

Australian  
**AModel**  
Engineering

*Hand books for model engineers!*

# The Model Injector

Ted Crawford



**Theory, principles of design and details for making your own  
miniature live steam injector**



# Der Modell-Injektor

Theorie, Konstruktionsprinzipien und Einzelheiten zum Selbstbau  
eines Miniatur-Echtdampf-Injektors

von

**Ted Crawford**



Das Magazin für alle begeisterten Modellbauer



# Inhaltsverzeichnis

Maßeinheiten .....	6
<b>Teil1 Die Arbeitsweise des Modell-Injektors</b>	
Einleitung.....	8
Die Funktion .....	9
Die Ansaugung.....	12
Externe Wasserzufluß-Steuerung.....	12
Starten des Injektors .....	13
Die Anpassung des Druckbereichs.....	13
Die Grenzen der Betriebsfähigkeit.....	14
Zustrom von Warmwasser .....	15
Der Ausgangs-Konus .....	16
Der Dampf-Konus .....	19
Der Misch-Konus.....	21
Anmerkungen für Konstrukteure .....	23
Durchschnittswerte veröffentlichter Konstruktionen.....	24
Durchschnittswerte für eine neue Konstruktion .....	24
Abweichungen an Kegelreibahlen .....	25
Verbindungen.....	25
Ausgangs-Konus, Anhang .....	26
$V_t$ minimum .....	26
Kleinster Kehldurchmesser .....	27
Druckverlauf .....	27
Ansaugvorgang.....	27
Dampf-Konus, Anhang.....	28
Ein bißchen Mathematik.....	29
Grenzen des Betriebsbereichs, Anhang.....	30
Die untere Grenze.....	30
Temperaturgrenzen bei hohem Betriebsdruck.....	31
<b>Teil2 Die Herstellung von Injektoren</b>	
Einführung.....	34
Bemerkungen zur Herstellung des Gehäuses .....	35
Das Türmchen.....	36
Der Tangens .....	38
Die Herstellung einer Reibahle .....	38
Die gedrehte Reibahle .....	39
Das Drehen einer Reibahle.....	40
Das Fertigstellen einer gedrehten Reibahle.....	41
Wie ein „Hersteller“ vorgehen würde .....	41
Die Sägeblatt-Reibahle .....	42
Fertigstellen einer Reibahle aus einem Sägeblatt .....	43
Der Einfluß der Dicke des Sägeblatts.....	43
Das Schärfen der Reibahlen .....	44
Tiefenanschläge.....	44
Reibahlen für kleine Rundungen.....	44
Die Nadel-Reibahle .....	45
Die Benutzung der Reibahlen aus Sägeblättern.....	45
(Grenz-)Lehrdorne und andere Lehren.....	46
Eine praktische Lehre für die Kehltiefe .....	46
Die Kehlen-Länge .....	47
Der Misch-Konus.....	47
Berechnungen.....	48
Die Herstellung eines Misch-Konus .....	48
Der Drehvorgang.....	48

## Inhaltsverzeichnis, Fortsetzung

Der Bohrvorgang.....	49
Der Reibvorgang.....	49
.....	54
.....	55
.....	56
.....	58
.....	59
.....	60
.....	60
.....	61
.....	61
.....	61
.....	61
.....	61
.....	62
.....	63

## Maßeinheiten

Die hier benutzten Maßeinheiten sind überwiegend imperial (zöllig), wie etwa psi, psft, feet, inches, thou usw.

