

Experimentelle und numerische Analyse der Luftströmung in Obst- und Gemüselagern

Holger Scaar, Ulrike Praeger, Klaus Gottschalk, Reiner Jedermann, Martin Geyer

Bei der Kühlung von Obst und Gemüse verursacht der Ventilatorbetrieb zur Luftumwälzung einen hohen Energieverbrauch. Die Optimierung der Kistengestaltung und der Stapelabstände in den Kühlräumen sowie eine auf der Luftströmung in Produktnähe basierende Regelung der Ventilatoren bietet ein erhebliches Energieeinsparpotenzial. Dazu wurden die Luftströmungsbedingungen in einem praxisüblichen Apfel- und Weißkohllager mit gängiger Luftrate und dichter Kistenstapelung mit einem CFD-Modell und experimentell untersucht. Die numerischen Ergebnisse zeigten eine qualitativ gute Übereinstimmung mit den gemessenen Strömungsprofilen. In beiden Lagerräumen hat sich eine Luftwalze eingestellt, wobei Bereiche mit hohen und niedrigen Luftgeschwindigkeiten gezeigt werden konnten. Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine zu hohe Befüllung des Lagers und eine unvorteilhafte Ventilatorenanordnung zu inhomogenen Strömungsverteilungen im Stapel führen.

Schlüsselwörter

Kühlager, Lagerung von Obst und Gemüse, CFD-Simulation, Strömungsverteilung, Strömungssensor

Zur Lagerung gartenbaulicher Produkte werden weltweit maschinell gekühlte Lagerräume eingesetzt. Der Betrieb dieser Lagerräume erfordert einen hohen Energieverbrauch. Zum Beispiel werden für ein praxisübliches CA-Apfellager pro Lagersaison und Tonne Lagerprodukt etwa 80–100 kWh elektrischer Energie verbraucht. 30–40 % dieses Energieverbrauches werden für den Ventilatorbetrieb benötigt (KITTEMANN et al. 2015). Die Luftbewegung im Lager ist erforderlich, um die Feld- und Atmungswärme der Produkte abzuführen. Die Luftkühler in den Lagerräumen laufen mit drückender oder saugender Luftführung durch den Verdampfer. Eine saugende Luftführung bewirkt eine größere Wurfweite der Luft über den Produktstapel als eine drückende Luftführung (DUNCAN und KIZLAUSKAS 2012).

In den letzten 15 Jahren ist das Interesse an der Analyse der Kühlungs- und Luftströmungsbedingungen in Vorkühleinrichtungen, Lagerräumen und Transporteinheiten gartenbaulicher Produkte gestiegen (AMBAW et al. 2013, DURET et al. 2014, MOUREH et al. 2009). Für Untersuchungen mit dem Ziel eine möglichst gleichmäßige Luftströmungsverteilung in Lagerräumen zu erreichen, wurden standardmäßig strömungsmechanische Modelle eingesetzt (NAHOR et al. 2005, XIE et al. 2006). NAHOR et al. (2005) zeigten mittels CFD-Simulation (CFD: Computational Fluid Dynamics) der Luftströmung von einem mit 8 Birnenkisten teilgefüllten Raum (43 m³) die Bildung eines Luftwirbels im leeren Raum vor den Kisten. Durch Abrundung der Ecken in einem leeren, kleinen Lagerraum (37 m³) wurde die Bildung von Strömungswirbeln verhindert (XIE et al. 2006). In einem mit 2 Paletten mit Apfelkisten gefüllten Raum (29 m³) haben DURET et al. (2014) punktuell in den Spalten und zwischen den Kisten und der Raumwand Luftgeschwindigkeiten im Bereich von 0,22–1,2 m s⁻¹ gemessen. AMBAW et al. (2015) verwendeten ein strömungsmechanisches CFD-Modell, um den Einfluss des Kühlungssche-

mas auf die Produktkühlung und den Energieverbrauch während der Lagerung zu quantifizieren. Die Luftströmungsverteilung unter praktischen Lagerbedingungen in großtechnischen Kühlräumen wurde bisher kaum untersucht.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „COOL“ soll die Lagergestaltung sowie der Luftaustausch über den Ventilatorbetrieb angepasst werden, um den Energieverbrauch durch Verringerung der Ventilatorzahl zu reduzieren, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen. In den hier dargestellten Studien wurden die aktuellen Bedingungen der Luftströmungsverteilung in praxisüblichen Lagerräumen mittels Luftgeschwindigkeitsmessungen und CFD-Simulationen analysiert, um Bereiche mit besonders niedriger und hoher Luftgeschwindigkeit zu identifizieren und gegebenenfalls Maßnahmen für eine gleichmäßige, optimierte Luftbewegung im Raum abzuleiten.

Material und Methoden

Lagerräume

In der Lagersaison 2015/2016 wurde die Strömungsverteilung in zwei Kühllagern (Äpfel und Weißkohl) numerisch und experimentell untersucht. Das ausgewählte CA-Lager für Apfel-Großkisten (Abbildung 1) der Havelfrucht GmbH liegt in der Nähe von Werder (Havel). Der untersuchte Lagerraum (Breite: 6,6 m, Tiefe: 15,2 m, Höhe: 7,0 m) hatte ein Fassungsvermögen von 520 Holzkisten ($1,2 \times 1,0 \times 0,8$ m), d. h. etwa 170 t Äpfel, und war zum Messzeitpunkt während der Einlagerungszeit von der hinteren Seite her gegenüber dem Luftkühler mit 9 vollständigen Kistenreihen (360 Kisten) und mehreren einzelnen Stapeln befüllt. Die Kisten waren mit der langen Seite (1,2 m) in Richtung des Luftstroms dicht aneinander gestellt mit Ausnahme eines 20 cm breiten Spaltes zwischen der 3. und der 4. Kistenreihe von links. Am rechten und linken Rand betrug der Abstand zwischen der Wand und den Kistenstapeln jeweils 20 cm. Der Luftkühler (Typ Helpmann THOR 268-7, Alfa Laval, Glinde, Deutschland, Luftmenge $30.480 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, 6 Ventilatoren) hing über der Tür, war mit einem Luftleitblech und einer Folie als Luftabschottung nach unten versehen (Abbildung 1 b) und lief im Druckbetrieb. Der Raum war vor den Untersuchungen auf $< 3 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt worden. Die Lufttemperatur im Raum stieg, bedingt durch das häufige Öffnen des Raums und die Unterbrechungen der Ventilation zwischen den Messungen, auf $3\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$ an.

