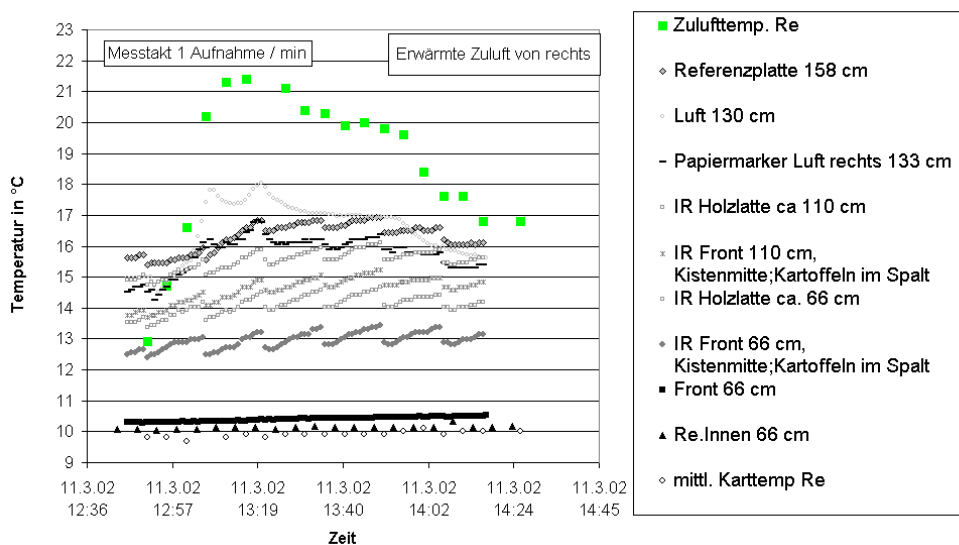


Bild 6.9: Temperaturveränderungen an der Versuchskiste bei Erwärmung

6.2.2 Kühlen

In den Morgenstunden wurde der Klimakammer für etwa 1 Stunde 10 °C kalte Außenluft zugeführt.

In **Bild 6.10** sind die Temperaturverhältnisse in 66 cm Höhe im Kisteninneren sowie an der Außenfront, thermographisch und konventionell gemessen, dargestellt.

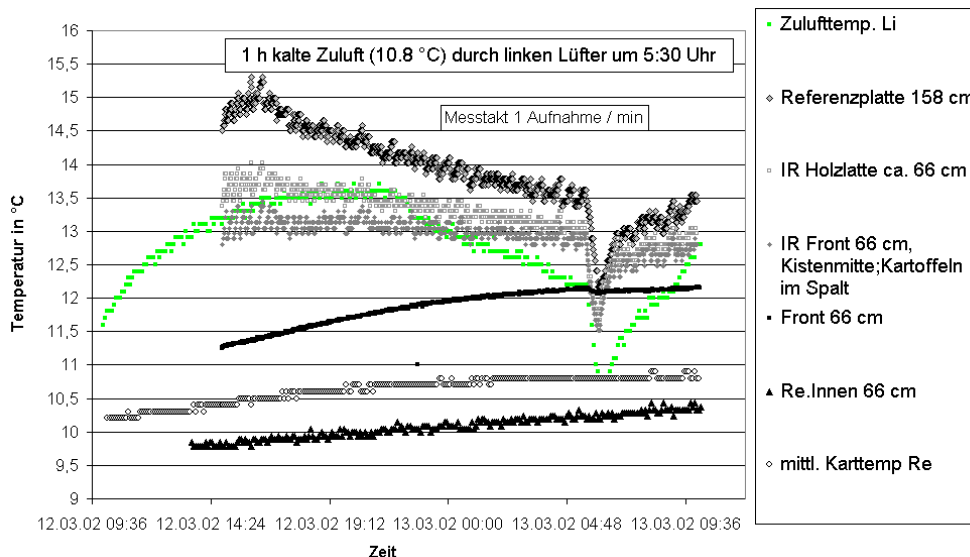


Bild 6.10: Temperaturveränderungen an der Versuchskiste bei Kühlung

Die Zufuhr von kalter Luft ist mit der IR-Kamera eindeutig nachweisbar: Sowohl Referenzplatte, als auch die in den Kartoffeln und der Holzfront in 66 cm Höhe thermographisch gemessenen Temperaturen zeigten den Temperatursturz um ca. 5:00 Uhr an.

Die an der Front und im Inneren der Kiste konventionell gemessenen Kartoffeltemperaturen unterscheiden sich deutlich in der Höhe voneinander und reagieren im betrachteten Zeitraum noch nicht auf die Temperaturänderung von außen.

6.2.3 Geregelttes Klima

Die Klimakammer wurde mit Außenluft 2,5 Tage gekühlt (**Bild 6.11**). Der Messtakt der Thermographiemessungen war 1/min.

Es zeigt sich, dass die an der Oberfläche gemessenen Temperaturen den Temperaturverlauf der Zulufttemperatur genau wiedergeben.

Die konventionell an der Front gemessene Temperatur reagierte zeitverzögert auf die Temperatureinwirkung von außen und im Kisteninneren war die Temperaturveränderung noch verzögerter (1,5 Tage) und abgeschwächer nachzuweisen.

Es zeigte sich, dass die Kartoffeln mit dieser Zwangbelüftung gut herabgekühlt werden konnten.

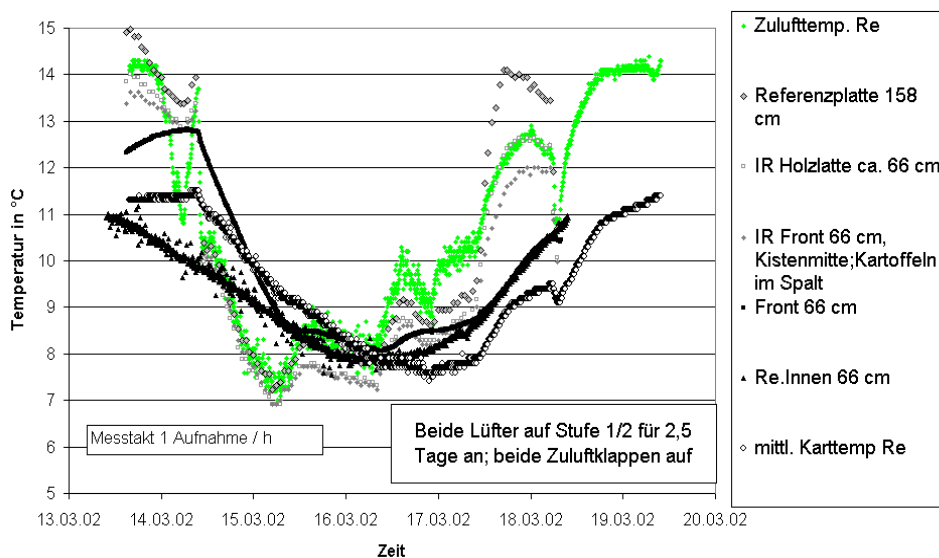


Bild 6.11: Temperaturveränderungen an der Versuchskiste bei langfristiger Kühlung (geregelttes Klima – Zwangsbelüftung)

6.2.4 Ungeregeltes Klima

Die Klimakammer wurde tagsüber den tagesbedingten Temperaturänderungen überlassen und nachts durch die Zufuhr von kalter Außenluft mit dem Lüfter gekühlt – vergleichbar mit einer konvektiven Belüftung (**Bild 6.12**).

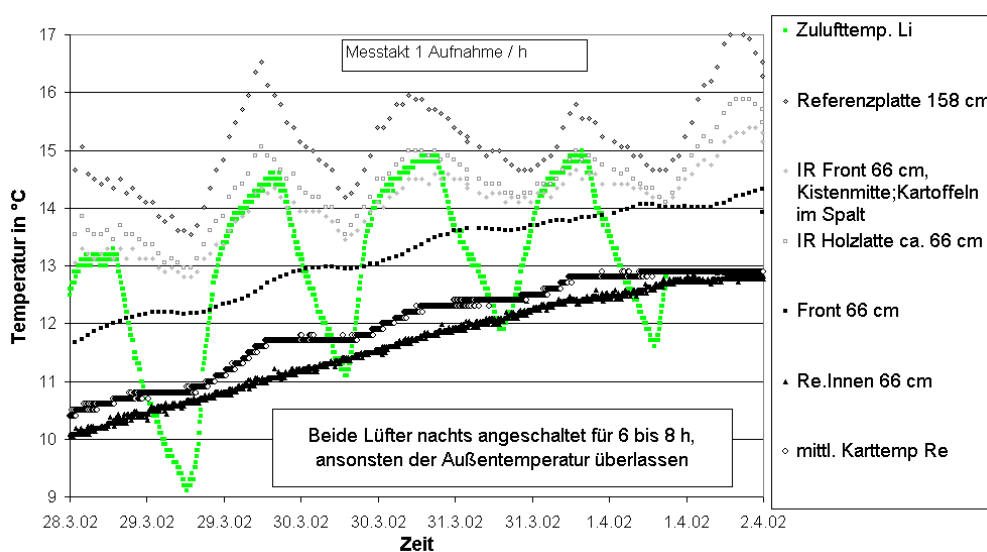


Bild 6.12: Temperaturveränderungen an der Versuchskiste (tagsüber ungekühlt, nachts gekühlt – konvektive Belüftung)

Die zugeführte Zuluft unterlag sehr starken Temperaturschwankungen, wobei es insgesamt zu einem leichten Temperaturanstieg kam.

Die an der Versuchskiste thermographisch ermittelten Temperaturen geben diesen Temperaturverlauf der Zuluft mit verringerter Temperaturdifferenz wieder.

Auch die an der Kartoffelfront konventionell gemessene Kartoffeltemperatur zeigte einen leicht schwankenden Temperaturanstieg. Die Kartoffeltemperatur in der Kistenmitte stieg trotz nächtlicher Kühlung stetig an.

6.3 Klimaerfassung während 2 Lagerperioden mit betriebseigener FKL-Klimasteuerung

Während der Lagerperioden 2002/2003 und 2003/2004 wurden im 15 kt Großkistenlager Weidensdorf Klimaaufzeichnungen unternommen. Alle konventionell und thermographisch erfassten Temperaturdaten des stationären Versuchsstands wurden zusammengestellt, an dieser Stelle wird jedoch zur besseren Übersicht nur ein Teil der Ergebnisse dargestellt.

Temperaturmessungen im Zeittakt von 1 Stunde wurden zur Langzeit-Temperaturerfassung durchgeführt. Messungen mit einer geringeren Taktrate dienen dazu, die Auswirkungen des Öffnen und Schließens der Lüftungsklappen zu untersuchen.

6.3.1 Langzeit-Temperaturerfassung

Bild 6.13 stellt den Temperaturverlauf eingelagerter Kartoffeln während der Lagerperiode 2002/2003 dar.

Die Kartoffeln befanden sich in der 1.,3. und 5. Stapelschicht der 2. Reihe (Hallenmitte) ihre Temperaturen wurden konventionell gemessen. Des Weiteren wurde die thermographisch gemessene Oberflächentemperatur der Kartoffeln in der 2. Reihe, 5. Schicht erfasst.

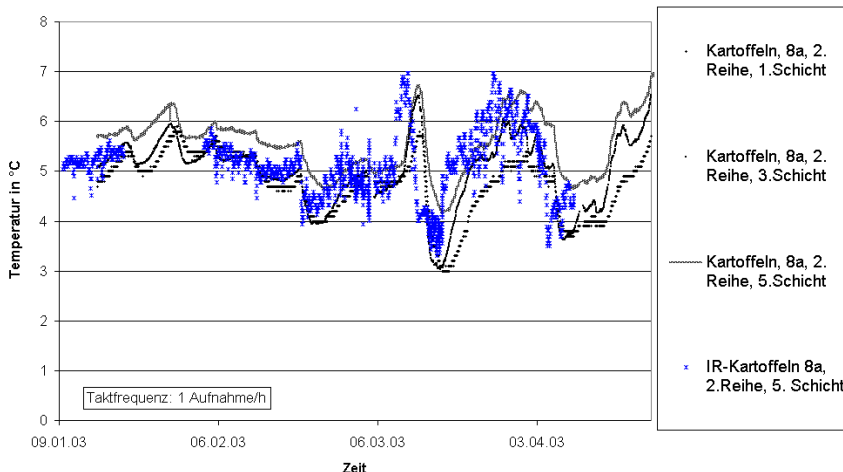


Bild 6.13: Temperaturverlauf, thermographisch und konventionell erfasst, von Kartoffeln im Großkistenlager Weidensdorf während der Lagersaison 2002/2003

Es zeigt sich, dass die Kartoffeltemperaturen ab Anfang März stärkeren Schwankungen unterworfen waren.

Ein Temperaturdifferenz zwischen der 1. und 5. Stapelschicht ist deutlich erkennbar; am Ende der Lagerperiode geht deren Temperaturspanne weiter auseinander.

Die thermographisch gemessenen Kartoffeloberflächentemperaturen verlaufen synchron entsprechend den konventionell im Kisteninneren gemessenen Temperaturen. Temperaturanstiege bzw. –abfälle werden zeitlich früher angezeigt.

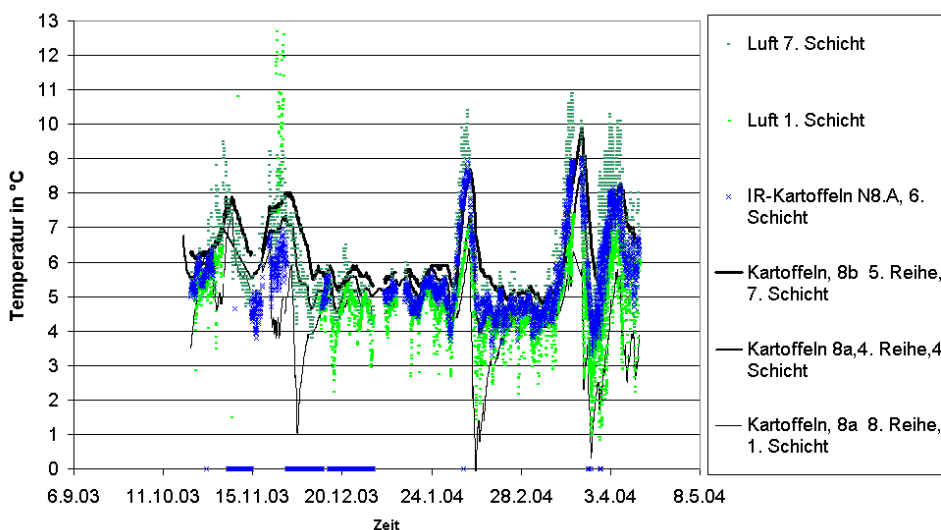


Bild 6.14: Temperaturverlauf, konventionell und thermographisch erfasst, von Kartoffeln und Luft im Großkistenlager Weidensdorf während der Lagersaison 2003/2004

Bild 6.14 stellt der Temperaturverlauf eingelagerter Kartoffeln und der Lufttemperaturen in der Lagerhalle während der Lagerperiode 2003/2004 dar.

Diese Temperaturen wurden konventionell erfasst. Zum Vergleich wurde die IR erfasste Kartoffeloberflächentemperatur in der 6. Schicht angefügt (blaue Linie).

Die Kartoffeltemperaturen wurden – um den räumlichen Eindruck des Lagers zu vermitteln – in der 5. Reihe, 7. Schicht (Mitte oben), in der 4. Reihe, 4. Schicht (Mitte des Kartoffelstapels) und in der 8. Reihe, 1. Schicht (Hallenwand unten, vor der Klappe) gemessen. Die Lufttemperaturen wurden in der Hallenmitte in 1m Höhe (1. Schicht) und in 10 m Höhe (7. Schicht) erfasst.

Im Laufe der Lagersaison kommt es zu deutlichen Temperaturschwankungen der Luft sowie der Kartoffeln. Die Kartoffeltemperaturen werden dabei je nach räumlicher Lage von den Lufttemperaturen (Klappenöffnungen) in ihrer Nähe beeinflusst. Zeitlich verzögert und in der Temperaturhöhe abgeschwächt ist der Verlauf der Lufttemperaturen im Temperaturverlauf der Kartoffeln nachzuvollziehen. Die IR-Temperatur passt sich im wesentlichen an die Kartoffelinnentemperaturen an, bei sehr starken Temperatursprüngen der Lufttemperatur werden diese allerdings deutlicher angezeigt als Innentemperaturen. Weiterhin ist festzustellen, dass die Lufttemperaturen in 1m und in 10 m Höhe in den Monaten Dezember/Januar tiefer als die Kartoffeltemperaturen sind.

Im engeren Zeitfenster ist dieses Verhalten noch deutlicher aufzuzeigen (**Bild 6.15**). Die thermographisch erfasste Oberflächentemperatur von Kartoffeln in der 6. Schicht (2. Reihe) (blaue Linie) ist im Vergleich zum Temperaturverlauf von Kartoffeln, die sich räumlich in der obersten Schicht in Nähe der Dachluken (2. Reihe 7. Schicht), genau in der Mitte des Stapels (4. Reihe, 4. Schicht) und in den unteren Schicht in Nähe der Bodenluken (8. Reihe, 1. Schicht) befanden, dargestellt. Weiterhin werden die Lufttemperaturen in 1 m, 9 m und 10 m Höhe gezeigt.

