

# Infrarot-Thermographie zur Klimasteuerung in einem Großkisten-Kartoffellager

*Die Erhaltung eines ausgeglichenen Klimas in einem Großkistenlager für Kartoffeln stellt hohe Anforderungen an die vorhandene Klimaprozesssteuerung. Zur Optimierung der Klimasteuerung lässt sich mit Hilfe der Thermographie die Temperaturverteilung im Lager großflächig erfassen. Geringe Temperaturänderungen sind so messbar, wodurch Einflüsse der Luftströmung sichtbar gemacht werden können. Es wurde geprüft, inwieweit in einem Lager mit freier konvektiver Lüftung (FKL) thermographisch online ermittelte Temperaturdaten als Temperaturgeber für die Klimaführung dienen können.*

Dr.-Ing. Sabine Geyer und Dr.-Ing. Klaus Gottschalk sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung am Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam (Wiss. Direktor: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Zaske); Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans Jürgen Hellebrand und Dr. sc. agr. Ralf Schlauderer sind wissenschaftliche Mitarbeiter und Dr.-Ing. Horst Beuche ist technischer Mitarbeiter in der Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe am ATB; e-mail: [kgottschalk@atb-potsdam.de](mailto:kgottschalk@atb-potsdam.de)  
Das Vorhaben wurde mit Mitteln des BMBF und vom Forschungszentrum Jülich unter dem Förderkennzeichen 0339992/06/126 gefördert.

## Schlüsselwörter

Kartoffellager, Klimasteuerung, Thermographie

## Keywords

Potato store, climate control, thermography

## Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 04207 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Die Erhaltung eines ausgeglichenen Klimas in einem Großkistenlager für Kartoffeln ist nicht einfach zu realisieren. Lagergrundflächen bis zu 5000 m<sup>2</sup> und Kistenstapelhöhen bis zu 8,5 m, speziell in konvektiv belüfteten Lagern (FKL), stellen die Klimasteuerung vor die große Herausforderung, überall im Lager die angestrebte optimale Temperatur von 5 °C aufrecht zu erhalten. Insbesondere bei FKL-Lagern zeigt es sich, dass mit zunehmender Lagerperiode trotz erreichter und gehaltener Kartoffeltemperatur von durchschnittlich etwa 5,0 °C die Kartoffeltemperaturen in 1 m Höhe und 8,5 m Höhe über der normal bestehenden Temperaturdifferenz von etwa 1,5 °C stetig auseinander divergieren. 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 [1].

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.

Grundlage für die Optimierung der Klimasteuerung speziell in FKL Großkistenlagern ist deshalb 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.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben wurde dem Institut für Agrartechnik Bornim die Aufgabe gestellt,

Tab. 1: Emissionsgrade unterschiedlicher Materialien

Table 1: Emission degrees of different materials

Material	Emissionsgrad e
Kartoffeln	0,85 - 0,92 [3,4,5,6]
Holz	0,87 - 0,91[3,4,5,6,11]
Weißes Schreibpapier (Papiermarker)	0,95 [10]
Emissionsgradfolie	0,94
Geschwärzte Referenzplatte	0,92 [10]
Kupfer poliert	0,04 [11]

zu untersuchen, inwieweit thermographisch ermittelte Temperaturdaten in einem konvektiv belüfteten Lager (FKL) zur Temperaturerfassung genutzt werden und weiterhin als Temperaturgeber für die Klimaführung dienen können.

Die Untersuchungen wurden am Institut sowie im Kartoffel-Großkistenlager der Firma Friweika [2] in Weidensdorf/Sachsen durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden Pt 100-Thermosensoren verwendet. Als thermographische Messtechnik wurde die IR-Kamera ThermaCam SC 500 (FLIR Systems GmbH) eingesetzt.

## Auswertung der IR-Daten

Zum besseren Vergleich des thermographischen Messverfahrens mit dem konventionellen Messverfahren soll kurz auf die Grundlagen der Thermographie eingegangen werden. Beim thermographischen Messverfahren wird die Wärmestrahlung eines Körpers im Infrarot-Wellenlängenbereich von 8,5 bis 13 µm erfasst. Die Strahlungsleistung  $\Phi$  hängt nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz sowohl von der Oberflächentemperatur T als auch vom Emissionsgrad  $\epsilon$  der Fläche A ab:

$$\Phi = \sigma \epsilon T^4 A$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\sigma$  wird als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet.

