

## Wassereinspritzung und Dampfkühlung

Es gibt viele Betriebszustände in Dampfanlagen, in denen temporär Wassertropfen in einem überhitzten Dampfstrom auftreten. Es ist daher wichtig, die Lebensdauer solcher Tropfen möglichst genau zu kennen, besonders dann, wenn sie Turbinenteile, Rohrbogen, Diffusorplatten, Kondensatoreinbauten oder andere tropfenschlag empfindliche Teile der Anlage gefährden können.

Wenn Kühlwasser dem überhitzten Dampfstrom zugegeben wird, ist mit solchen Problemen zu rechnen. Die Dispersion kleiner Tropfen in einer Gasphase wird im üblichen Sprachgebrauch als Sprühnebel bezeichnet.

Abhängig von der Tropfengröße (Durchmesser  $d$ ) kann folgende Unterscheidung getroffen werden:

HD - Sprühtropfen  $d = 0,5$  bis  $100 \mu\text{m}$

ND - Sprühtropfen  $d = 20$  bis  $400 \mu\text{m}$

Tropfenschlagerosion  $d = 60$  bis  $2000 \mu\text{m}$

Praktischer Nassdampf unterscheidet sich wesentlich von Zwei-Phasen-Systemen, die von der Gleichgewichtsthermodynamik her bekannt sind:

- Zustandsparameter ändern sich schnell,
- die Dampfphase ist kein monomolekulares Fluid, sondern enthält auch kondensierte Moleküle,
- zwischen den beiden Phasen tritt relative Bewegung auf (Schlupf),
- Wärmeaustausch findet auch zwischen den Tropfen und der Rohrleitung statt,
- Tropfen können wachsen, verdampfen, miteinander koagulieren oder auf die Wand aufschlagen und sich zerteilen.

Eine Flüssigkeit kann grundsätzlich mit Hilfe von

- Spiraldruckdüsen mit fester oder variabler Öffnung, welche flache, gefächerte, voll- oder hohlkegelförmige Sprühnebel produzieren,
- drehenden Scheiben oder konischen Schalen,
- dampf- oder luftunterstützter Wassereindüsung,
- Ultraschalldüsen,
- einfachen Düsen in Form von "Duschen" und Öffnungen in Kegel und Gehäusen eingespritzt werden.

Eine Reihe dieser Düsenkonstruktionen und die mit ihnen erzielten Sprühnebel sind für Dampfumformventile nicht besonders gut geeignet. Im Folgenden werden einige wichtige Parameter definiert, die für eine effiziente Zerstäubung von Bedeutung sind.

Um überhaupt eine anwendungsgerechte Zerstäubung zu erreichen, muss das Wasser mit einer relativ hohen Geschwindigkeit aus der Düse austreten. Das Wasser, das in Form eines dünnen konischen Films die Düse verlässt, bildet rotationssymmetrische Wellen und oszilliert bis zur Auflösung des Films. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten bricht der Wasserfilm

aufgrund achsensymmetrischer Schwingungen und aerodynamischer Oberflächenstörungen auf. Die Turbulenzen in der Dampfströmung unterstützen diesen Vorgang zusätzlich.

Wenn die Radialkomponente der Geschwindigkeit die Oberflächenspannung des Wassers übersteigt, löst sich der Strahl auf. Diese Strahlauflösung führt zu einem Sprühmuster mit einem Spektrum verschiedener Tropfengrößen und Geschwindigkeiten.

Eine geeignete Düse für Dampfumformventile produziert eine Tropfengrößenverteilung, die ungefähr dem log-normal-Gesetz entspricht. Eine andere, gut passende Verteilung ist jene von *Rosin-Rammler*.

Eine solche Tropfengrößen-Verteilungskurve beschreibt das Sprühmuster sehr genau. Die Tropfengröße wird in der Regel mit Hilfe des mittleren Durchmessers nach *Sauter* angegeben.

Die Darstellung der Tropfengeschwindigkeitsverteilung ist ebenfalls von Interesse für die Berechnung der Verdampfungszeit und -strecke.

Ein Stabilitätskriterium erlaubt dem Ingenieur die Bestimmung der maximalen Tropfengröße, die vorübergehend bei gegebenen Strömungsbedingungen vorliegen kann, ohne dass die Tropfen sofort zerfallen.

Die Tropfenstabilität hängt im Wesentlichen vom Verhältnis der aerodynamischen Druckkräfte ab, die versuchen, die Tropfen zu deformieren, sowie von der Oberflächenspannung durch das Bestreben, eine kugelige Tropfenform zu erreichen. Dieses Verhältnis ist als die Weber-Zahl bekannt.