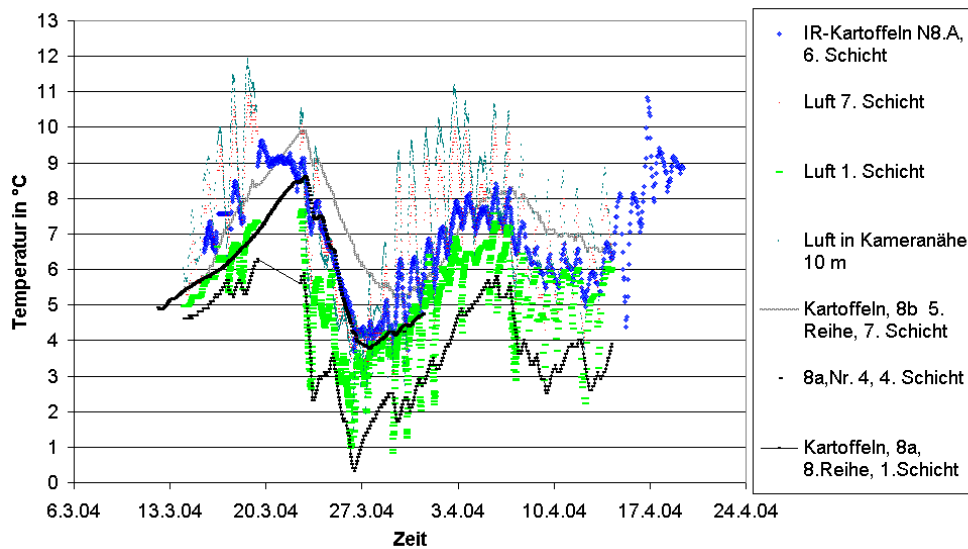


Bild 6.15: Temperaturverlauf von Kartoffeln und Luft an verschiedenen Stellen des Versuchsstands, konventionell und thermographisch erfasst

Die thermographisch gemessene Oberflächentemperatur der Kartoffeln korrelierte gut mit der ihr am nächsten liegenden Kartoffeltemperatur (Reihe 5, 7. Schicht). Der Temperaturverlauf der Luft, der starke Schwankungen zwischen 11 °C und 2 °C erfuhr, übertrug sich zeitlich verzögert und im Absolutwert abgeschwächt analog auf die Oberflächentemperaturen der Kartoffeln und dann ins Stapelinnere. Im Gegensatz zur konventionellen Messung registrierte die IR-Oberflächentemperatur auch Temperaturänderungen, die von Klappenöffnungen unten an der Hallenwand herrührten (vergleiche Temperaturen in Kartoffeln der Reihe 8, 1. Schicht).

Zum Zeitpunkt der Messung, d.h. am Ende der Lagerperiode 2003/2004, lag im Kartoffelstapel insgesamt eine Temperaturdifferenz von 2 bis 3 K zwischen „vorne oben“ und „hinten unten“ vor. Es kam zu Temperatursprüngen von etwa 6 K.

Bislang wurden nur die thermographisch erfassten Oberflächentemperaturen der Kartoffeln vorgestellt, die in den momentan aufgestellten „Sessions“ nur eine kleine Messfläche bzw. eine Linie zur Verfügung haben. Größere Messbereiche zur Temperaturerfassung bieten die Holzfronten der Großkisten an.

Bild 6.16 stellt dar, welche Temperaturen auf den Kartoffelkistenoberflächen an Front und Seite, der Papiermarker und - im Vergleich dazu konventionell erfasst - der Kartoffeln (2. Reihe, 5. Schicht) der Lagerperiode 2002/2003 thermographisch erfasst wurden.

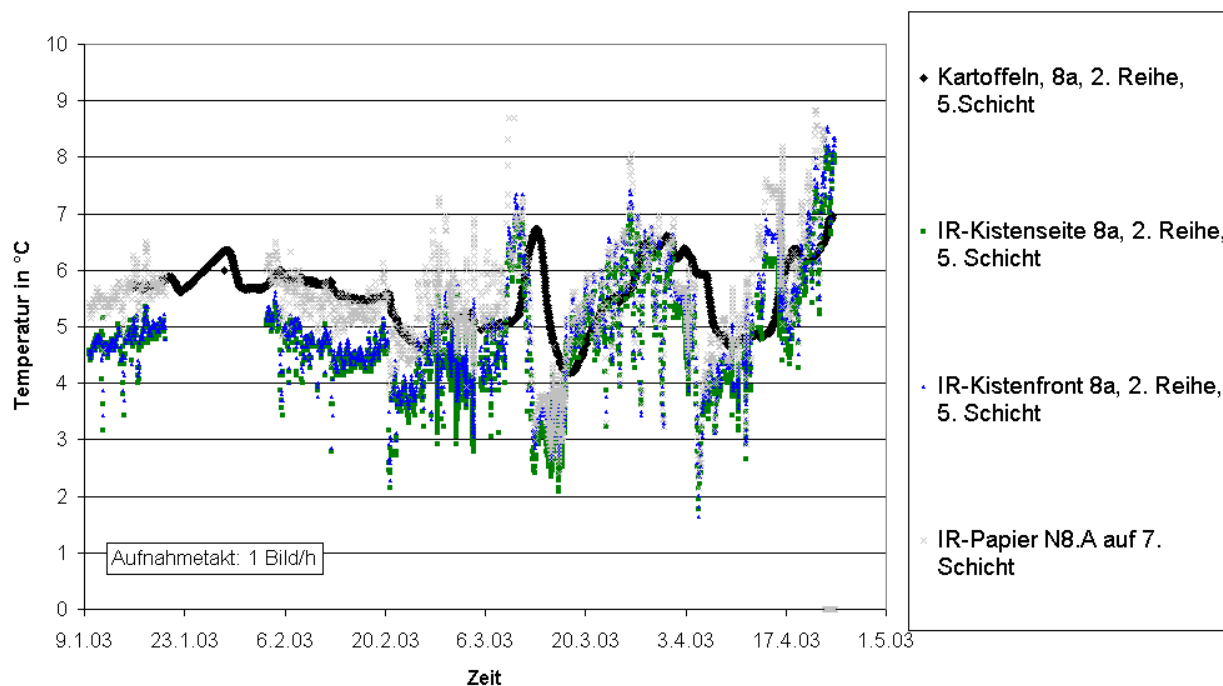


Bild 6.16: Temperaturverlauf, konventionell und thermographisch erfasst, von Kartoffeln, Kistenoberflächen und Papiermarkern während der Lagerperiode 2002/2003

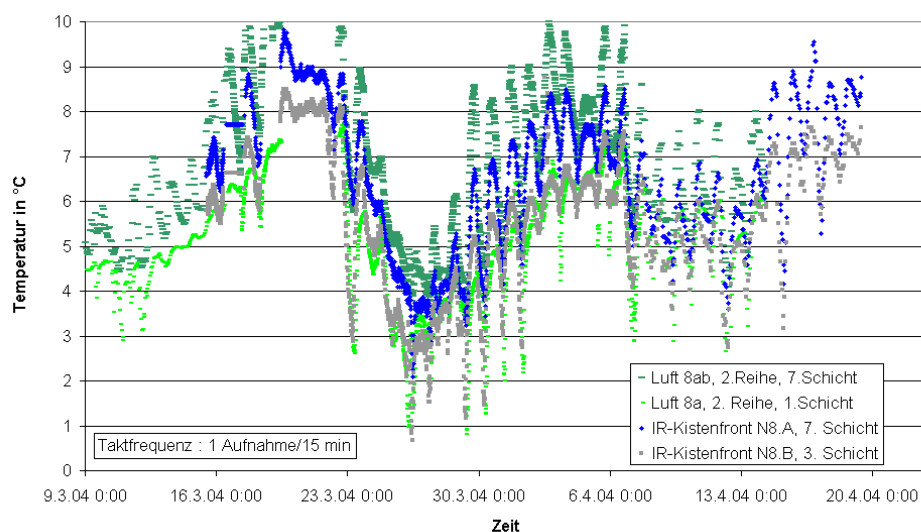


Bild 6.17: Temperaturverlauf, konventionell und thermographisch erfasst, von Luft und Kistenoberflächen (Seite, Front) Ende der Lagerperiode 2003/2004

Bild 6.17 stellt den konventionell und thermographisch erfassten Temperaturverlauf von Kistenoberflächen und der Umgebungsluft am Ende der Lagerperiode 2003/2004 dar.

Beide Darstellungen zeigen, dass die thermographisch erfassten Oberflächentemperaturen sehr stark von den Lufttemperaturen beeinflusst wurden. Hierbei waren die Temperaturschwankungen sehr groß, so dass sich von der Oberflächentemperatur der

Holzboxen nur schwer bzw. gar nicht auf die Innentemperaturen (**Bild 6.16**) schließen lässt.

6.3.2. Kurzzeit-Temperaturerfassung/Klappenversuche

Neben den Langzeitmessungen mit einer Taktfrequenz von 1 Aufnahme/Stunde wurden die Temperaturverläufe im Lager auch mit Taktfrequenzen von 15 bis 60 Sekunden bzw. 1 bis 15 Minuten pro Aufnahme erfasst, um bei unterschiedlichen Klappeneinstellungen der Dach- und Bodenluken Belüftungseinflüsse auf Kartoffeln und Lager nachzuweisen.

Dabei ließ sich feststellen, dass Bildfolgen mit einer Taktfrequenz unter 1 Minute sehr großen Schwankungen unterworfen sind. Diese wurden nicht weiter ausgewertet. Die hier aufgeführten Ergebnisse wurden Anfang März der Lagersaison 2002/2003 gewonnen - bei einer Taktfrequenz von mindestens einer Minute.

- Dachklappen geöffnet/Bodenklappen geschlossen:

Bild 6.18 stellt den Temperaturverlauf im Kartoffellager (in der 5. Stapelschicht) während einer Belüftung bei geöffneten Dachklappen, dem sogenannten „Kellereffekt“ dar. Die Außentemperaturen lagen bei 0°C bis 3°C bei einer Windgeschwindigkeit von 1,55 m/s, die Innentemperaturen bei etwa 5°C.

Trotz geöffneter Dachklappen und unter der Annahme, dass die kalte Außenluft von oben durch die Klappen „hereinfällt“, kam es nur zu einem geringen Temperaturabfall von etwa 0,5 bis 1 K. Die Kartoffeltemperaturen wurden von dieser Belüftung nicht beeinflusst. Allerdings waren ihre Oberflächentemperaturen niedriger als die im Kisteninneren gemessenen Temperaturen.

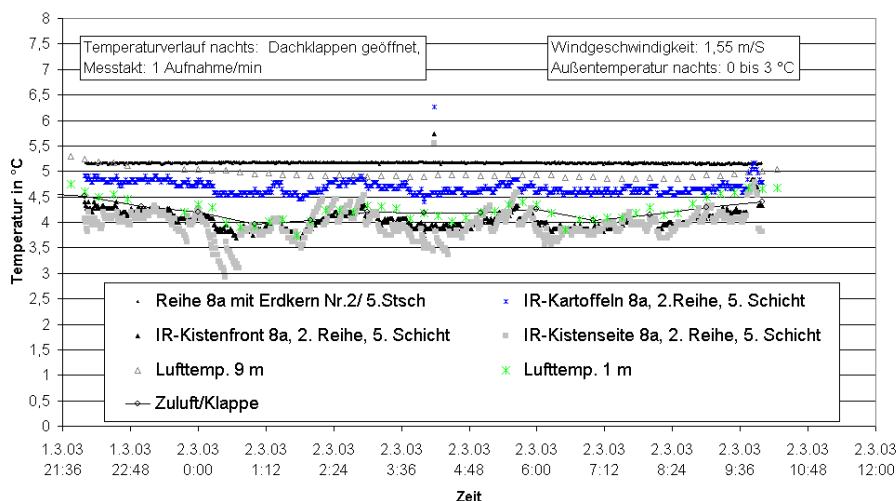


Bild 6.18: Temperaturverlauf von Kartoffeln, Kistenfronten und Luft, konventionell und thermographisch gemessen bei geöffneten Dachklappen

- Dach- und Bodenklappen geöffnet:

Während in den Nachtstunden bei Außentemperaturen von 0 °C bis 3 °C nur die oberen Dachklappen geöffnet waren (Kellereffekt), sanken die Oberflächentemperaturen der Kartoffeln und Holzfronten sowie die Lufttemperaturen nur geringfügig (**Bild 6.18**). Ab etwa 7:00 Uhr wurden zusätzlich die Bodenklappen geöffnet, dabei strömte kalte Außenluft mit 2,3 °C ein. Ein deutlicher Temperaturabfall war an allen Messstellen zu erkennen. Die Holzfronten reagierten stärker als die Kartoffeloberflächen in der 5. Schicht. Die Kartoffeltemperaturen im Kisteninneren wurden zu diesem Zeitpunkt noch nicht von der Temperaturänderung beeinflusst; es zeigt sich aber, dass die Oberflächen- und Lufttemperaturen unterhalb der Temperaturen innerhalb der Kiste lagen und es deshalb zeitverzögert zu einer Abkühlung kommen wird.

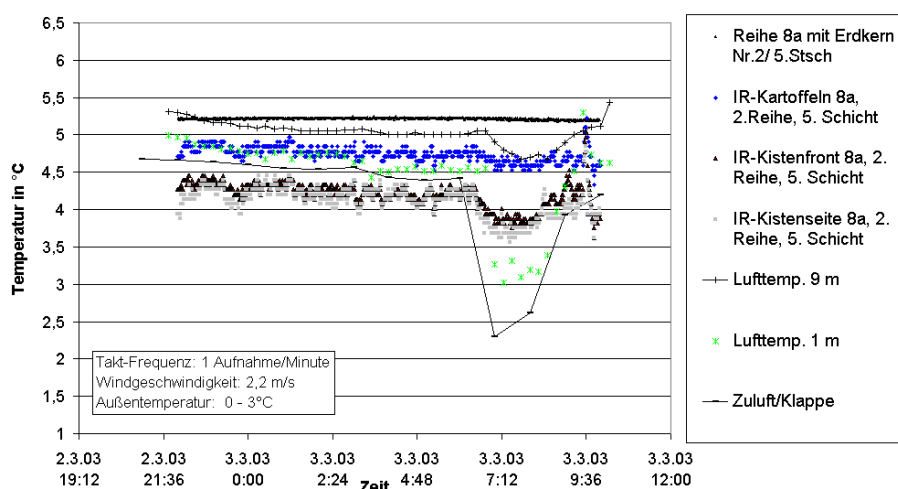


Bild 6.19: Temperaturverlauf von Kartoffeln, Kistenfronten und Luft, konventionell und thermographisch gemessen bei geöffneten Dach- und Bodenklappen (ab den Morgenstunden)

- Dach- und Bodenklappen geschlossen:

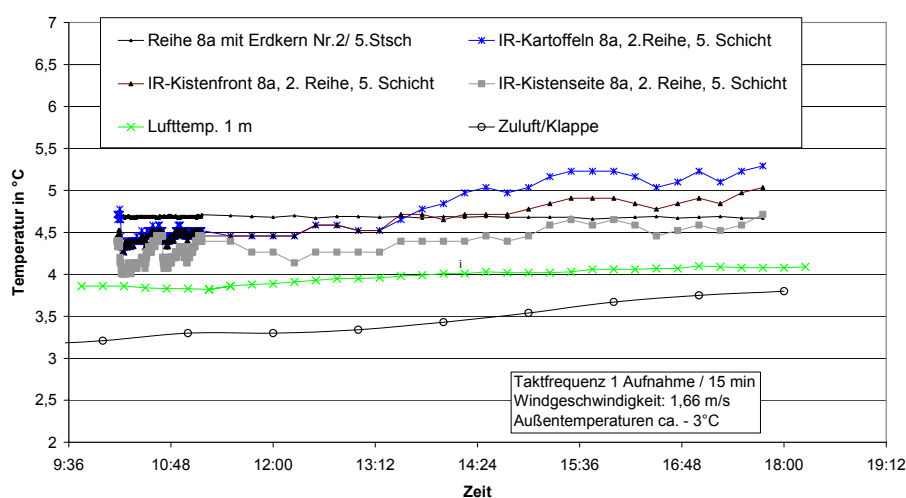


Bild 6.20: Temperaturverlauf von Kartoffeln, Kistenfronten und Luft, konventionell und thermographisch gemessen bei geschlossenen Dach- und Bodenklappen und Außenfrost

Bei Außenfrost und geschlossenen Belüftungsklappen im Dach- und Bodenbereich kam es im Kartoffellager trotz frostiger Außentemperaturen zu einem Anstieg der Umge-

bungslufttemperaturen und der Oberflächentemperaturen der Kartoffeln und Holzfronten (**Bild 6.20**). Die Kartoffeloberflächentemperaturen lagen ab einem bestimmten Zeitpunkt über den Kartoffeltemperaturen innerhalb der Kiste.

- Dachklappen geschlossen, Bodenklappen geöffnet:

Geöffnete Bodenklappen bei gleichzeitig geschlossenen Dachklappen führten zu einem Auftrieb der wärmeren Luftschichten nach oben (**Bild 6.21**). Die in Nähe der Bodenklappen gemessenen Temperaturen änderten sich bei den herrschenden Außenbedingungen während dieses Versuches kaum.

