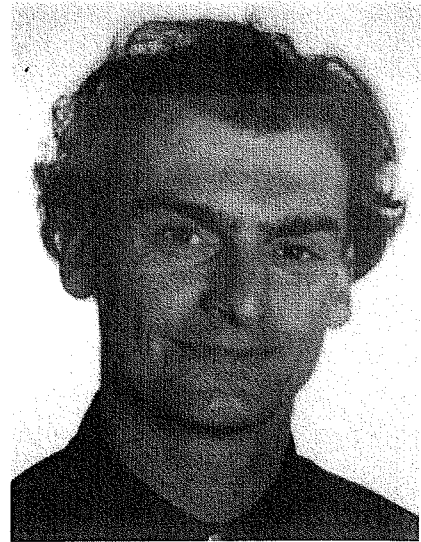


PROGRAMM ZUR DIMENSIONIERUNG DER KÜHLFLÄCHEN AN ZYLINDRO- KONISCHEN TANKS



Peter Gross *

Zylindro-konische Gär- und Lagertanks (ZKG und ZKL), auch Uni-Tanks genannt, sind heute aus modernen Brauereien auf der ganzen Welt nicht mehr wegzudenken. Sie haben sich sehr gut bewährt, bieten nicht nur vom Handling große Vorteile, sondern auch, was die Qualität des Bieres angeht, eine hohe Sicherheit. Sie geben höchstens noch bei der Dimensionierung von Inhalten, Durchmessern, Höhen und dem Bereich der Kühlung Anlaß zu Diskussionen.

Die Tatsache, daß diese Tanks nicht serienmäßig gefertigt werden, läßt das Problem der richtigen Auslegung von Kühlzonen deutlich hervortreten. Noch deutlicher wird diese Problematik durch die Tatsache, daß bei jeder Brauerei andere Parameter zur Berechnung der Kühlzonen gelten.

Die Problematik bei der Berechnung von Kühlflächen an zylindrokonischen Tanks wird schon ersichtlich durch die Tatsache, daß es bis vor kurzem alltäglich war, die Kühlzonen über Erfahrungswerte von bestehenden Tankanlagen auszulegen oder überschlägige Rechnungen durchzuführen und diese durch die Unsicherheit mit einem mehr oder weniger großen Sicherheitszuschlag zu versehen.

Dies führt in fast allen Fällen der Berechnung dazu, daß die Tanks meist mit einer viel zu großen Kühlfläche gefahren werden, was mehrere Nachteile mit sich bringt.

- Die Anlage fährt nicht kontinuierlich, dies bedeutet, der Kältemediumfluß wird dauernd unterbrochen, die Magnetventile sind im ständigen Einsatz.
- Die Hefe kann während der Gärung einen Kälteschock bekommen und damit an Gäraktivität verlieren.
- Es besteht die Gefahr, daß das Jungbier am Tankmantel einfriert.

* Maschinenbaustudium an der FH-Konstanz, Fachbereich: Konstruktion und Verfahrenstechnik, Abschluß Feb. 94 mit dem Titel eines Diplom-Ingenieur (FH), Okt. 1992 - Mai 1994 Ausbildung zum Europäischen Schweißfachingenieur, Abschluß Mai 94 mit dem Titel ESFI. 3-jährige Lehrzeit für den Beruf des Maschinenschlossers bei der Firma HKS-Maschinenbau GmbH in Singen, 3-monatiges Praktikum bei der Firma Aluminiumschweißwerke (ASS) in Schlieren (CH). 3-monatiges Praktikum bei der Firma Handtmann in Biberach-Riß. 6-monatiges Praxissemester bei der Firma Huppmann in Kitzingen. 4-monatiges Praktikum bei der Dorada Brauerei in Teneriffa (Spanien), seit Okt. 94 angestellt bei der Firma Gross Behälter und Anlagenbau in den Bereichen Konstruktion, Entwicklung, Berechnung, EDV und Kundenbetreuung.

