

## Wie der Injektor funktioniert

In der Einleitung wurde festgestellt, daß Giffard den Injektor in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit einem Geistesblitz erfunden hatte, als unsere Wissenschaft noch reichlich rückständig war, verglichen mit dem, was heute verfügbar ist. Ich glaube, daß es ihm unmöglich war, die genaue Wirkung der Bewegung der Flüssigkeiten in den Konuselementen vorherzusagen, aber er nutzte seine praktischen Kenntnisse und einen guten Forschersinn. Und ich wage zu sagen, daß auch ein wenig Glück im Spiel war, denn in Umfeld relativ niedriger Kesseldrücke zu jener Zeit gab es reichlich Gestaltungsspielraum beim Entwurf und der Realisierung der Erfindung, selbst wenn alle Randbedingungen nicht optimiert werden konnten.

Um die Funktionsweise des Injektors zu verstehen können wir moderne Informationen ausnutzen, um vorherzusagen was in den Konuselementen passiert, wenn der Dampf zu Wasser kondensiert, wenn er mit dem viel größeren Volumenstrom des Wassers kombiniert wird, bevor das Gemisch in Richtung Kessel strömt. In diesem Buch werden Sie feststellen, dass häufig Kegel von  $9^\circ$  verwendet werden. Dies ist ein ganz ehrlicher Ansatz, da die Vorteile von kleineren Steigungen durch praktische Überlegungen und Schwierigkeiten bei der Herstellung schnell ausgeglichen werden.

Die andere Erkenntnis aus Venturi's Arbeit erscheint vielleicht ein wenig überraschend, nämlich , dass bei abnehmenden Rohrdurchmesser der Druck sinkt, die Flüssigkeit ihre kinetische Energie auf Kosten der anderen Energieformen steigert, und die ist insbesondere der Druck.

Überlegen wir mal, was die moderne Wissenschaft uns hier sagen kann:

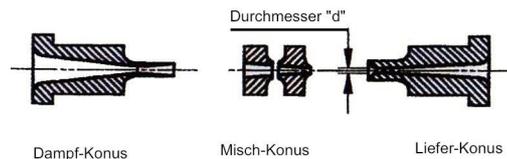
Nehmen wir an, der Dampfdruck im Kessel sei 80 psig. (6,5 bar).  
Der gesamte Wärmehalt ist 2760 kJ/kg

Nun, wenn der Dampf isentrop auf Atmosphärendruck entspannt (was so effizient wie theoretisch möglich und ohne Verlust wäre) , dann würde etwa 10% dieser Energie in eine andere Form, vornehmlich in kinetische Energie umgesetzt werden. Wir wissen, dass bei keinem realen Prozeß dieser theoretischen Wert erreicht werden kann, jedoch können wir untersuchen, was in der Praxis in einem Injektor passiert.

Wir beginnen bei der Betrachtung mit dem Vorgang , der in dem ersten Konus (dem Dampf-Konus des Injektors) stattfindet.

Ein Blick auf Abb. 2.1 zeigt die drei Konus-Elemente, welche die Innereien des Injektors bilden. Dabei ragt der Dampf-Konus leicht um einen kleinen Betrag "d" in den Misch-Konus hinein.

Eine ähnliche Lücke gibt es am Austritt auf der anderen Seite zwischen dem Misch-Konus und dem Austritts-Konus. Nur als eine Konvention werden Injektoren mit Bezug auf "d" benannt, dem kleinsten Konusdurchmesser des Liefer-Konus. Dies ist realistisch, denn es ist die Lochgröße in diesem Bauteil, womit die Fließgeschwindigkeit durch das System bestimmt wird.



Betrachten wir den Dampf, wie er aus dem Kessel in den Dampf-Konus eintritt.

Bei seinem Druckzustand hat er keine kinetische Energie, aber die anderen Energieformen sind groß und wurden beim Siedevorgang auf ihn übertragen.

Ein Blick in die Dampf-Tabellen zeigt, dass bei Dampf von 80 psig rund 8% des gesamten Energieinhaltes für die nützliche Arbeit freigesetzt werden kann, wenn der Dampf aus einer Düse austritt. (Ich lasse hier einige unweigerlich auftretende Verluste außer Betracht). Es ist übrigens nur diese Energie, die wir in einer Maschine nutzen können, wenn sie ihre nutzbare Arbeit leistet.