Der Emissionsgrad als eine Materialkenngröße gibt die Beziehung zwischen der spezifischen Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers ( $\epsilon = 1$ ) und der eines realen Körpers

mit gleicher Temperatur wieder ( $\epsilon < 1$ ). Er hängt ab von der Wellenlänge  $\lambda$ , der Temperatur  $T$ , dem Material und den Oberflächeneigenschaften sowie dem Abstrahlwinkel des zu untersuchenden Objekts. Somit muss jedem Gegenstand auf dem erfassten IR-Bild (Bild 1) ein entsprechender Bereich mit definiertem Emissionsgrad zugewiesen werden, der aus der Literatur [3, 4, 5, 6] oder nach eigenen Untersuchungen [7, 8] gewonnen werden kann (Tab. 1).

Weiterhin benötigt die verwendete Auswerte-Software ThermaCam<sup>®</sup> zur korrekten Temperaturwiedergabe genaue Angaben über die Umgebungsbedingungen der IR-Kamera (Temperatur, Luftfeuchte) sowie die Kameraentfernung zum Messpunkt für jedes gewählte Gebiet. Zum direkten Vergleich der Infrarotmesstechnik mit der konventionellen Messtechnik ist an den Kartoffelkisten zusätzlich eine mit Mattlack geschwärzte Metallplatte mit bekanntem Emissionsgrad als Referenz angebracht, an der Temperaturänderungen mit einem Kontaktthermometer konventionell erfasst werden können.

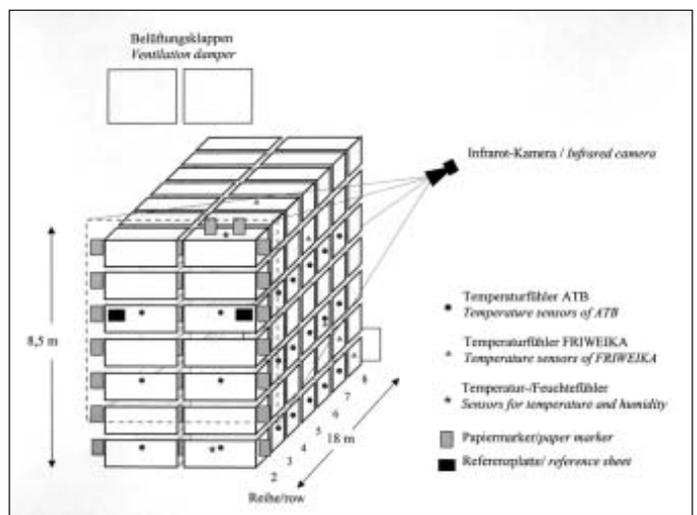
Unter Berücksichtigung von Korrekturfaktoren zeigten die Untersuchungsergebnisse insgesamt eine gute quantitative Übereinstimmung der Temperaturverläufe bei konventioneller Messtechnik und Thermographie, wenn Temperaturen direkt an der Oberfläche des Messgegenstandes gemessen werden.

### Gewinnung der Temperaturdaten

Eine Software zur Daten-Fernübertragung wurde entwickelt, die die konventionellen und thermographisch gewonnenen Temperaturdaten von einem stationären Messplatz im 15 kt Großkistenlager in Weidensdorf (Bild 2) sammelt und direkt zum Institut übermittelt. Zusätzlich erlaubt diese Software Einblicke in das betriebseigene Klimadaten-

**Bild 2: Stationärer Messstand mit konventioneller Messtechnik (40 Sensoren für Temperaturen und teilweise für Luftfeuchte) sowie thermographischer Messtechnik**

**Fig. 2: Stationary installed measuring station with conventional and thermal imaging measuring technique**



computersystem (Wetterwerte, Lagertemperaturen, Klappenöffnungszeiten) zu nehmen und relevante Daten zur Auswertung herüberzuladen.