VORGEHENSWEISE ZUR BERECHNUNG DER KÜHLZONEN

Die konstruktive Festlegung

Die konstruktive Festlegung beinhaltet in der Hauptsache die Definition verschiedener Eckdaten.

- Eckdaten des Tankes: Durchmesser, zylindrische Höhe, Gesamthöhe, mittlere Wanddicke, Konuswinkel, Krepennradius und Nutzinhalt.
- Eckdaten der Kühlzonen: Halbrohrdurchmesser, Teilung, Spaltbandbreite, Kühlprofilfläche, Kühlmedium und je nach Kühlmedium für NH_3 die Verdampfungs-temperatur und für die anderen Ein- und Austrittstemperaturen.
- Eckdaten der Würze/des Bieres: Bieranfangs- und Bierendtemperatur, Kühldauer und Extraktabbau.
- Allgemeine Eckdaten sind: zu verwendendes Material, Wärmeleitfähigkeit, Verschmutzungs-Faktor, zusätzlicher Wärmewiderstand, Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) der Isolierung, Umgebungslufttemperatur.

Die Berechnung

Mit einem Erfahrungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten, der sorgfältig bestimmt wurde, wird jetzt eine erste grobe Berechnung durchgeführt. Diese ist erforderlich, da für die genaue Ermittlung des so wichtigen Wärmedurchgangskoeffizienten Daten wie die Strömungsgeschwindigkeiten, Dimensionierung von bestimmten Baugruppen und deren Verhältnisse zueinander, erforderlich sind.

Aus dieser ersten groben Berechnung und den sich daraus ergebenden Wärmeaustauschflächen erfolgen die genauen Berechnungen der Wärmeübergangskoeffizienten an den einzelnen Stellen. Diese Berechnungen werden mit Formeln, die ausnahmslos aus dem VDI-Wärmeatlas (sechste erweiterte Auflage Jahrgang 1991) stammen, ausgeführt.

Die so errechneten exakten Wärmeaustauschflächen sollten nur um ca. ± 5 Prozent von der aus den Konstruktionsmaßen errechneten differieren. Je nach Notwendigkeit kann mit einem Sicherheitszuschlag gerechnet werden. Bei Verschmutzungsgefahr der Kühlzonen, wie z.B. durch Ablagerungen, sind der Wärmeleitwiderstand und die Stärke der Schmutzschicht bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten zu berücksichtigen.

In den meisten praktischen Fällen sind die Oberflächentemperaturen der Wandungen nicht bekannt, sondern nur die Temperaturen der im Wärmeaustausch sich befindlichen Medien. Für eine genaue Berechnung, besonders bei freier Konvektion, sind diese Werte aber von Wichtig-

keit. Deshalb ist vorab eine Annahme zu treffen, die sich am Ende der Berechnung bestätigen muß.

Nachdem die sich aus der festgelegten Konstruktion ergebenden Wärmedurchgangszahlen errechnet sind, muß entschieden werden, ob die über das Programm dimensionierten Kühlflächen in Ordnung sind oder verändert werden müssen. Ist dies der Fall, muß die Berechnung so oft wiederholt werden, bis die errechneten und konstruierten Kühlflächen den tatsächlichen Erfordernissen genügen.

Kundenwünsche

Da Kunden oft aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen heraus sehr große Tanks mit ungünstigen Durchmesser-Höhen-Verhältnissen und sehr kurzen Abkühlzeiten fordern, kann es vorkommen, daß die Tankoberfläche für die Unterbringung der Kühlflächen nicht ausreicht. Ist dies

der Fall, müssen die Eckdaten, die zur Leistungsermittlung vorgegeben wurden, nach Rücksprache mit dem Kunden modifiziert werden.

Resümee

Es wird hier schon deutlich, daß eine exakte Kühlflächenbestimmung „von Hand“ ein äußerst aufwendiges Unterfangen darstellt und auch bei genauester Anwendung der im VDI-Wärmeatlas genannten Formeln in der Praxis kaum durchführbar ist.