Bei kleinen Weber-Zahlen bleiben die Tropfen nahezu kugelförmig. Beim Überschreiten der kritischen Weber-Zahl kommt es zu einer fast explosionsartigen Fragmentierung in einem Zeitraum von 1 bis 3 [ms].

Es kann beobachtet werden, dass der von einer Hohlkegeldüse produzierte mittlere Tropfendurchmesser fast linear mit einer Vergrößerung des Düsenaustrittsdurchmessers zunimmt. Der Tropfendurchmesser nimmt ebenfalls mit abnehmender Dichte des Trägermediums zu.

Höhere Dampfgeschwindigkeiten verringern durch Reibung und Oszillation die maximal mögliche Tropfengröße am Einspritzpunkt.

Die Düsenleistung wird in hohem Maße von der Oberflächenspannung, der Dichte, und der Viskosität des Kühlwassers bestimmt.

- Der Massenstrom einer Düse variiert grob mit der Quadratwurzel der Wasserdichte.
- Die Viskosität beeinflusst die Tropfengröße, das entstehende Sprühmuster sowie die Strömungsrate, und hat Auswirkungen auf die Bildung natürlicher Instabilitäten des Flüssigkeitsfilms durch Variation der Reynolds-Zahl.
- Die Oberflächenspannung stellt die Widerstandskraft dar, die Tropfenfläche zu vergrößern.
- Letztere sollte zum Zweck eines verbesserten Wärmeaustausches ein Maximum erreichen.

Der Dampfdruck und die Temperatur (und somit die Dichte) haben erheblichen Einfluss auf den Zerstäubungs- und Verdampfungsvorgang. Der Sprühwinkel und die Tropfengröße variieren als Funktion der Gasdichte. Es sollte angestrebt werden, eine möglichst hohe relative Geschwindigkeit zwischen Tropfen und dem Dampfstrom zu erreichen.

## Vorwärmung und Verdampfung von Tropfen

Die Temperatur innerhalb eines Tropfens wird von der Wärmeleitung über dessen Oberfläche bestimmt. Die Temperatur an der Tropfenoberfläche wird von den Zuständen des Trägerdampfes beeinflusst. Unter bestimmten idealen Bedingungen kann es zu einer Blasenverdampfung im Tropfen kommen, die zu einer explosionsartigen Zersplitterung in kleinste Tropfenbruchstücke führt.

Sobald Wasser in Heißdampf eingedüst wird, kommt es zum Wärmeaustausch zwischen dem Gas und der Flüssigkeit. Der Verdampfungsprozess umfasst gleichzeitig Wärme- und Stofftransport.

Zunächst müssen die Tropfen bis zur Sättigungstemperatur  $T_s$  aufgeheizt werden. Während dieses Vorwärmvorganges wird die übertragene Wärme in Tropfenenthalpie umgewandelt. Nach Erreichen der Sättigungstemperatur wird die Verdampfungswärme vom Dampf durch Konvektion und Wärmeleitung an die Tropfenoberfläche übertragen. Der Wärmestrom wird in latente Verdampfungswärme umgewandelt, die eine Funktion von  $p$  und  $T$  ist. Wasserdampf wird mittels Konvektion und Diffusion zurück in den Dampfstrom geleitet.

Je kleiner die ursprüngliche Tropfengröße, desto geringer ist die Vorwärm- und Verdampfungszeit, welche wiederum eine kürzere Verdampfungsstrecke zur Folge hat. Der Wärmeübergangskoeffizient, die Reynolds'-Zahl der Tropfen, die Nusselt-Zahl (Wärmeübergang durch Konvektion), die Oberflächenspannung und Viskosität der Tropfen sind wichtige Faktoren bei diesen Berechnungen.

Bei einer vollständigen Analyse der Mechanik in Dampf- und Tropfenmischungen sind weiter zu beachten:

- Tropfenwiderstandskräfte im Dampfstrom und entsprechende Widerstandskoeffizienten,
- Koagulation und Abprallen der Tropfen,
- Tropfenschlag, Ablagerung und Sekundärzerstäubung,
- Tropfendehnung und Zerfall durch Resonanz, hohe Geschwindigkeitsgradienten, Turbulenzen, Schockwellen, Tropfenschlag, etc.,
- Zerfallsmuster und Formen.

Es stehen heute im Wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung, mit denen Zwei-Phasen-Strömungen im Austrittsbereich von Dampfumformventilen und Dampfkühlern bei Eindüsung von Kühlwasser modelliert werden können:

① die Euler-Methode einer lokalen Betrachtungsweise mit den physikalischen Größen als Funktion des Ortes und der Zeit.

