

Luftströmung in Großkistenlagern für Obst und Gemüse

Verbesserung der Raumauslegung und des Kühlraumbetriebs

(Quelle: https://www.kka-online.info/artikel/kka_Luftstroemung_in_Grosskisten-_lagern_fuer_Obst_und_Gemuese_3528695.html?fbclid=IwAR2ViT1e_OfNVCiAZ76p1AIISEmyYEVAAzC2vkkFHIO2IZfg42KrFmVSWg)

Maschinell gekühltes Obst und Gemüse wird nach der Ernte bis zu zehn Monate bei Temperaturen zwischen 0 und 4 °C und hoher relativer Luftfeuchte > 95 % in Räumen mit mehreren 100 t Lagerkapazität gelagert. Die Lagerung der Ware erfolgt üblicherweise in Großkisten, die bis zu 10 m Höhe gestapelt werden. Um die Feld- und Atmungswärme der lebenden Produkte abzuführen, ist Luftbewegung im Lager erforderlich. Im Verbundprojekt „COOL“ wurde untersucht, wie sich in Großkistenlagern der Energieverbrauch optimieren und die Produktverluste minimieren lassen.

Zur Gewährleistung optimaler Temperatur- und Feuchtebedingungen sollte in einem Großkistenlager die von den Ventilatoren ausgeblasene kalte Luft alle Produkte in den Großkisten gleichmäßig und in ausreichendem Maße umströmen. Während der Abkühlphase laufen die Ventilatoren kontinuierlich. In der späteren Lagerphase ist der Ventilatorbetrieb auf etwa sechs bis acht Stunden pro Tag reduziert, gekoppelt an den Betrieb der Kälteanlage. Üblicherweise laufen die Verdampferventilatoren mit konstanter Drehzahl. EC-Ventilatoren werden zunehmend für die Wärmeabfuhrseite eines Kältekreislaufes von Praxislagern an den Kondensatoren verwendet, aber selten für die Verdampfer in Kühlräumen. Die Kühlung erfordert einen erheblichen Energieverbrauch. Für die CA-Lagerung von Äpfeln werden pro Lagersaison und Tonne Lagerprodukt etwa 80-100 kWh Elektroenergie benötigt, wovon etwa 1/3 auf den Ventilatorbetrieb entfallen (Kittemann et al. 2015). Der Ventilatorbetrieb erhöht durch Wärmeeintrag auch den Kühlbedarf im Raum. Er kann bei Langzeitlagerung von Äpfeln eine größere Wärmelast verursachen als Transmissionswärme und Produktrespiration (Ambaw et al. 2016).

In dem Verbundprojekt „COOL“ kooperierten acht Forschungs- und Industriepartner aus den Bereichen Sensortechnik, Lagerung von Obst und Gemüse, Kühlraumbau, Kältetechnik sowie Großkistenfertigung mit dem Ziel, bei der Lagerung von gartenbaulichen Produkten die Ventilation hinsichtlich Energieverbrauch und Produktverlusten zu optimieren. Untersucht wurden Möglichkeiten zur Verbesserung der Raumauslegung und des Kühlraumbetriebs hinsichtlich Kistengestaltung, Stapelabständen, Ventilatoranordnung und Luftleitelementen in den Lagerräumen, Drehzahlregelung der Ventilatoren in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit am Produkt und Qualitätserhaltung bei Lagerung von Äpfeln mit verringerter Ventilator Drehzahl der Luftkühler.

Luftströmung in Praxislagern

Messungen und Simulationen in Praxislagern für Obst und Gemüse zeigten große Inhomogenität der Luftgeschwindigkeit innerhalb der Räume. In Bild 1 ist die Luftgeschwindigkeit bei praxisüblicher Ventilation im Kühlbetrieb eines Apfellagers mit drückendem Verdampfer (A) und eines Weißkohllagers mit saugenden Verdampfern und geneigter Raumdecke (B) dargestellt. Während die Geschwindigkeit üblicherweise am Luftaustritt des Verdampfers bei 5 m/s oder höher liegt, ist sie im Kistenstapel auf 1 m/s oder weniger reduziert. Über dem Kistenstapel ist die Luftgeschwindigkeit auch mehrere Meter entfernt von den Lüftern im Bereich des Luftaustritts der Ventilatoren erheblich höher als im Freiraum daneben.