Das daraufhin entwickelte Berechnungsprogramm, welches im Hause Gross seit einigen Jahren im Einsatz ist, läßt nun eine genaue Berechnung, unter Berücksichtigung der individuellen Anwendungsdaten, zu.

PROGRAMMANNAHMEN

Bei der Berechnung grundlegender Werte, wie Wärmeübergangskoeffizient und Wärmedurchgangskoeffizient, wurde der iterative Berechnungsweg gewählt. Eine exakte Berechnung ist in diesem Fall nicht möglich, da einige Annahmen im Vorfeld der Arbeit getroffen wurden, die die absolute Genauigkeit der Berechnungen einschränken.

Dies sind wie folgt:

- Vernachlässigung von Fertigungstoleranzen des Tankes.
- Vernachlässigung von Füllstandtoleranzen im Tank.
- Annahme, daß die freie Konvektion sofort einsetzt.
- Bereiche am Tank ohne Kühlung werden bei der Berechnung der Konvektion vernachlässigt (Wirbelbildung).
- Die Konvektion im Tank wird als vollständig ausgebildete turbulente Strömung angenommen.
- Für die erste Kühlflächenberechnung wird Gegenstrom angenommen.

DER BERECHNUNGSABLAUF DES PROGRAMMES

Als Grundgleichung gilt zur Berechnung der Wärmetauscherfläche die Formel:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\theta_m \quad (3.1)$$

Gültigkeitsbereich der Formel: Die Formel (3.1) gilt für die Verhältnisse stationäre Wärmeübertragung und ebener Wärmeaustausch zwischen den Flächen. Die Erfahrungen in der Anwendung dieser Formel bei instationärer Wärmeübertragung an gekrümmten Flächen läßt die Erweiterung des Gültigkeitsbereiches bei der hier vorliegenden Problemstellung zu.

Um den Gesamtwärmestrom des Tankes zu berechnen, bedarf es nur einer einfachen Addition, die Formel hierfür lautet:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_G + \dot{Q}_V \quad (3.6)$$

\dot{Q} - Gesamtwärmestrom [J/s, W]
 \dot{Q}_A - zu übertragender Wärmestrom [J/s, W]

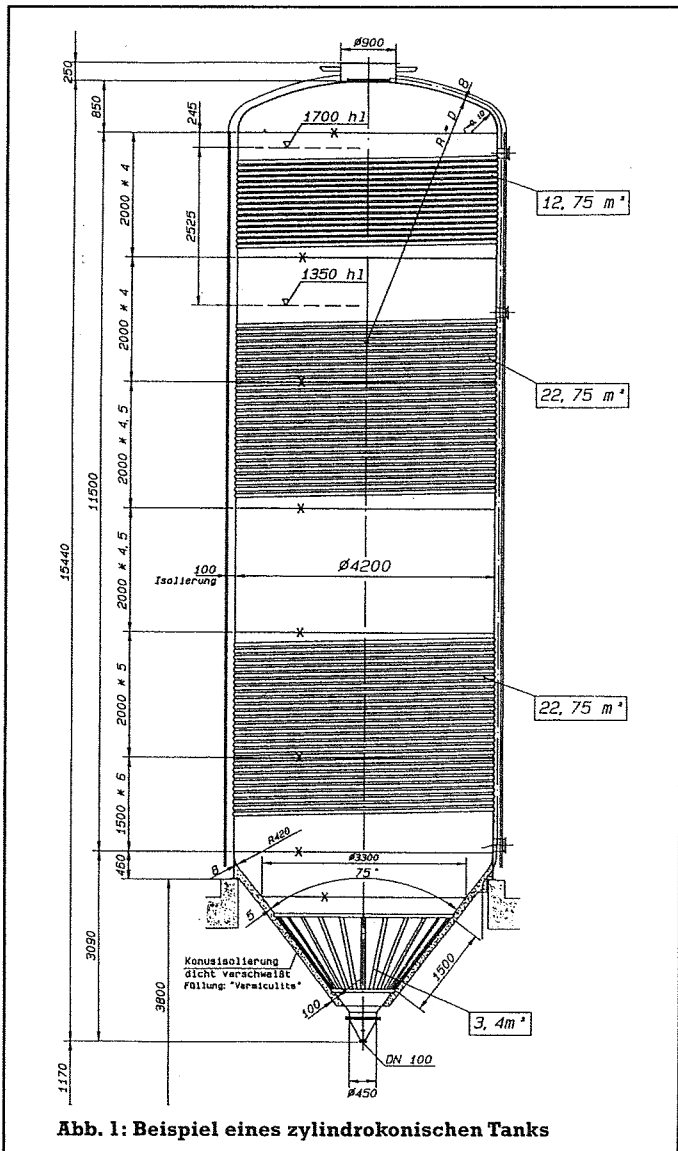
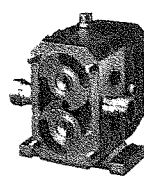
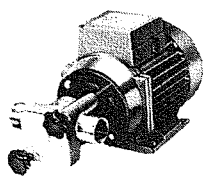
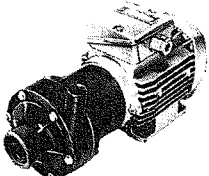


