

# Dampfdruck und -temperatur im Griff: Bewährte Verfahren zur Dampfkühlung

## Control of steam pressure and temperature: Proven steam-cooling methods

Elmar Götte, Britta Daume

*Dampfkühler und -sättiger halten in Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckleitungen die Temperatur des Dampfes konstant.*

*Zur Dampfkühlung empfehlen sich je nach Einsatzfeld verschiedene Verfahren. Dabei ist der Regelkreis zur Dampfkühlung von unterschiedlichen Faktoren und Einflussgrößen abhängig, zum Beispiel von der Verdampfungs- und Mischstrecke. Der folgende Beitrag beschreibt unter anderem, welche Berechnungsverfahren sich für die Bestimmung der Verdampfungs- und Mischstrecke anbieten, unterschiedliche Einspritzkühler-Bauformen für verschiedene Betriebs- und Einsatzbedingungen sowie die Einspritzung mit und ohne vorgeschaltete Druckreduzierstation.*

*Steam coolers and saturators keep steam temperature constant in high-, medium- and low-pressure lines.*

*Various methods can be recommended for steam cooling, depending on the specific application. The steam-cooling control loop is dependent on a range of variables and influencing factors, such as evaporation and mixing line lengths, for example. The following article examines inter alia the calculation procedures which can be used for determination of evaporation and mixing line length, various injection-cooler types for a range of operating and service conditions, and injection with and without an upstream pressure-reduction station.*

**D**ampfkühler und Dampfsättiger finden vielfältigen Einsatz in Rohrleitungsnetzen der dämpferzeugenden und -verbrauchenden Industrien, zum Beispiel in Anlagen von Energieversorgungsunternehmen (EVU), in Blockheizkraftwerken oder Industriekraftwerken. Sowohl in Hochdruck- und Mitteldruckleitungen mit stark überhitztem Dampf als auch in Niederdruckleitungen mit nur schwach überhitztem Dampf bzw. Sattdampf sollen Dampfkühler und -sättiger die Temperatur des Dampfes möglichst konstant halten.

Zum einen müssen Temperaturanstiege,

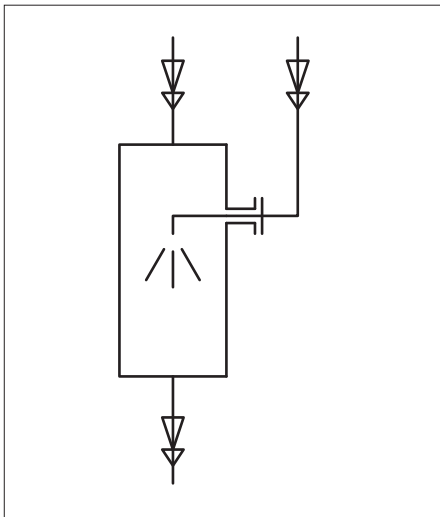
zum Beispiel in einem Kraftwerk, in Folge von Lastreduzierung und Stromabnahme an einer Turbine durch Kühlung ausgeglichen werden. Andererseits wirken sich diskontinuierliche Arbeitsweisen der Dampfverbraucher verändernd auf den Dampfzustand der einzelnen Schienen eines Dampfnetzes aus. In beiden Fällen lassen sich über Bypass-Stationen mit Druckreduzierung und Kühlung die Veränderungen des Dampfzustandes ausgleichen.

Wird Dampf für Heizzwecke benötigt, empfiehlt sich unmittelbar vor dem Verbraucher die Integration eines Dampf-

sättigers, denn Sattdampf bzw. nur schwach überhitzter Dampf garantieren den besten Wärmeübergang.