Da Kühlräume mit Großkisten und Produktfüllung eine komplexe Geometrie aufweisen, wurde für die Strömungssimulation der Kistenstapel vereinfacht als Block mit einheitlicher Porosität dargestellt. Um die Strömungssimulationen zu validieren, wurde die Luftgeschwindigkeit mit Sensoren gemessen, die speziell für die Anforderungen in den Lagern neu entwickelt wurden. Es sollten sehr niedrige Luftgeschwindigkeiten in direkter Produktnähe in den Kisten erfasst sowie Messung und kontinuierliche Funkübertragung der Luftgeschwindigkeit und Richtung an unzugänglichen Positionen zwischen den Kisten ermöglicht werden.

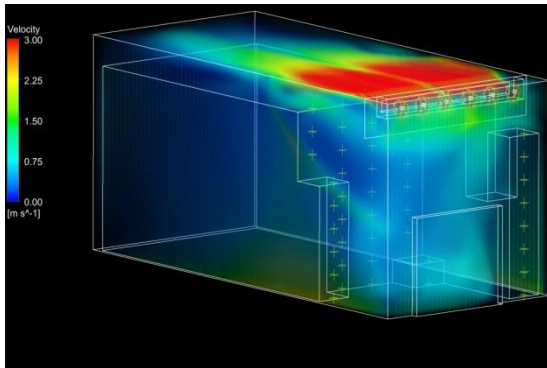


Bild 1

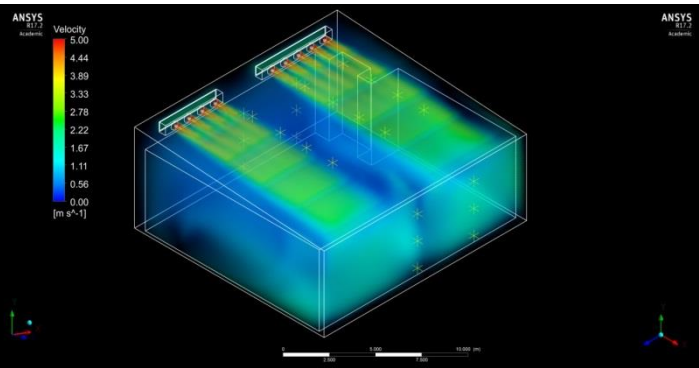


Bild 2

Strömungssensoren

Der ASL (Air speed logger, ATB Potsdam) für die Verwendung in den Kisten misst sehr niedrige Luftgeschwindigkeit (0-1,5 m/s) richtungsunabhängig im freien Raum zwischen vier Kunststoffkugeln, die tetraeder-förmig angeordnet sind und somit nebeneinanderliegende Äpfel simulieren (Bild 2, A) (Geyer et al. 2018, Praeger et al. 2019).

In den Spalten zwischen den Kisten wurde die Luftgeschwindigkeit und -richtung mit zwei-dimensionalen Funk-Strömungssensoren (WAMs – wireless anemometer, IMSAS Bremen) bestimmt, die an den Kistenwänden befestigt werden können. Durch ein neues Chip- und Gehäuse-Design (Hartgenbusch et al. 2020) wurde eine Auflösung der gemessenen Luftgeschwindigkeit unter 0,1 m/s erreicht. Das zylindrische Gehäuse hat einen Durchmesser von 65 mm und eine Höhe von 50 mm (Jedermann et al. 2018) (Bild 2, B).



Bild 2,A

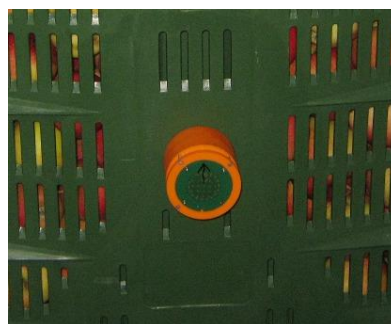


Bild 2,B

Durchströmung einzelner Großkisten

In den Lagerräumen verursachen die Großkistenstapel hohen Luftwiderstand, der insbesondere durch die relativ luftundurchlässigen Kistenböden und -wände gegeben ist. Bei praxisüblichen Kunststoffgroßkisten beträgt der Öffnungsanteil 7-10 % und hat damit eine wesentlich geringere Porosität als die Apfelfüllung mit einem Hohlraumanteil von 40 %. In einem Windkanal wurde der Einfluss veränderter Öffnungsfläche in den Kistenseitenwänden auf die Durchströmung einzelner Großkisten untersucht. Dazu wurde in den Kisten, die mit Kunststoffkugeln (\varnothing 70 mm) als Produktdummys gefüllt waren, an 18 Messorten mit den neuen ASL-Sensoren die Luftgeschwindigkeit bei stufenweise erhöhter Anströmgeschwindigkeit gemessen.