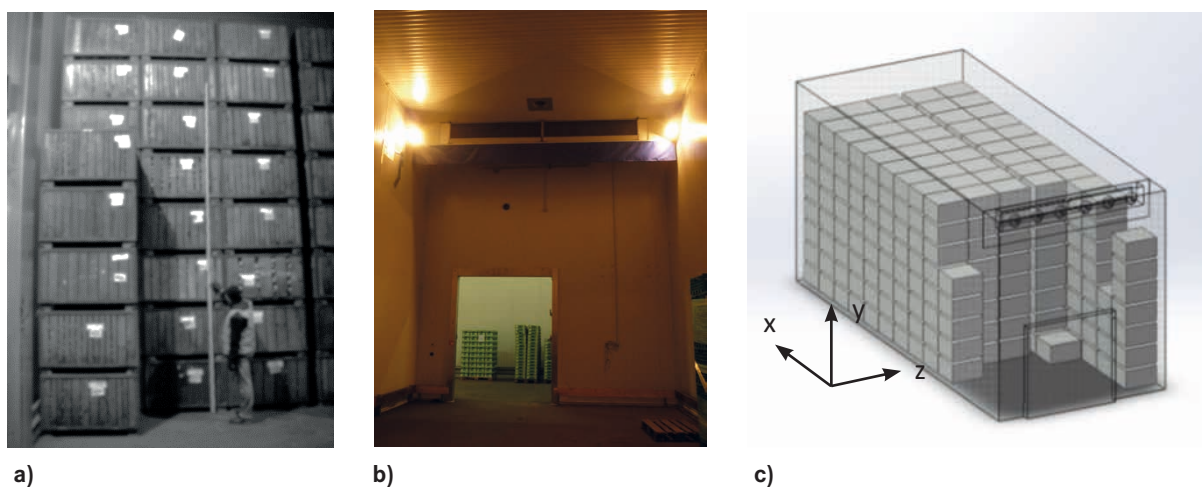
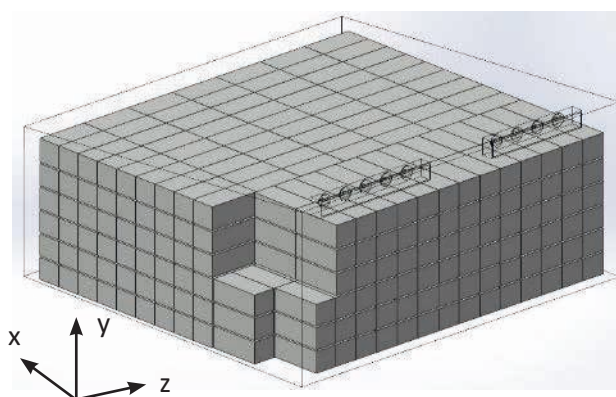


Abbildung 1: a) Kistenstapelung, b) Luftkühler (Fotos: ATB) und c) schematische Darstellung des Apfellagers

Der Weißkohllagerraum in Marne (Dithmarschen) hatte ein Fassungsvermögen von 393 t Kohl (524 Kisten). Eine Kiste war $2,15 \times 1,0 \times 0,9$ m groß und bei einem Kistenvolumen von $1,94 \text{ m}^3$ mit 750 kg Kohl gefüllt. Die Kisten waren ohne Abstände zwischen den Reihen gestapelt. Direkt unter den zwei seitlich angeordneten Luftkühlern waren die ersten zwei Reihen längs zur Kühlluftströmung gestapelt, weitere Kisten waren in 9 Reihen quer angeordnet. Direkt hinter der Tür waren die ersten Kistenstapel in Längsrichtung aufgrund der Türhöhe nur bis zur 3. Kiste nach oben gestapelt (Abbildung 2). Der Raum war mit zwei Luftkühlern (GEA Küba, KÖ SG 104, Baierbrunn, Deutschland) ausgestattet, die im Saugbetrieb liefen, in Türnähe mit 5 Ventilatoren, weiter hinten im Raum mit 4 Ventilatoren. Der Luftvolumenstrom des Kühlers mit 4 Ventilatoren betrug $17.200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Der Raum hatte eine schräge Decke, wobei die Seite, an der die Luftkühler hingen, $0,7$ m höher war als die gegenüberliegende Seite (Abbildung 2b). Die Temperatur war auf $1 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt. Da der Raum häufig zwischen den Messungen geöffnet und die Ventilatoren zeitweise abgestellt wurden, stieg die Lufttemperatur zeitweise bis $3 \text{ }^\circ\text{C}$ an.



a)



b)

Abbildung 2: a) Kistenstapel im Weißkohllager (Foto: K. Oelrichs) und b) schematische Darstellung des Kohllagers

Mathematische Modellierung

Zur Analyse der Luftströmung in den Lagern wurde ein CFD-Modell unter Verwendung der kommerziellen Simulationssoftware Ansys[®] CFX entwickelt. Das Modell beschreibt die Luftströmung im Lager und in den gestapelten Großkisten. Für die Berechnung der Luftströmung in den Kisten wurde deren Inhalt als poröses Medium definiert. Zur Ermittlung der Porosität des Apfelkistenstapels wurde die Schüttdichte über das Füllvolumen und das Füllgewicht der Großkiste sowie die Feststoffdichte über die Wasserverdrängung experimentell bestimmt. Die gemessene Feststoffdichte (ρ_P) der Apfelsorte „Jonagold“ betrug 826 kg m^{-3} und die dazugehörige Schüttdichte (ρ_B) lag bei 482 kg m^{-3} . Unter Verwendung von Gleichung 1 wurde eine Porosität (ε) von $0,42$ für die Apfelschüttung ermittelt:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_P} \quad (\text{Gl. 1})$$

