

Fachveröffentlichung

Raumtemperatur in Kühllhäusern und Auslegung der Luftkühler

Themenschwerpunkte:

- Ausgangspunkt für Auslegungen von Luftkühlern: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Kühlgut
- Festlegung der Kühlkonzepte in Abhängigkeit von Kühlgut, Abmessungen des Lagers, Kühllast und Logistik
- Strömungssimulation: Kommerzielle Berechnungsprogramme liefern korrekte Ergebnisse für Raumströmung in Kühllagern.
Nutzung des Modells der isotropen Schüttung (Modell im Computercode FLUENT)
- Auslegungsbeispiel eines Tiefkühlagers mit Simulationsberechnungen: Berechnung der Luftgeschwindigkeit, des Drucks, der Temperatur und der Luftturbulenzen. Darstellung der Luftströmung in Schnittebenen liefert Information über maximale Lufttemperatur, Luftströmung, etc.
- Fazit: Optimierung der Auslegung durch Strömungssimulation:
Berechnung der Raumströmung, Kühlbauart und -anordnung und der Auslegungsparameter anhand der numerischen Simulation
Frühzeitige Kostenoptimierung

Sowohl die Definition als auch die Größe der Raumtemperatur in Kühllhäusern haben entscheidenden Einfluss auf die Auslegung der Luftkühler. In [1] wurde gezeigt, dass die Raumtemperatur allein nicht ausreicht, einen optimalen Luftkühler auszulegen. Es wurde außerdem nachgewiesen, dass der Spielraum für den Volumenstrom der Kühlluft sehr groß sein kann und seine optimale Wahl sehr viel Erfahrung erfordert. Das ergibt sich daraus, dass unser Wissen über den Einfluss der Abmessungen der Kühlräume, der Lastverteilung der Anordnung der Kühler, das Zusammenwirken der Zu- und Abströmung am Kühler mit der Raumströmung im Lager, der Lufteintrittsgeschwindigkeit am Kühleraustritt usw. noch ungenügend ist.

Die heute verfügbaren Computercodes zur Berechnung der nicht isothermen Raumströmung einschließlich Stofftransport und darüber hinausgehend des Wärmetransports durch Leitung und Strahlung in Gebäuden bieten die Möglichkeit, bei Planung und Betrieb wesentliche Verbesserungen zu erreichen (siehe [3] bis [5], [8] und [9]). Allerdings ist es zurzeit nicht möglich, die Wärme- und Stofftransportvorgänge in Kaltlagern bis hin zu den Temperaturen in den Paletten zu berechnen. Deshalb wird vorteilhaft mit vereinfachten Modellen und Teilmodellen gearbeitet oder mit Experimenten kombiniert.

Eine weitere Problematik besteht in der Zeitabhängigkeit (Dynamik) infolge der täglichen und jahreszeitlichen Veränderungen des Klimas, der Be- und Entladungszyklen der Lager und der Regelung der Kälteanlagen. Um unter allen Bedingungen zu sicheren Auslegungen zu kommen, ist es notwendig, bei der Bearbeitung die thermischen Lasten zu variieren.

Festlegung der Lagerungsbedingungen

Ausgangspunkt für Auslegung von Kühllhäusern sind die Lagerungsbedingungen, das heißt die Lufttemperatur, Luftfeuchte und gegebenenfalls die Zusammensetzung der Atmosphäre in unmittelbarer Umgebung der gelagerten Güter [2]. In Hinblick auf die Austrocknung z. B. von Obst und Gemüse ist auch die Luftgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Im Weiteren wird angenommen, dass die einzuhaltenden Lagerungsbedingungen bekannt sind und bei Planung und Betrieb der Lager eingehalten werden sollen.

Die Festlegung der Lagerungsbedingungen ist in der Praxis eine schwierige Aufgabe für den Betreiber des Lagers, denn sie beeinflusst stark die Funktionserfüllung des Lagers und die Investitions- und Betriebskosten der Kühler.

Da die Güter in der Regel in Paletten, Körben usw. gelagert werden, besteht ein Unterschied zwischen den Temperaturen, Feuchten, Stoffkonzentrationen und Geschwindigkeiten an den Produkten in der Palette und in der Umgebung, der bei der Auslegung berücksichtigt werden sollte. Auch hierfür muss der Betreiber die Vorgaben machen.