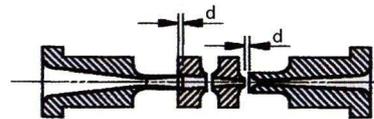


Bild 2.1 Die drei Konus - Düsen und die Position wie sie im Grundkörper eingebaut sind .

Beim Absenken des Druckes wird ein Teil der Energie in kinetische Energie umgewandelt, und man kann einfach zu mathematisch zeigen, daß die Geschwindigkeit des Dampfes bei Reduktion auf Atmosphärendruck einen Betrag von 2000 bis 2200 m / sec erreicht. Dies geht einher mit einer großen Volumenzunahme.

Kinetische Energie wird ausgedrückt als  $\frac{1}{2} m \cdot v^2$ , wobei m die Masse des Dampfes ist und v dessen Geschwindigkeit.

Man sieht schnell, daß wegen dieser quadratischen Beziehung bei Halbierung der verfügbaren Energie sich die Geschwindigkeit nur um 29% verändert.

Gehen wir davon aus, daß am Eintritt des Konus bereits eine Dampfgeschwindigkeit von 70 ft/sec vorherrscht. Unter diesen Bedingungen entspricht dies nur einem geringen Betrag an (möglicher) kinetischer Energie, deren Betrag einer Geschwindigkeit von 2000 ft / sec wäre, nach dem Ausdruck:

Im Klartext, wenn man mit Dampf mit bei 70 m / sec. strömen läßt, bevor dieser eine nutzbare Arbeit leistet, dann wird nur sehr wenig Energie verschwendet. Trotzdem lohnt sich immer die Einsparung von Energie, so daß die maximale Leistung erreicht werden kann.

Die Annahme einer Geschwindigkeit von 2.000 m/sec ist reichlich konservativ, in der Praxis ist die Geschwindigkeit vermutlich viel höher, es ist hier allerdings auch nicht notwendig, die Zahlen extrem genau zu nehmen, nur um diesen Punkt zu betrachten.

Eine weitere Beobachtung bezieht sich auf die Dampf-Konen in einigen kommerziellen Injektoren in der Originalgröße (1:1): Es ist erkennbar, dass es häufig keine oder keine sanfte Führung (gemeint ist Verengung... JG) für den Dampf in den kritischen Abschnitt der Düse gibt, so daß der Dampf durchaus eine plötzliche Änderung des Querschnittes sieht, was mit einer verringerten Fähigkeit vieles von der Druckenergie als kinetische Energie wiederzugewinnen, einhergeht.

Dies hängt davon ab, um wieviel die Geschwindigkeit beim Durchtritt durch die Düse gesteigert werden kann, und dies wird wiederum durch die Gesetze der Physik begrenzt. In unserem Fall müssen wir eine Düsengeschwindigkeit von mindestens 2000 ft / sec erreichen, und die sanfte Reduzierung der Querschnittsfläche im Dampfweg ist daher von großer Bedeutung.

In der Praxis ist der tatsächliche Konvergenzwinkel im Dampf-Konus wahrscheinlich ist nicht kritisch, weshalb wir bei 13° verbleiben, wir wissen ja, daß es so funktioniert. Wahrscheinlich wird ein viel steilerer Konvergenzwinkel im Dampf-Konus auch gut funktionieren, aber wenn man einmal eine erfolgreiche Formel hat, so macht es wenig Sinn davon abzuweichen.

Wir haben also Dampf Austritt beim aus der Düse von über 2.000 m / s. Der divergente Abschnitt der Düsenbohrung am Ende fixiert die Strömungsrichtung auf eine Entfernung von etwa 3 - 4 Lochdurchmesser hinter der engsten Stelle, der Druck erreicht tatsächlich ein Minimum (wie ursprünglich von Venturi gezeigt wurde). An diesem Punkt erzeugt der Dampf ein Vakuum und Wasser wird durch einen ringförmigen Spalt zwischen den beiden Kegeln angesaugt.

Der Dampf gibt sofort seine Verdampfungswärme an das Wasser ab, wobei der Ringspalt kritisch so bemessen sein soll, daß ein Massenverhältnis Wasser zu Dampf von 11 : 1 erreicht wird. Hier arbeiten auch die Gesetze der Thermodynamik in fast jeder Hinsicht zu unseren Gunsten. Zunächst ist die latente Wärme des Wasserdampfes so groß, daß die Temperatur des Wassers auf etwa 65° bis 70 ° C angehoben wird.