Bei Kohl betrug die Porosität der Schüttung 0,55. Der linear und quadratisch von der Luftgeschwindigkeit abhängige Druckverlust, den die Schüttung auf die Strömung ausübt, wurde über die Ergun-Gleichung (VDI 2006) (Gleichung 2) unter Verwendung des Sauter-Durchmessers d_s des Partikels (Apfel = 70 mm; Kohl 200 mm) bestimmt.

$$\frac{\partial P}{\partial l_i} = 150 \frac{1 - \varepsilon^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_i}{d_s} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_{air} u_i |\vec{u}|}{d_s^2} \quad (Gl. 2)$$

Anhand der Ergun-Gleichung wurden k_{perm} und k_{loss} für das Modell ermittelt. Es ergab sich für Äpfel für den Permeabilitätsfaktor k_{perm} ein Wert von $6,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ (bei Kohl: $5,65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$) und für den Druckverlustkoeffizienten k_{loss} ein Wert von $404,62 \text{ m}^{-1}$ (bei Kohl: $141,62 \text{ m}^{-1}$).

Unter der Verwendung der Impulstransportgleichung für turbulente Strömungen in porösen Medien wurde das Strömungsprofil im Praxislager berechnet (Gleichung 3 und 4):

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_{air} \vec{u}}{\partial t} + \nabla (\rho_{air} \vec{k} (\vec{u} \times \vec{u})) + \varepsilon \nabla P = \nabla \left(\mu_{eff} \vec{k} \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{u} \right) \right) + \vec{R} \quad (Gl. 3)$$

mit

$$R_i = \frac{\mu}{k_{perm}} u_i + k_{loss} \frac{\rho_{air}}{2} u_i |\vec{u}| \text{ und } \vec{k}_{ij} = \varepsilon \delta_{ij} \quad (Gl. 4)$$

Die effektive Viskosität μ_{eff} wurde über die dynamische Viskosität des Fluides und der Wirbelviskosität berechnet (ANSYS 2016).

d_s	Sauter-Durchmesser	in m	\vec{u}	Geschwindigkeitsvektor	in m s^{-1}
i, j	Vektorkomponenten		u_i	Geschwindigkeitskomponente	in m s^{-1}
k	Freier Strömungsweg	in m	δ	Porositätstensor	
k_{loss}	Druckverlustkoeffizient	in m^{-1}	ε	Porosität	
k_{perm}	Permeabilitätsfaktor	in m^2	μ	dynamische Viskosität	in kg m^{-1}
l_i	Strömungsweglänge	in m	μ_{eff}	effektive dynamische Viskosität	in kg m^{-1}
P	Druck	in $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$	ρ_{air}	Luftdichte	in kg m^{-3}
R	Druckverlust in der Schüttung	in $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$	ρ_B	Schüttdichte	in kg m^{-3}
t	Zeit	in s	ρ_P	Partikeldichte	in kg m^{-3}

Abbildung 3 a zeigt das 3-D-Modell für den Apfellageraum und Abbildung 3 b für das Weißkohllager. Der Kistenstapel wurde in beiden Modellen als poröser Block dargestellt. Als Porosität wurde der Porositätswert der Schüttung angenommen. Zur Vernetzung der Lagergeometrie wurde Ansys® Meshing verwendet. Das diskrete Modell des Apfellagers besteht aus 22.935.088 Volumenelementen und das diskrete Modell des Kohllagers besteht aus 7.365.957 Volumenelementen, wobei der kleinste Knotenabstand in der Grenzschicht bei 0,1 mm liegt.

Als Eintrittsfläche für die Umluft wurde beim Apfellager die Verdampferaustrittsfläche und beim Kohllager die Ventilatoraustrittsfläche gewählt. Beim drückenden Luftkühler im Apfellager wurde die Luft über die ganze Kühlerfläche durch die Verdampferlamellen ausgeblasen, beim saugenden Lüfter im Kohllager nur über die Fläche der Ventilatoren, die mit Gleichrichtern versehen waren. An diesen

Flächen wurde die im Lager gemessene Strömungsgeschwindigkeit als Randbedingung definiert. Diese betrug im Apfellager 3 m s^{-1} und im Kohllager 5 m s^{-1} . An der Ventilatoreintritts- (Apfellager) bzw. Verdampfeintrittsfläche (Kohllager) wurde als Randbedingung ein relativer Druck von 0 Pa angenommen. Zur Beschreibung der Lagerwand wurde das „no slip“-Modell (Haftbedingung) verwendet. Die Geometrieschnittstelle zwischen dem porösen Medium und dem freien Strömungsvolumen wurde als „general grid interphase“ GGI (ANSYS 2016) definiert. Für die Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Luft wurde das ideale Gasgesetz verwendet. Die Lagertemperatur wurde im Modell konstant auf 0 °C festgesetzt. Folglich wurden alle thermischen Effekte, die die Strömung im Lager beeinflussen, vernachlässigt. Der angenommene statische Druck im Lager betrug 1,013 bar, wobei dieser über die Höhe des Lagers über das Gravitationsmodell korrigiert wurde.