Für die metrisch Orientierten sind hier Umrechnungsfaktoren angegeben:

1 foot (ft oder ') = 12 inches (in. oder ")

1 thou = 1/1000 von 1 inch

39,37 thou = 1 mm

16 ounces (oz) = 1 pound (lb)

20oz = 1 pint

35,2 oz = 1 Liter

1 lb = 454 Gramm

1 pint = 568 ml

1 oz (fluid) = 28,4 ml

psi = Druck in lbs weight pro Quadrat-Zoll

psft = Druck in lbs weight pro Quadrat-Fuß

1 psi = 144 psft

Für kPa multiplizier psi mit 6,9

Für m<sup>2</sup> dividiere ft<sup>2</sup> durch 10,76

Für m dividiere ft durch 3,28

Für mm dividiere thou durch 39,37

Für l/min dividiere oz/min durch 35,2

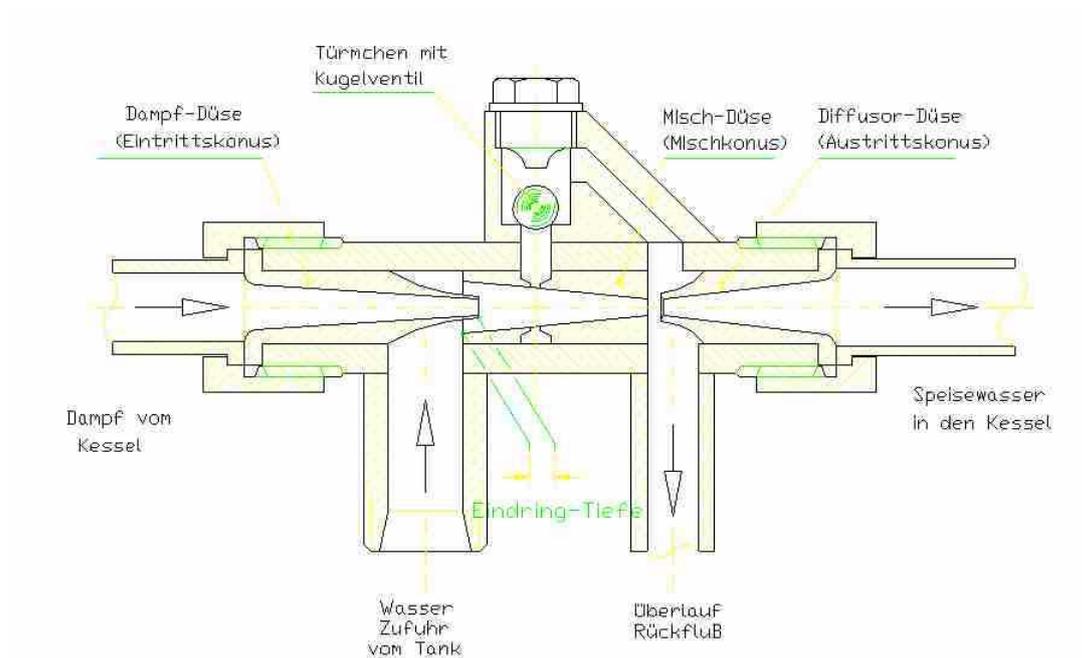
Die benutzte Gravitationskonstante ist 32,2 ft / s<sup>2</sup> was 981 cm/s<sup>2</sup> entspricht

1 BTU (British Thermal Unit) = 1055,06 Joule

# Teil 1

## Die Arbeitsweise des Modell-Injektors

Wie er arbeitet, Konstruktionsprinzipien und einige Berechnungen



# Die Arbeitsweise des Modell-Injektors

## Einleitung

Der Modell-Injektor ist eine vereinfachte Version der Originalausführung, von welchen es viele verschiedene Bauformen gibt, wobei alle Modell-Injektoren grundsätzlich ähnlich sind, indem sie aus einfachen Hohlkörpern bestehen; mit 3 Rohranschlüssen und einer Überlaufleitung und einem oben aufgesetzten Türmchen mit einem Kugelventil.