② das Lagrange-Modell für verteilte Phasen.

Die Euler-Methode wendet die Kontinuitätsbeziehung der Massenerhaltung der flüssigen und gasförmigen Phase in einem fest definierten Referenzrahmen an.

Der Ansatz von Lagrange, mit einem beweglichen Rahmen, betrachtet die Bewegung und den Transport von diskreten flüssigen Partikeln durch ein Strömungsfeld. Er beschreibt das bewegte Fluid als einen Punkthaufen mit gewissen Bewegungseinschränkungen, und erfasst das Tropfenverhalten besser. Er liefert mehr Informationen über den Partikelzustand, Tropfenentwicklung, Abprall- und andere Wandeffekte. Jedem Tropfen wird dabei ein bestimmter Lagevektor zurzeit  $t=0$  zugewiesen. Die Bahnaufzeichnungen der Wassertropfen werden

durch Integration der Navier-Stokes'schen Differentialgleichungen berechnet. Letztere enthält auch die zweiten Ableitungen der Geschwindigkeiten und ist damit von höherer Ordnung als die Euler'sche Bewegungsgleichung.

Beide Phasen, Wasser und Dampf, werden bei diesem Lösungsansatz durch Standardkorrelationen gekoppelt.

Eine genauere Vorhersage der Verdampfungszeit eines bestimmten Sprühnebels beinhaltet die Untersuchung eines möglichen Flüssigkeitsfilms entlang der Rohrwand sowie sekundärer Filmzerstäubungseffekte aufgrund der Dampf-Strömungsturbulenzen und Geschwindigkeitsunterschiede zwischen dem Dampfstrom und Wasserfilm.

### **Konstruktion von Wassereinspritzdüsen**

Die vorhergehenden Aussagen verdeutlichen, dass die Konstruktion der Wasserdüsen, die anfängliche Tropfengröße, der Eindüsungspunkt, die Geometrie des Ventilaustritts sowie der Zustand des Fluides die effiziente und störungsfreie Kühlung wesentlich beeinflussen.

Der Zustand des Fluides kann im Allgemeinen nicht frei durch den Konstrukteur bestimmt werden. Dies gilt nicht für die Mechanik und die aerodynamische Gestaltung, welche im Zusammenwirken zur Erlangung eines optimalen Zerstäubungsergebnisses berücksichtigt werden müssen.

Der aus physikalischer Sicht betrachtete beste Eindüsungspunkt ist häufig aus Betriebs-, Zuverlässigkeits- und Lebensdauergründen von Bauteilen nicht der geeignetste Ort.

In einem Dampfumformventil stellt der gesamte Kühlwasserweg ein kritisches Element dar. Der interne Wasserdosierungsmechanismus in einem kombinierten Ventil muss in einem bestimmten Verhältnis zu der Charakteristik des Regelkegels und zu den jeweiligen Wasser-/Dampfzuständen ausgelegt werden. Außerdem muss ein ausreichender Zerstäubungsdruck über den gesamten Betriebsbereich zur Verfügung stehen. Die Wasserdosierung und Düsengeometrie sind maßgeschneiderte Konstruktionen und berücksichtigen anlagenspezifische Variationen der Dampf- und Wasserzustände. Dadurch wird eine optimale Temperaturregelung über den gesamten Lastbereich garantiert.

Wichtige Komponenten der Düse sind das integrierte Drall Element und eine nachfolgende Beschleunigungskammer. Die Drallstrecke erzeugt ein Moment, welches das austretende Wasser gleichmäßig verteilt, den Wasserfilm stabilisiert und dessen Geschwindigkeit erhöht. In der Beschleunigungskammer werden Wassergeschwindigkeit und damit die relative Geschwindigkeit zwischen Wassertropfen und Trägerdampf weiter gesteigert. Die relative Geschwindigkeit ist von größter Wichtigkeit beim Kühlungsprozeß. Die Wasseraustrittsöffnung sollte groß genug sein, um kleinere Verschmutzungen durchzulassen, und klein genug, um einen feinen Sprühnebel zu produzieren.

Die Tropfengröße hat einen großen Einfluss auf die Gesamtverdampfungszeit. Die Tropfen sollten kleinstmöglich und gleichmäßig über den gesamten Strömungsquerschnitt verteilt sein. Eine größere Anzahl feiner Tropfen erhöht automatisch die gesamte Tropfen-Dampf-Berührungsoberfläche, die den Wärmeaustausch verbessert.