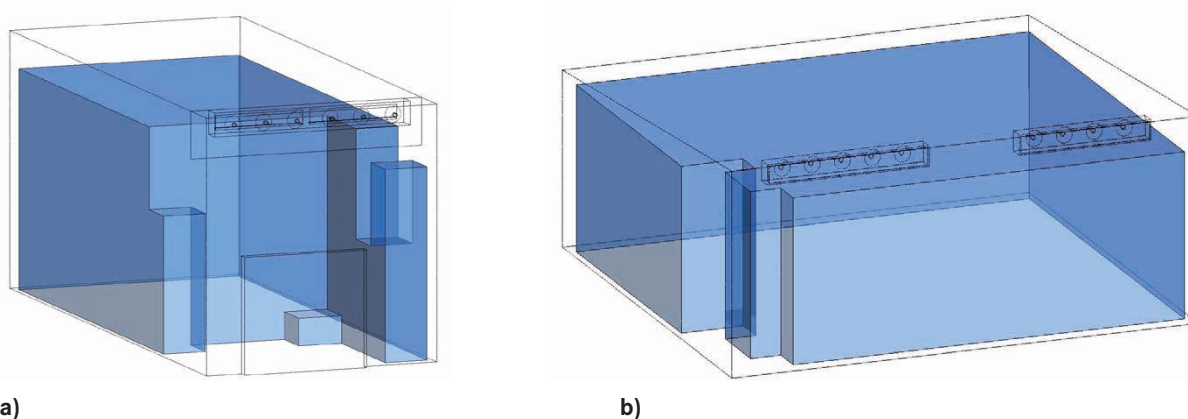


Abbildung 3: a) Modellgeometrie des Apfellagers und b) des Weißkohllagers

Experimentelle Untersuchungen

Zur Messung der Luftgeschwindigkeit wurden richtungsabhängige Thermoanemometer mit einem Messbereich von $0,08\text{--}2 \text{ m s}^{-1}$ (FVAD TH4, Auflösung, $0,04 \text{ m s}^{-1}$, Genauigkeit 1 %) und einem Messbereich von $0,2\text{--}20 \text{ m s}^{-1}$ (FVAD TH5, Auflösung $0,2 \text{ m s}^{-1}$, Genauigkeit 2 %) verwendet.

Die Messungen im Apfellager wurden während der Einlagerungszeit durchgeführt. Die Thermoanemometer wurden an der noch zugänglichen Seite der Kisten an der Türseite des Raumes in den waagrechten Spalten zwischen den Kisten über die ganze Stapelhöhe hinweg angebracht (Abbildung 1 und 4). Die Luftgeschwindigkeit wurde von den richtungsabhängigen Sensoren in x-Richtung des Raumes gemessen. Die Messungen wurden in den waagrechten Spalten nacheinander jeweils 1 Mal durchgeführt (Messintervall 1 s, Messdauer 1 Minute). Zusätzlich wurde in dem breiten vertikalen Spalt (20 cm) zwischen dem 3. und 4. Kistenstapel von links in den waagrechten Spalten 2, 4, 6 und 8 die Luftströmung in z-Richtung (horizontal), d. h. rechtwinklig zu den anderen Messungen durchgeführt (Abbildung 1 und 4).

Oberhalb des Kistenstapels im Kohllager wurde die Luftgeschwindigkeit (Messintervall 1 s, Messdauer jeweils 1 Minute) mit Thermoanemometern an 12 verschiedenen Positionen in einer Höhe von 25 cm gemessen (Abbildung 9). Aufgrund der Neigung der Lagerdecke konnten im hinteren Bereich des Lagers keine Messungen durchgeführt werden (Abbildung 2).

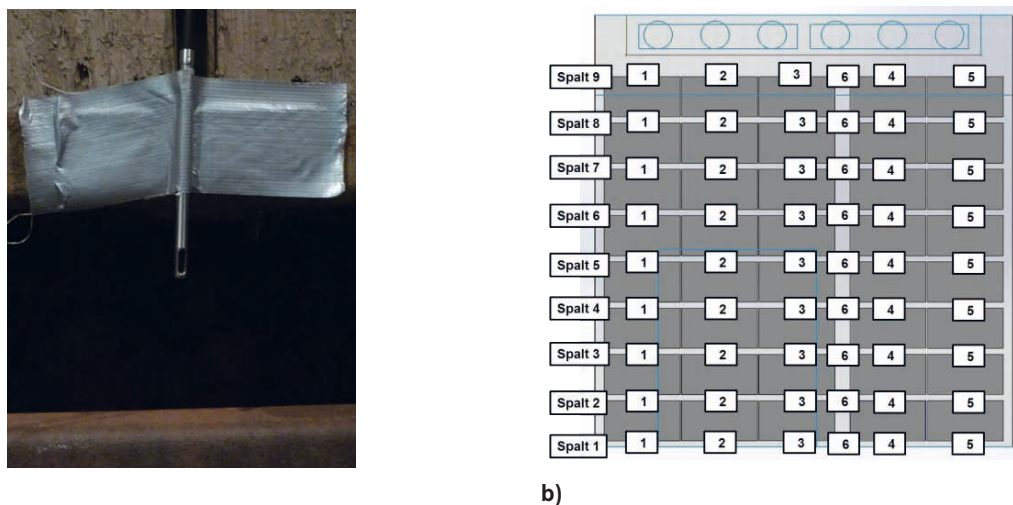


Abbildung 4: a) Sensorpositionierung (Foto: ATB) und b) Messpositionen im Apfellager

Zur Messung der Luftgeschwindigkeit in den Spalten vor und hinter dem Kohlkistenstapel wurden 3 Thermoanemometer an einem Stab befestigt, sodass sie an den seitlichen Brettern der Kisten eingehängt werden konnten und zur gleichzeitigen Messung in 3 Richtungen (x, y, z; Abbildung 5 a) verwendet werden konnten (Messzeit 3 Minuten, Messstab wurde an den Messorten teilweise von Hand gehalten, Intervall 1 s). Die Werte in x- und y-Richtung wurden etwa 2-3 cm vor den Kistenbrettern gemessen, in z-Richtung innerhalb der Kiste direkt hinter den Brettern. Zusätzlich wurde die Luftgeschwindigkeit in der Mitte des Spalts zwischen Raumwand und Kistenstapel auf etwa ein Meter Höhe an 2 Punkten (Abbildung 5 b und 10 a) gemessen.