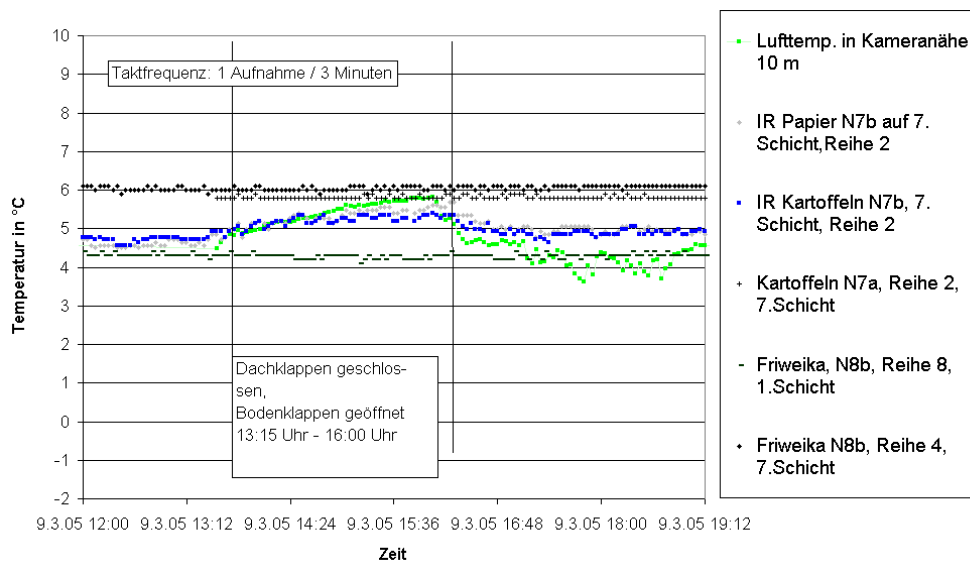


Bild 6.21: Temperaturverlauf von Kartoffeln und Luft, konventionell und thermographisch gemessen bei geschlossenen Dach- und geöffneten Bodenklappen

6.4 Sonstige Ergebnisse

Mit der ThermaCam PM545 wurden qualitative IR-Aufnahmen im Kartoffellager gemacht, d.h. die von der Kamera angezeigten Temperaturen wurden nicht korrigiert.

6.4.1 Abtrocknungsphase im Kartoffellager

Während der Abkühlphase in der Lagerperiode 2002/2003 wurden die Großkisten mit den frisch eingelagerten Kartoffeln im Abstand von 2 Wochen thermographisch erfasst. Ziel der Untersuchungen war, die gleichzeitig mit der Abkühlphase einhergehende Abtrocknungsphase der Kartoffeln zu visualisieren. Daneben konnten thermographische Aufnahmen von Kisten innerhalb des Kartoffelstapels vorgenommen werden (nach wägungsbedingtem Auslagern der Kisten).

Frischeingelagerte Kartoffelkisten sind eindeutig (allerdings aber nur kurzfristig) im bereits abgekühlten Lager erkennbar. Dies gilt in gleicher Weise für Kartoffelkisten, die am Ende der Lagerperiode aus der obersten Lagerschicht ausgelagert werden. (**Bild 6.22**).

Es lassen sich auch die Temperaturverhältnisse auf der Oberfläche einer Kartoffelkiste bei beginnender Abkühlung gut darstellen (**Bild 6.23**).

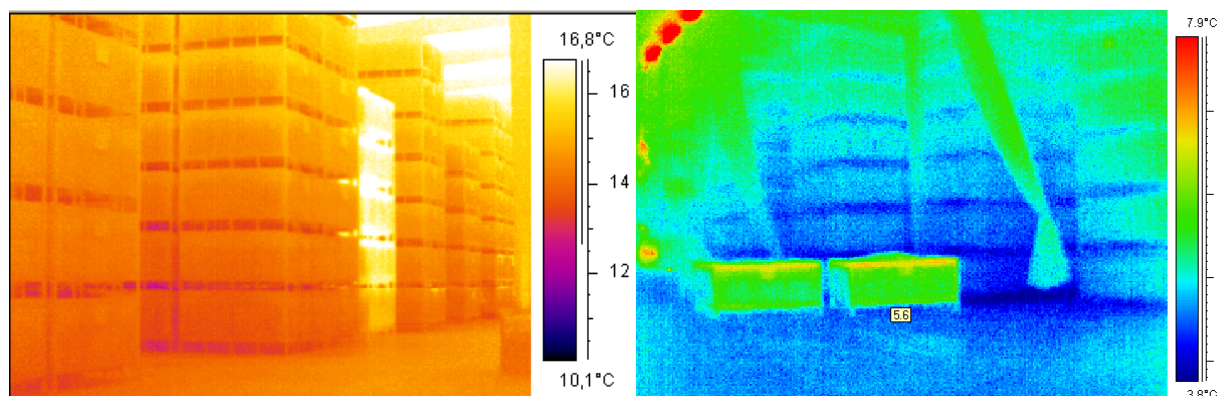


Bild 6.22: Links: frisch eingelagerter Kistenstapel im September 2002 (im Vergleich dazu) Rechts: ausgelagerte Kisten aus der 7. Stapelschicht im April 2002

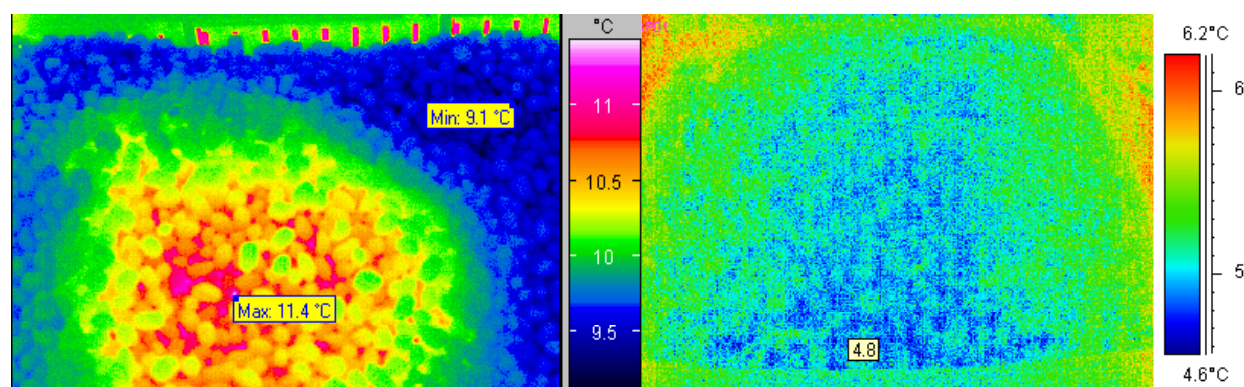


Bild 6.23: Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer Kartoffelkiste
Links: frischeingelagert im September 2001(im Vergleich dazu)
Rechts: kurz vor der Auslagerung im April 2001

IR-Aufnahmen von kalten Kartoffeln insbesondere in den unteren, d.h. von der Kamera noch einsehbaren Kisten lassen auf noch nicht abgetrocknete Kartoffeln schließen (**Bild 6.24**).

Feuchte Stellen in den Kartoffelkisten lassen sich mit der Infrarot-Kamera nachweisen, wenn man die an der Oberfläche liegenden Kartoffeln beiseite räumt (**Bild 6.25**).

Ein zweiwöchiger Messrhythmus ist allerdings zu groß, um Erkenntnisse aus Infrarotbildern über die Abtrocknungsphase der Kartoffeln zu erlangen, da die Kartoffeln an der Oberfläche und in den Außenbereichen der Schüttungen rasch abtrocknen.

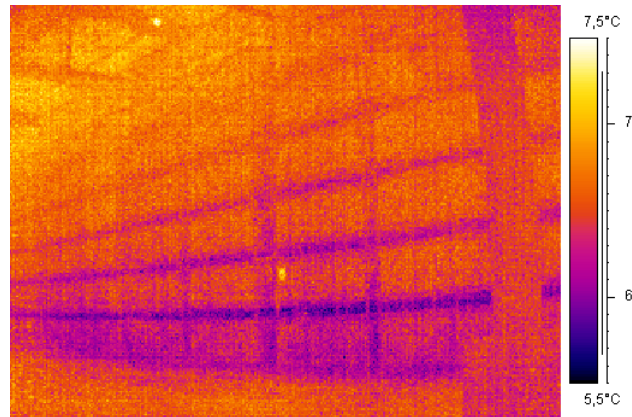


Bild 6.24: Kartoffellager Weidensdorf während der Abkühlungsphase im Oktober 2002: durch Feuchtigkeitsverdunstung erscheinen frisch eingelagerte Kartoffeln kälter

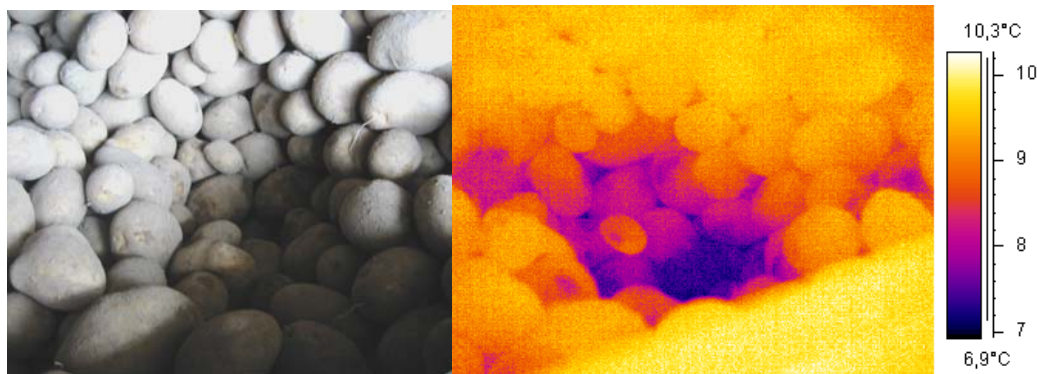


Bild 6.25: Frischeingelagerte Kartoffeln im Oktober 2002; Blick unter die Oberfläche, links photographische, rechts thermographische Aufnahme

Des Weiteren bestand die Gelegenheit, thermographische Aufnahmen von Kisten innerhalb des Kartoffelstapels bzw. innerhalb der Reihen zu erstellen, da die Kisten zur Wägung nacheinander entfernt wurden. Die Aufnahmen zeigten, dass die Temperaturverteilung im Lager über der Lagergrundfläche weitgehend gleichmäßig vorliegt. Die Temperaturverteilung über der Höhe war in allen hintereinander liegenden Kartoffelreihen vergleichbar, sofern keine Belüftung durch Öffnung der Klappen vorgenommen wurde.

Diese Untersuchung wurde mit der IR-Kamera ThermoCam PM 545 mit verschiedenen Weitwinkelobjektiven durchgeführt. Dabei wurden je nach Einsatz des Weitwinkelobjektives unterschiedliche Temperaturen mit der Kamera gemessen (**Bild 6.26**). Das bedeutet, dass bei Einsatz unterschiedlicher Objektive eine jeweils getrennte Nachkorrektur der Temperaturdaten vorgenommen werden muss (vgl. Kap. 6.1).

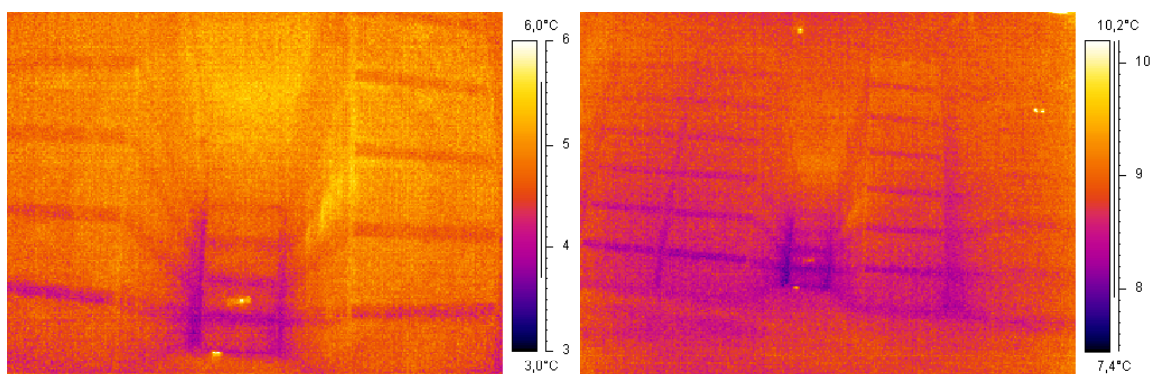


Bild 6.26: Blick in das Kistenlager mit ausgelagerten Kisten am 27.11.2002 10:00 Uhr
Links mit 45 ° Weitwinkelobjektiv: angezeigter Temperaturbereich: 3,0 bis 6,0 °C
Rechts mit 80 ° Weitwinkelobjektiv: angezeigter Temperaturbereich: 7,4 bis 10,2 °C

6.4.2 Keimung der Knollen

Keine eindeutigen Erkenntnisse erbrachten die thermographischen Aufnahmen bei den Untersuchungen unterschiedlicher physiologischer Lagerungszustände der Kartoffeln (gekeimt, ungekeimt) bzw. von Sortenunterschieden und/oder Vorbehandlungen (**Bild 6.27**).

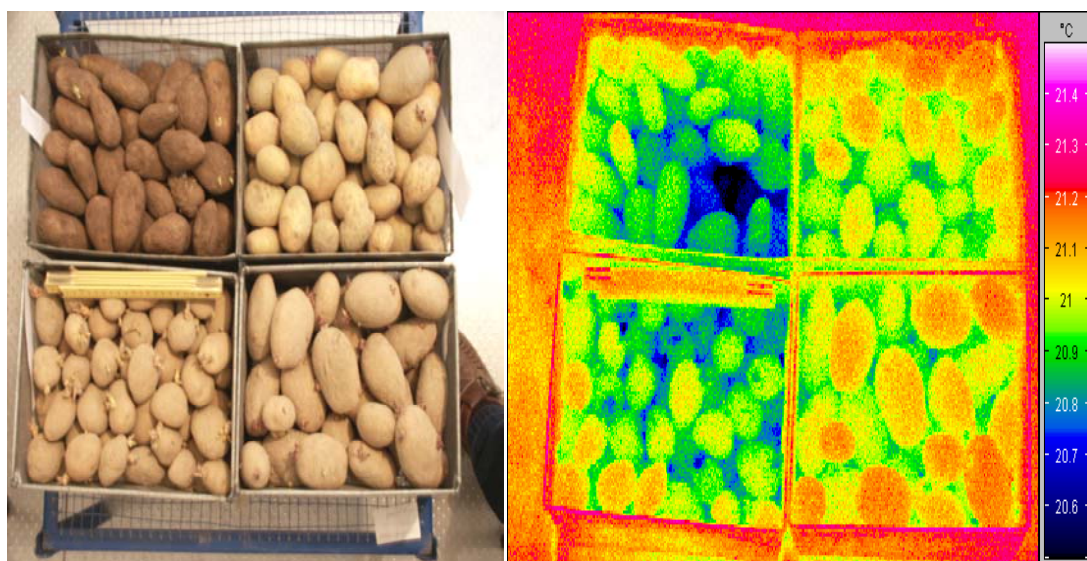


Bild 6.27: Die Kartoffelsorten Clelia, Afra, Donella (mit Keimhemmungsmitteln besprüht), Donella (mit Keimhemmungsmitteln bepudert) (jeweils von oben nach unten, bzw. links nach rechts) am 03.05.2002. Kartoffelkeime sind auf dem Thermographiebild kaum erkennbar

6.4.3 Vergleich mit einem zwangsbelüfteten Lager

Neben den Untersuchungen am stationären Messplatz in einem mit freier Konvektion belüfteten Kartoffellager wurden zum Vergleich Messungen mit der IR-Kamera in einem konventionellen zwangsbelüfteten Kartoffellager in Dethlingen durchgeführt. Auch hier wurden nur qualitative Messungen mit der mobilen IR-Kamera ThermaCam PM 545

durchgeführt. Es wurde versucht, Temperatur- bzw. Luftströmungen im Lager bei Klappenöffnungen mit manuell erstellten Bildfolgen im Zeittakt von 30 Sekunden erfassen.

Erwartungsgemäß zeigten die IR-Aufnahmen, dass ein zwangsbelüftetes Kartoffellager über der Raumhöhe ein besser ausgeglichenes Temperaturprofil aufweist als ein Lager, das mit freier Konvektion belüftet wird. Im FKL-Lager ist ein Temperaturanstieg zwischen den einzelnen Kisten von unten nach oben erkennbar. Der Unterschied zwischen den beiden Belüftungsvarianten konnte gut sichtbar gemacht werden (**Bild 6.28**).

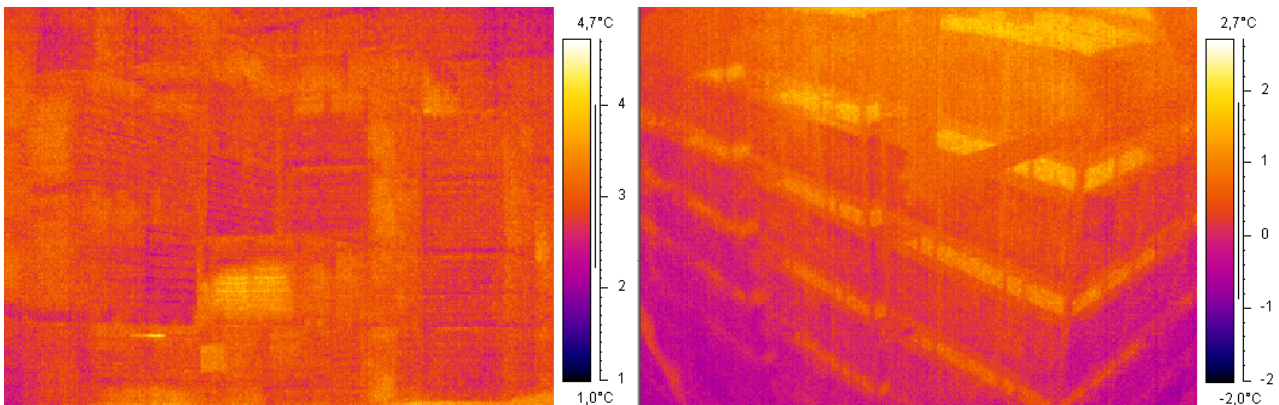


Bild 6.28: Temperaturverteilung im Kartoffellager:
Links: zwangsbelüftetes Lager Eimcke Rechts: FKL-Lager Weidensdorf

Obwohl in beiden Kartoffellagern annähernd die gleiche Lagertemperatur von ca. 5 °C herrschte, wurden mit der mobilen ThermaCam PM 545 höhere Temperaturen als mit der stationären ThermaCam SC 500 gemessen.

