

Repetitorium der Wärmeübertragung

Beispielhafte Berechnungen zur Wärmeübertragung im Brauprozess

Wer eine Ingenieurausbildung an einer deutschen Universität absolviert hat, weiß, dass er zur thermodynamischen Berechnung eines Wärmeübertragers die Reynoldszahl „benötigt“. Falls er es vergessen hat und entsprechende Unterlagen durchsieht, stößt er spätestens an dieser Stelle auf einen Widerstand, der sich nicht durch die üblicherweise zahlreich vorhandenen Querverweise in den Lehrbüchern lösen lässt.

Dass die hydraulische Auslegung mindestens so wichtig ist wie die wärmetechnische, wird häufig vergessen. Der schlechte Ruf der Hochtemperaturwürzekochung war hauptsächlich in der mangelhaften hydraulischen Auslegung begründet. Wer identische Anfragen an mehrere Lieferanten für Wärmeübertrager schickt, wird eine Bandbreite unterschiedlicher Auslegungsergebnisse erhalten, da die Anfrage (das Lastenheft) meistens unvollständig ist und die Bediener der Auslegungssoftware unterschiedliche Qualifikationen haben.

Einige Grundlagen

Der Wärmedurchgangskoeffizient [U-Wert, früher k-Wert] steigt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit an. Da bei der Berechnung des Druckverlustes die Strömungsgeschwindigkeit zum Quadrat einfließt, ist der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auch eine wirtschaftliche Grenze gesetzt. Bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit sinkt demnach der Bedarf an Wärmeübertragungsfläche und damit auch das Produkt- und Versorgungsmedien-Volumen. Dadurch sinken Produkt- und

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient} = \frac{\text{Massestrom} \cdot \text{spez. Wärmekapazität} \cdot \Delta T \cdot 1000}{3600 \cdot \text{Fläche} \cdot \Delta T_{\text{mittl. In}}}$$

$$W/m^2K = \frac{\frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \frac{\text{h}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{K}}{\text{K}} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kJ}}}{\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{K}}{\text{K}}} = \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Formel 1: Wärmedurchgangskoeffizient

Reinigungsmittelmischphasen / -verluste und die Regelung wird (tendenziell) einfacher. Selbstverständlich gibt es Produkte in der Brauerei, die hohe Scherkräfte nicht gut vertragen; dazu gehören z. B. Maische oder Ausschlagwürze.

Die auch heute noch abgedruckten Daten zur maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeit, z. B. von Filtratbier, beruhen aber in der Regel auf historischen Annahmen. Die Strömungsgeschwindigkeit hat in realen Prozessen nur einen geringen Einfluss auf die Auswirkungen von zu hohen Scherkräften. Das Beschleunigen, z. B. in Pumpen oder Stellventilen, oder Verdampfungs- und Kondensationsprozesse, z. B. bei Kavitation oder zügiger Druckreduzierung, hat einen wesentlich größeren Einfluss, als die meist vernachlässigbare Strömungsgeschwindigkeit. Der Wirkungsgrad einer Pumpe ist ein erster Indikator für den Grad der auftretenden Scherkräfte innerhalb der Pumpe.

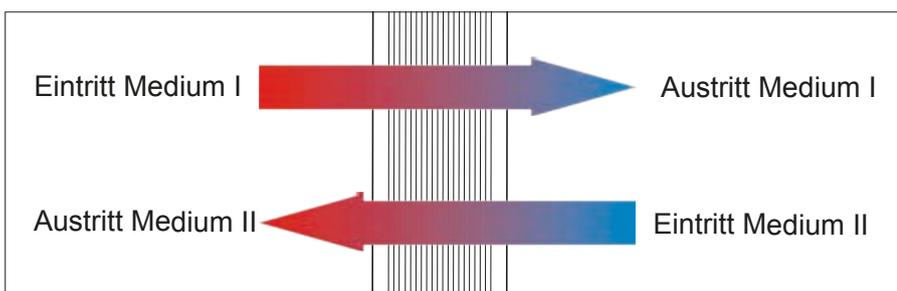


Abb. 1: Schema einstufiger Wärmeübertrager

Lautsprecherboxen und Wärmeübertrager „haben“ keine Watt. Lautsprecherboxen verlangen einen bestimmten Strom, bevor sie anfangen nach „Ampere“ zu riechen. Die Wärmeübertragungsleistung und die in Prozent angegebene Rekuperation eines Wärmeübertragers sind von den Betriebsbedingungen abhängig und eher überflüssige Angaben.