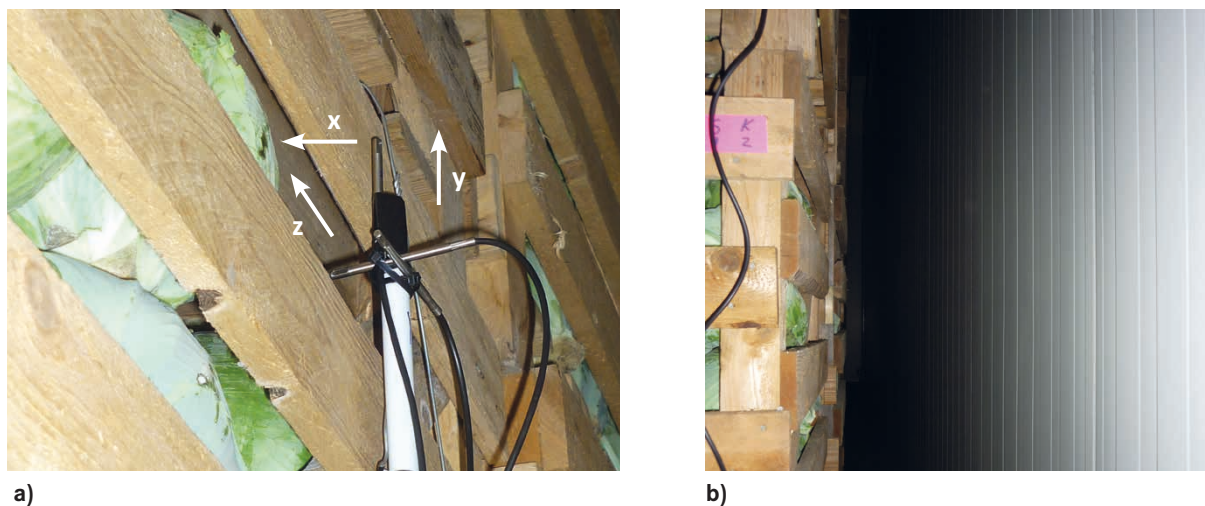


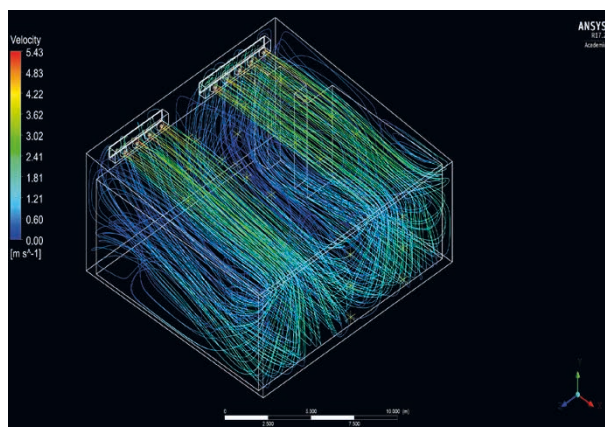
Abbildung 5: a) Luftgeschwindigkeitsmessung in 3 Richtungen vor den Kisten im Spalt zwischen Kistenstapel und Raumwand, b) Spalt zwischen Kistenstapel und Raumwand unterhalb der Ventilatoren (Fotos: ATB)

Ergebnisse und Diskussion

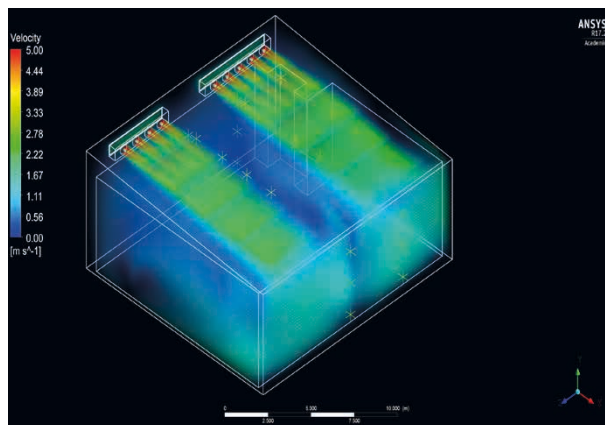
Modell

Die mathematische Untersuchung der Luftströmung zeigte in beiden Kühllagern die Ausprägung einer Luftwalze (Abbildung 6 und 7). Im Apfellager reichte die Wurfweite der Ventilatoren aus, um den

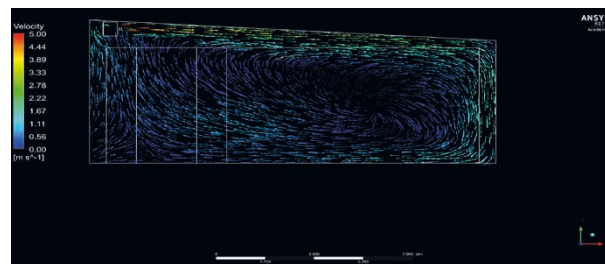
noch freien Stapelraum vor der Tür zu überwinden und somit eine Umwälzung der Luft zu gewährleisten. Es ist zu erkennen, dass sich im freien Stapelraum ein Wirbel in Bodennähe und in Ventilatornähe eine schwache Kurzschlussströmung ausbildet. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit liegt in Deckennähe bei ca. 3 m s^{-1} und im Stapel bei $0,1 \text{ m s}^{-1}$, wobei die Strömungsgeschwindigkeit im Stapel in Ventilatornähe etwas höher ist als im hinteren Lagerbereich. Im seitlichen Stapel rechts neben der Tür waren die Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls etwas geringer. Die Geschwindigkeiten im Spalt zwischen dem Stapel und der Wand lagen bei $0,8\text{--}1,3 \text{ m s}^{-1}$. Anhand des Strömungsvektorplots ist zu erkennen, dass innerhalb des Stapels keine Wirbel auftreten.



a)



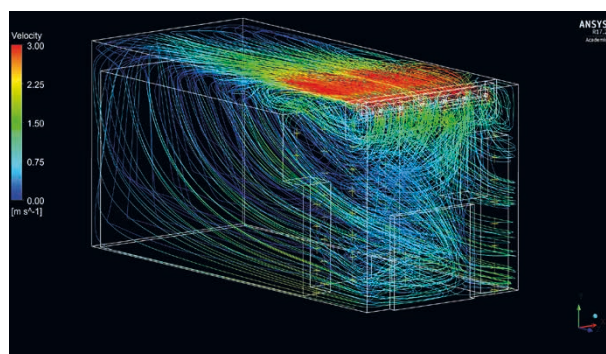
b)