Ein Beispiel der Belüftungsversuche zeigt Bild 6.29.: die im Lager links und rechtsgelegenen hinteren Klappen wurden (vgl. **Bild 5.8**) für 5 Minuten geöffnet und anschließend die Lüfter für etwa 10 Minuten angestellt.

Mit der IR-Kamera konnten Belüftungsvorgänge anhand veränderter Oberflächentemperaturen im zwangsbelüfteten Lager erfasst werden: nach Öffnen der Klappen fielen die Temperaturen im Lager (Messpunkt in etwa 3 m Höhe) um 2 K ab. Das Einschalten der Lüfter führte anschließend zu einer Durchmischung der Luft und einem deutlichen, schnellen Temperaturanstieg um 2,5 K mit anschließendem schwächeren Temperaturabfall.

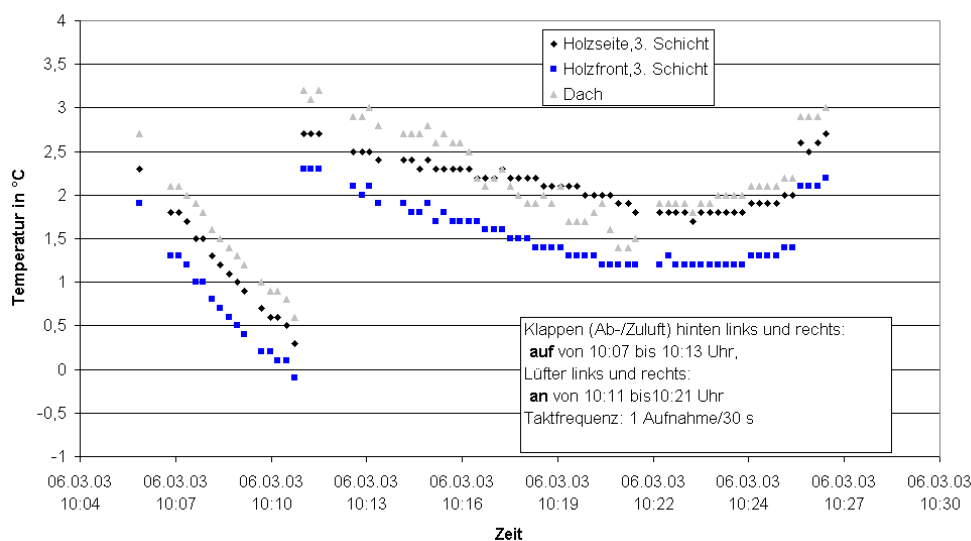


Bild 6.29: Belüftungsversuch im zwangsbelüfteten Kartoffellager.

6.5 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Wie die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, ist die Thermographiemesstechnik zur Temperatur-/Klimaerfassung im Kartoffellager eine vielversprechende Technologie. Allerdings erfordert die Auswertung der IR-Bilder viel Erfahrung und entsprechenden Aufwand. Eine Korrektur der thermographisch ermittelten Temperaturwerte ist für eine korrekte quantitative Temperaturerfassung unerlässlich. Soll die IR-Messtechnik zur Klimaregelung von Kartoffellagern eingesetzt werden, müssen einige wesentliche Aspekte beachtet werden.

Ein Infrarot-Bild liefert sehr viel Informationen. Je nach Objektiv und Einstellung der Kamera können – wie bei jeder normalen Kamera - Einzelheiten im Lager oder der ganze Raum dargestellt werden. Bildfolgen mit unterschiedlichem Zeittakt stellen Temperaturveränderungen wie z. B. Erwärmen oder Kühlen an den Oberflächen dar (vgl. **Bild 6.9** bis **6.12**). So können auf einem Bildausschnitt die Oberflächentemperaturen mehrerer Objekte in unterschiedlichen Höhe erfasst werden. Zur Bestimmung der Lufttemperaturen ist der Einsatz zusätzlicher Papiermarker, die aufgrund ihrer geringen Wärmekapazität schnell Temperaturänderungen annehmen, an geeigneten Orten möglich und empfehlenswert.

Mit einer entsprechenden „Session“ können auf dem Bild die für die Temperaturerfassung interessanten Bereiche gewählt werden. Dabei berücksichtigt die dazu gehörende Software auch die Entfernung des Objekts von der Kamera und das Abstrahlverhalten des zu betrachtenden Materials (Emissionsgrad).

Die Korrektur der thermographisch ermittelten Werte durch die Auswertesoftware „ThermaCam 2001“ war allerdings unter den gegebenen Messbedingungen noch nicht ausreichend genau. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Weit-

winkelobjekte sowie unterschiedliche Kameratypen verschiedene Oberflächentemperaturen anzeigten, die nicht den realen bzw. den konventionell gemessenen Temperaturwerten entsprachen. Unter den Bedingungen im Kartoffellager – ca. 5 °C Temperatur und hohe Luftfeuchte - lagen die thermographisch ermittelten Oberflächentemperaturen immer unter den konventionell ermittelten Werten.

Mit Hilfe einer Referenzplatte, an der die Oberflächentemperatur thermographisch sowie konventionell gemessen wurde, lassen sich die von der Kamera ermittelten Temperaturen korrigieren. Mit Hilfe dieser Korrekturmaßnahme kann auch die temperaturabhängige Messung der Thermographiekamera ausgeglichen werden: bei tiefen Temperaturen zeigte die IR-Kamera nämlich niedrigere Werte als der konventionelle Fühler an gleicher Messstelle an als bei höheren Temperaturen (vgl. **Bild 6.1**). Dieser Effekt führt dazu, dass auf einem Infrarotbild visuell mit dem Auge größere Temperaturdifferenzen zu erkennen sind als tatsächlich vorhanden.

Um die IR-Kamera zur genauen Temperaturerfassung verwenden zu können bzw. um die von der Kamera angegebenen Werte auf die realen Werte zu korrigieren, wurden die über einen längeren Zeitraum an der Referenzplatte thermographisch erfassten Temperaturen den konventionell gemessenen gegenübergestellt und anschließend eine Korrelationsanpassung mittels der Gaußschen Fehlerquadrat-Methode durchgeführt. Eine lineare Beziehung der Regressionsgrade ergab dabei eine gute Korrekturmöglichkeit (vgl. **Bild 6.1**). Eine entsprechende Regressionsgleichung wurde für die Thermo-Cam SC 500 in der Klimakammer (mit 24° Weitwinkelobjektiv) (**Bild 6.2**) und am stationären Messplatz im Kartoffellager Weidensdorf (mit 45° Weitwinkelobjektiv) für zwei Lagerperioden ermittelt (vgl. **Bild 6.3** und **7.2**).

Alle übrigen Daten der Session wurden anschließend mit der entsprechenden Regressionsgleichung korrigiert. Unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren zeigten die Untersuchungsergebnisse insgesamt eine gute quantitative Übereinstimmung der Temperaturverläufe bei konventioneller Messtechnik und Thermographie, wenn die Temperaturen direkt an der Oberfläche des Messgegenstandes gemessen wurden. Insgesamt wurde bei den korrigierten IR-Temperaturen eine Messgenauigkeit von etwa $\pm 0,5$ K erzielt (vgl. Anhang).

Wie die Untersuchungen weiterhin gezeigt haben, bedarf es einer genauen Kontrolle der IR-Bilder, wenn die IR-Kamera als Klimaregler bzw. zur Temperaturerfassung eingesetzt werden soll.

Die IR-Kamera misst von ihrem einige Meter vom Messobjekt entfernten Standort berührungslos die Oberflächentemperaturen des Kartoffelstapels, d.h. der mit Kartoffeln befüllten Holzkisten. Anstelle von vielen einzelnen konventionellen Fühlern in den Holzkisten können gleichzeitig mehrere Temperaturbereiche auf einem Bild erfasst werden, wenn die entsprechende Session aufgestellt wurde. Die Session und der Kamera-Ausschnitt sind allerdings nicht fest verknüpft, so dass die Gefahr einer fehlerhaften Temperaturermittlung besteht. So können ein Absenken der Kamera (**Bild 6.5**) bzw.

das Hinzufügen von weiteren Kartoffelkisten in den Bildausschnitt (vgl. **Bild 6.6**), was in einem Kartoffellager bei normaler Lagertätigkeit die Regel ist, zu fehlerhaften Messungen führen, wenn beispielsweise eine Session-Linie, die die Kartoffeloberflächentemperatur bestimmen soll, in den Bereich einer Holzkastenoberfläche rutscht. Es konnte nämlich festgestellt werden, dass sich die Oberflächentemperaturen von Kartoffeln und Holzkisten deutlich unterscheiden. Verdecken der Kartoffelkisten durch Planen (**Bild 6.7**) verhindert jegliche Messungen mit der Kamera, die mit konventionellen Fühlern ohne weiteres durchgeführt werden können.

Es zeigt sich also, dass für den Einsatz der Thermographiemesstechnik bei der Klimaregelung im Kartoffellager einige Disziplin, Sorgfalt und Kontrolle erforderlich ist. Es gibt aber Möglichkeiten, Fehlerquellen von vornherein auszuschalten: so kann eine definierte Wärmequelle an einem definierten Platz in der Session Hinweise darauf geben, wenn es wegen einer Bildausschnittverschiebung zu einer Veränderung der Temperatur innerhalb eines definierten (markierten) Bereichs gekommen ist.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass die interessanten Bereiche möglichst große Messflächen aufweisen.

Bei den bisherigen Messungen wurde im Kartoffellager ein Bildausschnitt von zwei Kistenreihen mit jeweils etwa fünf Kisten ausgewählt. Dabei ist festzustellen (vgl. **Bild 6.4** bzw. **Bild 6.30**), dass die Kamera von ihrem Messort zwar viele Flächen zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen der Holzkisten erfasste, dass aber zur Ermittlung der Kartoffeltemperaturen nur begrenzte Messflächen (Linien) zur Verfügung standen.

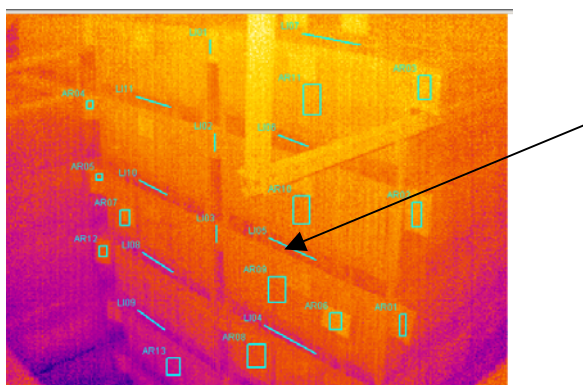


Bild 6.30: IR-Aufnahme des stationären Messplatzes im Kartoffellager Weidensdorf mit der definierten Session; die Oberflächentemperatur der Kartoffeln (siehe Pfeil) kann nur in relativ kleinen Bereichen gemessen werden

Die Messungen haben weiterhin ergeben, dass die auf den Holzoberflächen gemessenen Temperaturen weitgehend die Temperatur der Umgebungsluft wiedergeben. Bei starken tagesbedingten Klimaschwankungen führt dies zu einer starken Temperaturschwankung, die nicht unbedingt auf die Kartoffeltemperaturen im Inneren schließen lässt (vgl. **Bild 6.16**).

Insgesamt ergaben die Untersuchungen, dass mit der IR-Kamera in Bildfolgen gezielte und klimatisch bedingte Temperaturveränderungen nachweisbar sind. Je nach Taktfrequenz konnten Veränderungen der Umgebungsluft und der Kartoffeltemperaturen nachgewiesen werden. Langzeitmessungen mit einer Taktfrequenz von 1 Aufnahme/Stunde ergaben, dass IR-gemessene Oberflächentemperaturen von Kartoffeln sehr gut, wenn auch etwas zeitverzögert und z.T. von der Umgebungsluft beeinflusst, die Kartoffeltemperaturen im Inneren des Stapels wiedergeben. An gleicher Stelle gemessen war der konventionell und thermographisch erfasste Temperaturverlauf annähernd entsprechend (vgl. **Bild 6.14** und **Bild 6.15**).

Kurzzeitige Bildfolgen (ca. 1 Aufnahme/Minute) demonstrierten genau den Temperaturverlauf der Umgebungsluft in der Halle. Insbesondere an den Holzfronten waren die Temperaturänderungen gut abzulesen. So konnte gezeigt werden, wie die Kartoffeln im Lager Eigenwärme produzieren und damit die Umgebungslufttemperatur ansteigt (vgl. **Bild 6.20**), auch wenn Frosttemperaturen außerhalb des Lagers vorliegen. Die IR-Oberflächentemperaturen von Kartoffeln zeigten entsprechend den gemessenen Temperaturen im Kisteninneren im untersuchten Zeitraum wenig Änderung.

Durch den Einsatz einer Thermographiekamera konnte der Einfluss der Klappenstellungen auf die Belüftungseffektivität im Kartoffellager gut demonstriert werden: Ausschließliches Öffnen der Dachklappen führte nur zu einer geringfügigen Temperaturabsenkung im Lager (vgl. **Bild 6.18**). Auch der in der Literatur beschriebene und damit verbundene „Kellereffekt“ konnte anhand der bisherigen Messungen nicht in der Art und Weise nachgewiesen werden, dass kalte Luft durch die Dachklappen ins Lager „hineinfällt“. Es wurde zwar visuell beobachtet, wie Nebel im Lager zu Boden sank, wenn die Dachklappen geöffnet wurden. Diesen Eindruck von einfallender kalter Luft kann jedoch u. U. gewonnen werden, wenn die Wasser gesättigte Luft im oberen Hallenbereich beim Aufeinandertreffen mit der kälteren Luft abkühlt, das Wasser in der Luft kondensiert und anschließend zu Boden fällt (Anmerkung: ein entsprechender Filmausschnitt ist vorhanden).

Nach den bisherigen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass ein mit 15 kt Kartoffeln gefülltes Lagerhaus eine sehr hohe Wärmekapazität besitzt, so dass einfallende kalte Luft sofort von der aufsteigenden warmen Luft erwärmt wird und nur mit einer geringeren Temperaturdifferenz einströmt. Das Lager wird also nur ganz langsam abgekühlt.

Eine deutliche Temperaturabsenkung der Hallenumgebungsluft konnte nur dann nachgewiesen werden, wenn die Klappen sowohl im Boden- als auch Dachbereich geöffnet wurden (**Bild 6.19**). Interessant war auch die Beobachtung, dass bei ausschließlich geöffneten Bodenklappen warme Luft verstärkt zur Lagerdecke getrieben wird (**Bild 6.21**). Diese Beobachtung könnte unter Umständen für ein gezieltes Belüftungsregime genutzt werden: z.B. könnte damit die warme Luft oben gesammelt und anschließend durch gleichzeitiges Öffnen der Boden- und Dachklappen herausgedrückt werden. (Anmerkung: dieses Ergebnis wurde erst in der letzten Versuchsphase während der Lagersai-

son 2004/2005 erzielt und konnte bei den folgenden Versuchen zur Optimierung der Klimaregelung noch nicht berücksichtigt werden.)

Neben den Messungen mit der Thermographiekamera wurden im Kartoffelstapel konventionelle Fühler räumlich verteilt und auch an einigen Stellen die Umgebungsluft konventionell gemessen. Beim Vergleich dieser Werte mit den Thermographiemesswerten zeigt sich, dass mit der IR-Kamera nur eine Seite des Raumes erfasst wird, die aber keinen oder nur wenig Hinweise darauf gibt, was an der gegenüberliegenden Seite (z. B. bei geöffneten Klappen) passiert. Dies bedeutet, dass mit der Thermographiekamera von einem eventuell ungünstigen Platz aus nur sehr bedingt eine Klimaregelung vorgenommen werden kann. Wie die Untersuchungen ergeben haben, ist speziell die Überwachung der in Nähe der Bodenklappen gelegenen Kartoffeln von Bedeutung (vgl. **Bild 6.14**).

Des Weiteren ergaben die Untersuchungen, dass die Umgebungsluft in der Halle einen sehr großen Einfluss auf die im Inneren des Kartoffelstapels gemessenen Temperaturen besitzt. Bei gezielter Kühlung nahmen mit sinkender Oberflächentemperatur die Temperaturen im Inneren des Stapels ab, wenn auch zeitlich verzögert (vgl. **Bild 6.12**). Stark wechselnde, jahreszeitlich bedingte Veränderungen der Umgebungslufttemperatur führten zu einem Anstieg der Temperatur im Stapel (**Bild 6.16**). Insbesondere hohe Temperaturen unter dem Dach führten zu einem Temperaturanstieg im Stapel und damit zu verstärkter Keimung und stärkerem Schwund. Im Kartoffelstapel an sich wurden über der Fläche weitgehend gleichmäßige Temperaturen erfasst, wobei sich eine Temperaturdifferenz zwischen den unteren und oberen Kisten aufbaute - entsprechend dem konvektiven Belüftungsprinzip -, die sich am Ende der Lagerperiode noch erhöhte (vgl. **Bild 2.2**). Ein Luftaustausch ohne Auswirkungen auf die Temperaturverhältnisse der Kartoffeln im Lager, wie von LEPPACK 2000 beschrieben (vgl. Kap. 2.), konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Weitere Auswertungen der FRIWEIKA-eigenen Klimaführung ergaben, dass die Lüftung des Lagers bisher überwiegend mit den oberen Dachklappen durchgeführt wurde (**Bild 6.31**) und nur selten mit den Bodenklappen (**Bild 6.32**). Dies hing vermutlich aber auch weitgehend von den herrschenden Außenbedingungen ab.