Abb. 1: Beispiel eines zylindrokonischen Tanks

JOHNSON PUMPEN SIND IMMER RICHTIG!



JOHNSON - der Pumpenspezialist!

Dichtungslose Tauch- und Magnetpumpen, Drehkolbenpumpen, Kreiskolbenpumpen, trocken-selbstansaugende Impellerpumpen, Edelstahl-Kreiselpumpen.

JOHNSON PUMPEN GMBH
 Postfach 1935
 D-32009 Herford
 Tel. (05221) 5973-0
 Fax (05221) 5973-10



JOHNSON PUMP

\dot{Q}_G – Gärwärmestrom [J/s, W]
 \dot{Q}_V – Fremdwärmestrom [J/s, W]
 k – Wärmedurchgangskoeffizient [$W/m^2 K$]
 A – Kühlfläche, aus konstruktiven Gegebenheiten [m^2]
 $\Delta\vartheta_m$ – mittlere logarithmische Temperaturdifferenz [K]

Zur Bestimmung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz ist einmal die große und zum anderen die kleine Temperaturdifferenz zwischen den wärmetauschenden Medien erforderlich. Die Berechnung erfolgt gemäß der Formel:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl})}{\ln \left(\frac{\Delta\vartheta_{gr}}{\Delta\vartheta_{kl}} \right)} \quad (3.7)$$

$\Delta\vartheta_m$ – mittlere logarithmische Temperaturdifferenz [K]
 $\Delta\vartheta_{gr}$ – Differenz zwischen Mediu-manfangs- und Kühlmedium-eintrittstemperatur [K]
 $\Delta\vartheta_{kl}$ – Differenz zwischen Mediumend- und Kühlmedium-austrittstemperatur [K]

KONSTRUKTIVE AUSLEGUNG DER KÜHLZONEN

Nach der überschlägigen Auslegung der Kühlzonen im ersten Teil der Berechnung folgt eine konstruktive Auslegung. Diese erfolgt anhand der im Vorfeld festgelegten Tankdimensionen. Bei dieser konstruktiven Festlegung wird festgesetzt, in wieviel Zonen mit der entsprechenden Anzahl von Zügen oder Windungen die Gesamtkühlfläche aufgeteilt wird. Diese Festlegung erfolgt einmal aus verfahrenstechnischen Braugründen, zum anderen aus dem Grund der Vermeidung eines zu hohen Druckverlustes in den Kühlzonen. Die Art (Größe, Form) der Kühlzonenprofile liegt im Bereich des Tankherstellers, dieser arbeitet mit Standardprofilen, die den einzelnen Bedarfsfällen, wie z.B. der Art des Kühlmediums genau angepaßt sind.