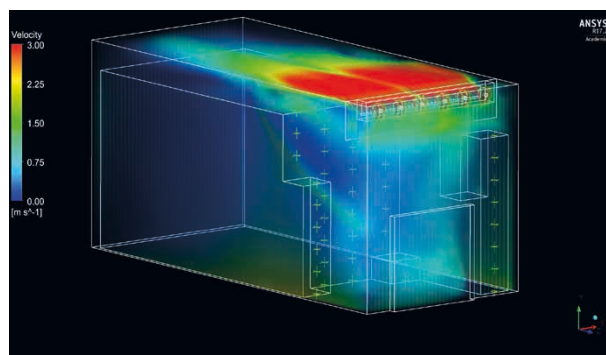
c)

Abbildung 7: CFD-Simulation Kohllager: a) 3D-Abbildung der Strömungslinien, b) 3D-Abbildung mit Positionen der Messpunkte (gelbe Sterne) über, vor und hinter den Kisten und c) Querschnitt zur Strömungsverteilung

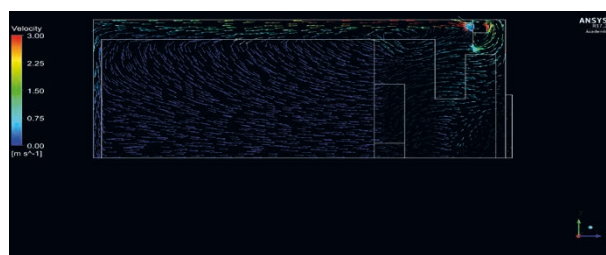
Bei der Strömungsverteilung im Kollager (Abbildung 7) fällt a dass die Luftverteilung in diesem Lager im Vergleich zum Apfellager inhomogen ist, bedingt durch die Anordnung der zwei Verdampfer. Im Inneren des Stapels liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei 0,4–0,8 m s⁻¹. Es kommt zu einer Wirbelbildung im Stapel, welche die reale Luftwechselrate verringert. Im unteren Bereich des Stapels hingegen ist die Luftgeschwindigkeit höher (bei ca. 1,3 m s⁻¹) und in Richtung der Verdampfer gerichtet. Die Wurfweite der Ventilatoren der Verdampfer reicht aus, um die Luft bis zum hinteren Ende des Kühllagers zu befördern. Durch die Neigung des Lagerdaches wird die Luft im hinteren Bereich des Lagers in den Kistenstapel gedrückt, welches zu hohen Luftgeschwindigkeiten (bis 2 m s⁻¹) am Produkt führt. Im seitlichen Spalt zwischen dem Stapel und der Lagerwand lag die Geschwindigkeit bei 0,4–0,8 m s⁻¹.



a)



b)



c)

Abbildung 6: CFD-Simulation Apfellager: a) 3-D-Abbildung der Strömungslinien, b) 3-D-Abbildung mit Positionen der Messpunkte (gelbe Kreuze) und c) Querschnitt zur Strömungsverteilung

Experiment

Im Apfellager betrug die Austrittsluftgeschwindigkeit am Kühler 3 m s^{-1} . Zwischen den Kisten in den horizontalen Spalten der mittleren 3 Kistenreihen betrug die Luftgeschwindigkeit in x-Richtung des Raumes $0,9\text{--}1,35 \text{ m s}^{-1}$ und war somit um die Hälfte niedriger als am Luftkühler. Die Simulationsdarstellung (Abbildung 6 b und c) zeigt im Bereich der Messpunkte bzw. des Kistenblocks dunkel- bzw. hellblaue Färbung an und somit ähnliche bzw. etwas niedrigere Luftgeschwindigkeit von $\leq 1 \text{ m s}^{-1}$, als in den Spalten gemessen wurde. Die Ursache für die geringe Abweichung liegt darin, dass der Luftwiderstand in der Apfelschüttung höher ist als in den horizontalen Spalten, die im Modell nicht berücksichtigt wurden. In den Randreihen war die Geschwindigkeit in den meisten waagrechten Spalten etwa $0,7 \text{ m s}^{-1}$ niedriger als in den mittleren Reihen. Am oberen Rand der Kisten (Spalt 9) war die Geschwindigkeit erheblich geringer im Vergleich zu den Spalten zwischen den Kisten (Abbildung 8). Offensichtlich wird die Luft aus dem Luftauslass des Kühlers, der über der obersten Kistenreihe liegt und mit einem nach oben zeigenden Luftleitblech versehen ist, über der Oberkante der Kistenstapel entlanggeführt und durch die unteren Spalten zwischen den Kisten wieder angesaugt. In dieser Untersuchung konnte nicht gemessen werden, wie schnell sich die Luft durch die hinteren Stapel im Raum bewegt.

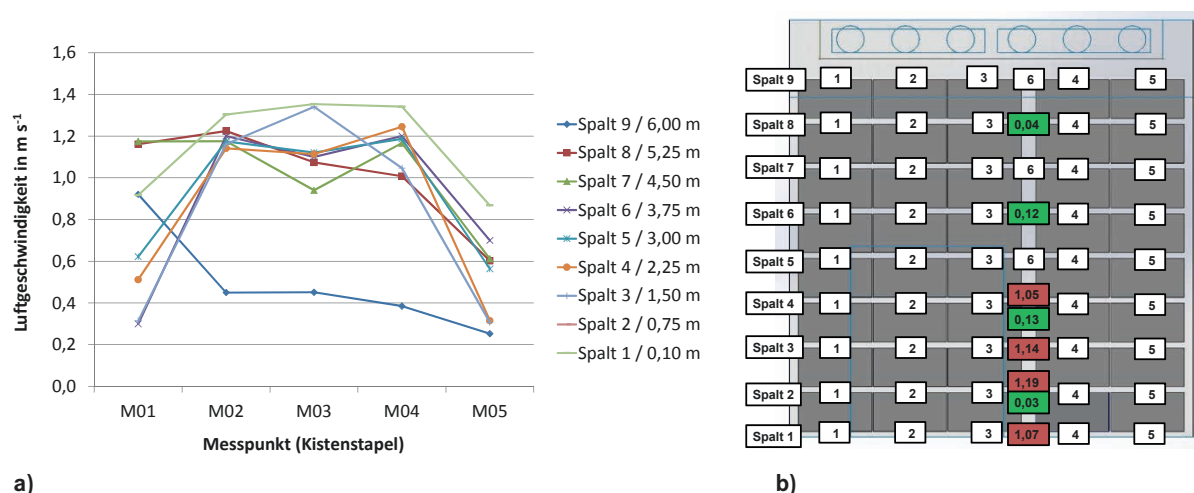


Abbildung 8: a) Luftgeschwindigkeit im Apfellager in den horizontalen Spalten in x-Richtung und b) dem vertikalen Spalt in z- (grün) und x- (rot) Richtung