### Dampfkühlung durch Einspritzung

Für die Dampfkühlung auch bis nahe an die Sattdampftemperatur heran hat sich als Verfahren das Einspritzen von fein verteiltem Kühlwasser bzw. Kondensat in den Dampfstrom bewährt (**Bild 1**). Bei diesem Mischprozess wird das eingespritzte Kühlwasser durch den Dampf erwärmt. Das Kühlwasser verdampft und überhitzt, während der Dampf



**Bild 1:** Einspritzen von Kühlwasser bzw. Kondensat in den Dampfstrom zur Dampfkühlung

**Fig. 1:** Steam cooling by means of injection of cooling water and/or condensate into the steam flow

selbst gekühlt wird. Aus der Gleichheit der Enthalpien und der Summe der Massenströme kann die benötigte Einspritzmenge bestimmt werden.

Der Vorgang des Verdampfens und Mischens benötigt Zeit und findet bei strömendem Dampf in der Rohrleitung stromabwärts von der Einspritzstelle statt.

## Regelung der Einspritzkühler

Nach vollständiger Verdampfung des eingespritzten Kühlwassers und Mi-

schung mit dem überhitzten Dampf kann die Temperatur gemessen und als Istwert zur Regelung der Einspritzmenge genutzt werden. Für den Regelkreis „Einspritzkühler“ muss hierzu der notwendige Abstand des Temperatur-Messumformers von der Einspritzdüse ermittelt werden. Um Fehlmessungen durch noch nicht verdampfte Tröpfchen oder heiße Dampfstrahlen zu vermeiden, sollte dieser Abstand bei allen Betriebszuständen größer sein als die eigentliche Verdampfungs- und Mischstrecke (**Bild 2**).

Praktische Erfahrungen mit Einspritzkühlern zeigen, dass in den meisten Anwendungsfällen für die Auslegung des Abstandes des Temperatur-Messumformers zur Einspritzdüse die maximale Dampfgeschwindigkeit in der Dampfleitung maßgeblich ist. Für sie ist daher die Verdampfungs- und Mischstrecke zu bestimmen, da sich hieraus der Abstand zwischen Temperaturfühler und Einspritzdüse ergibt. Der Abstand des Temperaturfühlers wird hierbei zur Sicherheit noch ein wenig größer gewählt.

Für den Regelkreis ergibt sich aus dem Abstand zwischen Einspritz- und Temperaturmessstelle eine von der Dampfgeschwindigkeit abhängige „Totzeit“, die umgekehrt proportional zur Dampfgeschwindigkeit ist. Verringert sich die Dampfgeschwindigkeit, vergrößert sich die Totzeit. Die Folge: Der Regelkreis gerät in Schwingungen. Somit bestimmt

die zulässige Abweichung vom Temperatursollwert die minimale Dampfgeschwindigkeit im Schwachlastbereich.

## Einflussgrößen auf Verdampfung und Mischung

Gleich mehrere Parameter beeinflussen die notwendige Länge der Verdampfungs- und Mischstrecke. Einige dieser Einflussgrößen sind durch die Betriebsbedingungen vorgegeben und lassen sich nicht beeinflussen, wie Druck und Temperatur vor und nach dem Kühler.

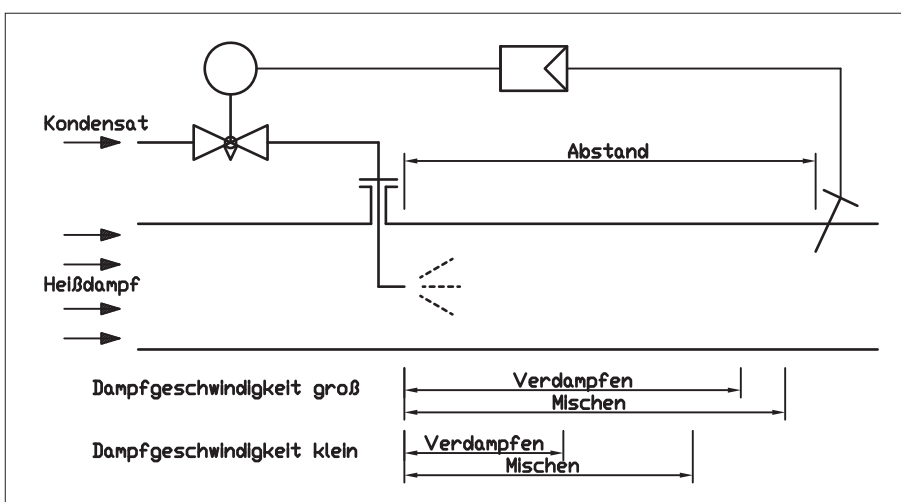
Andere Parameter wiederum korrelieren mit der Auslegung der Einspritzdüsen und hängen von eventuellen Einbauten in die Rohrleitung zur Verbesserung der Vermischung ab. Diese Parameter ermöglichen daher eine Verkürzung der Verdampfungs- und Mischstrecke und vergrößern so den gewünschten stabilen Regelbereich.