Bei identischen Wärmeübertragungsflächen und produktseitig identischen Verhältnissen (Temperaturen, Volumenstrom) ist die produktseitige Grenzflächentemperatur sehr ähnlich. Das heißt, wenn ein korrekt ausgelegter Bündelrohrwärmeübertrager 1000 hl/h Würze von 101 °C auf 103 °C erwärmt, dann ist die thermische Belastung fast identisch, gleich ob dieser Wärmeübertrager mit Satteldampf von 110 °C oder mit Heißwasser mit einer Eintrittstemperatur von 130 °C und einer Austrittstemperatur von 129 °C betrieben wird.

Viele Plattenwärmeübertrager weisen Risse oder Plattenbrüche auf. Da in Wärmeübertragern immer eine turbulente Strömung herrscht, findet trotz positivem Druckgefälle ein Austausch der Medien statt. Eine einfache Sichtprüfung ist ungeeignet, um defekte Platten sicher zu erkennen.

Bei mehrstufigen Plattenwärmeübertragern, wie sie z. B. als Kurzzeiterhitzer (KZE) eingesetzt werden, ist es nicht möglich alle Abteilungen des Platten-Apparates thermodynamisch und hydraulisch optimal auszulegen. Das größte Abteil bestimmt in der Regel die Plattengröße. Ab einer bestimmten Größe ist es wirtschaftlich sinnvoll, statt eines mehrstufigen Plattenapparates mehrere einzelne Wärmeübertrager zu installieren. Auch wenn für bestimmte Anwendungen in der Praxis entweder Platten- oder Röhrenapparate üblich sind, sollte man die eine oder andere Ausführung nicht grundsätzlich ausschließen.

Berechnungen

In der Dokumentation eines Wärmeübertragers finden sich die Auslegungsdaten. Mithilfe der tatsächlichen Betriebsbedingungen kann der Wärmedurchgangskoeffizient (Formel 1) bei den betrieblichen Bedingungen leicht errechnet werden. [Tabellenkalkulationsarbeitsblätter zum Herunterladen: http://www.sachverstand-gutachten.de/wissenswertes/wissenswertes_k_wert.html]

Das Fördervolumen einer Pumpe kann mithilfe der Kennlinie, dem gemessenen Differenzdruck und der zur

Verifizierung gemessenen Leistungsaufnahme auch ohne Volumenstrommessgerät relativ genau bestimmt werden. Bei der Kennlinie ist zu berücksichtigen, dass diese in der Regel auf eine bestimmte konstante Drehzahl berechnet wurde und dass einige Hersteller die Kennlinie innerhalb erlaubter Toleranzen nach Marketingaspekten schönen. Da selten die Leistungsaufnahmekurve bei dieser Marketingmaßnahme entsprechend angepasst wird, wird dies durch die Messung der elektrischen Leistung erkannt.

Beispiel Würzeerwärmung

Üblicherweise wird bei 76 °C bis 78 °C abgeläutert. Wenn Wasser vom Bründenkondensator zur Erhitzung der Läuterwürze zur Verfügung steht, könnte die Würze z. B. (Abb. 1) mit 98 °C warmen Wasser [Eintritt Medium I] von 77 °C [Eintritt Medium II] auf 95 °C [Austritt Medium II] erwärmt werden. Das Wasser kühlt sich dabei auf z. B. 80 °C [Austritt Medium I] ab. Die mittlere Temperaturdifferenz beträgt somit 3 K. Es wird angenommen, dass bei einem Volumenstrom von 53 hl/h genau 100 kW übertragen werden und die Wärmeübertragungsfläche genau 10 m² beträgt. Wenn man nun nicht Würze von 77 °C auf 95 °C, sondern von 72 °C auf 96,2 °C erwärmen würde, betrüge die Leistung nicht 100 kW, sondern 134 kW. Wenn man die Wassertemperaturen mit 98 °C und 80 °C unverändert ließe, stiege die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz (Formel 2) auf 4,16 K an und bei unveränderter Fläche könnte der Einsatz von Wärme aus der Rekuperation um etwa ein Drittel erhöht werden. Das heißt, der Wärmeübertrager „hätte“ ohne bauliche Veränderung bei identischer Fläche nun 134 kW statt 100 kW.

Auch wenn in Lehrbüchern geschrieben steht, man solle bei möglichst hohen Temperaturen abläutern, erschließt sich dem aufgeschlossenen Betrachter der Grund hierfür nicht. Bei den im Läuterbottich herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten ist der Einfluss der Viskositätsänderung von 77 °C auf 72 °C weder mess-

$$\Delta T_{\text{mittl. ln}} = \frac{\Delta T_{\text{groß}} - \Delta T_{\text{klein}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{groß}}}{\Delta T_{\text{klein}}}}$$

Formel 2: Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz



Abb. 2: Teflonband – gekühlte Würze

noch seriös errechenbar. Für die Nachverzuckerung spricht: nicht die 77 °C, sondern die 72 °C zu wählen.

Ein- oder zweistufiger Würzekühler?

Beim einstufigen Würzekühler wird das Brauwasser meist in einem Eisspeicher mit Niedertarifstrom gefroren (als Eis gespeichert) und dann bei Bedarf aufgetaut. Je nach Dicke der Eisschicht sind Verdampfungstemperaturen von mindestens -4 °C nötig, aber Temperaturen um -7 °C gebräuchlich. Das aufgetaute Brauwasser wird dann beim Würzekühlen zu warmem Brauwasser. Im Würzekühlereintritt sind Temperaturen um 1 °C üblich und das Brauwasser wird auf 80 °C bis 85 °C erwärmt. Da seit Jahren auch Großbrauereien mit hoher Sudfolge einstufige Würzekühler betreiben, gibt es teilweise erhebliche Abweichungen von der „Norm“ im Bereich der Brauwasserkühlung.

Der Investitions- und Platzbedarf eines großen Eisspeichers ist bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung neben den Betriebskosten zu berücksichtigen. Die üblichen Eisspeicher genügen heutigen Hygieneerwartungen nicht. Da man aber auch nicht das letzte Weichwasser in der Mälzerei freiwillig trinken würde, wird immer wieder die Frage gestellt, ob eine Sudhausinstallation hygienisch sein muss? Häufig werden frühestens am Auslauf des Würzekühlers hygienische Grundlagen beachtet (Abb. 2).

Nachfolgend werden die Schnittstellen direkt am Wärmeübertrager betrachtet. Wenn man von einer Brau-

wassertemperatur von 15 °C ausgeht, dann wurde dieses 15 °C warme Wasser mit Kältemaschinen auf 1 °C gekühlt, bevor es im einstufigen Würzekühler zum Einsatz kommt. Wenn das Wasser von 1 °C auf 85 °C erwärmt und die Würze von 98 °C auf 8 °C gekühlt wird, ergibt sich, dass $[\Delta T = 84 \text{ K}; 84 \text{ K} = 100 \%; 14 \text{ K} = x \%]$ 16,67 Prozent der abzuführenden Wärme über die Kältemaschine abgeführt werden. Bei diesem Beispiel ergibt sich eine mittlere logarithmische Temperaturdifferenz von 9,69 K. Beim einstufigen Würzekühler bestimmt die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz wie viel die Kältemaschinen leisten müssen. Wenn die Wassereintrittstemperatur 5 °C und die Wasseraustrittstemperatur 95 °C wären, dann müsste die Kältemaschine nur 11,11 Prozent der Leistung übernehmen, da die Temperaturdifferenz nun aber 3 K statt 9,69 K beträgt, wäre der Wärmeübertrager mehr als 3-mal so groß. Eine solche Auslegung wäre zwar möglich, aber unrealistisch.

Beim zweistufigen Wärmeübertrager entscheidet über die Leistung, die die Kältemaschine aufbringen muss, nur die Differenz der Würzeübergabetemperatur (zwischen den beiden Abteilen) zur Temperatur des kalten Brauwassers am Eintritt. Wenn im obigen Beispiel die Würzeübergabetemperatur 3 K über der Wassereintrittstemperatur liegt, ergibt sich eine Würzeübergabetemperatur von 18 °C, das heißt, die Würze wird mit 15 °C Wasser von 98 °C auf 18 °C gekühlt und von 18 °C auf 8 °C mithilfe der Kältemaschine. Somit muss die Kältemaschine 11,11 Prozent der Gesamtleistung übernehmen.

Das Kühlabteil kann natürlich auch mit Eiswasser wie beim einstufigen Würzekühler betrieben werden, es wird jedoch nicht zu warmen Brauwasser, sondern wird zurück in den Eisspeicher geführt. Statt Eiswasser können natürlich auch ein Glycol-Wassergemisch oder eine Kältemitteldirektverdampfung eingesetzt werden. Bei einer Gesamtbetrachtung hat selbst-

$$\text{Pasteurisationstemperatur} = 60 + \frac{\log \frac{PE}{\text{Zeit}}}{\log 1,393}$$

Formel 3: Pasteurisationstemperatur

verständlich die Kältemitteldirektverdampfung mit deutlichem Abstand den geringsten Energiebedarf.

Wenn bei den vorgenannten Würzekühlern nun das Wasser nicht auf 85 °C, sondern nur auf 80 °C erwärmt wird, wie es in sehr vielen Brauereien üblich ist, dann steigt beim zweistufigen Würzekühler die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz der Vorkühlabteilung von 6,82 K auf 8,37 K an. Der Flächenbedarf verringert sich proportional, aber weiterhin werden nur 11,11 Prozent der abzuführenden Wärme von der Kältemaschine übernommen, da die Differenz Wassereintritt und Würzeübergabetemperatur unverändert bleiben.

Beim einstufigen Würzekühler hingegen steigt die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz auf 11,65 K an und die Kältemaschine muss statt der 16,67 Prozent nun 17,72 Prozent der Last übernehmen.

Erfahrungen

Die Betriebsbedingungen eines Würzekühlers zu beschreiben, ist einfach, da Sudgröße und -folge und die Reinigungsprozedur bekannt sind. Mischphasen sind relativ unproblematisch, da sie im Rezept berücksichtigt sind und weitgehend in den Gärtank gelangen.

Bei Kurzzeiterhitzern sieht es hingegen anders aus. Wenn eine Rekupe-ration mit einer mittleren Temperaturdifferenz von 3 K betrieben wird, wird hierfür etwa die doppelte Fläche benötigt wie bei 6 K. Das bedeutet auch, dass Mischphasen und Ausschubmengen sich proportional ändern. Der höhere Wärmerückgewinn rechnet sich deshalb erst nach entsprechend größeren Produktionschargen oder bei billigeren Produkten. Das heißt, die Temperaturdifferenz (oder der prozentuale Wärmerückgewinn in Verbindung mit Heißhaltezeit und Temperaturprofilen) sollte nach dem zu erwartenden Betrieb nach wirtschaftlichen Bedingungen errechnet werden.

Die Entwicklung hin zu höheren Pasteurisationstemperaturen bei reduzierten oder eliminierten Heißhaltezeiten bei konstanter Temperatur verläuft schleppend, da die Steuerung

sich grundlegend ändern müsste. Bei vorgegebenen Pasteurisationseinheiten kann die Pasteurisationstemperatur durch Umstellen der üblichen Formel errechnet werden (Formel 3). Da gegenwärtig die Berechnung am Eintritt des Heißhalters beginnt, ist zu berücksichtigen, dass die tatsächlichen Pasteurisationseinheiten höher sind.

Wenn in einer Bier-KZE der herrschende Druck immer oberhalb des CO₂-Sättigungsdrucks liegen muss, kann man den notwendigen Druck mithilfe eines Druckhalteventils am Austritt des Kühlabteils einstellen oder den Druckverlust des Kühlabteils entsprechend hoch wählen oder eine Kombination von beidem wählen.

Mehrere Wärmeübertrager auf ein Gestell zu bauen, ist immer ein Kompromiss, der im direkten Verhältnis zur Größe des Wärmeübertragers steht. Der Sekundärkreislauf des Platten-Erhitzerabteils einer KZE wäre nicht erforderlich, würde man den Erhitze- als eigenen Wärmeübertrager optimal auslegen.

Fazit

Obwohl die Zusammenhänge sehr simpel sind, werden Entscheidungen regelmäßig nicht auf Grundlage von Fakten getroffen. Kaum eine Brauerei kann beispielsweise begründen, warum sie einen ein- oder einen zweistufigen Würzekühler betreibt. Die Macht der Anlagenlieferanten wird meist unterschätzt. Vieles wird so ausgeführt, weil angeblich es alle so machen oder der Anlagenlieferant es mithilfe von Computersimulationen und „tausendjähriger“ Erfahrung genauso optimal ausgelegt hat. Wenn ein Anlagenlieferant als Antwort auf eine qualifizierte Frage zur Auslegung behauptet, dass etwas in der Praxis anders ist als in der Theorie, könnte man an seinem Sachverstand zweifeln. □

Raimund Kalinowski

Raimund Kalinowski, Sachverständigenbüro und Wirtschafts-Mediator (QDR). Staatlich anerkannte Gütestelle nach § 794 Abs.1 Nr. 1 ZPO. Von der IHK öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Maschinen und Anlagen der Brauerei- und Getränke-industrie: Planungs- und Ausführungsfehler (www.sachverstand-gutachten.de)