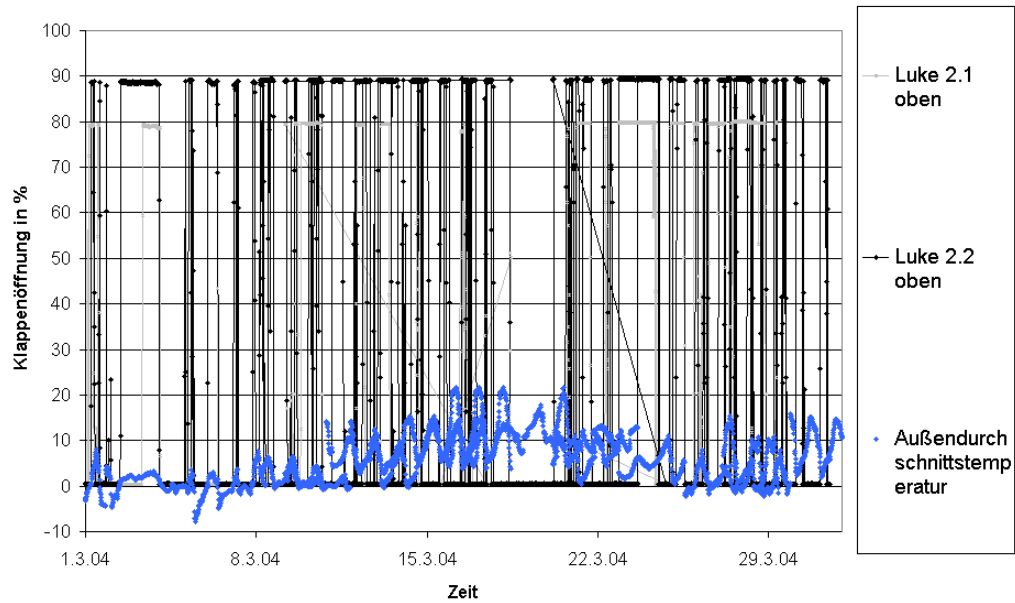


Bild 6.31: Dachklappenöffnungszeiten und Außentemperatur im März 2004

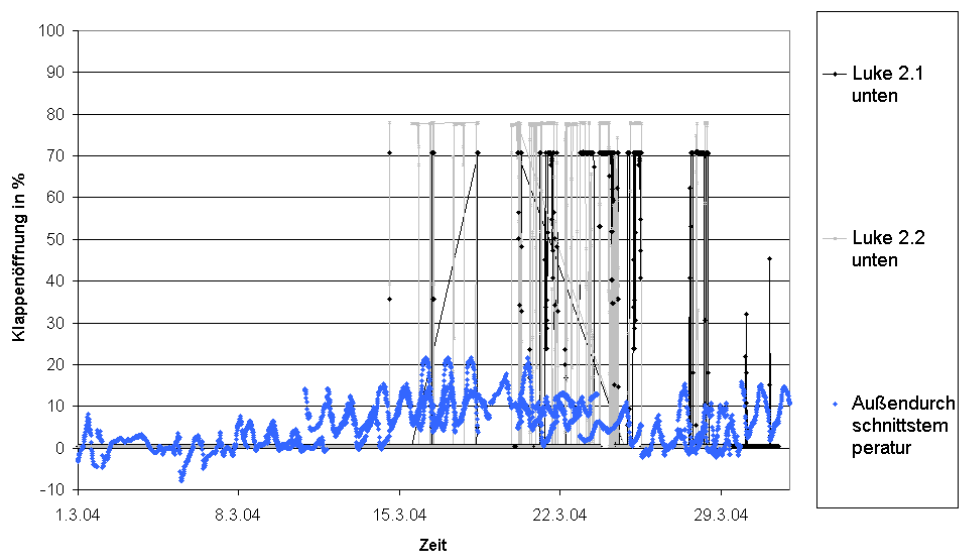


Bild 6.32: Bodenklappenöffnungszeiten und Außentemperatur im März 2004

Aus der Summe der Ergebnisse und mit Hilfe der Aufzeichnungen der IR-Aufnahmen ist es nun möglich, die bestehende Klimaführung im Lager zu verbessern.

Folgende Punkte sollten für eine verbesserte Klimaführung berücksichtigt werden:

- Da die Wärmekapazität des Lagers sehr groß ist, kann der bisherige Frostschutz für die oberen Dachklappen von -1 °C bis 3 °C weiter herabgesetzt werden
- Zur besseren Luftabfuhr der wärmeren Luft in den oberen Bereiche sollten öfter die unteren Klappen geöffnet werden, wobei eine Unterkühlung der an den Bodenklappen gelegenen Kartoffeln zu vermeiden ist
- Da die Oberflächentemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Kartoffeltemperatur hat, kann die Regelung bereits an der Oberfläche des Kistenstapels ausgerichtet werden (konventionell oder thermographisch). (Aber Achtung, Oberflächentemperaturen der Kartoffeln, nicht der Kistenfronten messen!)
- Die Lufttemperaturen in der Halle bzw. die thermographisch gemessenen Oberflächentemperaturen der Kartoffeln sollten dabei immer niedriger sein als die Kartoffeltemperaturen im Kisteninneren
- Bei der Regelung der Kartoffeltemperatur sollten die Temperaturen in Nähe der Bodenklappen (niedrigste Temperaturen) und der Dachklappen (höchste Temperaturen) mitberücksichtigt werden. Diese Forderung für eine optimierte Klimasteuerung wird auch von JAYAS et al. 2001 und MALTRY 1998 erhoben
- Es wurde eine große Anzahl an Temperaturdaten der Kartoffellagerhalle im dreidimensionalen Bereich gewonnen, die es ermöglichen, Klimaveränderungen im dreidimensionalen Modell zu berechnen und daraus weitere Schlüsse für eine optimierte Klimasteuerung zu ziehen (vgl. Kap 7.1)

7 Einsatz der Thermographie zur Optimierung der Klimasteuerung im Kartoffellager

7.1 Auswertung der Arbeitsweise der betriebsinternen Klimasteuerung

Um die thermographisch gewonnenen Temperaturdaten effektiv zur Optimierung der Klimasteuerung einsetzen zu können, wurde im Folgenden auch die Arbeitsweise und Effektivität der bisherigen Klimasteuerung analysiert: Wie eigene Messungen ergaben, lässt die betriebsinterne Klimasteuerung grundsätzlich nur Belüftungen in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 5 °C Außentemperatur zu - trotz angegebener Einstellungsmöglichkeiten der Frostgrenze bis zu -1 °C . Als Sollwert der Regeltemperatur wurde bislang üblicherweise die Durchschnittstemperatur der eingesetzten Fühler verwendet, wobei die fünf Fühler gleichmäßig über die sieben Schichten verteilt werden. (vgl. auch Kap. 5.3.2.).

Die Erfassung der Klimadaten im konvektiv belüfteten Kartoffellager über drei Lagerperioden hinweg ergab, dass der Einfluss der Außentemperaturen auf den Erhalt einer konstanten Lagertemperatur sehr viel größer war als der der Kartoffeln, die durch Atmung und Produktion von Eigenwärme ebenfalls einen Temperaturanstieg im Lager verursachen können. Insbesondere an warmen Frühjahrstagen stiegen die Lufttemperaturen unter dem Dach an, wobei mit einigen Tagen Verzögerung auch ein Anstieg der

Kartoffeltemperaturen – speziell in den oberen Schichten – folgte. Ein Gegensteuern durch Belüften mit den Bodenklappen führte im Bereich der unteren Kartoffelschichten teilweise zu Lagertemperaturen von 0°C. Insgesamt ergaben sich beträchtliche Temperaturschwankungen innerhalb der oberen und unteren Kartoffelschichten, die im wesentlichen von den Außentemperaturen verursacht wurden und die sich negativ auf die Qualität der Kartoffeln auswirkten (Frühzeitiges Auskeimen in den oberen Schichten, Frostschäden in den Kisten in Nähe der Bodenklappen). (**Bild 7.1**).

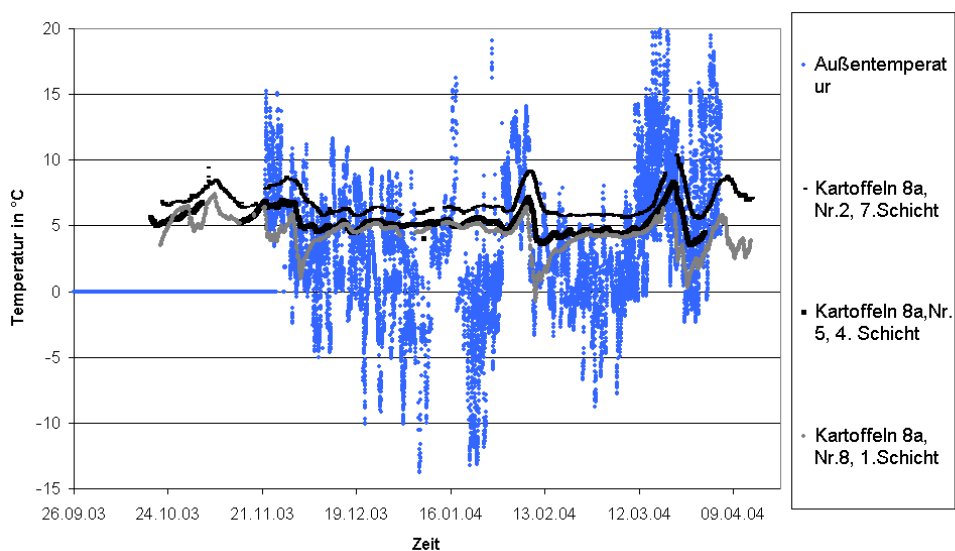


Bild 7.1: Klima und Kartoffeltemperaturverlauf 2003/2004

7.2 Maßnahmen zur Optimierung der Klimasteuerung mit Hilfe der Thermographie

Zum Zwecke der Optimierung der Klimasteuerung wurde das thermographische Messverfahren während der 3. und 4. Lagerperiode mit der internen Klimasteuerung des Lagerhauses gekoppelt. Dazu mussten einige vorbereitende Maßnahmen getroffen werden.

1. Zunächst musste eine „Live bzw. Ist-Zeit-Erfassung“ und Auswertung des IR-Bildes realisiert werden. Für eine Klimasteuerung mittels thermographisch bestimmter Messdaten muss das „live“ gemessene IR-Bild sofort ausgewertet und die gemessenen Temperaturdaten dem Klimasteuerungsalgorithmus zur Verrechnung zugewiesen werden.

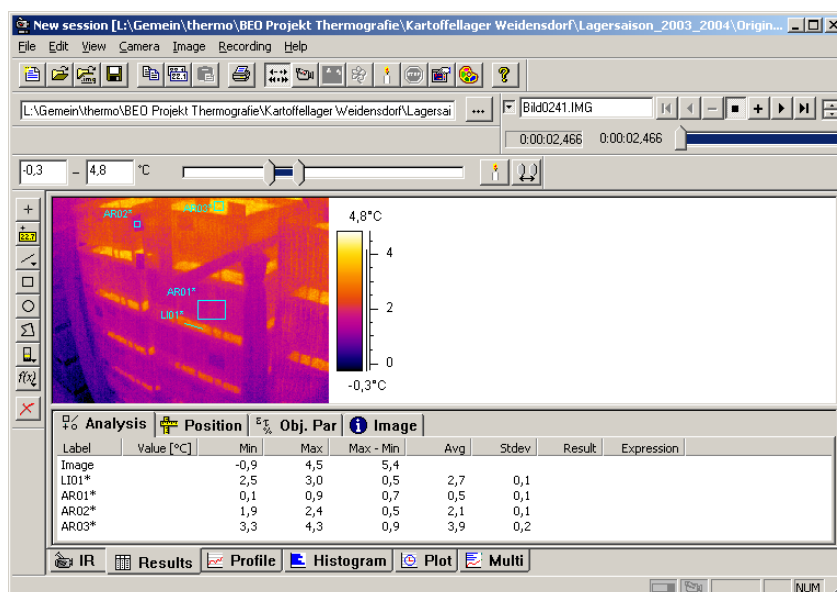


Bild 7.2: Die kameraeigene Software ThermoCam® gibt zu jedem Messzeitpunkt die Emissionsgrad-vorkorrigierten Temperaturfelder in Tabellenform an

Die kameraeigene Software ThermoCam® bietet die direkte Auswertung der Messwerte für jeweils ein Bild bzw. einen Zeitpunkt. In der entsprechenden Session werden die ausgewählten Temperaturfelder gemäß ihres Emissionsgrades vorkorrigiert und als Temperaturwerte in Form eines Tabellenblatts parallel zum IR-Bild pro Messung angezeigt (**Bild 7.2**).

Am ATB wurde eine Software entwickelt, die diese Tabelle des vorausgewerteten IR-Bildes photographisch erfasst und die Messwerte der aufgenommenen IR-Bilder nacheinander in einem Temperatur/Zeitdiagramm speichert (**Bild 7.3**). Danach werden die IR-Temperaturwerte mit Hilfe einer Regressionsgerade korrigiert und können als Messwert (Istwert) dem Steuerungsalgorithmus zugeführt werden.

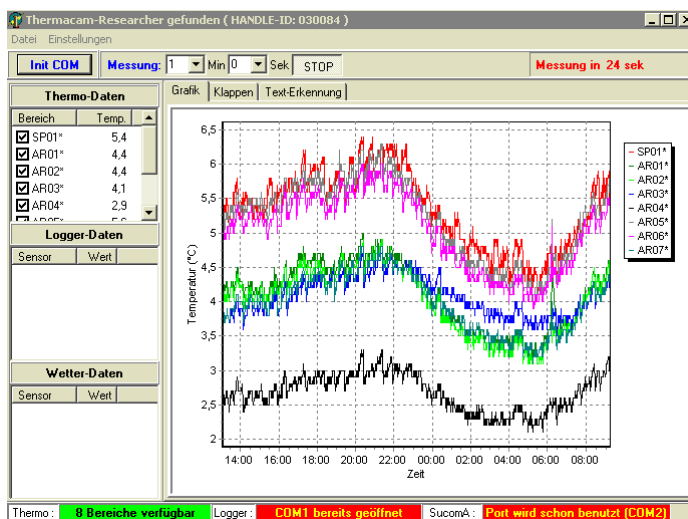


Bild 7.3: Die Software erfasst photographisch die Temperaturdaten pro IR-Bild bzw. IR-Session und setzt sie in ein Temperaturzeitdiagramm um

2. Für die Gewährleistung der Genauigkeit der Regressionsgeraden über einem möglichst großen Temperaturbereich wurden Temperaturdaten der Lagerperioden 2003/2004 und 2004/2005 an den Referenzplatten konventionell und thermographisch erfasst und ausgewertet. Die aus 2003/2004 resultierende, von beiden Referenzplatten ermittelte Durchschnittsregressionsgerade wurde für die direkte Auswertung bzw. Korrektur der IR-Daten der Lagersaison 2004/2005 verwendet (**Bild 7.4**). Die aus 2004/2005 resultierende Regressionsgerade differierte nur leicht im Vergleich zu der des Vorjahres. Wie **Bild. 7.5** zeigt, ergaben sich kaum Temperaturabweichungen, wenn die thermographisch erfassten Daten mit den beiden Regressionsgeraden korrigiert werden. Nach der Korrektur der IR-Daten mit der 2004/2005 ermittelten Regressionsgerade verringerte sich die Differenz zwischen konventionellen und thermographischen Messwerten von einem durchschnittlichen Mittelwert von $3,50 \text{ K} \pm 0,74 \text{ K}$ auf eine durchschnittliche Differenz von $0 \text{ K} \pm 0,28 \text{ K}$. Die Korrektur der thermographisch ermittelten Messwerte mit der Regressionsgleichung von 2003/2004 ergab gegenüber der Regressionsgleichung von 2004/2005 einen durchschnittlichen Abweichungsfehler von $0,16 \text{ K} \pm 0,34 \text{ K}$. Tendenziell kann nach Korrektur der thermographischen Messwerte von einem Messfehler von $\pm 0,5 \text{ K}$ ausgegangen werden. (vgl. Anhang).

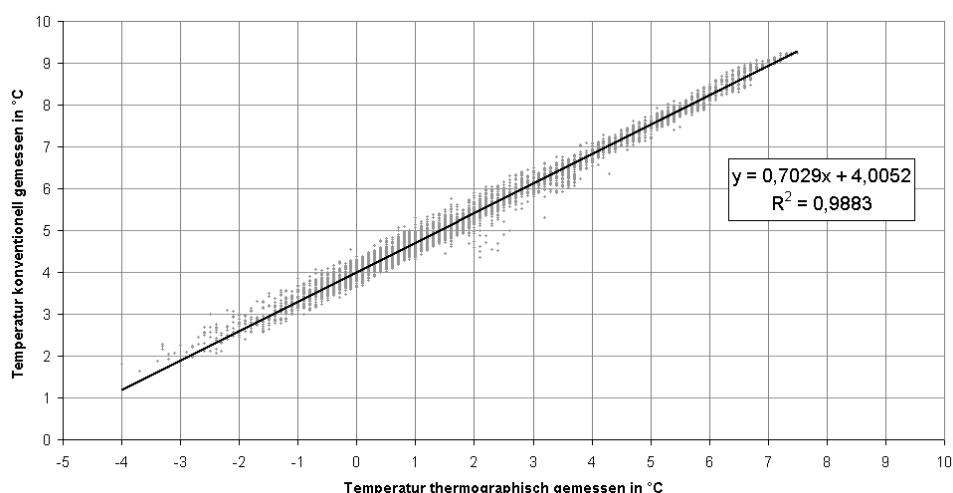


Bild 7.4: Regressionsgerade zur Lagersaison 2003/2004

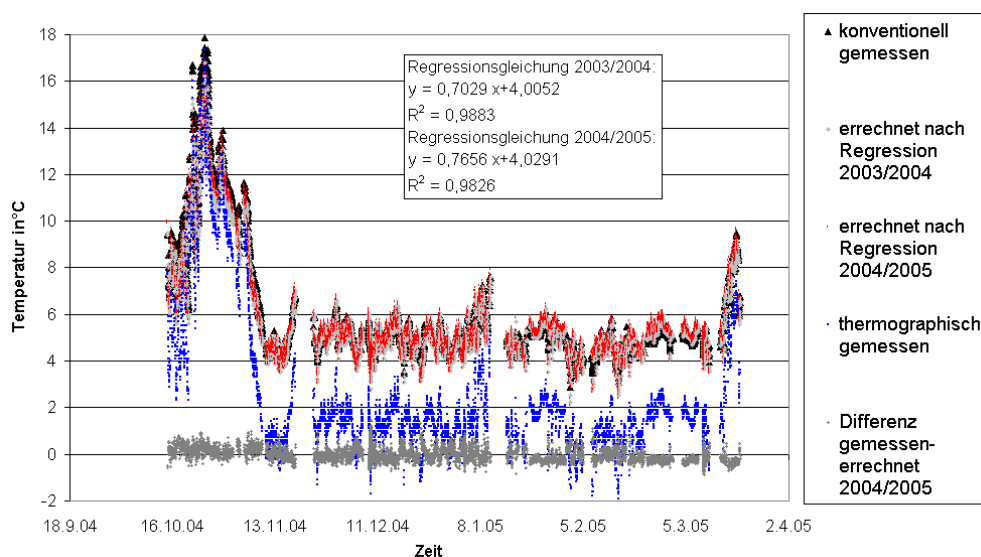


Bild 7.5: Vergleich des an den Referenzplatten konventionell und thermographisch gemessenen Temperaturverlaufs während der Lagersaison 2004/2005.