Die Klimadaten der Lagerperioden 2002/2003 und 2003/2004 werden anschließend ausgewertet, um sie in ein Rechenmodell einzubeziehen, das die Vorhersage der Temperaturverteilung im Inneren der Kisten und in den von der IR-Kamera nicht "sichtbaren" Bereichen zu ermöglichen. In das räumliche Modell gehen die Temperaturveränderungen und Auswirkungen der Belüftungsvorgänge ein, die schnell an Papiermarkern und verzögert auch an der Gutoberfläche oder Kistenoberfläche erkennbar sind. Derzeit werden reale Messwerte mit einer Anzahl konventioneller Messfühler erfasst und mit den aus der Belüftungsmodellrechnung gewonnenen Werten verglichen und für eine optimierte Belüftungssteuerung verrechnet.

Aus den Untersuchungen konnte bereits aufgezeigt werden, dass unterschiedliche Belüftungsvorgänge wie Aufwärm- und Abkühlvorgänge durch die Thermographie anschaulich in Filmsequenzen visualisiert werden können. Es zeigte sich, dass Papierfahnen sehr schnell auf Temperaturänderungen reagieren, die durch die Luftströmungen ent-

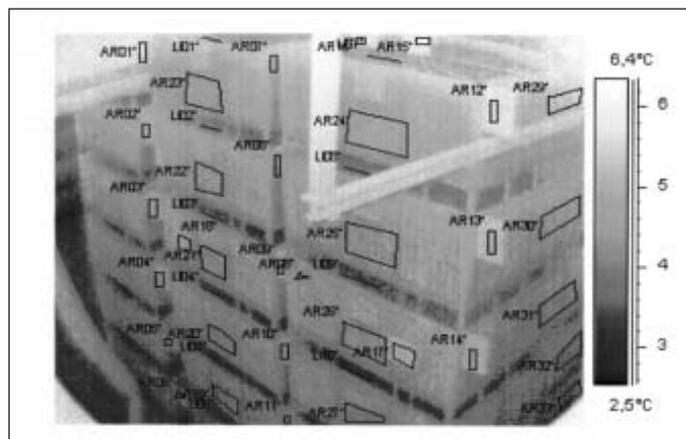
stehen, sobald über die Belüftungsklappen Frischluft zugeführt wird. Durch die geringe Wärmekapazitäten und definierten Emissionsgrade von Papierfahnen können mittels derartiger "Papiermarker" schnelle Temperaturänderungen und Luftströmungsvorgänge im IR-Kamerabild sichtbar werden. Holzfronten und Referenzplatten reagieren ebenfalls schneller auf Temperaturänderungen als Kartoffeloberflächen, aber langsamer als die Papiermarker. Belüftungsbedingte Temperaturänderungen im Lagerraum wurden nach entsprechend längeren Zeitperioden im Inneren des Lagerguts nachgewiesen.

### Fazit und Ausblick

Die Thermographie eröffnet neue Aspekte, Klimatisierungsprozesse zu visualisieren und auszuwerten [12]. Durch die Anwendung der Thermographie sind nun Möglichkeiten gegeben, Modellrechnungen noch genauer zu verifizieren. Sie muss jedoch als eines von mehreren Analysemiteln angesehen werden. Auch erfordert die Auswertung der IR-Bilder viel Erfahrung. Eine Korrektur der thermographisch ermittelten Temperaturwerte ist für eine korrekte quantitative Temperaturerfassung unerlässlich.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten zur Nutzung der Thermographie als Temperaturgeber in Großkistenlagern hängen in großem Maße von der relativen Vorzüglichkeit des Verfahrens im Vergleich zu den konkurrierenden konventionellen Verfahren ab. Aufgrund des relativ hohen Investitionsbedarfs für die Infrarot-Kamera und die zusätzlich benötigte Ausstattung und Personalbedarf, wird das Verfahren unter den herrschenden Rahmenbedingungen nur für große Lager von Interesse sein können. Hier können aber die Lager mit optimierter Belüftungssteuerung die Kosten der Kamera durch eine Schwundreduzierung von 1,2 % innerhalb von sieben Jahren amortisieren [13].

**Bild 1: Infrarotbild eines Kartoffel-Großkistenlagers mit ausgewählten Bereichen, auf denen unterschiedliche Materialeigenschaften (Emissionsgrade) und die Entfernung zur Kamera berücksichtigt werden zur Korrektur der IR-Daten in reale Temperaturen**



**Fig. 1: Infrared image of a big box store house in selected fields, respecting e. g. different material characteristics (emission degrees) and the camera distance for exact rectification are taken into consideration, to achieve a correct quantitative temperature recording**