Festlegung der Kühlkonzepte, Kühllasten und Abmessungen

Bei der Wahl von Konzepten für neue Kühllhäuser wird in der Regel von den zu lagernden Produkten, der Logistik, der verfügbaren Grundfläche usw. ausgegangen. Erst danach und leider noch viel zu selten wird nach den optimalen Luftkühlern, ihrer Anordnung, ihren Auslegungsparametern gefragt. Ist die Anordnung der Luftkühler bereits endgültig festgelegt, sind möglicherweise optimale Verhältnisse nicht möglich.

Strömungssimulation

Hinsichtlich der numerischen Lösung der Gleichungen für die Strömung und den Wärmetransport mit den entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen wird auf ([3] Abschnitt 8) und das Handbuch für den verwendeten Computercode (FLUENT) verwiesen. Es gilt als gesichert, dass für eine gegebene meist etwas vereinfachte Geometrie und Anfangs- und Randbedingungen, die in Anlehnung an VDI 2078 (Kühllastregeln) bestimmt werden, die verwendeten kommerziellen Computerprogramme bei richtiger Handhabung auch richtige Ergebnisse für die Raumströmung in Kühllagern liefern. Zur Modellierung der Strömung und Einbringung der Wärme bei teilweise durchströmten Einbauten (Versperrungen) wie den aus Paletten gebildeten Wänden wird vorteilhaft mit dem Modell der „isotropen Schüttung“ (power law – Modell in FLUENT) gearbeitet.

Auslegungsbeispiel

Für die Demonstration der Auslegung der Kühler werden die bereits früher beschriebenen Simulationsrechnungen für das Tiefkühlager bei REWE in Langel ausgewählt [4] und [5]. Es hat ein Seitenverhältnis Höhe : Breite : Länge = 1 : 2 : 7 und ist somit sehr langgestreckt. Die Isolierkühler sind hier an der rechten Stirnwand etwa in halber Höhe der Halle angeordnet, siehe Bild 1. Die Kühlluft wird von je 3 Axialventilatoren gleichmäßig verteilt oberhalb oder unterhalb der Klappe ausgeblasen. Die Kühlleistung beträgt 110 kW.

Die Simulationsrechnungen liefern die Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung, den Druck, die Temperatur und zwei Turbulenzgrößen. Die Skalierung ist so gewählt, dass große Werte rot und kleine Werte blau gekennzeichnet werden. Von den Berechnungsergebnissen ausgehend lassen sich in diversen Schnitten die gewünschten Verteilungen darstellen. Durch systematische Variation der Schnittebenen gewinnt man vielfältige Informationen z. B. die maximale Lufttemperatur als besonders wichtige Größe. Die Kühlluft fällt beim betrachteten Beispiel zum Boden, strömt zur gegenüberliegenden Wand und im Bereich der Decke zurück zum Kühler. Die maximale Temperatur außerhalb der Wandgrenzschichten tritt im Dachbereich an der den Kühlern gegenüberliegenden Wand auf.

Auslegung optimaler Kühler

Ausgehend von der vorgegebenen maximalen und minimalen Kerntemperatur in den Paletten ($t_{K \max}$ und $t_{K \min}$), der durch numerische Simulation ermittelten maximalen Lufttemperatur im Lager außerhalb der Paletten (t_{\max}) und der flächengemittelten Ein- und Austrittstemperatur des Lagers (t_{Aus} , t_{Ein}) können in Anlehnung an Meffert [6] und [7] ein Strukturkoeffizient CC für die Übertemperatur der Kühlluft im Lager und ein Produktkoeffizient PC für die Übertemperatur in den Paletten gebildet werden.