Zum Zweiten ist der Volumenunterschied zwischen einer Masseneinheit von Dampf zu elf mal der Masse an Wasser so groß, daß es noch genügend kinetische Energie in der Dampfmasse gibt, um die Geschwindigkeit des kleineren Volumens im kombinierten Strom auf ein sehr nützliches Niveau anzuheben.

Diejenigen, welche eine einfache mathematische Rechtfertigung der obigen Aussage suchen, sollten die ursprüngliche kinetische Energie einer Masse ist bei

2.000 ft. / sec betrachten.

Dies ist  $1/2 * m * 2000^2 = 2000000 * M$  Energieeinheiten. (in der Regel ft.lb. / sec.)

Wenn diese kinetische Energie von 11 weiteren Masseeinheiten, also insgesamt 12 Einheiten, geteilt wird, dann erwirbt jede dieser 12 Masseeinheiten  $2000000/12 = 166667 * M$  Energieeinheiten.

Auch diese Energiemenge ist ausgedrückt als  $1/2 * M * v^2$ , so daß die Geschwindigkeit  $v$  der Masse der Mischung dann  $\sqrt{(2 * 166667)} = 577$  m / sec. beträgt.

Nun geht in jeder realen thermodynamischen Situation etwas im Prozess verloren und in der Praxis wird nur eine Geschwindigkeit erreicht in der Größenordnung von 400 bis 450 m / sec.

(Die kinetische Energie, die hier scheinbar verloren geht, verpufft lediglich als Wärme und erfüllt damit das Erhaltungs-Gesetz von Bernoulli.)

Im Misch-Konus werden die beiden Phasen der Strömung vereinigt.

Vergessen wir im Moment die Lücke auf halbem Weg im Misch-Konus, es reicht hier zu sagen, daß es der Zweck des Konus ist, den Strahl von warmem Wasser zu einer glatten Säule zu formen, der aus dem rechten Ende Austritt, wo Atmosphärendruck herrscht.

Es ist nützlich zu wissen, daß die typische Laufzeit durch den Misch-Konus in der Größenordnung von nur 50 Mikrosekunden liegt! (50/1000000 sec)

Es ist keine Frage, daß vollständige Kondensation in der ersten Hälfte des Konus stattfindet, wäre es nicht so, dann würde in der Mitte Dampf austreten, was definitiv nicht bei einem richtig installierten Injektor vorkommt.

Das letzte Glied in der Kette der Düsen ist der Austritts-Konus, dessen Eintritt ein wenig kleiner ist als derjenige beim Misch-Konus. Zwangsläufig wird der Strom beim Verlassen des Misch-Konus leicht verengt, und die leichte Veränderung des Durchmessers stellt sicher, daß das Wasser die Flanken des letzten Konus beim Eintritt seitlich berührt.

Das divergente Profil ist so entworfen, um so die Geschwindigkeit des Wassers auf etwa 30 bis 50 ft/sec zu reduzieren - oder mit anderen Worten um rund 98% der kinetischen Energie durch die Verlangsamung der Strömung zurück in Druckenergie umzuwandeln.

Um die Fähigkeit abschätzen zu können, Druckenergie aus der Flüssigkeitssäule (die sich mit 400 m / sec. bewegt) zurückzugewinnen, betrachte man das

Anheben derselben unter dem Einfluss der Schwerkraft ( $g = 32,2 \text{ m / sec}^2$ ), und unter Außerachtlassung von Luftwiderstand.

Nach einem der Newtonschen Bewegungsgesetze, würde sich eine Höhe ergeben von

$v^2 = u^2 - 2 * g * s$ , wobei  $u$  und  $v$  die Anfangs- und End-Geschwindigkeiten sind (400 bzw 50 ft. / sec)

und  $s$  ist die Strecke unter dem Einfluss der Beschleunigung -  $g$  .

$400^2 \text{ bis } 50^2 = 64,4 \text{ s}$

$s = 2446 \text{ ft.}$

Eine Flüssigkeitssäule von dieser Größenordnung entspricht einem Druck von 1.089 psig!

Man bedenke diesen Zahlen das nächste Mal, wenn Sie eine Wasserfontäne in einen Park, oder in einer der großen Herrenhäuser wie Chatsworth House sehen.