Die Erhöhung der Gesamtöffnungsfläche der herkömmlichen Kiste von 7 % auf 20 % bei einem neuen Kistenmodell bewirkte eine Verdoppelung der mittleren Luftgeschwindigkeit in der Kiste (Bild 3).



Bild 3

Einfluss von Ventilatorzahl und Raumgestaltung

Nach den anfänglichen Luftgeschwindigkeitsmessungen in Praxislagern und Kisten wurde in Versuchslagerräumen des Kompetenzzentrums Obstbau Bodensee (KOB) gezielt untersucht, wie sich die Raumgestaltung auf die Luftgeschwindigkeitsverteilung in Spalten zwischen den Kistenreihen und in den Kisten im Stapel auswirkt. Dabei wurden unterschiedliche Reihenabstände, Ventilatoranordnung und -anzahl, übliche und verringerte Ventilatorzahl, Luftabschottung unterhalb des Verdampfers und Luftumlenkung an der Wand gegenüber von den Verdampfern berücksichtigt. Es sollte auch überprüft werden, wie weit die Ventilatorzahl reduziert werden kann, ohne die Luftzirkulation im ganzen Raum erheblich zu beeinträchtigen.

Für die Veränderung von Reihenabständen und Ventilatorpositionen wurde ein Apfellaageraum mit 100 t Kapazität mit einer verschiebbaren Seitenwand und beweglichen Ventilatoren (Typ „AxiCOOL EC W3G450-SC28-35“, ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG) anstelle eines Luftkühlers ausgestattet. Die Drehzahl konnte über eine Steuerspannung stufenlos variiert werden mit maximaler Umdrehung von 1300 rpm. Der Raum wurde mit praxisüblichen Kunststoffkisten (120 cm x 100 cm x 78 cm, CargoPlast GmbH, Salem) gefüllt (Bild 4, A).



Bild 4, A

Jeweils ein ASL-Sensor wurde zwischen die Äpfel in Kisten etwa 20 cm unterhalb der Oberfläche an 24 Positionen in der ersten und zweiten Kistenreihe gelegt. Insgesamt wurden 31 WAMs an beiden Seiten der ersten Kistenreihe befestigt, wobei nur die eine Hälfte der Anemometer mit einem Radio-Interface ausgestattet war, die andere Hälfte mit einer USB-Verbindung (Bild 4, B).

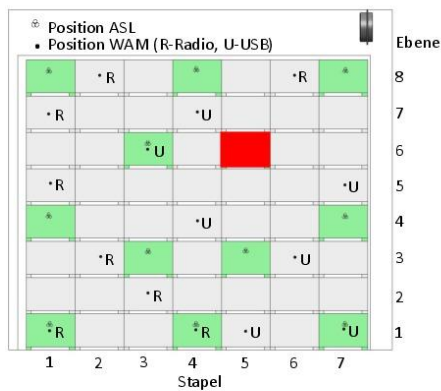


Bild 4, B

Die Luftgeschwindigkeit wurde bei abgestufter Ventilatorleistung von 100 %, 90 %, 76 % und 45 % gemessen, entsprechend einer Luftmenge im Raum von maximal 21.772 m³/h bis minimal 9.584 m³/h. Etwa 1 m vor den Ventilatoren in Ausblasrichtung über dem Kistenstapel betrug die mittlere Geschwindigkeit 10,5 m/s, 8 m/s, 5,5 m/s und 2,5 m/s bei abgestuften Ventilatorleistungen. Bei Verwendung von drei Ventilatoren ergab sich eine verringerte Luftmenge von 16.200 m³/h bei 100 % Ventilatorleistung und 6.900 m³/h bei 45 % Ventilatorleistung.

Für die Variation der Kistenstapelung wurden folgende Reihenabstände gewählt: zwischen den Kisten 10 cm bzw. kein Abstand bei Blockstapelung, zwischen seitlicher Wand und Kistenstapel 10 cm oder 30 cm und eine Anordnung mit zwei direkt aneinander gestellten Doppelreihen mit 10

cm Abstand in der Mitte dazwischen. Ergänzend wurde die Luftgeschwindigkeit mit Reihenabstand von 10 cm und jeweils nur sechs statt sieben Stapeln/Reihe gemessen, so dass zwischen der den Ventilatoren gegenüberliegenden Wand und den ersten Kistenstapeln ein Abstand von 140 cm blieb.