Strukturkoeffizient:

$$CC = \frac{t_{\max} - t_{\text{Ein}}}{t_{\text{Aus}} - t_{\text{Ein}}} = 1 + \frac{t_{\max} - t_{\text{Aus}}}{t_{\text{Aus}} - t_{\text{Ein}}} \quad (1 < CC < \infty)$$

Produktkoeffizient:

$$PC = \frac{t_{K \max} - t_{\max}}{t_{K \max} - t_{K \min}} \quad (0 \leq PC \leq 1)$$

Damit errechnet man den Kühlluftvolumenstrom:

$$\dot{V}_{\text{Ein}} = \frac{CC}{1-CP} \frac{\dot{Q}}{(\rho c_p)_{\text{Ein}} (t_{K \text{ max}} - t_{K \text{ min}})}$$

\dot{Q} = Kältebedarf (W); $(\rho c_p)_{\text{Ein}} \dot{V}_{\text{Ein}}$ = Wärmekapazitätsstrom am Eintritt in das TK-Lager (W/K); \dot{V}_{Ein} = Volumenstrom am Eintritt in das TK-Lager (m³ / s).

Der Strukturkoeffizient kennzeichnet die Güte der Luftströmung im Kühllager und wird durch numerische Simulation bestimmt. Er enthält den Einfluss der Geometrie des Lagers und dessen Einbauten, der Anordnung der Kühler, der Geschwindigkeitsverteilungen am Kühleraustritt und der Verteilung der Wärmeströme. Je größer er ist, um so ungünstiger ist die Luftführung und um so größer wird der Kühlluftvolumenstrom, optimal ist CC=1,0.

Der Produktkoeffizient wird in der Regel ausgehend von der Untersuchung des zeitabhängigen Abkühlverhaltens festgelegt und bei der Strömungssimulation nicht verändert.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Strömungssimulation für die beiden Isolierkühler in Hinblick auf die Kühlerauslegung zusammengestellt. Für die Übertemperaturen in der Palette werden ideale Verhältnisse angenommen. Da die Differenz der zulässigen Produkttemperaturen nicht von den Parametern des Lagers abhängen, bedeutet das: beim Isolierkühler oben ausblasend liegt der notwendige Kühlluftstrom 115% über dem minimalen, und beim Isolierkühler unten ausblasend 95% über dem minimalen.

Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass nach Festlegung der zulässigen Produkttemperaturen und der Übertemperaturen in der Palette die Abmessungen des Lagers, die Größe und Verteilung der Kühllasten, die Anordnung und Austrittsgeschwindigkeitsverteilung der Kühler auch kleine Temperaturdifferenzen einen wesentlichen Einfluss auf den Kühlluftvolumenstrom und damit auf die Investitions- und Betriebskosten des Lagers haben können.

Tabelle 1 Zusammenstellung der Ergebnisse zur Kühlerauslegung

Isolierkühler	oben ausblasend	unten ausblasend
($t_{K \text{ max}} - t_{K \text{ min}}$) in K	4,3	3,9
($t_{\text{Aus}} - t_{\text{Ein}}$) in K	2,0	2,0
($t_{\text{max}} - t_{\text{Aus}}$) in K	2,3	1,9
($t_{K \text{ max}} - t_{\text{max}}$) in K	0,0	0,0
Strukturkoeffizient CC	2,15	1,95
Produktkoeffizient PC	0	0

Zusammenfassung

Durch Anwendung der Strömungssimulation wird es möglich, die bisherige Unsicherheit bei der Optimierung der Luftkühler zu überwinden.

Ausgangspunkt aller Untersuchungen sind die Lagerungsbedingungen, das heißt die maximale und minimale Kerntemperatur in den Paletten und die Übertemperatur in der Palette gegenüber der Umgebung für die zu lagernden Produkte.

Bei der Erarbeitung des Konzeptes für ein neues Kühlhaus wird in der Regel von den zu lagernden Produkten, der Logistik, der verfügbaren Grundfläche usw. ausgegangen.

Bei der kältetechnischen Planung werden mit Hilfe der numerischen Simulation der Raumströmung, die Bauart, Anordnung und Auslegungsparametern bestimmt. Zur Kennzeichnung der Qualität der Raumluftrömung in Kühlslagern wird dabei der Strukturkoeffizient verwendet.

Durch diese Verfahrensweise ist man bereits frühzeitig in der Lage, die Kosten für das Lager einschließlich Kühler zu optimieren. Wünschenswert sind systematische Untersuchungen zu aus kältetechnischer Sicht optimalen Kühlhäusern.