Der Designer hat eine gewisse Fallhöhe des Wassers zur Verfügung, um den Effekt zu erreichen, doch dieser Wert einer verfügbaren Druckhöhe verblaßt im Vergleich mit den Werten, mit denen wir es hier zu tun haben!

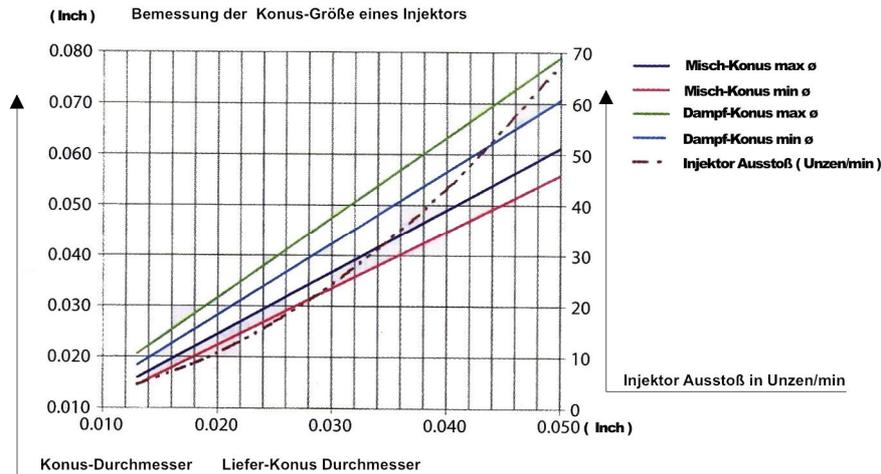
In der realen Welt ist eine Energieumwandlung von einer Form zur anderen bei weitem nicht perfekt, aber das Potential ist vorhanden für das Entstehen eines hohen Druckes innerhalb des Austritts-Konus.

Die sanfte Erweiterung vom Eintritt bis zum Austritt ist so konzipiert, daß der Strahl langsam auf eine vernünftige Geschwindigkeit gebracht wird, bevor dieser auf den Rest des Weges in den Kessel geht.

Eine Verlangsamung ermöglicht es, den Druck zu erhöhen, und es ist, ehrlich gesagt, mehr als genug Energie zur Verfügung, diese Aufgabe erforderlich zu erledigen.

Bei vielen Gelegenheiten, wenn z.B. das Druckventil auf meinem Prüfstand wegen Verkalkung geklemmt hat, habe ich einen Förderdruck von über 160 psig registriert, bei einem Kesseldruck von nur 80 psig.

## Die Dimensionierung der Injektor-Kegel



Wie aus den Zeichnungen ersichtlich wird, muss der Durchmesser der einzelnen Kegel streng eingehalten werden, traditionell beziehen sich alle Maße wieder auf den Austritts-Konus, dessen Fähigkeit, eine bestimmte Menge an Wasser zu fördern die Kapazität des Injektors bestimmt.

Die angefügte Tabelle/Graphik zeigt die Beziehung zwischen den Durchmessern.

Wenn man die beiden oberen Geraden ausliest so repräsentieren diese den Durchmesserbereich des Dampf-Konus, der für die Vergrößerung des Austritts-Konus toleriert werden kann, für den wir uns hier interessieren. In ähnlicher Weise umfassen die beiden unteren Zeilen die Größen des Misch-Konus im gleichen Bereich; alle Durchmesser werden auf der linken Achse angegeben.

Für eine bestimmte Output-Größe in oz / min. findet man über die Kurve einen Wert auf der rechten Achse der Grafik. Sollten Sie einen Injektor von Grund auf neu konstruieren, so beginnen Sie in der Mitte der Abbildung. Eine Reduzierung der Konen-Durchmesser kann notwendig sein, um den Injektor bei höheren Drücken zu betreiben.

Umgekehrt gilt dies auch für niedrigere Drücke.

Warum ist der Misch-Konus geteilt?

Bei Betrachtung der Vermischung von Dampf und Wasser wurde die Lücke im Misch-Konus übergangen, warum gibt es sie dort also? Die Antwort ist: um den Injektor in Betrieb nehmen zu können.