Eine dieser Einflussgrößen ist die bei der Einspritzung von der Düse erzeugte Tropfengröße und die Tropfenverteilung über den Leitungsquerschnitt: je kleiner die Tropfen und je gleichmäßiger deren Verteilung über den gesamten Rohrquerschnitt, desto kürzer die Verdampfungsstrecke.

Druckzerstäuberdüsen mit Hohlkegel- oder Vollkegelsprühbild (**Bild 3**) wie der Typ 910 1-5 von Daume Regelarmaturen finden häufig bei Einspritzkühlern ihren Einsatz. Bei diesen Düsen wird das Wasser zunächst durch einen Drallkörper in Rotation um die Düsenachse versetzt und gelangt dann über eine konische Wirbelkammer zur Düsenöffnung. Die erzeugte Tropfengröße hängt von folgenden Faktoren ab:

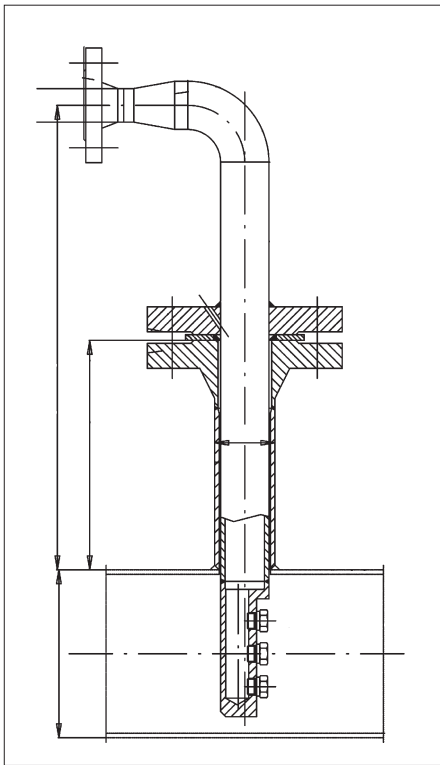
- Erzeugter Sprühwinkel
- Druckabfall über der Düse
- Durchmesser der Düsenöffnung

Während der Sprühwinkel nur geringen Einfluss auf die Tropfengröße hat – bei größerem Sprühwinkel werden die Tropfen (bei sonst konstanten Bedingungen) geringfügig kleiner – wirkt sich der Druckabfall über diese Düse entscheidend auf die Größe der Tropfen aus. Die erzeugte Tropfengröße ist etwa umgekehrt proportional zu dem Druckabfall (und dem Durchsatz).



**Bild 2:** Ermitteln Abstand des Abstandes Temperatur-Messumformer – Einspritzdüse

**Fig. 2:** Determination of the necessary distance between the temperature transducer and the injection nozzle



**Bild 3:** Druckzerstäuberdüsen mit Hohlkegel- oder Vollkegelsprühbild

**Fig. 3:** Pressure atomization nozzles with hollow-cone or full-cone spray pattern

Der erzeugte Tropfendurchmesser ist dagegen dem Durchmesser der Düsenöffnung in etwa direkt proportional. So beträgt zum Beispiel der mittlere Tropfendurchmesser bei einer Düse mit einem Durchmesser von 2 mm bei einem Druckabfall von 30 bar zirka 0,2 mm. Bei einer Düse mit 5 mm Durchmesser bei 0,5 bar Druckabfall ist der Tropfendurchmesser fast 1 mm.