Die thermographisch erfassten Werte wurden durch die Regressionsgeraden von 2003/2004 und 2004/2005 korrigiert

3. Software zur Ansteuerung der Klappen

In Anlehnung an die betriebseigene Klimasteuerungssoftware „Citec“ wurde am Institut eine Software realisiert, die es erlaubte, unter Umgehung der betriebseigenen Klimasteuerung, die Belüftungs-Klappen direkt vom Institut anzusteuern. Auf diese Weise war es möglich, die Klappen in der Kartoffelhalle Weidensdorf über einen ATB-Computer zu öffnen bzw. schließen.

4. Verknüpfung der Datensätze zur IR-Klimasteuerung

Eine am Institut entwickelte Software nahm die Verknüpfung aller verfügbaren Datensätze, d.h. der eigenen thermographischen Messwerte sowie der von FRIWEIKA ermittelten Klimadaten vor (**Bild 7.6**). Damit wurde grundsätzlich die

Möglichkeit geschaffen, die Klimasteuerung über thermographisch ermittelte Daten zu vorzunehmen.

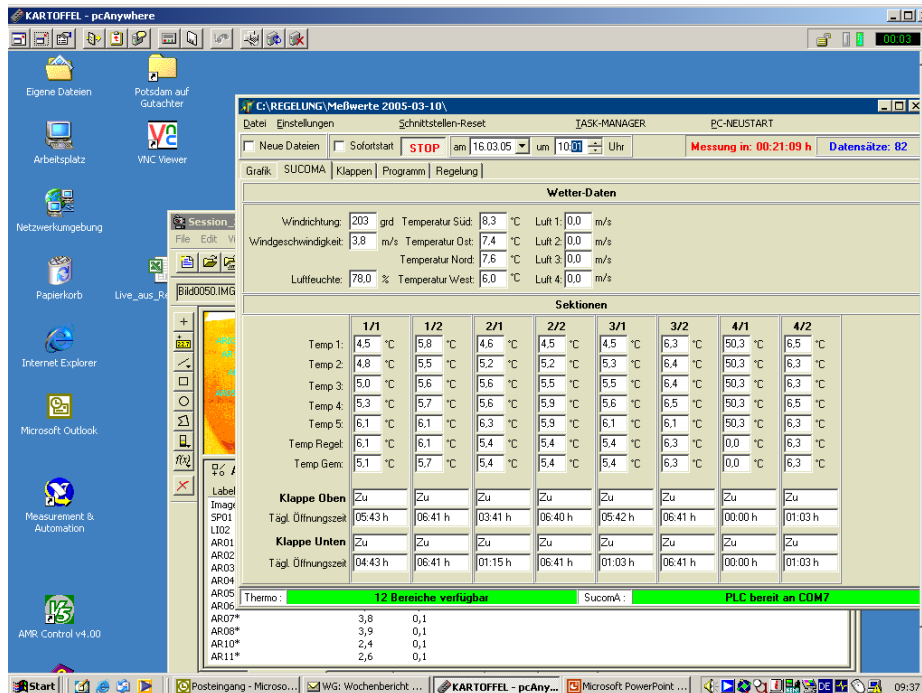


Bild 7.6: Menü der Steuerungssoftware: Wetterdaten, Temperaturen in den Kartoffelkisten der Lagersektionen, Thermographiedaten sowie Informationen über die Belüftungsklappen (Lüftungszustand, -zeit) werden gleichzeitig erfasst

5. Veränderte Kameraeinstellung

Eine veränderte Kameraeinstellung wurde für die Lagersaison 2004/2005 vorgenommen: die IR-Kamera hatte nun einen senkrechten Blickwinkel auf die Stapel (**Bild 7.7**). Dies führte zu einer reduzierten Kistenoberfläche im Bildausschnitt im Vergleich zum bisherigen Blickwinkel mit großer Stapeloberfläche (vgl. **Bild 6.30**).

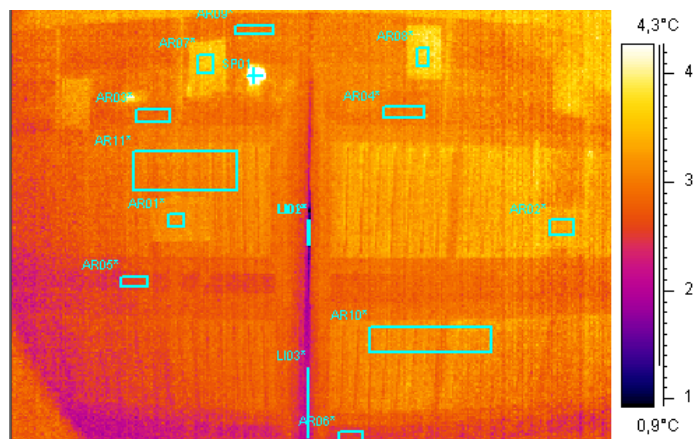


Bild 7.7: Blickwinkel der Thermographie-Kamera 2004/2005 mit neuer Session zur Temperatureauswertung

Der neue Blickwinkel ermöglichte aber andererseits neben der Erfassung der Oberflächentemperaturen im obersten Stapel (höchste Temperaturen) auch die Erfassung der Bodentemperatur in der Nähe der unteren Bodenklappen. Zum Vergleich wurden die Temperaturen der Kartoffeln (Kartoffeln 8. Reihe 1. Schicht) in Nähe der Bodenklappen konventionell erfasst. Es bestand eine gute Übereinstimmung der Temperaturwerte (vgl. **Bild 7.8**).

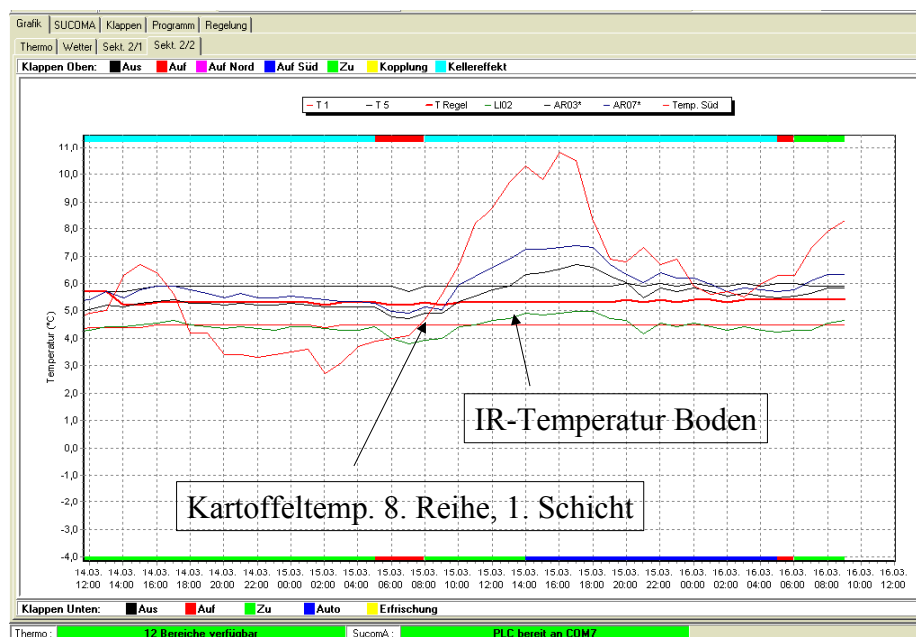


Bild 7.8: Menü der Regelungssoftware: Temperaturverlauf der konventionell (T) und thermographisch (L, AR) erfassten Daten. Oben und unten im Diagramm kann die Position der Boden- und Dachklappen eingesehen werden

6. Einfacher Algorithmus zur Klimasteuerung

Ein einfacher Algorithmus zur Klimasteuerung wurde erarbeitet; dieser konnte je doch nicht mehr langzeit-erprobt werden, da die Kartoffeln frühzeitig, d.h. Ende März 2005 aus dem Lager ausgelagert wurden.

Folgende Punkte wurden in diesem Algorithmus für eine verbesserte Klimaführung berücksichtigt:

- Bei der Regelung der Kartoffeltemperaturen müssen sowohl die Temperaturen in Nähe der Bodenklappen (niedrigste Temperatur) als auch im oberen Bereich 7. Schicht (höchste Temperaturen) berücksichtigt werden (keine Durchschnittstemperatur!). (Mit einem geeigneten Blickwinkel der IR-Kamera können die Umgebungstemperaturen an beiden Positionen erfasst werden)
- Die Regelung muss derart eingestellt sein, dass die an der Oberfläche gemessene IR-Temperatur immer etwas niedriger ist als die im Stapel gemessenen Kartoffeltemperaturen

- Warme Luftmassen im Bereich der Hallendecke sollten möglichst schnell entfernt werden
- Bei Frost durch Öffnen der Dachklappen: da die Wärmekapazität des Lagers sehr groß ist, kann der bisherige Frostschutz für die oberen Dachklappen (Kellereffekt) von 0 °C auf -3 °C (oder evtl. niedriger) herabgesetzt werden
- Bei frostfreiem Klima: durch gleichzeitiges Öffnen der Dach- und Bodenklappen
- Die aus thermographisch und konventionell gewonnenen Daten können weitere Hinweise zu Erstellung eines räumlichen Rechenmodells der Wärmeverteilung innerhalb des Stapels geben

7. Algorithmus zur Temperaturvorhersage im Inneren der Lagerkisten

Mittels einer Thermographiekamera können naturbedingt nur die ‚sichtbaren‘ Gebiete erfasst werden. Demzufolge sind nur Oberflächentemperaturen der der Kamera zugewandten Seiten messbar. Wesentlich sind bei der Temperaturregulation im Lager aber auch die Temperaturen im Inneren der Kisten. Ein thermodynamisches Modell der Wärmeübergänge und Wärmetransportvorgänge von der Oberfläche der Kisten in das Innere der Kisten (Füllgut) und umgekehrt, ermöglicht die Vorhersage der Temperaturverteilung im Füllgut (Kartoffelschüttung) in Abhängigkeit von den Außentemperaturen, entsprechend den thermographisch ermittelten Oberflächentemperaturen (GOTTSCHALK 2004). Nach Messung der Oberflächentemperaturen mittels der Thermographiekamera kann unter Anwendung des Modells annähernd die Temperaturverteilung in Schichten innerhalb der Kisten bzw. des Kistenstapels errechnet werden (**Bild 7.9**).

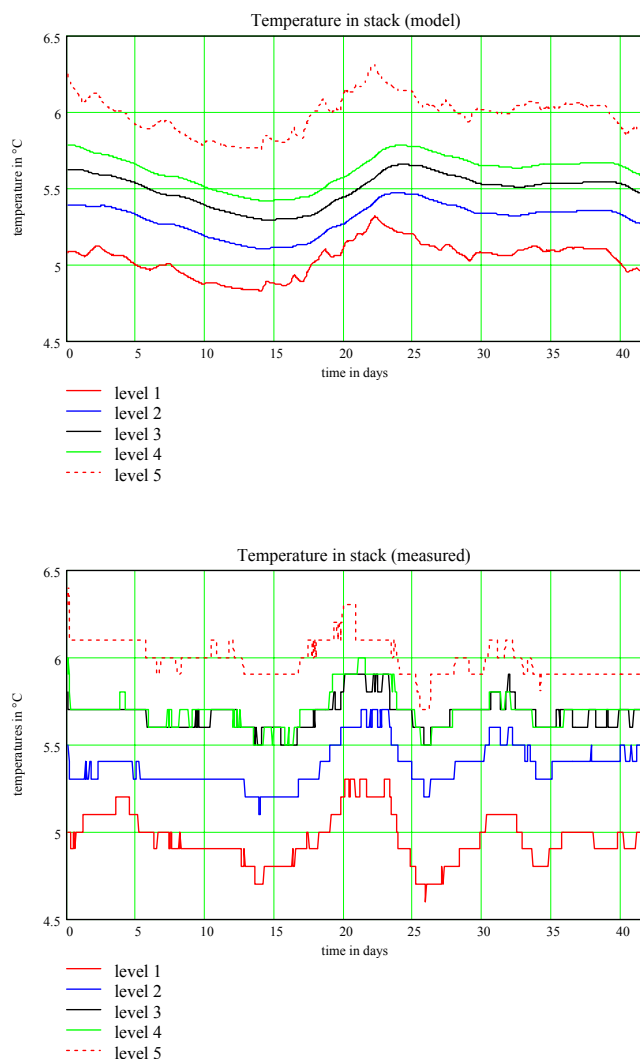


Bild 7.9: Temperaturverteilung in einzelnen Schichten innerhalb eines Kistenstapel errechnet nach Modell (oben) und gemessen (unten)

Dabei gehen die Temperaturen der für die Kamera sichtbaren Gebiete als Randbedingungen in die Modellrechnung ein. Es zeigt sich der Vorteil der Thermographie, berührungslos auch Temperaturen von entfernten Gebieten zu erfassen, die für die Modellrechnung benötigt werden (vgl. Punkt 5 dieses Abschnitts, sowie **Bilder 3.4, 6.26, 7.7**). Die Vorhersagewerte nach den Modellrechnungen dienen als zusätzliche Information für die Klimaregelung, mittels der der Luftzustand durch gezielte Klappensteuerung hergestellt werden kann, um die gewünschte Lagertemperatur im Inneren der Kiste zu erreichen. Der Luftzustand wird dabei von der Thermographie überwacht. Diese Vorgehensweise entspricht der Idee zu einem 3D-Modell für die Temperaturverteilung in der Kartoffelschüttung.

7.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Diese in den Algorithmus eingehenden Erfahrungen wurden in der Lagerperiode 2004/2005 bereits mit manueller Regelung und Überwachung mit der IR-Kamera/Regelungssoftware (noch ohne direktes Ansteuern der Klappen) verwertet:

- Die betriebseigene Klimaregelung wurde über den Temperaturfühler in der obersten Schicht geregelt
- Durch Überwachung der Lufttemperaturen in den oberen Schichten mit der IR-Kamera wurde durch frühzeitiges Öffnen der entsprechenden Klappen (siehe 7.2.) weitgehend vermieden, dass sich warme Luftmassen unter der Hallendecke sammelten
- Es wurde darauf geachtet, dass die IR-Temperaturen immer niedriger waren als die Kartoffeltemperaturen

Insgesamt konnten in der Lagerperiode 2004/2005 geringere Temperaturschwankungen der Kartoffeltemperaturen im Vergleich zu 2003/2004 erzielt werden (**Bild 7.10**).

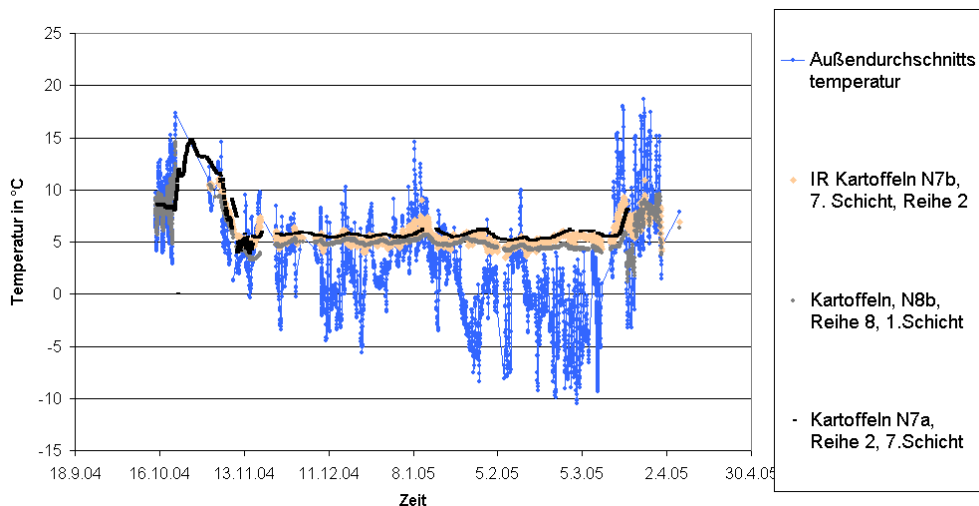


Bild 7.10: Außenklima und Kartoffeltemperaturverlauf, thermographisch und konventionell gemessen, während der Lagersaison 2004/2005

Dabei gilt es allerdings zu bedenken, dass dieser Umstand auch dadurch begründet ist, dass das Klima während der Lagerperiode 2004/2005 relativ ausgeglichen war.