Bei den drei Stapelvarianten „Reihenabstand 10 cm und Wandabstand 30 cm“, „Reihenabstand 10 cm / Wandabstand 10 cm“, „Doppelreihe mit 10 cm Abstand in der Mitte“ wurde die Luftgeschwindigkeitsverteilung jeweils bei Verwendung von vier Ventilatoren über den Kistenreihen mit drei Ventilatoren über den Spalten verglichen.

Bei 100 % Ventilatorleistung bildeten sich in den vertikalen Spalten in Ausblasrichtung der Ventilatoren Luftwalzen mit relativ gleichmäßiger Luftgeschwindigkeit über die Höhe im Gegensatz zu der Luftgeschwindigkeit in den Kisten. Bei verringerter Ventilatorleistung blieb die Luftzirkulation im Spalt erhalten, jedoch mit verringerter Geschwindigkeit (Bild 5).

Bild 6 zeigt beispielhaft einen Luftgeschwindigkeitsverlauf zwischen den Früchten in einer Kiste oben im Stapel in der 6. Ebene der 1. Reihe bei abgestufter Luftmenge mit Messdauer von jeweils 15 Minuten. Eine Verringerung der Luftmenge im Raum bewirkte eine direkte Anpassung der Luftgeschwindigkeit zwischen den Früchten an allen Messpositionen.

In den Kisten betrug die mittlere Luftgeschwindigkeit nur etwa 1/10 des Wertes in den vertikalen Spalten. In den obersten Kisten war sie etwa siebenmal so hoch wie in den Kisten in Bodennähe. Die Reihenabstände hatten insgesamt einen relativ geringen Einfluss auf die Durchströmung der Kisten. Die mittlere Luftgeschwindigkeit in den Großkisten war bei 100 % Ventilatorleistung etwas höher bei gleichmäßigen Reihenabständen von 10 cm (0,09 m/s) im Vergleich zu Blockstapelung (0,07 m/s) und konnte durch einen großen Freiraum an der Wand gegenüber von den Ventilatoren erhöht werden (0,12 m/s). An allen Messpositionen in den Kisten wurde bei den verschiedenen Stapelvarianten auch bei reduzierter Ventilatorleistung auf 40 % Luftbewegung gemessen und die Luftzirkulation wurde aufrechterhalten. Allerdings war die Luftgeschwindigkeit an manchen Positionen mit Werten < 0,001 m/s vom Rauschen des Sensors kaum zu unterscheiden (Bild 7).

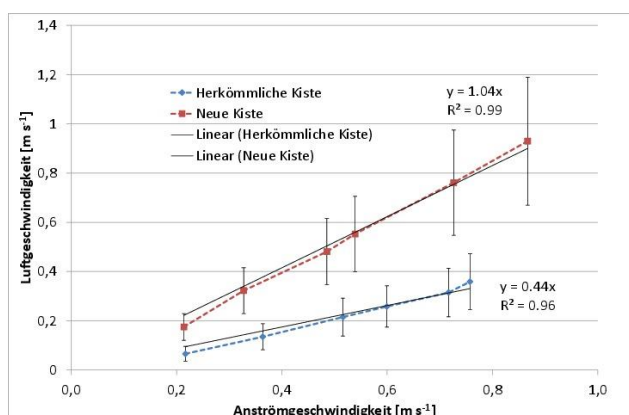


Bild 7

Die Anordnung von drei Ventilatoren über den Spalten im Vergleich zu einer mit vier Ventilatoren über den Kistenreihen veränderte die Luftgeschwindigkeit an den unteren Messpositionen im Kistenstapel nur wenig, reduzierte sie aber teilweise in Kisten der oberen Ebenen im Stapel. In einem Versuchsraum mit 50 t Äpfeln mit drückendem Verdampfer verbesserte eine Luftabschottung in Form einer Plane unterhalb des Verdampfers (Bild 8, A) die Gleichmäßigkeit der Luftströmung im Raum. Eine Luftumlenkung oben an der Ekkante von Raumdecke und

Seitenwand gegenüber von den Ventilatoren hatte dagegen keine Auswirkung auf die Luftgeschwindigkeitsverteilung im Raum (Bild 8, B).