### Verkürzung der Verdampfungstrecke

Zweistoffdüsen mit einem gasförmigen Treibmittel (**Bild 4**) Typ 900 1A-6B von Daume Regelarmaturen sind besonders wirkungsvoll, wenn es darum geht, kleine Tropfendurchmesser zu erzielen und damit die Verdampfungstrecke zu verkürzen. In Einspritzkühlern zur Dampfkühlung wird vorzugsweise Dampf mit höherem Druck als Treibdampf verwendet, der den Tropfendurchmesser gegenüber Druckzerstäuberdüsen auf mehr als ein Zehntel senkt.

Auch eine hohe Dampfgeschwindigkeit an der Einspritzstelle mit stark turbulen-

ter Dampfströmung verkürzt die Verdampfungs- und Mischstrecke, da sich durch die Turbulenzen die eingespritzten Tröpfchen noch weiter zerteilen.

Bei sehr geringer Dampfgeschwindigkeit kommt es hingegen im Schwachlastbereich mitunter zu einer laminaren Dampfströmung. Hierdurch wird die Verdampfung sehr verlangsamt und eine Vermischung findet praktisch nicht statt. In einem solchen Fall kann sich der für maximale Dampfgeschwindigkeit ausreichende Abstand des Messfühlers als zu klein erweisen.

### Verlängerung der Verdampfungstrecke

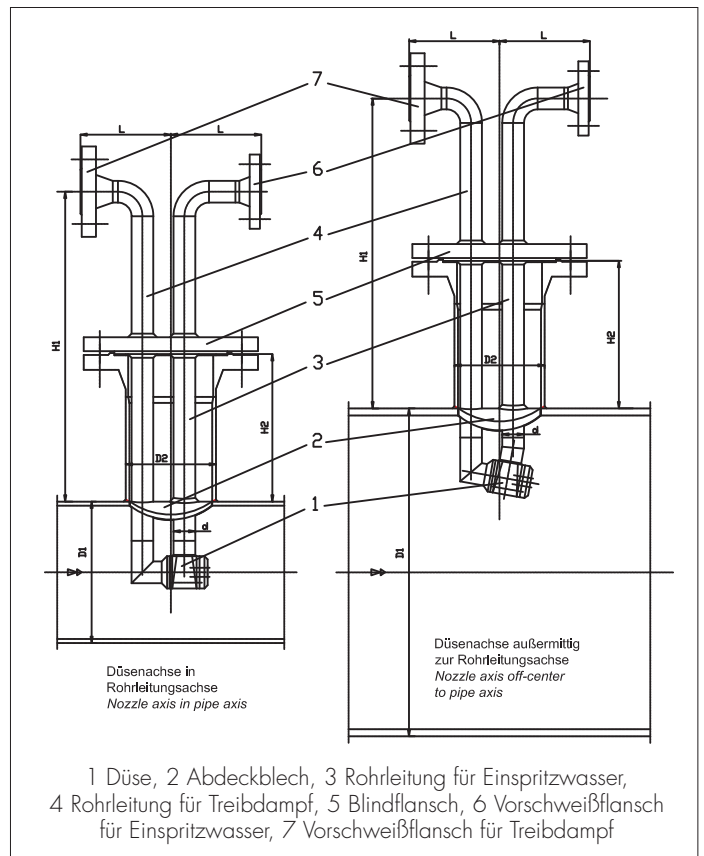
Eine Benetzung der Rohrwand durch nach außen gerichtete Düsen führt zu einer Verlängerung der Verdampfungstrecke, da ein Wasserfilm an der Rohrwand oder eine Wasserlache am Rohboden bei waagerechten Rohren nur sehr langsam verdampfen. In praktischen Einsatzfällen hat Daume Regelarmaturen festgestellt, dass in diesem Zusammenhang selbst ein Messfühlerabstand von 30 Metern zur Einspritzdüse zu keinem befriedigenden Regelergebnis führte.

Mit zusätzlichen Mischeinbauten wie zum Beispiel Umlenkungen, Lochkörbe oder Blendenringe und einer frühzeitigen und wirksamen Entwässerung der Rohrleitung lassen sich derartige Probleme aber in den Griff bekommen.