Über den Großkisten im Kohllager betrug die Luftgeschwindigkeit an den Messpositionen, die direkt vom Lüfter angeblasen wurden (Reihe 1 und 2, Abbildung 9), $3\text{--}5 \text{ m s}^{-1}$ mit abnehmender Luftgeschwindigkeit bei zunehmender Entfernung vom Lüfter etwa 25 cm oberhalb der Kohlköpfe, ähnlich wie bei der simulierten Luftgeschwindigkeitsverteilung (Abbildung 7 b und c), die durch die Farbveränderung von links nach rechts (orange bis hellgrün) in Strömungsrichtung unter der Raumdecke eine Luftgeschwindigkeitsabnahme von etwa 4 bis etwa 2 m s^{-1} anzeigt. An den Messpositionen, die nicht direkt von den Lüftern angeblasen wurden, war die Luftgeschwindigkeit im Bereich von $0,8$ bis $1,7 \text{ m s}^{-1}$ erheblich geringer (Abbildung 9).

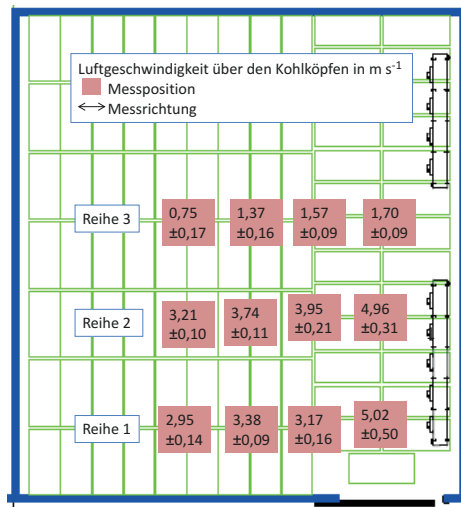


Abbildung 9: Luftgeschwindigkeit (Mittelwert und Standardabweichung innerhalb einer Messung) in 25 cm Höhe über der obersten Kohlkistenlage an 12 Messpositionen

Im Spalt zwischen dem Kohlkistenstapel und der Wand unterhalb der Luftkühler wurde eine geringere Luftgeschwindigkeit gemessen als im Spalt an der Wand gegenüber von den Luftkühlern (Abbildung 10 a und b). Die niedrigere Luftgeschwindigkeit unterhalb der Ventilatoren ist auch in der Simulationsdarstellung erkennbar (Abbildung 7 b und c). An den Positionen, die auf Höhe der Ventilatoren lagen, war die Luftgeschwindigkeit in y-Richtung (vertikale Strömungsrichtung) höher als an den Messpunkten in der Stapelmitte, die in Ausblasrichtung zwischen den beiden Luftkühlern lagen (Abbildung 10 a und b). Insgesamt lagen die Messwerte (erfasst in 3 Richtungen) im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit über dem Kistenstapel – mit wenigen Ausnahmen – überwiegend zwischen $0,1 \text{ m s}^{-1}$ und $0,6 \text{ m s}^{-1}$ und waren somit sehr niedrig, vermutlich durch die stark eingeschränkte Luftbewegung aufgrund der engen Kistenstapelung. Die Luftgeschwindigkeitswerte in z- und x- Richtung sind deshalb hier nicht im Einzelnen dargestellt. Vor der untersten Kistenebene wurde an manchen Messpunkten (Abbildung 10 a) keine Luftbewegung gemessen. Da aus den Kisten zwischen den Kohlköpfen nur sehr wenig Luft strömte ($\leq 0,3 \text{ m s}^{-1}$), wird die nach oben in Richtung Ventilatoren strömende Luft vermutlich v.a. aus den Spalten zwischen Kistenstapel und Seitenwänden des Raumes angesaugt.

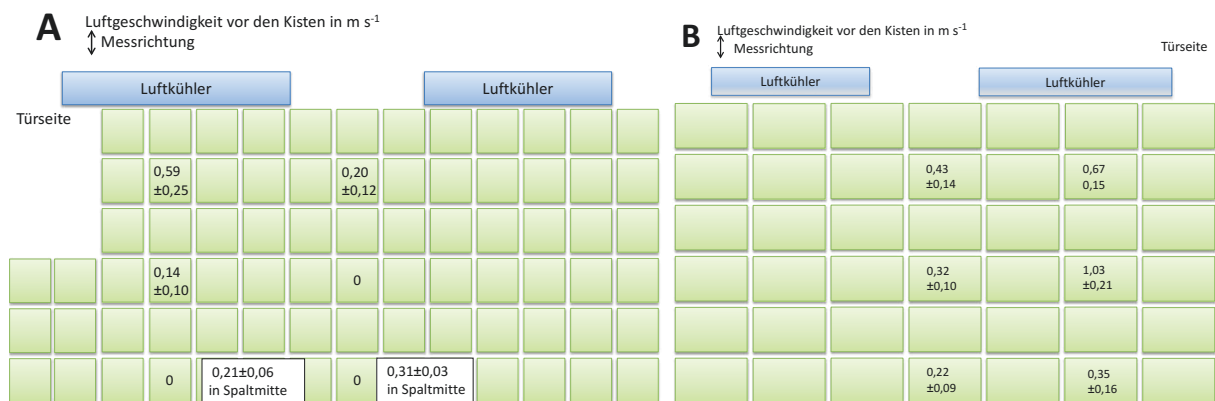


Abbildung 10: a) Luftgeschwindigkeit (Mittelwert und Standardabweichung innerhalb einer Messung) in den Spalten zwischen der Raumwand unterhalb der Luftkühler und b) gegenüber von den Luftkühlern (Messrichtung y, Abbildung 2 und 5)