Bild 8, A



Bild 8, B

Energieeinsparung bei der Obstlagerung

Um den Einfluss reduzierter Luftbewegung auf den Energieverbrauch und die Qualitätserhaltung von Äpfeln zu untersuchen, wurden am KOB über zwei Jahre CA-Lagerversuche durchgeführt, wobei Kühlung mit üblicher Ventilatorleistung (100 %) verglichen wurde mit auf 50 % reduzierter Ventilatorleistung während der Lagerphase nach der Abkühlung. Die Verringerung der Ventilatorleistung auf 50 % bewirkte eine Energieeinsparung von 40 % gegenüber üblichem Ventilatorlauf. Die Gesamtlaufzeit der Kühlung wurde um 13 % verringert, möglicherweise auf Grund des geringeren Wärmeeintrags der Ventilatormotoren. Positiv auf verringerten Energieverbrauch wirkte sich auch der Einsatz von EC-Motoren im Vergleich zu AC-Motoren für den Ventilatorbetrieb aus. Die Qualität der Äpfel war nach Lagerung bei verringerter Ventilatorleistung nicht beeinträchtigt, d.h. es gab keine signifikanten Unterschiede der Festigkeit, des Masseverlusts und des Zucker- und Säuregehalts.

Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz sehr inhomogener Luftgeschwindigkeitsverteilung in Kühllagern mit Obstgroßkisten ein großes Energieeinsparpotenzial durch verringerte Ventilatorleistung in der Langzeitlagerphase nach der Abkühlung besteht. Die Strömungsuntersuchungen an den Einzelkisten lassen vermuten, dass veränderte Kistengestaltung eine weitere Verringerung der Ventilatorleistung in den Räumen bei ausreichender Luftbewegung am Produkt ermöglichen würde.

Für eine Umsetzung in die Praxis müsste die Eignung der Kühler für verringerten Luftumsatz überprüft werden bzw. eine Anpassung erfolgen. Da die Lagerversuche mit sehr hohem Aufwand verbunden sind, sind zur Bearbeitung weiterer Fragestellungen Simulationen erforderlich mit Berücksichtigung der Klimafaktoren Temperatur und Luftfeuchte, z.B. zur Untersuchung der Wirkung veränderter Kistengestaltung und anderer Raumkonstellationen. Die neu entwickelten Luftströmungssensoren ermöglichen die Validierung von Modellen zu Luftgeschwindigkeit und Temperaturverteilung in Produktschüttungen zwischen den Früchten.

Projektpartner

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bio-ökonomie e.V. (ATB), Potsdam,
Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee (KOB), Ravensburg
Universität Bremen, Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS)
CargoPlast GmbH, Salem
EHW Elektronik GmbH, Landsberg
Micro-Sensys GmbH, Erfurt
Plattenhardt + Wirth GmbH, Meckenbeuren
Güntner AG & Co. KG, Fürstenfeldbruck

Förderung

Das Projekt „Strömungssensorgestützte Luftführung in Obst- und Gemüselagern – COOL“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (Förderkennzeichen VP2050828CL4). Wir danken allen Kollegen und Kolleginnen aus den Forschungsinstituten und Unternehmen, die an der Sensorentwicklung und Versuchsdurchführung beteiligt waren.

Literatur

- > Ambaw, A., Bessemans, N., Gruyters, W., Gwanpua, S. G., Schenk, A., De Roeck, A., Delele, M. A., Ver-bouen, P. (2016): Analysis of the spatiotemporal temperature fluctuations inside an apple cool store in response to energy use concerns, *International Journal of Refrigeration – Revue Internationale Du Froid* 66, 156-168.
- > Geyer, M., Praeger, U., Truppel, I., Scaar, H., Neuwald, D. A., Jedermann, R., Gottschalk, K., Measuring Device for Air Speed in Macroporous Media and Its Application Inside Apple Storage Bins (2018): *Sensors* 18(2/576), 1-13.
- > Hartgenbusch, N.; Borysov, M.; Jedermann, R. and Lang, W. (2020): Characterization and design evaluation of membrane-based calorimetric MEMS sensors for two-dimensional flow measurement. In: *IEEE Sensors Journal*. (doi:10.1109/JSEN.2020.2965332)
- > Jedermann, R., Hartgenbusch, N., Borysov, M., Lang, W. (2018): Design parameters for the housing of two-dimensional air flow sensors, *IEEE Sensors Journal*, 18(24), 10154-10162.
- > Kittemann, D., McCormick, R., Neuwald, D. A. (2015): Effect of high temperature and 1-MCP application or dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage, *European Journal of Horticultural Science* 80(1), 33-38.
- > Praeger, U.; Scaar, H.; Truppel, I.; Gottschalk, K.; Geyer, M. (2019): Neuer Datenlogger zur Messung von Luftströmungen im Lager, *Kartoffelbau*, 70 (4), 41-45.
- > Scaar, H., Praeger, U., Gottschalk, K., Jedermann, R., & Geyer, M. (2017): Experimentelle und numerische Analyse der Luftströmung in Obst- und Gemüselagern. *Landtechnik – Agricultural Engineering*, 72(1), 1-527 12.