Eine Senkung der Kartoffeltemperaturen in den oberen Schichten hätte am Ende der Lagerperiode eventuell noch verbessert werden können, wenn die betriebseigene Klimasteuerung ein Öffnen der Dachklappen bei Temperaturen unter 0°C zugelassen hätte.

Insgesamt haben die Untersuchungen ergeben, dass das thermographische Messverfahren (Messung der Oberflächentemperaturen) sehr viel schneller Temperaturänderungen der Umgebung erfasst, als konventionelle Messverfahren mit Einzelfühlern in den Kartoffeln. Es kann damit – bei geeigneten Klimavoraussetzungen – auch schneller die Belüftung aktivieren. Bisher noch übliche starke Temperaturschwankungen im Lager

sind auf diese Weise weitgehend vermeidbar. Allerdings ist zu bedenken, dass die Klimaregelung im frei konvektiv belüfteten Lager vom Außenklima abhängig ist. Die Messergebnisse haben zudem gezeigt, dass das Außenklima einen wesentlich größeren Einfluss auf die Kartoffeln hat als ihre eigene Wärmeentwicklung. Ungünstige klimatische Bedingungen, z.B. erhöhte Außentemperaturen im Frühjahr bei relativ warmen Nächten, können unter Umständen dazu führen, dass die überschüssige Wärme auch bei thermographisch optimierter Klimasteuerung nicht entfernt werden kann. Damit sind der thermographischen (schnelleren), aber auch der konventionellen (trägeren) Regelung Grenzen gesetzt.

Das Testen und Erweitern des erarbeiteten Algorithmus, der die Informationen der IR-Daten und einer Modellrechnung in der Steuerung automatisch einsetzt, muss während weiterer Lagerperioden durchgeführt werden.

Da die Klimatisierung eines konvektiv belüfteten Lager ausschließlich von den Außentemperaturen der Umgebung abhängig ist, sollte weiterhin überlegt werden, mit welchen Methoden die warme Luft unter dem Dach möglichst schnell entfernt werden kann. Beispielsweise wäre eine Verknüpfung der Thermographie mit Photovoltaikzellen auf dem Dach in der Weise denkbar, dass der bei hoher Sonneneinstrahlung gewonnene Strom umweltfreundlich einen Lüfter betreiben könnte, der die warme Luft unter dem Dach schnellstmöglich wieder entfernt, bevor es zu einer Erwärmung der Kartoffeln kommt. Ein mit Solarstrom betriebener Lüfter, der die umweltrelevanten Vorzüge eines FKL-Lagers unterstützen würde, könnte u. U. auch die Lagerbereiche (7. Schicht, in Nähe der Hallenwand bzw. Bodenklappen) besser belüften, die mit der aktuellen Belüftungstechnik noch nicht zufriedenstellend erreicht werden. Messungen haben ergeben, dass die Kartoffeltemperaturen in oberster Schicht in Nähe der Hallenwand zwar wie die übrigen in Abhängigkeit vom Außenklima verlaufen, dass sie insgesamt etwa um 1 K wärmer sind (vgl. Anhang).

8 Ökonomische und umweltrelevante Bewertung

Um die ökonomische und umweltrelevanten Vorzüge der freien konvektiven Lagerung herauszuarbeiten, wurde zum Vergleich die ökonomische und umweltrelevante Bewertung der konventionellen Lagerverfahren vorgenommen.

Die ökonomische Bewertung der konventionellen Vergleichsverfahren wurde in zwei Schritten vorgenommen. Im ersten Schritt wurde auf Daten aus der Literatur zurückgegriffen, in einem zweiten Schritt Kostenkalkulationen einer möglichen kommerziellen Belüftungsanlage für das untersuchte Kartoffellagerhaus in Weidensdorf analysiert (Fa. Grimme, Fa. Gaugele) (**Bild 8.1**).

Die Belüftungskosten je Tonne eingelagerter Kartoffeln variieren je nach Belüftungsbedarf durch den vermehrten Einsatz der Belüftungsanlage und der sich ändernden Ab-

schreibung. Je nach Witterungsverlauf wird mit einem Belüftungsbedarf zwischen 180 h und 895 h pro Jahr

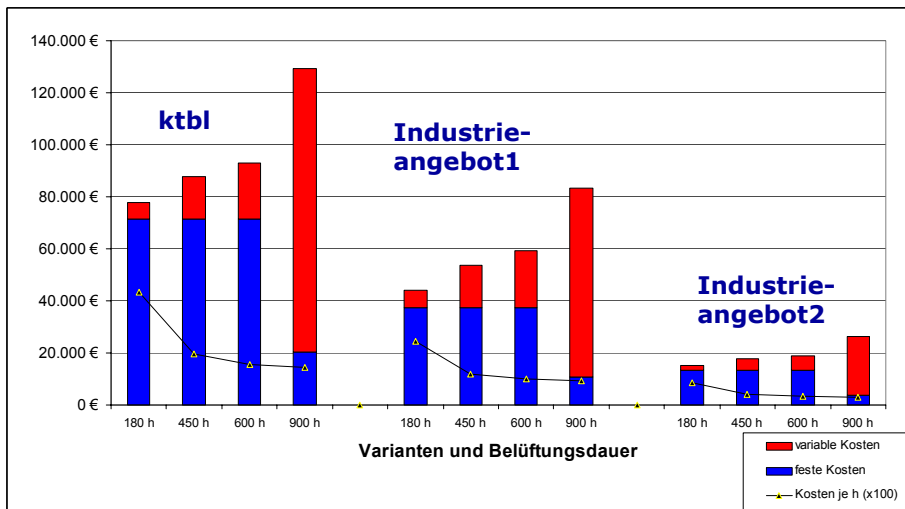


Bild 8.1: Belüftungskosten für ein konventionelles 15 kt Lagerhaus

gerechnet. Damit entstehen Belüftungskosten zwischen 5,20 € je Tonne und Jahr (Belüftungsbedarf 180h/Jahr) und 8,62 € (Belüftungsbedarf 900h/Jahr). Bei einem durchschnittlichen Belüftungsbedarf (450h/Jahr) ist mit Kosten von 5,84 € je Tonne zu rechnen.

Die umweltrelevante Bewertung konventioneller Lagerverfahren führte zu dem Ergebnis, dass eine Zwangsbelüftung das untersuchte Kistenlagers je nach klimatisch bedingtem Belüftungsbedarf u.a. mit klimarelevanten Emissionen zwischen 2000 bis 4500 kg CO₂-Äquivalenten je Jahr belasten würde (**Tabelle 8.1**).

Tabelle 8.1: Umweltrelevante Bewertung für ein konventionell betriebenes 15 kt Lagerhaus

Belüftungsbedarf in h/a	Primär-Energiebedarf in GJ	Treibhaus effekt in kg CO ₂ -Äq.	Versauerungspotenzial in kg SO ₂ -Äq.	Eutrophierungspotenzial in kg PO ₄ ³⁻ -Äq.	Photo-oxidantien in kg C ₂ =C ₂ -Äq.
180	28	1937	5,0	0,41	0,38
300	35	2374	5,7	0,46	0,40
600	52	3466	7,5	0,58	0,44
900	70	4558	9,2	0,70	0,48

Die Marktsituation thermographischer Kameras hat sich in den letzten Jahren folgendermaßen entwickelt.

Es wurden verstärkt neue Anwendungsfelder für Thermographiekameras erschlossen. Der bekannteste Bereich ist der Einsatz von Thermographie für die Kontrolle und Optimierung von Gebäudeisolierungen zur Vermeidung von Wärme- und Kälteverlusten. Aber auch in der Industrie wurde in den vergangenen Jahren die Thermographie gezielt u.a. für die Qualitätskontrolle und Prozessüberwachung eingesetzt. Auch im medizinischen Bereich (<http://www.thermotemp.de/to11.htm>, September 2004), der Elektrotechnik sowie in der Geländeüberwachung (Infrarot Sichtgeräte von Polizei und Grenzschutz) wird diese Technik eingesetzt. Die Erschließung neuer Anwendungsfelder hat dazu geführt, dass mittlerweile einige Anbieter wie FLIR, ebs oder InfraTec vielseitig einsetzbare Geräte und Systeme anbieten.

Einer der determinierenden Punkte für die Preisgestaltung ist die Stückzahl der Geräte. Hier ist vorzuschicken, dass die Nutzung der Thermographie für die Klimasteuerung von Kartoffellagern eine anspruchsvolle Technik in Form einer Hochleistungskamera voraussetzt. Als Mindestanforderungen sollte der Sensor auf der Basis des thermischen Infrarot einen Spektralbereich von etwa 8-12 μm abdecken. Es sollte sich um einen Sensor mit einer geometrischen Auflösung von mindestens 320 * 240 Pixel handeln. Die thermische Auflösung sollte mindestens 0,2 K erfassen und der Messbereich Temperaturen zwischen -10 ... 50°C liegen. Der Messfehler sollte dabei nicht größer als +/- 2 K sein. Um einen möglichst großen Bereich permanent durch die Temperaturkontrolle erfassen zu können, sollte ein Objektiv mit 45° Weitwinkel eingesetzt werden. Zusätzlich sind ein Computer für die Steuerung und entsprechende Datenübertragungsmöglichkeiten erforderlich. Die im Projekt stationär verwendete Versuchsausstattung kostete ca. 66.000 € (o.MWSt.) (**Tabelle 8.2**). Den größten Kostenfaktor stellt dabei die Kamera selbst mit ca. 70% der Gesamtkosten dar, inklusive Weitwinkelobjektiv werden sogar knapp 4/5 der Gesamtkosten erreicht (**Bild 8.2**). Dies bedeutet letztendlich, dass die Kosten für die Klimasteuerung unter Verwendung von Thermographie in erster Linie von den Kosten und der Kostenentwicklung der Thermographiekamera abhängen.

Tabelle 8.2: Kosten für die Versuchsausstattung der Thermographiekamera

Kosten:	Thermographiekamera	47.610	Euro
	Zusatzausstattung		
	Stativ mit Joystick-Kopf	235	Euro
	5" LCD Display mit Zubehör	1.320	Euro
	LCD-Halter für Fernsteuereinheit	150	Euro
	Fernbedienungseinheit	2.250	Euro
	Weitwinkelobjektiv 45° LWB	6.500	Euro
	Bildfeld (horizontal/vertikal): 45° × 34° Mindestabstand 0,3 m		
	Lichtfaser-Optische Datenübertragung	5.690	Euro
	Standcomputer	2.500	EURO
Gesamt	netto	66.255	EURO
	mit MWSt	76.856	EURO

Im anspruchsvollen Segment, zu dem die Klimasteuerung gehört, zeichnet sich eine großflächige Einführung verbunden mit einer entsprechenden Nachfrage nach Thermographiekameras derzeit nicht oder nur zögernd ab. Dies gilt auch für die kurz- und mittelfristige Perspektive. Interviews mit Anbietern von Thermographiekameras bestätigten, dass im Bereich der qualitativ hochwertigen Thermographiekameras auf absehbare Sicht nicht mit zurückgehenden Preisen zu rechnen sei. Inwieweit die fortschreitende Erschließung neuer Anwendungsfelder langfristig zu erheblich höheren Stückzahlen und damit zu rückgängigen Preisen führt, lässt sich heute noch nicht abschätzen.

Aufgrund des relativ hohen Investitionsbedarfs für die Infrarot-Kameras und die zusätzlich benötigte Ausstattung und Personalbedarf, wird das Verfahren unter den herrschenden Rahmenbedingungen nur für große Lager von Interesse sein können.

Diese Situation ändert sich allerdings langsam: Ein Hersteller z.B. hat kürzlich eine IR-Kamera auf dem Markt gebracht, die wesentlich preisgünstiger ist als alle bisherigen Systeme. (Größenordnung ca. 10.000 €). Auf Anregung von uns und anderen Kunden sollte allerdings die mitgelieferte Software dahingehend erweitert werden, dass Fernabfragen und Fernauslösung der Kamera möglich werden, wie es für eine Automatisierung erforderlich ist.

Deshalb empfiehlt es sich auch, unter Einbeziehung der vorliegenden Ergebnisse, die Untersuchungen bezüglich Temperaturkorrekturen mit billigeren, qualitativ einfacheren Geräten zu wiederholen. Wesentlich für die Temperaturüberwachung sind ja korrekt

erfasste Temperaturen der IR-Daten bezogen auf reale Temperaturen. Damit wäre eine Temperaturüberwachung mit mehreren billigeren Geräten, die eventuell an verschiedenen Stellen des Lagers eingesetzt werden könnten, gewährleistet und eine thermographische Klimasteuerung könnte auch für kleinere Lager wirtschaftlich interessant werden.

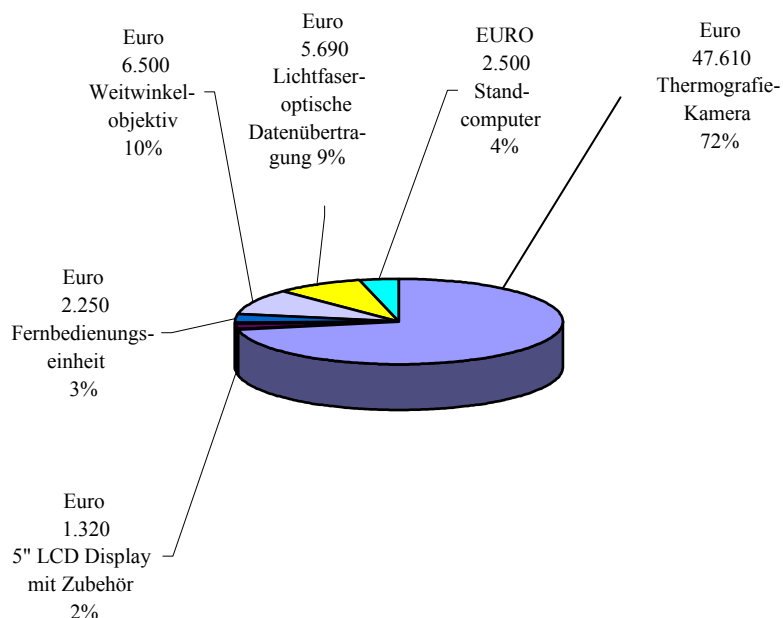


Bild 8.2: Prozentuale Zusammensetzung der Kosten für die Versuchsausstattung.

Die ökonomische und umweltrelevante Bewertung des thermographischen Messverfahrens führte zu folgendem Ergebnis:

Die bisherigen Arbeiten zeigten, dass die Anforderungen an die IR-Kamera als quantitativ exakte Temperaturegeber für eine optimierte Belüftungssteuerung nach dem 3D Belüftungsmodell sehr hoch sind. Für diese Aufgabenstellung werden daher eine Hochleistungskamera mit anspruchsvoller Technik sowie ein Computer für die Steuerung und Übertragung des Datenmaterials eingesetzt. Die entsprechenden Jahreskosten wurden mit ca. 11.000 € berechnet. Geht man von einem durchschnittlichen Kartoffelpreis von 8,36 €/dt aus, so müsste für ein Lager in der Größenordnung von 15.000 Tonnen, das zu 80 % belegt ist, der Einsatz der Technologie zu einer Verringerung des Lagerverlustes um rund 1,2 % führen, damit sich die Investition in diese Technik amortisiert. Geht man von den Daten von SCHUHMAN 2001 und GOTTSCHALK et al. 2004 (**Tabelle 8.3**) aus, dass in vielen Betrieben durch Lüftungsfehler bzw. falsche Belüftung 2-3 % Schwund/Verluste im Kartoffellager entstehen, so erscheinen diese Zahlen zwar hoch, aber sie liegen durchaus im Rahmen des zumindest theoretisch möglichen Einsparpotenzials. Bei der Preisentwicklung für die benötigten Hochleistungskameras kann kurz-

und mittelfristig trotz einer erheblichen Dynamik des Gesamtmarktes nicht mit wesentlich reduzierten Kosten gerechnet werden. Ob preisgünstigere qualitativ einfachere Kameras zur Temperaturerfassung und Klimaregelung eingesetzt werden könnten, müsste - wie bereits erwähnt und ausgehend vom derzeitigen Kenntnisstand - geprüft werden. Gelingt es, FKL-Lager mit Hilfe der Thermographie optimal zu belüften, so ist im Vergleich zu zwangsbelüfteten Lagern mit einer erheblichen Umweltentlastung v.a. durch die Einsparung elektrischen Stroms für die maschinelle Belüftung zu rechnen. Die Höhe variiert stark je nach jahresbedingtem Belüftungsbedarf. Es kann damit gerechnet werden, dass die Primärenergie für ein 15 kt Lager in Höhe von 580...2.830 GJ, klimarelevante Gase in Höhe von 36...179 t CO₂-Äq., ein Versauerungspotenzial von 76...308 kg/SO₂-Äq. sowie ein Eutrophierungspotenzial von 22...38 kg/PO₄-Äq. je Jahr eingespart werden können.

Tabelle 8.3: Lagerungsverluste von Kartoffeln und deren Bewertung nach SCHUHMANN 2001 und GOTTSCHALK 2004.