### Bestimmung der Verdampfungs- und Mischstrecke

Zur Bestimmung der Verdampfungs- und Mischstrecke bieten sich verschiedenste Berechnungsverfahren an. So ermöglicht ein an der Technischen Universität Delft entwickeltes Programm die Berechnung der Tropfengröße, der Tropfenbahn und der Tropfen-Verdampfungszeit für bestimmte Düsenformen. Der Einsatz dieses aufwendigen Programms ist allerdings nur in sehr komplexen Anwendungsfällen sinnvoll.

Für andere Anwendungen empfehlen sich Berechnungsdiagramme gemäß VGB R 540 (Dampfkühlung in Wärmekraftanlagen). Zudem lässt sich mit Hilfe des in **Bild 5** dargestellten Diagrammes (anwendbar auf die Düsenstöcke von Daume Regelarmaturen bei einer Dampfgeschwindigkeit von 40 m/s)

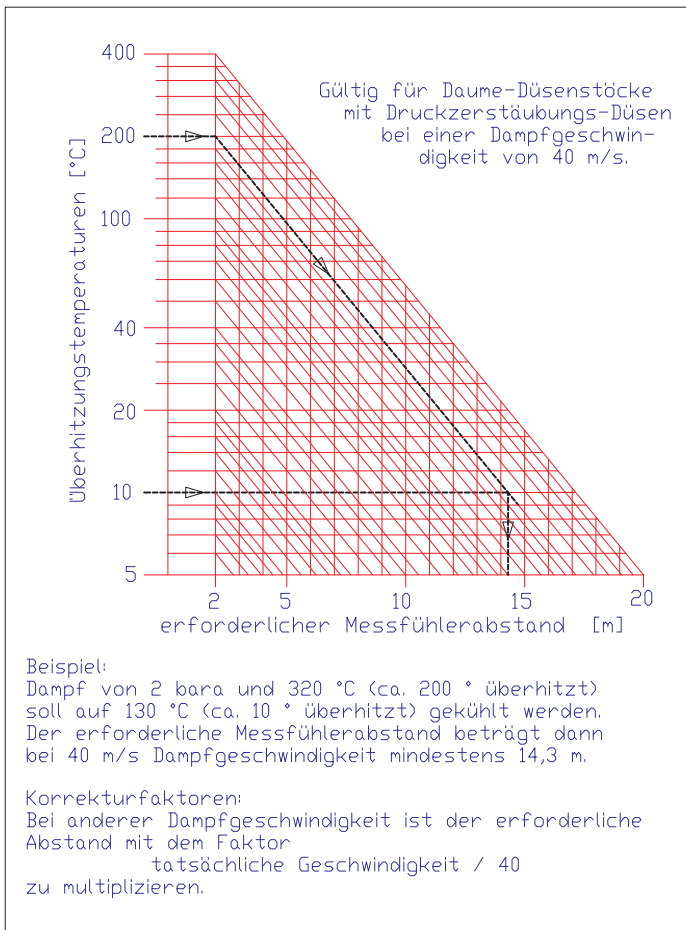


**Bild 4:**

Zweistoffdüse mit einem gasförmigen Treibmittel

**Fig. 4:**

Dual-fluid nozzle with a gaseous propellant fluid



**Bild 5:** Diagramm für das Bestimmen des notwendigen Abstands des Temperaturfühlers von der Einspritzstelle für einen bestimmten Betriebsfall

**Fig. 5:** Diagram for determination of the necessary distance between the temperature sensor and the injection point for a specific operating case

Oft lässt sich eine Dampfkühlung auch direkt mit einer Druckregelung kombinieren. Eine solche Anlage nennt man „Dampfumform-Station“.

## Einspritzung ohne vorgeschaltete Druckreduzierstation

Je nach Einsatz bzw. Leitungsdurchmessern bieten sich zur Verkürzung der Verdampfungs- und Mischstrecke sowie Erhöhung des Regelbereichs als Einspritzkühler Druckzerstäuberdüsen, Venturikühler oder Zweistoffdüsen an.