Kunde: Musterbrauerei
Vertreten durch: Mustermann

Mustertank

– Daten und Ergebnisse sind je Tank –

Tankdurchmesser (innen)	=	4 200 mm
Kühlbereich – zylindrische Tankhöhe	=	11 500 mm
mittlere Wandstärke	=	4,5 mm
Konuswinkel	=	75,0 °
Krempenradius am Konus	=	420 mm
Nutzinhalt bis Oberkante der Zarge	=	1 700 hl
Kühlleistung – Bier-Anfangstemperatur	=	6,0 °C
– Bier-Endtemperatur	=	-1,0 °C
– Kühldauer	=	96,0 h
– Extraktabbau	=	0,00 %
Kühlmedium: – NH ₃		
– Verdampfungstemperatur	=	-3,0 °C
Wärmestrom	=	12 396 kcal/h
Gärwärmestrom	=	0 kcal/h
Fremdwärmestrom	=	2 073 kcal/h
Gesamtwärmestrom	=	14 469 kcal/h
NH ₃ -Menge (4-fach)	=	190,4 kg/h

Konstruktive Festlegung der Kühlzonen mit Druckverlust

Zone-Nr.	Anzahl Züge [-]	Windungen pro Zug [-]	Druckverlust pro Zug [bar]	Kühlfläche pro Zone (Bierseitig) [m ²]
1	1	8,0	0,001	11,6
2	2	11,0	0,001	32,0
3	2	11,0	0,001	32,0

Abb. 2: Kühlflächenberechnung für zylindrokonische Tanks

Die Wärmeübertragungsfläche errechnet sich wie folgt:

$$F = D \cdot \pi \cdot z \cdot t_K \cdot n \cdot x \quad (3.9)$$

F – Wärmeübertragungsfläche [m²]
 D – Tankdurchmesser (innen) [m]
 z – Anzahl der Kühlzonen [-]
 t_K – Teilung der Kühlzonen [m]
 n – Anzahl der Windungen pro Zug [-]
 x – Anzahl der Züge pro Kühlzone [-]

Mit der aus der konstruktiven Auslegung nun festgelegten Kühlfläche, mit Unterteilung in Zonen, Züge und Wendelanzahl, wird jetzt so gerechnet, als wäre diese verbindlich.

Der sich daraus ergebende Wärmedurchgangskoeffizient wird mit dem zu Beginn der Berechnung angenommenen verglichen und korrigiert. Diese Korrekturrechnung ist solange zu wiederholen, bis Annahme und nachgerechneter Wert auf einen Minimalfehler übereinstimmen.

GESCHWINDIGKEIT DES KÜHLMEDIUMS IN DEN KÜHLSCHLANGEN

Um die Strömungsverhältnisse in den Kühlzonen exakt berechnen zu können, ist es erforderlich, die freie Durchtrittsfläche (a_i), die das Kühlmedium im Kühlprofil hat, zu bestimmen. Dies ist bereits geschehen durch den Tankhersteller, der durch Konstruktion des Kühlprofils Größe und Art der Kühlzone festgelegt hat.

Die Geschwindigkeit des Kühlmediums in den Kühl-schlangen wird damit nachstehend berechnet:

$$v = \frac{\dot{V}_K}{a_i \cdot z \cdot x} \quad (3.10)$$

v – Geschwindigkeit [m/s]
 \dot{V}_K – Volumenstrom des Kühlmediums [m³/s]
 a_i – freie Durchtrittsfläche des Kühlprofils [m²]

datograf

- ★ 5 Liter Partyfäßchen
- ★ Abfüllanlagen
- ★ Bierzapfer
- ★ Bier-Crack Der Bayerische Anstich



DATOGRAF APPARATEBAU GmbH & Co. · 74016 Heilbronn
Austr. 34-36 · Tel. 07131/9860-0 · Tx. 728562 · Fax 07131/162154

Gültigkeitsbereich der Formel: Das Kühlmedium wechselt nicht die Phase und z (Anzahl der Kühlzonen) wird nur bei Parallelströmung eingesetzt.

DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT

Zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, welcher die Wärmeübertragung zwischen zwei durch eine Wand getrennte Fluide beschreibt, dient die nachstehende Formel:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{a_1} + \frac{a}{a_2} + b \cdot \frac{s_w}{\lambda_w} + f_v + f_z \quad (3.13)$$

- | | | |
|----------------|------------------------------------------------------|----------------------|
| k | - Wärmedurchgangskoeffizient | [W/m ² K] |
| a ₁ | - Wärmeübergangskoeffizient auf der Produktseite | [W/m ² K] |
| a ₂ | - Wärmeübergangskoeffizient auf der Kältemediumseite | [W/m ² K] |
| s _w | - mittlere Wanddicke | [m] |
| λ _w | - Wärmeleitkoeffizient des Grundmaterials | [W/mK] |
| a, b | - Korrekturfaktoren, abhängig vom Kühlprofil | [-] |

WÄRMEÜBERGANG DURCH FREIE KONVEKTION AN VERTIKALEN FLÄCHEN (PRODUKTSEITE)

Die Wärmeübertragung bei freier Konvektion entsteht, auf Grund von Dichteunterschieden meist als Folge von Temperaturunterschieden. Bei der freien Konvektion werden die Dichte in der Bewegungsgleichung nur im Auftriebsterm als lineare Funktion der Temperatur angenommen und alle übrigen Stoffwerte als konstant vorausgesetzt. Die maßgebende Stoffeigenschaftsgröße ist der

isobare thermische Ausdehnungskoeffizient „β“. Dieser ist Tabellenwerten zu entnehmen. Der mittlere dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient für den laminaren und auch den turbulenten Strömungsbereich von Ra = 10⁻¹ bis Ra = 10¹³ (Das Produkt Gr · Pr wird auch als Rayleigh-Zahl Ra bezeichnet) wird durch die Nußelt-Zahl und die Grashof-Zahl beschrieben. Für die Nußelt-Zahl gilt die Formel:

$$Nu_{pl} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{9/27}} \right\}^2 \quad (3.20)$$

Die Formel (3.20) über die eine Literaturrecherche gemacht wurde, gilt als nicht unbestritten anwendbar für Ra > 10⁹. Im VDI-Wärmeatlas (6. Auflage 1991 Kap. Fa 2) wird jedoch ein Strömungsbereich von (Ra = 10⁻¹⁷ bis Ra = 10¹³ als Gültigkeitsbereich angegeben, was zeigt, daß hier zu Gunsten der Anwendbarkeit, in einem größeren Gültigkeitsbereich, die eingeschränkte Anwendbarkeit für Ra > 10⁹ vernachlässigt wird.

Mit der folgenden Formel für den vertikalen Zylinder wird die Nußelt-Zahl des Zylinders als Funktion der Nußelt-Zahl einer gleich hohen senkrechten Platte und des Verhältnisses zwischen Höhe h und dem Tankdurchmesser D ermittelt:

$$Nu = Nu_{pl} + 0,97 \frac{h}{D} \quad (3.20a)$$

Mit Errechnung der Nußelt-Zahl ist es möglich, den produktseitigen Wärmeübergangskoeffizienten, welcher die Wärmeübertragung zwischen bewegter Flüssigkeit oder Gas und einer festen Wand bezeichnet, anhand von Stoffwerten aus Tabellen zu ermitteln.

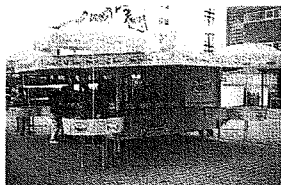
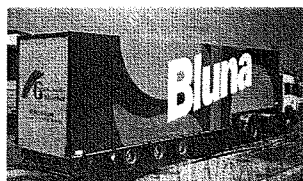
CORRECT

Fahrzeugbau GmbH

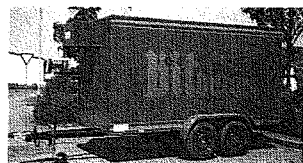
Die Fahrzeugbaualternative für die Getränke herstellende und vertreibende Wirtschaft.

Wenn es um:

Getränkeverteilungsfahrzeuge,
Getränke Last- und Sattel-
zeuginheiten,



Getränkeverkaufsfahrzeuge



und Getränkekühlfahrzeuge
usw. geht.