Wenn der Dampfstrom in großer Menge geöffnet wird, muß dieser irgendwohin gehen, während sich das Vakuum einstellt, deshalb tritt der Strom durch den Spalt zwischen den Konus-Abschnitten aus und entweicht zur Atmosphäre über ein kleines Kugelventil (nicht dargestellt in Abb. 2.1, aber es wird berücksichtigt werden, wenn wir zu den Kapiteln über Konstruktion und Design kommen).

Sobald die Kondensation eintritt, entsteht das Vakuum, welches das Kugelventil umgehend schließt, daher ist es eine Notwendigkeit, dass der Ventilsitz wirklich optimal ist. Dieser Teil des Ablaufes sollte die Tatsache angemessen demonstrieren, daß die Kondensation im ersten Abschnitt des Misch-Konus abgeschlossen ist.

Bei den winzigen Konstruktionsdetails der Konen muß besonders darauf geachtet werden, daß der Einlassabschnitt des zweiten Teiles des Misch-Konus durch eine winzige Fase entlastet wird. Dies ist die Basis des sog. "Linden Tricks", der durch den gleichnamigen Herrn im frühen 20. Jahrhundert entdeckt wurde und viele Jahre nicht in der Literatur erwähnt wurde.

Sein Zweck ist es, einen Injektor selbststartend zu machen und ihn damit entweder zuerst Wasser oder Dampf zuführen zu können. Wenn diese Fase nicht vorhanden ist, dann wird der Injektor nicht selbstständig starten, es sei denn, es existiert ein positiver Vordruck von kaltem Wasser an der Dampfdüse, bevor der Dampf zugestellt wird.

Ich biete eine spekulative Begründung für diese Tatsache: Wenn ein Dampfstrahl durch den Misch-Konus geht wird er von der Öffnung der zweiten Konushälfte abgeleitet, da diese geringfügig kleiner ist als der Austrittsdurchmesser der ersten Konushälfte.

Wenn die Spitze einen scharfen Rand hat, dann schlägt der Dampf "auf sich selbst um", wodurch ein Gegendruck entsteht, der die Bildung des Vakuums hemmt.

Ich höre hier schon ein ungläubiges Jammern: "Wozu brauche ich einen selbstständig startenden Injektor?"

Meine eigne Installation ermöglicht es mir immer, zuerst das Wasser aufzudrehen. Spielt es also in meinem Fall eine Rolle? Der Grund ist ganz einfach, daß es nämlich oft notwendig für den Injektor ist, eine Störung durch zeitweise zu hohen Wasserstand oder Schäumen zu bewältigen.

Unter diesen Umständen ist es sehr wichtig, daß der Injektor die Situation meistern können sollte, ohne den Bediener von seiner Hauptaufgabe abzulenken.

Ich erinnere mich gut die Berichte in "Model-Engineer" in den 1950er Jahren, als LBSC beschrieb, wie er seine Injektoren zum Starten überreden mußte ; seine Injektoren starteten nie, ohne daß das Wasser zuvor geöffnet worden wäre. Seine Fahrten gingen ja auch nur auf einem ebenen Gleisstück bei seinem Haus auf und ab.

Wie haben sich die Dinge doch seit jenen Tagen verbessert!

Das richtige Entlastungsventil in der Konstruktion des Misch-Konus (wie oben beschrieben) eröffnet aufregende neue Möglichkeiten bei der Konstruktion eines selbststartenden Injektors, der in der Lage ist, Wasser aus einem Tank unterhalb

seines eigenen Niveaus anzusaugen.

Beim Original forderten einige Eisenbahnen dies bei ihren Konstruktionen und ich erinnere hier insbesondere an die "Tilbury Tank" Loks, wo der Injektor deutlich oberhalb des Wassertanks vor der Führerhausvorderwand angebracht war.

Dies war auch nicht ungewöhnlich bei Dampftraktoren und kann sehr nützlich sein bei Installation auf Schiffen, wo sich die Wassertanks in der Bilge befinden, damit die Masse des Speise-Wassers tief im Rumpf liegt.

Unabhängig von der Anwendung, ist es der vorrangige Nutzen eines selbst ansaugenden Injektors, daß er ein eigenes Wasserventil überflüssig macht - eine Komponente weniger herzustellen, die versagen kann oder betrieben werden muss. Auch wenn der Injektor nicht selbstständig ansaugen muß, so gibt er die zusätzliche Sicherheit der Selbst-Ansaug-Fähigkeit, die im kontinuierlichen Betrieb sein Gewicht in Gold wert ist.