Die einfachste Art der Einspritzung ist die Anordnung von einer Druckzerstäuberdüse oder mehreren Druckzerstäuberdüsen auf einem Rohr, das über einen Anbauflansch in die Dampfleitung integriert wird. Die Regelung der Einspritzmenge dieses Düsenstockes von Daume Regelarmaturen erfolgt über ein vorgeschaltetes Regelventil für das Einspritzwasser (**Bild 6**).

Diese Form der Einspritzung eignet sich besonders für den Einbau in Mittel- und

der benötigte Abstand des Temperaturfühlers von der Einspritzstelle für einen bestimmten Betriebsfall mit der jeweils erforderlichen Genauigkeit bestimmen.

Zur Ermittlung des Messfühlerabstands von der Einspritzstelle folgt man dem geneigten Linienzug von der Überhitzungstemperatur des ungekühlten Dampfes nach rechts unten bis zu dem Schnittpunkt mit der waagerechten Linie der Überhitzungstemperatur des gekühlten Dampfes. Folgt man hier der Senkrechten zur x-Achse, lässt sich auf dieser der gesuchte Mindestabstand zwischen Einspritzstelle und Messfühler ablesen - in diesem Fall etwas mehr als 14 Meter.

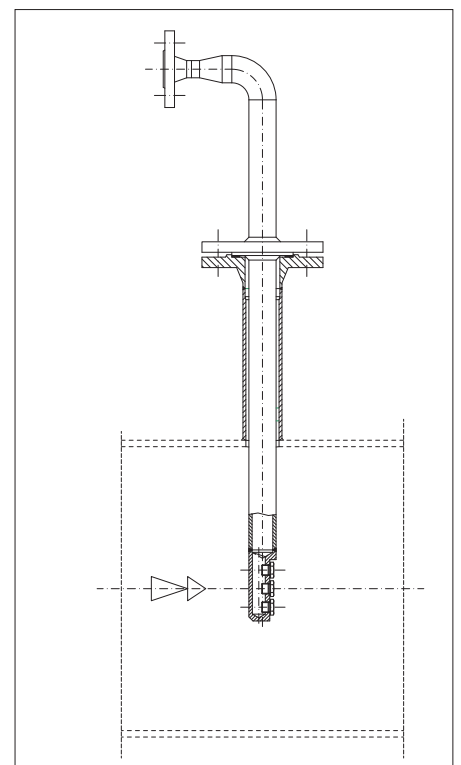
Der ermittelte Wert lässt sich zusätzlich durch Korrekturfaktoren für abweichende Betriebsdaten bzw. für andere Kühlerbauarten anpassen.

## Einspritzkühler-Bauformen

Die verschiedenen Einspritzkühler-Bauformen von Daume Regelarmaturen de-

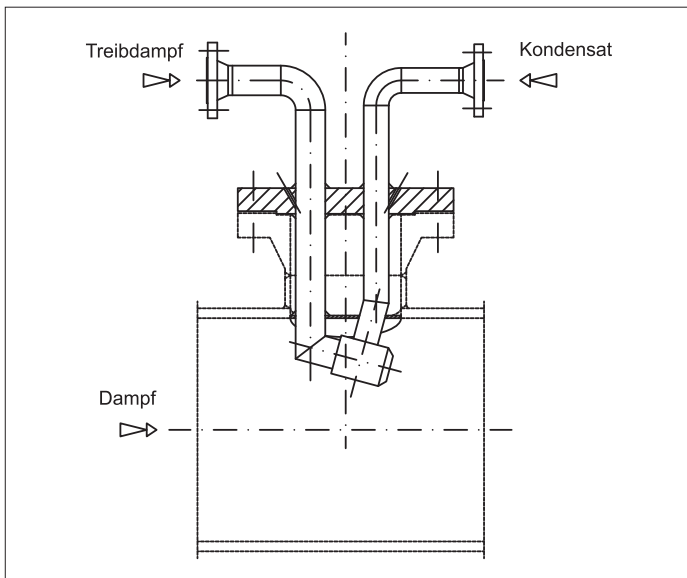
cken unterschiedliche Betriebs- und Einsatzbedingungen ab. Konstruktive Gegebenheiten und wirtschaftliche Gesichtspunkte bestimmen die für den jeweiligen Einsatzfall optimale Lösung. In vielen Fällen reicht eine einfache Lösung zumeist aus. Dauerbetrieb, hohe thermische Beanspruchung, rascher Wechsel der Lastfälle und die Notwendigkeit eines weiten Regelbereichs rechtfertigen hingegen einen höheren Aufwand. Argumente für eine höhere Investition sind in diesem Zusammenhang zufriedenstellende Betriebsergebnisse und lange, störungsfreie Reisezeiten (Zeiten zwischen der Wartung bzw. Inspektion).