Schlussfolgerungen

Der qualitative Vergleich zwischen Simulation und Experiment lässt auf ähnliche Strömungsbedingungen in den Kühllagern schließen. Im Apfellager wurde eine gleichmäßige Luftströmung in den horizontalen Spalten von 1 m s^{-1} in x-Richtung gemessen. Dies weist darauf hin, dass die Luft durch die Spalten wieder in Richtung der Ventilatoren angesaugt wird und sich im Lager eine Luftwalze mit absteigender Luft hinter den Kisten ausbildet. Die Simulation zeigt die Ausbildung dieser Walze ebenfalls. Beim Kohllager zeigen die Simulation und die Messungen, dass die Luftströmung an der Wandseite gegenüber von den Ventilatoren höher ist als direkt unter den Ventilatoren jeweils in den Spalten zwischen dem Kistenstapel und der Wand.

Anhand der Messungen in beiden Lagern wurde gezeigt, dass höhere Luftgeschwindigkeiten in den Bereichen der Räume auftreten, die direkt von den Ventilatoren angeblasen werden, als in den Bereichen, die außerhalb dieses direkten von den Ventilatoren erzeugten Luftstroms liegen. In der Simulation wurde in diesen Bereichen auch eine höhere Luftgeschwindigkeit mit ähnlichen Werten ermittelt. Die gemessenen Werte für die Luftgeschwindigkeit zwischen den Kistenstapeln und der Lagerwand zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Demzufolge eignet sich das CFD-Modell gut, um Luftströmungen in Kühllagern zu simulieren.

In weiteren Untersuchungen soll eine noch genauere geometrische Auflösung der Simulation durch die Differenzierung der Kistenblöcke (z.B. waagrechte Kistenblöcke im Apfellager unter Berücksichtigung der horizontalen Spaltenabstände) dazu beitragen, Informationen über geeignete Stapelanordnungen zu erhalten. Die thermischen Effekte auf die Luftströmung spielen bei schon abgekühlter Ware keine erhebliche Rolle. Sie sollen aber in weiteren Simulationen berücksichtigt werden. Außerdem sollen mit Messungen und Simulationen der Einfluss der Spaltenabstände der Kisten und die Drehzahlverringering der Ventilatoren auf die Verteilung der Luftgeschwindigkeit und Temperatur in Lagerräumen untersucht werden. Ziel ist es, den Energieverbrauch während der Lagerphase bei gleichbleibender Produktqualität zu senken.

Literatur

- Ambaw, A.; Delele, M. A.; Defraeye, T.; Ho, Q. T.; Opara, L. U.; Nicolai, B. M.; Verboven, P. (2013): The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: Past, present and future. *Computers and Electronics in Agriculture* 93, pp. 184–194
- Ambaw, A.; Bessemans, N.; Gwanpua, S.G.; Schenk, A.; De Roeck, A.; Verboven, P.; Nicolai, B. (2015): Evaluation of energy saving schemes in an apple cool store using computational fluid dynamics, Conference paper, IIR International Congress of Refrigeration, edition 24, article 636, Yokohama, Japan, August 16–22, 2015
- ANSYS (2016): CFX-Solver Theory Guide. Release 17.1; Inc. ANSYS: Canonsburg, PA, USA
- Duret, S.; Hoang, H. M.; Flick, D.; Laguerre, O. (2014): Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *International Journal of Refrigeration – Revue Internationale Du Froid* 46, pp. 17–25
- Duncan, S.; Kizlauskas, C. (2012): Vergleich von saugenden und drückenden Luftkühlern, *Kälte Klima Aktuell, Großkälte* 2012, S. 14–21.
- Kittemann, D.; McCormick, R.; Neuwald, D. A. (2015): Effect of high temperature and 1-MCP application on dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage. *European Journal of Horticultural Science* 80(1), pp. 33–38
- Moureh, J.; Tapsoba, S.; Derens, E.; Flick, D. (2009): Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts. *International Journal of Refrigeration – Revue Internationale Du Froid* 32(2), pp. 220–234

Nahor, H. B.; Hoang, M. L.; Verboven, P.; Baelmans, M.; Nicolai, B. M. (2005): CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores. *International Journal of Refrigeration – Revue Internationale Du Froid* 28(3), pp. 368–380

Verein Deutscher Ingenieure (2006): VDI-Wärmeatlas. Springer Verlag, Berlin, S. 311

Xie, J.; Qu, X. H.; Shi, J. Y.; Sun, D. W. (2006): Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation. *Journal of Food Engineering* 77(2), pp. 355–363

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Holger Scaar ist Doktorand, **Dr. Ulrike Praeger** und **Prof. Dr. Klaus Gottschalk** sind Wissenschaftler, **Dr. Martin Geyer** ist Abteilungsleiter der Abteilung Technik im Gartenbau am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (Wiss. Direktor: **Prof. Dr. Reiner Brunsch**), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, E-mail: hscaar@atb-potsdam.de

Dr. Reiner Jedermann ist Wissenschaftler am Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS) der Universität Bremen.

Danksagungen

Das Projekt „Strömungssensorgestützte Luftführung in Obst- und Gemüselagern – COOL“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (Förderkennzeichen VP2050828CL4). In dem 2,5 Jahre dauernden Forschungsprojekt, das vom Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) koordiniert wird, arbeiten 3 Forschungseinrichtungen und 5 Industriepartner aus den Bereichen Sensortechnik, Lagerung von Obst und Gemüse, Kühlraumbau, Kältetechnik sowie Großkistenfertigung zusammen.

Unser besonderer Dank gilt Herrn Oelrichs (Dithmarscher Kältetechnik GmbH, Marne), Herrn Jan Nagel in Marne und Herrn Thomas Giese (Havelfrucht GmbH, Werder) dafür, dass sie die Messungen in den Lagerräumen ermöglicht haben.