Correct Fahrzeugbau GmbH
Zurmaiener Straße 176, 54292 Trier

☎ 0651/14670-0 📠 0651/14670-11

Fordern Sie bitte zu einem unverbindlichen Beratungsgespräch unsere Aussendienstmitarbeiter an!

WEDA-OPTICOMP®

Ihr kritisches Auge am
laufenden Band



Warum über eine Nach-
rüstung mit Transpondern
nachdenken, wenn robuste,
individuelle und personen-
lesbare Nummerncodes
bereits auf den PLUS KEGs
vorhanden sind?

Die bewährte Alternative:

**Optische
Faßnummern-Erkennung!**

WEDA

DAMMANN & WESTERKAMP GmbH

D-49424 LUTTEN · Telefon (04441) 8705-0 · Telefax (04441) 5500

WÄRMEÜBERTRAGUNG BEI DER NH₃-DIREKT-VERDAMPFUNG IN EINER ROHRWENDEL

Aus der festgelegten Kühlfläche A und des Gesamtwärmestromes ist die Wärmestromdichte zu bestimmen:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.26)$$

\dot{Q} – Gesamtwärmestrom [J/s, W]
 \dot{q} – Wärmestromdichte [W/m²]
 A – Kühlfläche, aus konstruktiven Gegebenheiten [m²]

Die theoretische NH₃-Menge errechnet sich aus dem abzuführenden Wärmestrom nach folgender Formel:

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\dot{Q}}{r} \quad (3.29)$$

Die umlaufende NH₃-Menge bestimmt sich aus der Erfahrung nach folgender Formel:

$$\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{Uml.}} = 4 \cdot \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (3.30)$$

\dot{m}_{NH_3} – theoretisch benötigter Ammoniakmassenstrom [kg/s]
 Uml. – tatsächlich benötigter Ammoniakmassenstrom [kg/s]
 \dot{m}_{NH_3} – Verdampfungsenthalpie des Ammoniaks [kJ/kg]

Aus der umlaufenden NH₃-Menge läßt sich nach folgender Formel die Geschwindigkeit in der Kühlschlange berechnen:

$$v = \frac{\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{Uml.}}}{\rho_F \cdot a_i \cdot z \cdot x} \quad [(3.31)]$$

Der Druckverlust, welcher in den Kühlzonen von großer Wichtigkeit ist, errechnet sich nach folgender Formel:

$$\Delta_p = \left(\xi_u + \frac{\xi_w \cdot L}{d_{\text{hyd}}} \right) \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_F}{2 \cdot 10^5} \quad (3.32)$$

Δ_p – Druckverlust in der Kühlschlange [bar]
 L – Länge der Kühlschlange [m]
 v – Geschwindigkeit des Kühlmediums in der Schlange [m/s]
 ξ_w – Widerstandsbeiwert der Kühlschlange [-]
 ξ_u – Widerstandsbeiwert bei Ein- und Austritt ins Kühlprofil [-]
 ρ_F – Dichte des NH₃-Fluides [kg/m³]
 d_{hyd} – hydraulischer Durchtrittsdurchmesser [m]

Gültigkeitsbereich der Formel: 0 bar ≤ Δ_p ≤ 0,2 bar

WÄRMEÜBERTRAGUNG BEI DER STRÖMUNG EINES KÄLTETRÄGERMEDIUMS DURCH EINE ROHRWENDEL

Bei der Strömung eines Kälteträgermediums durch eine Rohrwendel zählen die selben Kriterien (bei Berechnung des Druckverlustes nach den beschriebenen Formeln) wie bei der NH₃-Direktverdampfung in einer Rohrwendel.

Gemäß der konstruktiven Festlegung der Kühlzonen wird zuerst die Geschwindigkeit in diesen bestimmt. Diese Geschwindigkeit ist wichtig zur Feststellung der Strömungsart, ob laminar oder turbulent.