Ein weiteres Kriterium für die Wahl des Einspritzkühlers ist die Frage, ob mit der Dampfkühlung auch eine Druckreduzierung erfolgen soll. Solitäre Einspritzungen sind praktisch ohne bzw. mit vernachlässigbar kleinem Druckverlust verfügbar. Einige Bauformen nehmen mit Blick auf kürzere Verdampfungs- und Mischstrecken einen geringfügigen Druckverlust in Kauf.



**Bild 6:** Vorgeschaltetes Regelventil für das Einspritzwasser

**Fig. 6:** Upstream control valve for injection water



**Bild 7:**  
Zweistoffdüse

**Fig. 7:**  
Dual-fluid nozzle

aus der Rohrmitte zum Rand unter einem Winkel zur Rohrachse angeordnet werden.

Bei großen Leitungsdurchmessern über DN 1000 wird durch eine windschief zur Rohrachse angeordnete Treibdampfdüse (Rohrachse und Einspritzachse der Treibdampfdüse schneiden sich nicht) eine Drehbewegung des Dampfes um die Rohrachse erzeugt. Das Resultat ist eine gleichmäßige Verteilung des gekühlten Dampfes über den gesamten Rohrquerschnitt schon nach wenigen Metern.

Die aufwendige Bauart der Treibdampfdüsen ermöglicht eine sehr günstige Vermischung des eingespritzten Wassers mit dem Treibdampf vor der Düse. Das über ringförmig angeordnete Bohrungen in der gehärteten Innendüse austretende Wasser wird hierbei von einem inneren Treibdampfstrahl und einem äußeren Treibdampfhohlstrahl bestmöglich erfasst und zerstäubt.

### Einspritzungen mit Druckreduzierstation

Alle oben beschriebenen Bauarten von Einspritzkühlern sind auch direkt hinter

Niederdruck-Dampfleitungen im Bereich von DN 80 bis DN 400. Vorausgesetzt am Eintritt herrschen gleicher Druck und gleiche Temperatur, beträgt die Dampfmenge 10 bis 100 % und damit auch die notwendige Einspritzwassermenge 10 bis 100 %. Im Regelbereich für diese Einspritzwassermenge liefern solche Anlagen zufriedenstellende Ergebnisse. Die Einspritzmenge sollte aber möglichst nicht unter 10 % liegen, da sonst die geringere Dampfgeschwindigkeit den Mischprozess, zum Beispiel durch unterschiedlich heiße bzw. kalte Dampfstrahlen, erschwert.

Größerer Turbulenz durch örtliche Erhöhung der Dampfgeschwindigkeit an der Einspritzstelle verkürzt ebenfalls die Verdampfungs- und Mischstrecke, da hierdurch die Tröpfchen durch die größere Turbulenz aufgrund der Druckschwungung zusätzlich zerteilt werden. Die Erhöhung der Dampfgeschwindigkeit wird erreicht, in dem man den Durchmesser der Dampfleitung um etwa die Hälfte reduziert. Somit wird ein Regelbereich mit guter Regelqualität bis etwa 1:10 erreicht. Obwohl solche Venturikühler mit seitlicher Eindüsung einen kleinen bleibenden Druckabfall erzeugen – je nach Einschnürung, von 0,3 bis 0,7 bar – haben sie sich insbesondere für kleine Leitungsdurchmesser ab DN 40 bis DN 200 bewährt.

Die kürzesten Verdampfungs- und Mischstrecken und ein größerer Regelbereich lassen sich durch Einsatz von

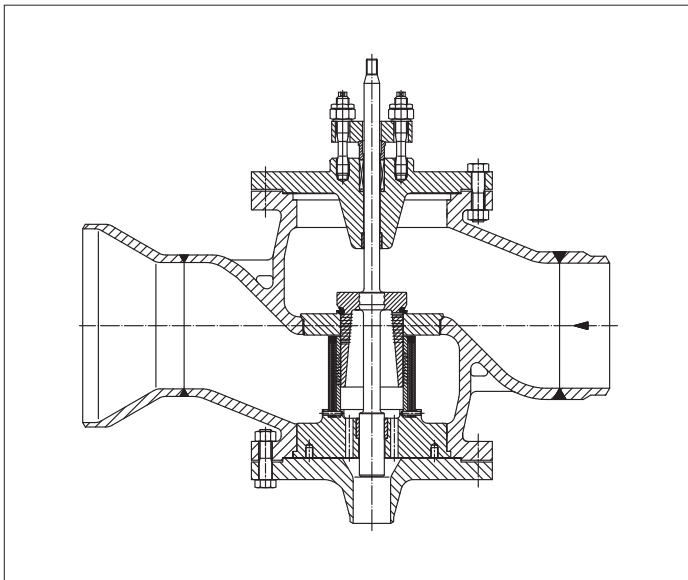
Zweistoffdüsen (**Bild 7**) erzielen, in denen als gasförmiges Treibmittel Dampf aus einer Schiene mit höherem Druck verwendet wird. Durch die zusätzliche Treibdampfleitung, das Treibdampf-Absperr- bzw. Treibdampf-Regelventil und dessen elektronische Steuerung ergibt sich bei solchen Düsen ein höherer Implementierungsaufwand. Bei größeren Durchmessern der Dampfleitung (etwa ab DN 400) kann die Treibdampfdüse



**Bild 8:** Dampfdruckreduzierventil mit nachgeschalteter Kühlung

**Fig. 8:** Steam-pressure reducing valve with downstream cooling





**Bild 9:**  
Druckreduzierventil  
mit einem Treib-  
dampf-abgriff

**Fig. 9:**  
Pressure-reducing  
valve with propel-  
lant-steam take-off

Eine kostengünstige Bauform einer Dampfumformstation ist ein Druckreduzierventil mit kombinierter Einspritzung im Sitzbereich. Solche Ventile werden auch als Dampfumform-Ventile bezeichnet. Die hier vorhandene größtmögliche Turbulenz erzeugt kleinste Tröpfchen und beschleunigt die Verdampfung und Vermischung außerordentlich.

einem Druckreduzierventil realisierbar. Von Vorteil ist hier der Einsatz einer Treibdampfdüse. Das Treibdampfventil kann als Absperr- oder Regelventil im Bypass zum Druckreduzierventil integriert werden. Die Bypassleitung lässt sich dann zum Beispiel auch als Vorwärmleitung nutzen (**Bild 8**).

Um den regeltechnischen Aufwand gering zu halten, haben sich vor allem bei großem Druckgefälle Druckreduzierventile mit einem Treibdampf-abgriff bewährt (**Bild 9**). Hierzu ist eine Treibdampfanzapfung am Sitz oder bei mehrstufigem Druckabbau in der ersten Stufe vorgesehen.



**Dr.-Ing. Elmar Götte**  
Daume Regelarmaturen  
GmbH  
30916 Isernhagen  
Tel. +49 (0)511 90214-0  
Tel. +49 (0)511 90214-17



**Dipl.-Ing. Britta Daume**  
Daume Regelarmaturen  
GmbH  
30916 Isernhagen  
Tel. +49 (0)511 90214-0  
Tel. +49 (0)511 90214-17