Am Beispiel des Tiefkühlslagers bei REWE in Langel, für das bereits früher umfangreiche Simulationsrechnungen im Auftrag der Firma Güntner ausgeführt wurden, wird die dargestellte Methode erläutert und gezeigt, dass bei Einhaltung der zulässigen Produkttemperaturen und der Übertemperaturen in der Palette aus Sicht der Raumluftrömung ein beträchtliches Verbesserungspotential vorhanden ist.

Literatur

- [1] Handschuh, R.: Auswahl von Lamellenschlangen-Luftkühlern. Anhang zu „Wärmetauscher: Eurovent „Certify All“ setzt Maßstäbe“
- [2] Mann, G.; Hofer, B.: Kühlraum-Lastfaktoren. Reihe Luft- und Kältetechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, 1977
- [3] Baumgarth, S.; Hörner, B.; Reeker, J.: Handbuch der Klimatechnik Band 2: Anwendungen. C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2003
- [4] Döge, K.: Berechnung der Luftströmung in Tiefkühlslagern und Isolierkühlern. Güntner Symposium 2002
- [5] Handschuh, R., Döge, K.: Die Strömung in Tiefkühlslagern mit Isolierkühlern. Ki Luft- und Kältetechnik (2003), S. 173-179
- [6] Meffert, H. F. Th.: Die Qualität der Kühlung in Lagerräumen und Transportmitteln. DKV Tagungsbericht 1992, Bd. III, S. 123-135
- [7] Meffert, H. F. Th.: Prediction of Cargo Temperatures in Refrigerated Transport Equipment – Application of the Configuration Coefficient: Stepwise Control and Heat Generation Cargo. 29th International Congress of Refrigeration, IIR / IIF, Sydney, 1999, Volume iV, (paper 384)
- [8] Döge, K.; Ehle, A.: Die Kühlluftströmung in Hochregallagern. Ki Luft- und Kältetechnik (1996), S. 160-164
- [9] Döge, K.; Wobst, E.: Lebensmittelkühlung ganzheitlich betrachtet. VDI Berichte1351, VDI Verlag Düsseldorf, 1997

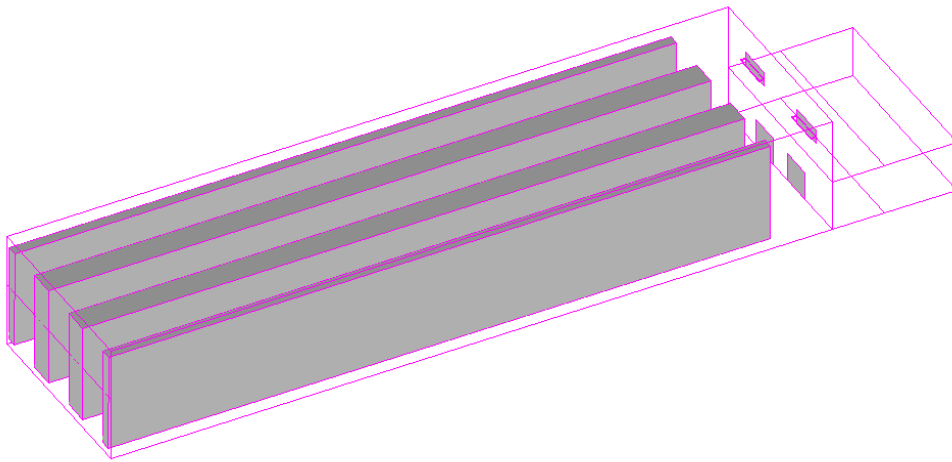


Bild 1 Darstellung des Berechnungsgebietes und der Koordinaten für das Tiefkühlager bei REWE in Langel

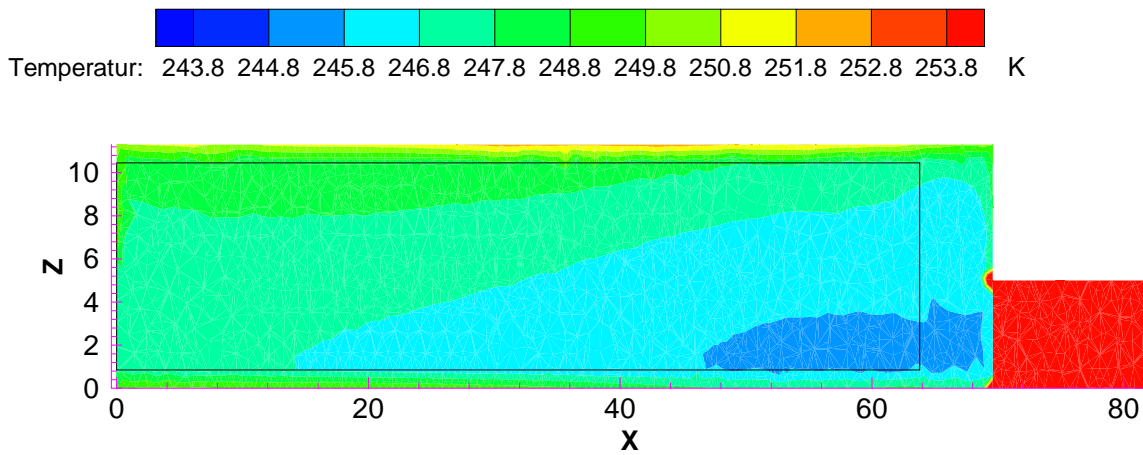


Bild 2 Temperaturverteilung in einem Längsschnitt $y=9,30$ m durch einen Gang, Isolierkühler unten ausblasend Türen zu

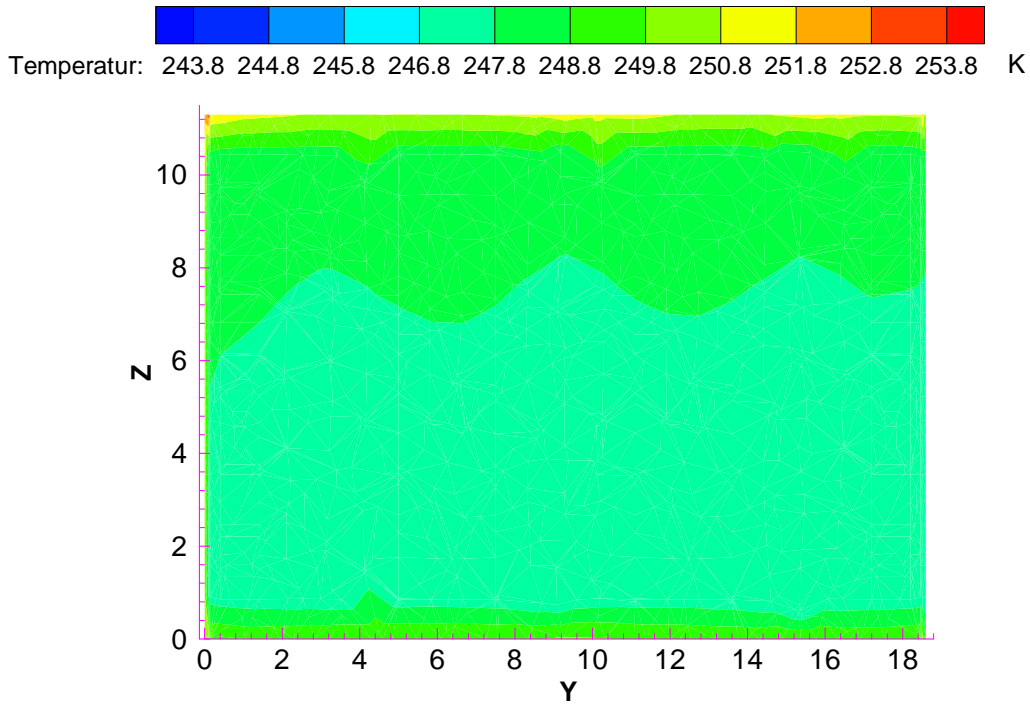


Bild 3 Temperaturverteilung in einem vertikalen Schnitt bei $x=6\text{m}$, Isolierkühler unten ausblasend, Türen zu