Es sei hier vermerkt, daß besonders bei sehr zähflüssigen Kälteträgermedien es leicht vorkommen kann, daß die Strömung, trotz hoher Durchflußgeschwindigkeit, im laminaren Bereich liegt. Ist dies der Fall, ist die Konstruktion der Kühlzonen derart zu ändern, daß mit weniger Zügen, bzw. einer geringeren Aufwärmung (Erhöhung des Durchflusses) gefahren wird. Wegen der größeren Umlaufmenge bedeutet dies aber auch erhöhte Betriebskosten. Ermittlung des Volumenstromes des Kälteträgermediums durch die Formel:

$$V_K = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \rho_F \cdot \Delta \vartheta_K} \quad (3.33)$$

Hieraus läßt sich die Geschwindigkeit in den Kühlzonen berechnen, mit der Formel:

$$v = \frac{V_K'}{a_i \cdot z \cdot x} \quad (3.34)$$

v – Geschwindigkeit in der Kühlzone [m/s]
 c_p – spezifische Wärme [kJ/kg · K]
 a_i – freie Durchtrittsfläche des Kühlprofils [m²]
 z – Anzahl der Kühlzonen [-]
 x – Anzahl der Züge pro Kühlzone [-]
 V_K' – Volumenstrom des Kälteträgermediums [m³/s]
 \dot{Q} – Wärmestrom [J/s, W]
 ρ_F – Dichte des Kälteträgermediums [kg/m³]

Auch bei den Kälteträgermedien ist der Druckverlust in den Kühlzonen von großer Wichtigkeit. Er wird mit der nachstehenden Formel berechnet:

$$\Delta_p = \left(\xi_u + \frac{\xi_w \cdot L}{d_{\text{hyd}}} \right) \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_F}{2 \cdot 10^5} \quad (3.44)$$

Δ_p – Druckverlust in der Kühlschlange [bar]
 L – Länge der Kühlschlange [m]
 v – Geschwindigkeit des Kühlmediums in der Schlange [m/s]
 ρ_F – Dichte des Kälteträgermediums [kg/m³]
 ξ_w – Widerstandsbeiwert der Kühlschlange [-]
 ξ_u – Widerstandsbeiwert bei Ein- und Austritt ins Kühlprofil [-]

WEITERES VORGEHEN

Hier soll kurz gezeigt werden, in welcher Richtung die Entwicklung fortgesetzt wird.

1. Die konstruktive Forschung und Entwicklung im Bereich der Art von Kühlzonen und im Bereich der Ein- und Austrittsbereiche von Kühlzonen zu treiben, um eine Reduzierung des Materialverbrauchs und eine Optimierung der Kühlleistung durch z.B. Druckverlustreduzierung zu erreichen.
2. Erweiterung des Kälteprogrammes durch den Wärmebereich, so daß Kühlzonen auch zur Beheizung genutzt werden können.
3. Die Einbeziehung der erzwungenen Konvektion, durch Einblasen von CO₂-Gas in den Gärprozeß, in das Rechenprogramm.
4. Realisierung der Lösungsvorschläge.
 - Entwicklung eines Zellenmodells, was die Modellierung anhand vorhandener numerischer Lösungen bedeutet.
 - Die Berechnung der Kühlzonen über die Finite-Diffusion, was die Lösung der gekoppelten Differenzialgleichungen in der Flüssigkeit bedeutet.

Durch dieses schrittweise Vorgehen werden die Kosten minimiert, da hier die Schritte aufeinander aufbauen und je nach auftretenden Problemen sofort richtig reagiert werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß heute das Know-How und dessen Verwirklichung zur Verfügung steht, welches den aktuellen Anforderungen der Brauereien an Wirtschaftlichkeit, optimale Prozeßführung und Umweltschutz vollauf genügt.

Dabei ist das Ergebnis umso besser, je besser der Konsens zwischen Kundenwünschen und produktspezifischer Erfahrung ist. So kann eine maßgeschneiderte Anlage, auf höchstem Produktniveau, entstehen.

In diesem Punkt liegt

der große Unterschied zwischen dem qualifizierten Anlagenbauer und dem reinen Schalterbauer