Lagerungsverluste von Kartoffeln und deren Bewertung										
Merkmal/ Verwendungszweck	Dauer der Lagerung bis ...									
	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni
Lagerungsverluste in %										
Schwund (kumulativ)	1,6	2,2	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,8	5,5	6,2
Verluste Fäule u. Keimung (kum.)	.	.	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	1,7	2,5	3,8
Verluste insgesamt	1,6	2,2	3,0	3,5	4,0	4,5	5,3	6,5	8,0	10,0
monetäre Bewertung der Lagerungsverluste in €/dt										
Stärke- und Veredelungskartoffeln ¹⁾	0,10	0,14	0,20	0,23	0,26	0,29	0,34	0,42	0,52	0,65
Speisekartoffeln ²⁾	0,13	0,18	0,24	0,28	0,32	0,36	0,42	0,52	0,64	0,80
Pflanzkartoffeln ³⁾	0,35	0,48	0,66	0,77	0,88	0,99	1,17	1,43	1,76	2,20
1) = 6,50 €/dt; 2) = 8,00 €/dt; 3) =22,00 €/dt										

9 Zusammenfassung

Um die Vorteile der freien Lüftung bei gleichbleibender oder verbesserter Lagerungsqualität zu nutzen, sollte eine neuartige Klimasteuerung entwickelt werden, die lokale Klimaänderungen erkennt und ausgleicht. In einer Grundlagenuntersuchung wurde am Leibniz-Institut für Agrartechnik (ATB) geprüft, inwieweit thermographisch ermittelte online Temperaturdaten in einem konvektiv belüfteten Lager (FKL) als Temperaturegeber für die Klimaführung dienen können. Die Untersuchungen wurden am Institut sowie im Kartoffel-Großkistenlager der Firma Friweika in Weidensdorf/Sachsen durchgeführt.

Von einem stationären Messplatz aus wurde die kontinuierliche Überwachung der Lagerklimatisierung mittels IR-Kamera und konventioneller Messtechnik, d.h. im Lagergut verteilten Einzelsensoren während drei Lagerperioden durchgeführt; die gewonnenen Temperaturdaten wurden gesammelt und zum Institut online übermittelt.

Unter Berücksichtigung von Korrekturfaktoren (Ermittlung einer Regressionsgeraden zur Korrektur der IR-Daten) zeigten die Untersuchungsergebnisse insgesamt eine gute quantitative Übereinstimmung der Temperaturverläufe bei konventioneller Messtechnik und Thermographie, wenn Temperaturen direkt an der Oberfläche des Messgegenstandes gemessen wurden. Unterschiedliche Belüftungsvorgänge wie Aufwärm- und Abkühlvorgänge konnten durch die Thermographie anschaulich in Filmsequenzen visualisiert werden. Fehlerquellen des Messsystems wurden ermittelt.

Je nach Bildausschnitt bzw. ausgewähltem Bereich innerhalb einer Session (Kartoffeln, Holzkisten, Papiermarker) wurden unterschiedliche Temperaturverläufe im Kartoffellager erfasst: mittels IR gemessene Oberflächentemperaturen von Kartoffeln gaben die Kartoffeltemperaturen im Inneren des Stapels wieder; mittels IR gemessene Oberflächentemperaturen von Holzfronten und Papiermarkern zeigten den Temperaturverlauf der Umgebungsluft in der Halle. Der Einfluss der Klappeneinstellungen auf die Belüftungseffektivität im Kartoffellager konnte mit Hilfe der Thermographie sehr gut demonstriert werden. Eine veränderte Kameraeinstellung während der Lagersaison 2004/2005 (senkrechter Blickwinkel auf die Stapel bei reduzierter Kistenoberfläche im Gegensatz zu einem schrägen Blickwinkel mit großer Stapeloberfläche) ermöglichte neben der Erfassung der Oberflächentemperaturen im obersten Stapel (höchste Temperaturen) auch die Erfassung der Bodentemperatur in der Nähe der unteren Bodenklappen. Zum Vergleich wurden die Temperaturen der Kartoffeln in Nähe der Bodenklappen konventionell erfasst. Es bestand eine gute Übereinstimmung der Temperaturwerte.

In einem weiteren Untersuchungsschritt sollte die Klimasteuerung mittels thermographisch bestimmter Messdaten im Kartoffellager Weidensdorf optimiert werden.

Die Erfassung der Klimadaten im konvektiv belüfteten Kartoffellager über drei Lagerperioden hinweg ergab, dass der Einfluss der Außentemperaturen auf den Erhalt einer konstanten Lagertemperatur sehr viel größer war als der der Kartoffeln, die durch Atmung/Produktion von Eigenwärme ebenfalls einen Temperaturanstieg im Lager verursachen können. Ein einfacher Algorithmus zur Klimasteuerung wurde mit Berücksichtigung der IR gemessenen Daten erarbeitet und manuell erprobt.

Folgende Punkte wurden in diesem Algorithmus für eine verbesserte Klimaführung berücksichtigt:

- Bei der Regelung der Kartoffeltemperaturen müssen sowohl die Temperaturen in Nähe der Bodenklappen (niedrigste Temperatur) als auch im oberen Bereich 7. Schicht (höchste Temperaturen) berücksichtigt werden (keine Durchschnittstemperatur!). (Mit einem geeigneten Blickwinkel der IR-Kamera können die Umgebungstemperaturen an beiden Positionen erfasst werden.)

- Die Regelung muss derart eingestellt sein, dass die an der Oberfläche gemessene IR-Temperatur immer etwas niedriger ist als die im Stapel gemessenen Kartoffeltemperaturen
- Warme Luftmassen im Bereich der Hallendecke sollten möglichst schnell entfernt werden
- Bei Frost durch Öffnen der Dachklappen: da die Wärmekapazität des Lagers sehr groß ist, kann der bisherige Frostschutz für die oberen Dachklappen (Kellereffekt) von 0 °C auf -3 °C herabgesetzt werden
- Bei frostfreiem Klima: durch gleichzeitiges Öffnen der Dach- und Bodenklappen
- Die aus thermographisch und konventionell gewonnenen Daten können weitere Hinweise zu Erstellung eines räumlichen Rechenmodells der Wärmeverteilung innerhalb des Stapels geben

Insgesamt wurden in der Lagerperiode 2004/2005 geringere Temperaturschwankungen der Kartoffeltemperaturen im Vergleich zu 2003/2004 erzielt (allerdings auch bedingt durch frühzeitige Auslagerung der Kartoffeln).

Letztendlich haben die Untersuchungen ergeben, dass das thermographische Messverfahren (Messung der Oberflächentemperaturen) sehr viel schneller Temperaturänderungen der Umgebung erfasst, als konventionelle Messverfahren mit Einzelfühlern in den Kartoffeln. Es kann damit – bei geeigneten Klimavoraussetzungen – auch schneller die Belüftung aktivieren. Bisher noch übliche, starke Temperaturschwankungen im Lager sind auf diese Weise weitgehend vermeidbar. Allerdings ist zu bedenken, dass die Klimaregelung im frei konvektiv belüfteten Lager vom Außenklima abhängig ist. Die Messergebnisse haben zudem gezeigt, dass das Außenklima einen wesentlich größeren Einfluss auf die Kartoffeln hat als ihre eigene Wärmeentwicklung. Ungünstige klimatische Bedingungen, z.B. erhöhte Außentemperaturen im Frühjahr bei relativ warmen Nächten, können unter Umständen dazu führen, dass die überschüssige Wärme auch bei thermographisch optimierter Klimasteuerung nicht entfernt werden kann. Damit sind der thermographischen (schnelleren), aber auch der konventionellen (trägeren) Regelung Grenzen gesetzt.

Das Testen und Erweitern des erarbeiteten Algorithmus, der die Informationen der IR-Daten und einer Modellrechnung in der Steuerung automatisch einsetzt, muss während weiterer Lagerperioden durchgeführt werden.

Da die Klimatisierung eines konvektiv belüfteten Lager ausschließlich von den Außentemperaturen der Umgebung abhängig ist, sollte weiterhin überlegt werden, mit welchen Methoden die warme Luft unter dem Dach möglichst schnell entfernt werden kann. Beispielsweise wäre eine Verknüpfung der Thermographie mit Photovoltaikzellen auf dem Dach denkbar: der bei hoher Sonneneinstrahlung gewonnene Strom könnte umweltfreundlich einen Lüfter betreiben, der die warme Luft unter dem Dach schnellstmöglich und effektiv wieder entfernt, bevor es zu einer Erwärmung der Kartoffeln kommt.

10 Literaturverzeichnis

- BEUCHE H. (2002):** mündliche Mitteilungen, ATB, Januar 2003
- BEVERLY D., HUNG Y.-C., PRUSSIA S. E.; SCHWEFELT R. L., TOLLNER E. W., GARNER, J. C., ROBINSO D. (1987):** Thermography as a nondestructive method to detect invisible quality damage in fruits and vegetables. HortScience 22 (5) 1056
- BREHME U., AHLERS D., BEUCHE H., HASSELER W., STOLLBERG U. (2003):** Is there a possibility of clinic application on infrared-thermography for diagnostics in oestrus detection in dairy cows? Academic Publishers: Proceedings 3rd Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering, Hungarian Institute of Agricultural Engineering, Gödöllő (H), 11.-13.09.2003, pp. 137-142.
- DALEY P. F. (1995):** Chlorophyll fluorescence analysis and imaging in plant stress and disease. Canadian Journal of Plant Pathology 17, 167-173
- DANNO A.; MIYAZATO, M.; ISHIGURO, E. (1978):** Quality evaluation of agricultural products by infrared imaging method. Memoirs Fac Agric 14 (23), 123-138
- EBERT H: (1962):** Physikalisches Taschenbuch (in German, Handbook of Physics). Vieweg&Sohn Braunschweig: pp 349-354
- FLIR SYSTEMS (2003):** Keeping the spread of SARS under control, August 2003. www.flir.com/SARS/application/note.pdf
- GOTTSCHALK K GEYER S, HELLEBRAND H.-J., SCHLAUDERER R. (2004):** Thermographie im Kartoffellager. Bornimer Agrartechnische Berichte, H. 37, , S. 128-142
- GOTTSCHALK K. (1994):** Mathematical modelling of the thermal behaviour of stored potatoes and developing of fuzzy control algorithms to optimise the climate in store houses. Proceeding: 2nd International IFAC/ISHS Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture in Silsoe, UK, 12-15. Sept. 1994, Acta Horticulturae No. 406, ISHS 1996, p 331 –339
- GOTTSCHALK K. (1998):** Möglichkeiten und Grenzen der Lagerklimaautomatisierung für Kartoffellager. Belüftung von Kartoffeln. Vorträge zur Jahrestagung 1997, 45 –61, KLAS- Verband, Buchedition Agrimedia, ISBN 3-86037-081-2
- GOTTSCHALK K. (2004):** Ein Modell zur Simulation des Lagerklimaverlaufs bei der Speisekartoffellagerung. KI Luft- und Kältetechnik 3/2004, S. 98-103
- HELLEBRAND, H. J.;**
- GOTTSCHALK K., CHRISTENBURY G.D. (1998):** A model for predicting heat and mass transfer in filled pallet boxes. 1998 ASAU Annual International Meeting, Paper No.983157
- GOTTSCHALK K., NAGY L., FARKAS I. (2003):** Improved climate control for potato stores by fuzzy controllers. Computers and Electronics in Agriculture 40 p. 127-140
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M. (2002a):** Berührungslose Temperaturbestimmung (Remote temperature measurement). ATB Jahresbericht 2002, 50-51, on-line available:<http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/ATB-Schriften/Jahresberichte/Jahresberichte/Jabe2002/Jahresbericht-2002-gesamt.pdf>
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M. (2002b):** Thermal imaging. A promising high-tec method in agriculture and horticulture. In "Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality" edited by J.Blahovec and M. Kutílek, Kluwer Academic/Plenum Publishers (ISBN 0-306-47430-1), New York, p. 411-427
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M., HEROLD B, GEYER M. (2001):** Chances and Shortcomings of Thermal Imaging in the Evaluation of Horticultural Products. International Conference "Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality", Prague 27-30 August 2001, Proceedings S. 112-117 (ISBN 80-213-0836-2)

<http://www.thermotemp.de/to11.htm>, September 2004

INQUE Y. (1990): Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. *Japan Jour Crop Sci* 59 (4), 762-768

INQUE Y., KIMBALL B. A., JACKSON R. D., PINTER P. J., REGINATO R. J. (1990): Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology* 51, 21-33

JANSEN H. (2000): Kartoffellager: Dämmung und Bauphysik. *Kartoffelbau*, 51 3, 112-119

JAYAS D. S., IRVINE D. A., MAZZA G. et al. (2001): Evaluation of a computer-controlled ventilation system for a potato storage facility. *Canadian Biosystems Engineering* 43: 5.5-5.12 2001

JONES H. G. (1999): Thermographic studies of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment* 22, 1043-1055

KERN A. (2001): mündliche Mitteilung; Friweika, Weidensdorf, September 2001

KING W. J. (1987): Emissivity and absorption, in R C Weast ed, *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton (Florida), , pp E-393 - E-395

LANDRY J. A., NORRIS E. R. (2001): Expert system for the control of potato storage environments. *Applied Engineering in Agriculture* 17 (6): 839-844

LARocca A. J. (1996): Artificial Sources, in "Sources of Radiation", editor Zissis, G. J., vol. 1 of "The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook" (8 volumes), exec. eds. Accetta, J. S. and Shumaker, D. L., ERI Ann Arbor (Michigan) and SPIE Optical Engineering Press Bellingham (Washington), , pp 49-135

LEPPACK E. (1993): Zur Praxis der heutigen Kartoffelbelüftung. *Kartoffelbau*, 44 8, 310-313

LEPPACK E. (1994): Warmlagerung mit Außenluft. *Kartoffelbau*. 45 7, 264-266

LEPPACK E. (1997): Einfachlagerung in Großkisten, *Kartoffelbau*, 48,12, 448 – 453

LEPPACK E. (2000): Aspekte der Kartoffellagerung. *Kartoffelbau*. 51 7, 296-299

LINKE M., BEUCHE H., HEROLD B., GEYER M. (2000): Horticultural Products Evaluated by Thermography. *AgEng2000*, University of Warwick, UK, July 2-7, 2000, Abstracts Part 2, p. 26-27, Paper No. 00-PH-003

LINKE M., HEROLD B., GEYER M., BEUCHE H., HELLEBRAND H. J. (1999): Application of thermography for studies of horticultural products. *ASTEQ - Second Action Group Meeting*, Madrid, 16-18 September, 1999, Proceedings S. 30-32

LUTZ P. et al. (1997): *Lehrbuch der Bauphysik*, B.G. Teubner Stuttgart, 4. Auflage

MALTRY W. (1998): Elementare Wärme- und Stofftransportvorgänge in lagernden Kartoffeln. Belüftung von Kartoffeln. Vorträge zur Jahrestagung 1997, S 9 – 24, KLAS- Verband, Buchedition Agrimedia, ISBN 3-86037-081-2

MALY P., HOFFMANN T., FÜRLI CH. (2004): Eine neue Methode zur belastungsarmen Ernte von Kartoffeln, *Landtechnik* 4 H 1277 (59), 212-213

MONTEITH J. L., SZEICZ G. (1962): Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Q J Roy Meteorol Soc* 88, 496-507

NILSSON H.-E. (1995): Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Canadian Journal of Plant Pathology* 17, 154-166

PÖTKE E. (2002): Sauber ins Winterlager. *Neue Landwirtschaft* 2 54-56

PÖTKE E., HAUSCHILD W., KERN A. (1999): Verbesserte Auftriebslüftung in Behältern durch Zuflutluken am Boden“ *Kartoffelbau* 50 9/10, 384-387

- SCHEER A. (1993):** Art der Großkisten bestimmt Abtrocknungs- und Kühlverfahren für Pflanzkartoffeln. Kartoffelbau, 44 11, 444-448
- SCHEIBE K., RIESE U., PÖHLKING A., MALY P., KERN A. (2005):** Befüllen von Großlagerkisten auf der Kartoffelerntemaschine - Ergebnisse, Kartoffelbau 56 (2005), 5, 191-197
- SCHIERHORN H. (1998):** Nachlese zur 25 jährigen Anwendung des Systems der Freien Konvektionslüftung nach Schierhorn von 1971 –1996. Belüftung von Kartoffeln. Vorträge zu Jahrestagung 1997, 33 –38. KLAS- Verband, Buchedition Agrimedia, ISBN 3-86037-081-2
- SCHORLING E. (2001):** Raumbelüftung bei Großkistenlagern. Kartoffelbau, 52 5, 204-208
- SCHUHMAN P. (1999):** Stand und Probleme der Lagerung und Belüftung. Kartoffelbau, 50 9/10, 380-383
- SCHUHMAN P. (2001):** Zur Wirtschaftlichkeit der Kartoffellagerung von Kartoffeln. Kartoffelbau 52 9./10, 406-409
- SCHUSTER N. AND KOLOBRODOV V. G. (2000):** Thermal imaging. Wiley-VCH Berlin Weinheim New York, 339 p, p 59
- TANNER C. B. (1963):** Plant temperatures. Agronomy Journal 55, 210-211
- TOLLNER E. W.; BRECHT J. K., UPCHURCH B. L. (1993):** Nondestructive evaluation: Detection of external and internal attributes frequently associated with quality or damage, in "Postharvest handling: a-system-approach". Food Science and Technology Series 7, 225-255
- ZOHAR O.; IKEDA M., SHINAGAWA H., INOUE H., NAKAMURA H., ELBAUM D., ALKON, D. L., YOSHIKA (1998):** Thermal imaging of receptor-activated heat production in single cells. Biophysical Journal 74 (1), 82-89

Anhang

Drei Diagramme: Differenz der auf den Referenzplatten thermographisch ermittelten und mit den Regressionsgleichungen errechneten Temperaturen von der konventionell gemessenen Temperatur in Abhängigkeit von der konventionell gemessenen Temperatur

- in der Klimakammer des ATB, März 2002
- im FKL-Kartoffellager FRIWEIKA während der Lagerperiode 2003/2004
- im FKL-Kartoffellager FRIWEIKA während der Lagerperiode 2004/2005

Ein Diagramm: Temperaturverlauf von Kartoffeln in 1m und 8,5 m Höhe an verschiedenen Positionen im Lager von Januar bis März 2005

**In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €