

2.3 Aspekte zur Rückkühlung in Härtereien: Gesetzgebung, Verfahren, Probleme (Teil 1)

Miriam Moritz, Olaf Irretier, Marco Jost

Wärmebehandlungsprozesse wie das Härten, Vergüten und Einsatzhärten als auch eine Vielzahl an glüh- oder thermochemischen Diffusionsprozessen setzen sich neben dem verfahrensbedingten Erwärmen und Halten auf Prozesstemperatur auch aus Abkühl- oder Abschreckprozessen zusammen. Somit gilt es, die zugeführte Wärmeenergie durch eine geeignete Abkühltechnik wieder zu entziehen. Die Industrieöfen für diese Wärmebehandlungsprozesse sind mit einer Vielzahl an Durchführungen und Flanschen ausgestattet, die hinsichtlich des Ofen- oder Behandlungsraums zur Umgebung abgedichtet werden müssen. Diese Dichtungen gilt es, ausreichend zu kühlen. Die Kühlung von Prozessen und Einrichtungen ist eine zwingende Notwendigkeit, die es in der Auswahl und Auslegung auf die Erfordernisse der Härtereie anzupassen gilt. Doch nicht nur die verfahrenstechnische Dimensionierung dieser Rückkühltechnik ist als anspruchsvoll zu bezeichnen. Den mit dem Betrieb dieser Anlagen in Zusammenhang stehenden rechtlichen und umweltrelevanten Vorgaben ist eine besondere Aufmerksamkeit geschuldet. Der vorliegende Teil des Fachbetrags behandelt die verfahrens- und anlagentechnischen Bedürfnisse und Anforderungen von Wärmebehandlungs- und Härtereibetrieben an Rückkühlsysteme und im Besonderen die in diesem Bereich verbreitetste Technologie der Verdunstungskühlung über Kühltürme.

Vor der Auslegung einer Verdunstungskühlanlage steht grundsätzlich die Frage, welche Wärmemengen es in der Härtereie abzuführen gilt (Energiebilanz), d. h., welche Energiemengen können genutzt und welche müssen über Rückkühlung „vernichtet“ werden. Es gibt eine ganze Reihe volkswirtschaftliche, politische, aber auch unternehmerische Gründe, die Energieeffizienz der Industrie bzw. der eigenen Wärmebehandlung zu optimieren. Neben der Wirtschaftlichkeit (steigende Energiepreise), dem Umweltschutz, der Ressourcenschonung und der Klimaschutzpolitik sind auch gesetzliche Anforderungen sowie generelles Wirtschaftswachstum, Beschäftigung und Zukunftssicherung zu berücksichtigen. Die Energieeffizienz ist für die Wirtschaftlichkeit von Wärmebehandlungsprozessen daher von wachsender Bedeutung. Als (wärme- und) energieintensive Prozesse und Betriebe haben Härtereien die Bedeutung eines geeigneten und optimierten Energiemanagements für die Wärmebehandlung im Besonderen zu berücksichtigen. Somit:

- Mittel- und langfristig steigende Energiepreise
- Zukunftssicherung: Energie ist einer der größten Kostenblöcke in der Wärmebehandlung und die Erhöhung der Energieeffizienz trägt zur Zukunftssicherung bei
- Reduzierung der EEG-Umlage ggf durch Energiemanagementsystem
- Energiemanagementsystem (EnMS) zur kontinuierlichen Verbesserungen der Energieeffizienz
- Isolation und Wärmedämmung im Ofenbau: Überprüfung und Verbesserung der Anlagenisolationen (insbes. bei Neuzustellung), Überprüfung der Schaltschränke (Thermographie)
- Abwärmenutzung: Vorwärmung des Verbrennungsgases (Rekuperatorbrenner), Beheizung von Waschmedien und Ölbecken, Bauteiltrocknung, Vorwärmung von Bauteilchargen oder Hallenbeheizung und Wasseraufbereitung
- Kältemaschinen oder Verdunstungskühler: Prüfung der Wirkungsgrade und Prüfung der notwendigen Wassertemperaturen (erforderliche Kühlleistung)
- Erfassung der Effizienzklassen von vorhandenen Antriebe, Pumpen und Gebläsen. Einsatz min. Effizienzkategorie IE2 bei Ersatz und Neubeschaffung von Anlagen

- Überprüfung der notwendigen Leistungen: Oftmals sind Motoren, Lüfter und Pumpen überdimensioniert. Durch den Einbau von Frequenzumrichtern werden Drehzahlen regelbar
- Überprüfung der notwendigen Nitrier- und Einsatzhärtezeiten und ggf. Reduzierung der Haltezeiten
- Überprüfung der möglichen Behandlungstemperaturen: Eine Temperaturerhöhung kann die Haltezeit erheblich reduzieren
- Überprüfung der erforderlichen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten: Bei Teilauslastung oder zum Wochenende ist eventuell keine volle Aufheiz- und Kühlleistung erforderlich, da mehr Zeit vorhanden ist.

Die daraus resultierenden Maßnahmenswerpunkte im modernen Industrieofenbau sind vor allem die Entwicklung neuer Anlagenkonzepte, die Analyse und Optimierung des Anlagenkonzepts, optimierte Ofenschleusentechnik, Wärmedämmung, optimierte Brennertechnologie, Antriebstechnik, effiziente Abwärmenutzung (Ölbad, Abgas, Schutzgas), Anlagenenergiemanagement und die generelle Optimierung der Prozessparameter.

2.3.1 Grundlegende Betrachtungen und Energiebilanz

Jede Auswahl und Auslegung von Anlagen und Prozessen unterliegt zunächst einer genauen Bestandsaufnahme (Status Quo) und einer Spezifikation der Zielgröße über eine Leistungsbeschreibung, im Idealfall ein Lastenheft. Die „Wege, die schlussendlich nach Rom“ oder zur optimalen Verfahrens- und Anlagentechnik führen, können dabei vielschichtig und komplex sein, so auch die Auswahl und Auslegung der Rückkühlleistung und somit der Kühlturmdimensionierung. Als Ablauf und Maßnahmen zur Auslegung der Rückkühlleistung und der Kühlturmdimensionierung gilt:

- Bestandsaufnahme in der Härterei: Anlagen- und Verfahrenstechnik
- Erfassung und Bilanzierung der energetischen Betriebsdaten und -verbräuche
- Ermittlung von Schwachpunkten und Potenzialen
- Konzepte und Potenziale für Energieeinsparung und -effizienz, Rückkühlung
- Maßnahmen und wirtschaftliche Betrachtung.

Die Bestimmung eines theoretischen Energiebedarfs für Erwärmung und Abkühlprozesse unterliegt folgendem Zusammenhang, der als grobe Abschätzung dienen kann: $E = m \text{ [kg]} \times 0,54 \text{ kJ/kgK} \times T \text{ [K]}$. Verbrauchsmengen von mehreren GWh in modernen Härtereiunternehmen im Jahr sind dabei keine Seltenheit – demnach gibt es enormes Potenzial zur Wärmerückgewinnung oder aber einen hohen Aufwand und hohe Kosten zur „Vernichtung“ im Verdunstungskühler. Somit steht vor der „Energievernichtung durch Rückkühlung“ in der Härterei die genaue Bilanzierung der im Härteprozess auftretenden Energiemengen. Moderne Wärmebehandlungsanlagen sparen bereits zwischen 20 und 40 % Energie im Vergleich zu alten Ofenanlagen ein. Mittelfristig können nach aktuellem Stand weitere Einsparpotenziale von ca. 10-20 % realisiert werden. Eine verbesserte und moderne Wärmedämmung verringert beispielsweise die Ofenwandtemperatur um bis zu 20 °C und kann Energieeinsparungen von bis zu 25 % realisieren. Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung von Ölkühlung, Abfackelung und Abgas amortisieren sich dabei meist schon innerhalb von zwei bis fünf Jahren. Außerdem kann durch die Nutzung von Abgas zur Bauteilvorwärmung sowie prozessintegrierter Energierückgewinnung weiteres Potenzial gewonnen werden. Diese beispielhaft genannten Maßnahmen als auch weitere Möglichkeiten, die im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht genannt werden können, werden die Wirtschaftlichkeit und die Verbesserung des „Return on Invest ROI“ mit steigenden Energiekosten zur Folge haben.

2.3.2 Grundlagen zur Rückkühlung

Bei der Auswahl der geeigneten Verdunstungs- oder Nasskühlung gilt es zunächst einmal zu bemerken, dass Verdunstungskühltürme die am häufigsten und mit höchstem Wirkungsgrad eingesetzten Anlagen sind. Dementsprechend liegen hier technische Standards vor, die vergleichsweise einfach zu planen und kostengünstig zu beschaffen sind. Trockenkühlung nutzt demgegenüber Luft als Kühlmedium und sollte in Härtereien in der Regel nur unter speziellen Umgebungsbedingungen (niedrige/mittlere Temperatur oder Wassermangel) zum Einsatz kommen, da bei diesen Systemen der niedrigste Wirkungsgrad von allen Kühlarten vorliegt. Bei sog. Hybridkühlung tritt im Vergleich zu Nasskühltürmen verfahrensbedingt weniger Wasserverdunstung auf; zudem liegt der Wirkungsgrad zwischen Nass- und Trockenkühlung.

2.3.4 Physikalische Grundlagen

Bei der verfahrenstechnischen Betrachtung und Auslegung einer Verdunstungskühlung sind folgende physikalische Größen und Begriffe zu nennen:

- Warmwassertemperatur $t_E W$: Eingangstemperatur des Wassers in Kühlturm
- Kaltwassertemperatur $t_A W$: Temperatur, mit der das Wasser den Kühlturm verlässt
- Kühlzonenbreite z (Temperaturdifferenz, um die sich das Wasser abkühlt): $z = \Delta T W = t_E W - t_A W$
- Regendichte r : Verhältnis Wassermenge zu Kühlturmfäche und Zeit (in m^3/m^2h)
- Feuchtkugeltemperatur t_F (auch Kühlgrenztemperatur genannt): tiefste Temperatur, die sich mit Verdunstungskühlung erreichen lässt (standortabhängig, in Deutschland ca. 21 °C)
- Kühlgrenzabstand a : Temperaturdifferenz zwischen Feuchtkugeltemperatur und real möglicher Kaltwassertemperatur aufgrund wirtschaftlicher Kriterien (ca. 3 °K). Zustandsverlauf von Luft und Wasser lässt sich im Mollier (h,t)-Diagramm darstellen
- Kühlgrenztemperatur $T_a = t_F + 3 K$
- Gegenseitige Verdunstungskühlung: Prozess, in dem die eintretende Luft kühler ist als das eintretende Wasser ($t_E L < t_E W$), da sich die Temperaturen von Luft und Wasser beim Übertragungsvorgang im Gegenseitigen ändern.

Es ist nicht im Besonderen zu erwähnen, dass das Ziel der Rückkühlung (im Kühlturm) die Absenkung der Wassertemperatur ist. Physikalisch betrachtet entsteht dabei die Verdunstungskälte im Kühlturm durch intensivere Durchmischung des warmen (oder durch den Härereibetrieb erwärmten) Wassers mit der im Kühlturm in der Regel im Gegenstrom wirkenden Luft. Durch dieses bekannte Prinzip lassen sich im Kühlturm niedrigere Temperaturen als die Außenlufttemperatur erreichen, die für die rechnerische Auslegung eines Kühlturmes mit 3 °C oberhalb der sog. Feuchtkugeltemperatur angenommen wird. Die Feuchtkugeltemperatur ist ein klimazonenabhängiger Wert und kann für Deutschland mit ca. 21 °C angegeben werden, sodass sich in diesem Fall eine minimale Vorlauftemperatur von 24 °C ergibt. In Verdunstungskühltürmen wird dementsprechend das zu kühlende Wasser in die umgebende Luft versprüht und über die im Kühlturm befindlichen Füllkörper verrieselt. Dabei wird Verdunstungswärme dem Wasser entzogen, das Wasser somit gekühlt und die umgebende Luft entsprechend befeuchtet. Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass bei einer Verdunstung von 1 % Wasser die Wassertemperatur um 6 K absinkt. Zusätzlich wird das Wasser durch feinverteilten Kontakt mit der Luft durch Konvektion gekühlt und die Luft erwärmt.

Wie bereits angemerkt, liegt die Kühlgrenztemperatur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte unterhalb der Lufttemperatur. Die Temperaturabsenkung ist dabei umso größer, je trockener die umgebende Luft ist. So kann aus der Temperaturdifferenz „rückwärts gerechnet“ die Luftfeuchte

bestimmt werden. Relevant ist die Kühlgrenztemperatur vor allem überall dort, wo in großen Mengen Flüssigkeit verdunstet werden.

2.3.5 Betriebsweise und Arten der Rückkühlung

Rückkühlungen und Kühlwasserkreisläufe können grundsätzlich in offene und geschlossene Kühlkreisläufe unterteilt werden. Beim offenen Kühlkreislauf wird im Kühlturm das Wasser durch direkten Kontakt mit der Luft gekühlt. Die Wärmeübertragung erfolgt dabei über den Wärmeaustausch zwischen Luft und Wasser. Der Kühleffekt ist durch Verdunstung eines geringen Anteils des zu kühlenden Wassers vergleichsweise sehr hoch, wobei zusätzlich zu bedenken ist, dass hierbei die Gefahr von Verschmutzung des Kühlwassers vermehrt besteht.

Demgegenüber tritt beim geschlossenen Kühlkreislauf das kühlende Prozesswasser nicht in Kontakt mit der umgebenden Luft. Dieses wird dadurch realisiert, dass ein zweiter Kühlkreislauf abgetrennt über Wärmetauscher verwendet wird. Der Wärmetauscher trennt somit das zu kühlende Prozesswasser vom „Verdunstungswasser“ des Kühlturms. Auf diese Weise können auch andere Medien als Wasser gekühlt werden und unterschiedliche Kreislauftemperaturen gefahren werden. Für Härtereibetriebe empfehlen sich somit grundsätzlich geschlossene Kühlkreisläufe.

Ergänzend zu den bisherigen Ausführungen im Beitrag zur Anlagen- und Verfahrenstechnik der Rückkühlung, möchten die Autoren bereits an dieser Stelle vermerken, dass es auch Probleme mit Verdunstungskühlern gibt. Beachtet man, dass etwa 1,5 bis 2,5 % des Kühlwassers verdunsten und je nach Betriebsweise ca. 0,01 bis 0,2 % in Form von Aerosolen als Sprühverlust ausgetragen werden, und ergänzt werden müssen, so ist hier entsprechende Pflege und Aufbereitung der Rückkühlung erforderlich. Durch Tropfenabscheider kann der Wasserverlust beispielsweise reduziert werden. Zudem kann eine starke Aufkonzentration von gelösten Salzen ggf. einen weiteren Austausch des Kühlwassers notwendig machen. Bei hohen Temperaturen im Wasserkreislauf vermehren sich Bakterien (z. B. Legionellen). Zudem treten Kalk-Ablagerungen je nach Härtegrad des Wassers auf.

2.3.6 Auslegung von Verdunstungskühlanlagen

Der vorliegende Beitrag hat den Anspruch, eine praxisingerechte Informationsschrift für die Auswahl und Auslegung von Verdunstungskühlanlagen und deren späteren Betrieb zu liefern. Vollständigkeit in der Theorie und lehrbuchartige Beschreibung sind dabei ausdrücklich nicht das Ziel. Dementsprechend wird die Auslegung von Verdunstungskühlanlagen an einem exemplarischen Anwendungsfall vorgenommen:

Annahmen:

- Erforderliche Kühlleistung in der Härtere: 4 MW
- Warmwassertemperatur $t_E W$, Eingangstemperatur in Kühlturm: 32 °C
- Kaltwassertemperatur $t_A W$, Ausgangstemperatur aus dem Kühlturm: 25 °C
- Kühlzonenbreite z : 7 °C
- Feuchtkugeltemperatur T_f (damit Kühlgrenztemperatur $T_f + 3 K = 23$ °C): 20 °C
- Füllkörperhöhe im Kühlturm h : 600 mm
- Maximale Luftgeschwindigkeit CA (für Tropfenabscheider): 4,2 m/s.

Mit diesen Daten kann über ein geeignetes Mollier-Diagramm, wie in **Bild 1** dargestellt, die sog. Regendichte ermittelt werden.

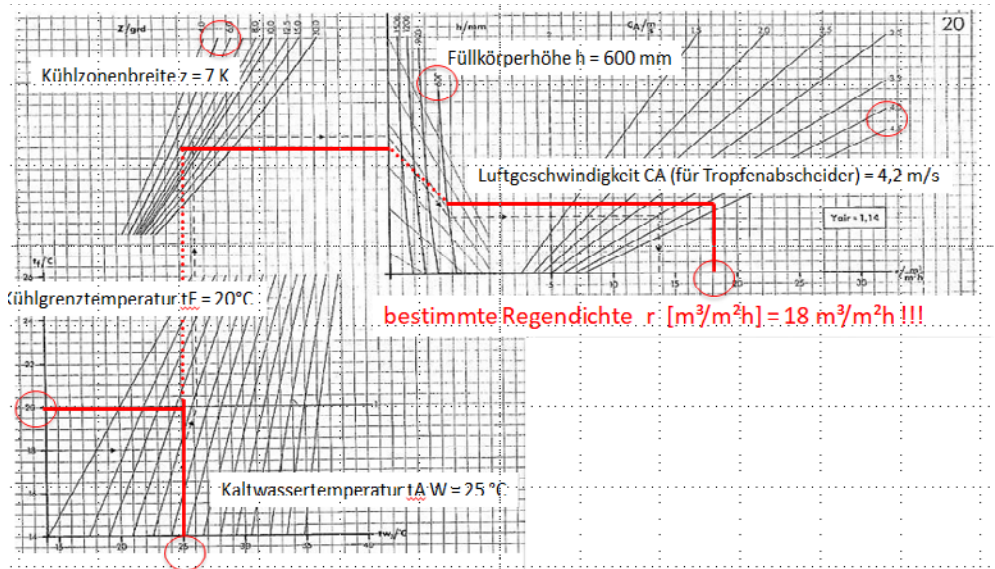


Bild 1: Mollier-Diagramm zur Ermittlung der Regendichte

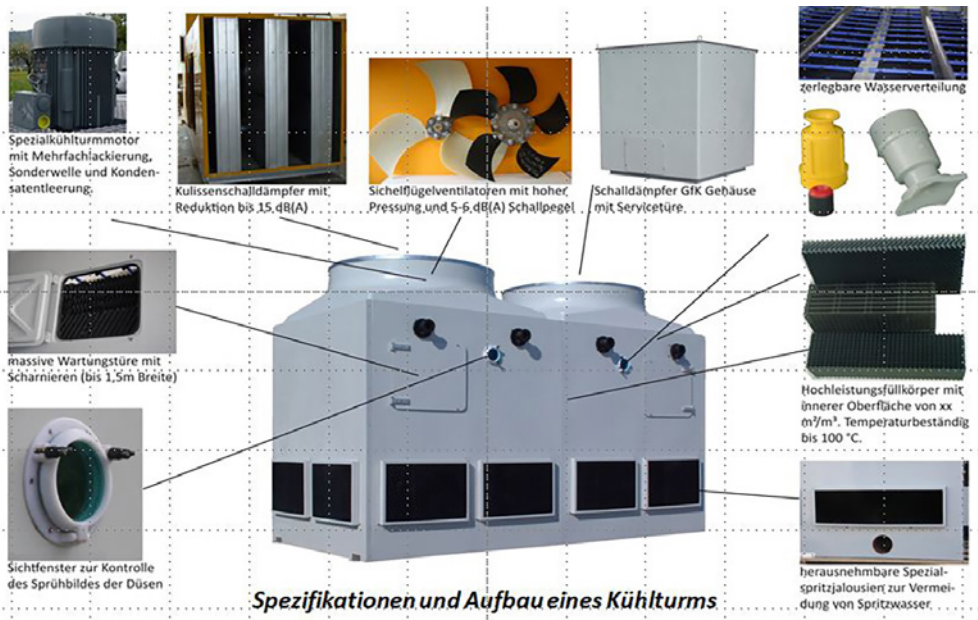
Die Umlaufmenge des Kühlwassers V , mit einer Kühlleistung $P = \text{Massen-/Volumenstrom } V \times \text{Kühllonenbreite } z \times \text{spez. Wärmekapazität } c_p$ ergibt sich folgendermaßen: $V = 4.000 \text{ kW} / 7 \text{ K} \times 1,16 [\text{h} \times \text{kw} / \text{m}^3 \times \text{h}] = 493 \text{ m}^3/\text{h}$. Unter Berücksichtigung der Regendichte $r = 18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{h}$ ergibt sich die Kühlturmfäche $A = V/r = 27,4 \text{ m}^2$. Demnach ist für diesen exemplarische Härterei betrieb ein Verdunstungskühlturm mit einer Fläche von $27,4 \text{ m}^2$ ausulegen.

2.3.7 Auswahl und Bauweise von Verdunstungskühlanlagen

Wie bereits ausgeführt, können bei der Auswahl von Verdunstungskühlanlagen für dem Härterei betrieb kompakte Bauweisen mit hohem Wirkungsgrad ausgewählt werden, die Kühlwassertemperaturen von bis zu 23 °C und verhältnismäßig große Leistungsbreiten von $25\text{-}15.000 \text{ kW}$ bei relativ geringen Investitionskosten aufweisen. **Bild 2** zeigt einige besondere Merkmale, auf die geachtet werden muss.

Dabei muss der Umwälzer nicht immer auf dem Kühlturm platziert sein. Kühltürme mit axialdrückenden Ventilatoren ermöglichen beispielsweise niedrige Bauformen bei verhältnismäßig geringem Schallpegel und einer etwa 2,5-fach niedrigeren Antriebsleistung als Radialventilatoren. Bei dieser Bauform gilt aber zu berücksichtigen, dass stärkere Spritzverluste auftreten. Auch gilt es, bei der Auswahl der Bauform zu berücksichtigen, ob eine im geschlossenen Kreislauf betriebene Hybridkühlung für den Anwendungsfall die optimale Lösung bietet. Diese Technologie vereinigt die getrennte Wasserverdunstung und die Vorteile der Trockenkühlung und Nasskühlung in einem geschlossenen System bei hoher Kühlleistung und verbessertem Wirkungsgrad gegenüber der Trockenkühlung (schlechterer Wirkungsgrad als bei der Nasskühlung aufgrund der hohen Ventilatorleistung) und einem deutlich geringeren Wasserverbrauch im Vergleich zur Nasskühlung.

Das in **Bild 3** dargestellte Anlagenlayout einer Kombination von Kühlturm und Luftkühlung nach dem Prinzip Hybridkühlung mit geschlossenem Kühlwasserkreislauf hat den Vorteil, dass der Luftkühler nur bei Bedarf zusätzlich kühlt. Die Vorteile sind ein geringer Wasserverbrauch, etwa 85%



2

Bild 2: Spezifikationen und Aufbau eines Kühlturms

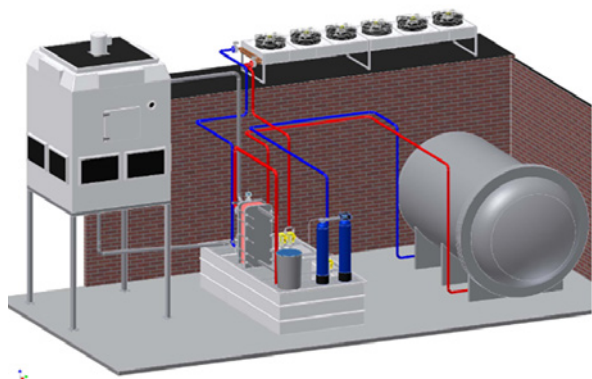


Bild 3: Kombination Kühlturm und Luftkühlung nach dem Prinzip der Hybridkühlung

des Jahres kann die störende Nebelentwicklung vermieden werden und die hohe Effizienz bei schwankender Kühlleistung. Die Nachteile sind: hohe Investitionskosten, hoher Energieverbrauch durch „doppelte Lüfter“, komplexe Regelungstechnik ist über SPS-Steuerung erforderlich und es besteht ein Verschmutzungsrisiko des Wärmetauschers.