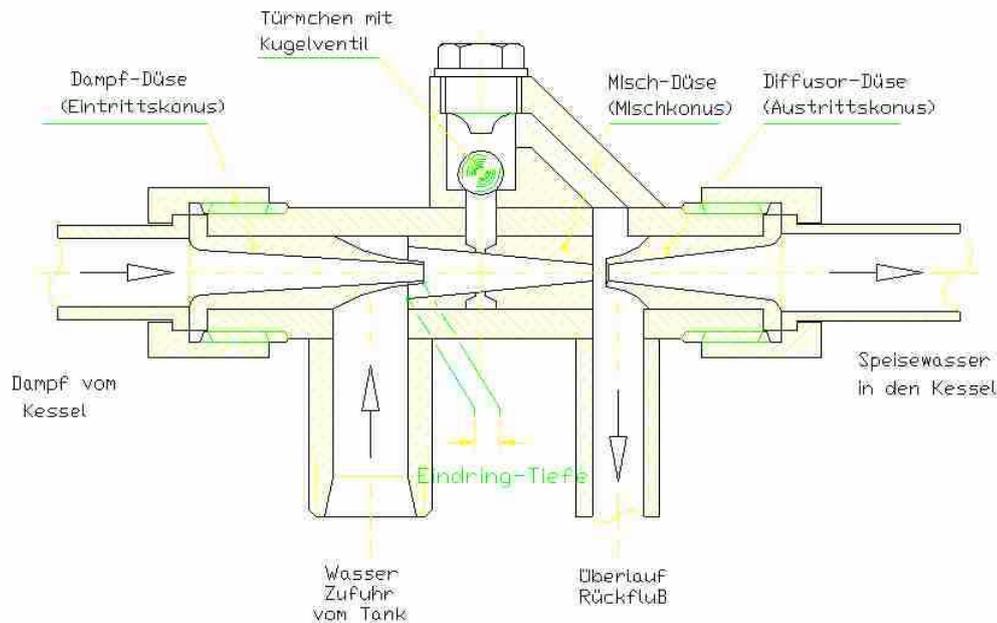


Bild 1 zeigt den Querschnitt eines typischen Modell-Injektors. Die Dampfzuführung und die Kessel-Speiseleitung sind die Anschlüsse an den Enden, mit einem Wasserzulauf von unten in der Nähe der Dampfzuführung. Innerhalb des Gehäuseblocks befinden sich drei Konus-Stücke. Sie werden so benannt wegen ihrer Innenkontur. Dies sind im einzelnen der Dampf-Konus, der Misch-Konus und der Ausgangs-Konus. Dann gibt es noch die Überlaufleitung, geführt über das Kugelventil und das Türmchen, welches gewöhnlich mit dem Überlauf verbunden ist. Wie auch immer, der Überlauf am Türmchen kann auch mal stattdessen seine Entleerung direkt an der Turmspitze angeordnet haben. Natürlich müssen alle Teile und Anschlüsse korrekt installiert sein, damit das System funktioniert. Aber es ist bekannt, daß schon mal Verbindungen für die auswechselbaren Konusstücke an den Enden vertauscht wurden. Für diejenigen, die so etwas noch nie gesehen haben: der Ausgangs-Konus ist stumpf und der Dampf-Konus besitzt eine scharfrandig auslaufende Düse und endet in der Nähe des Wasserzulaufs. Beide Konen tragen einen Flanschrand / Bund , sodaß eine dichte Verbindung entsteht, wenn die Rohr-Überwurfmuttern angezogen sind. Der Wasseranschluß hat oft eine kegelförmige Verbindung, weil das einen dichten Anschluß ergibt, wenn es ordentlich ausgeführt ist.

Nachdem alles parat ist, werden Wasser- und Dampfzustrom voll geöffnet und die Kesselspeisung startet umgehend nach einem kurzen Abspritzen des Überlaufs, genau wie bei den Original Ausführungen.

Dieser Vorgang ist, wenn er im gesamten Kesseldruck-Bereich und bei warmem und kaltem Zulaufwasser im Sommer und im Winter zutrifft, der Idealfall. Jedoch kein Modell-Injektor ist derart gut gemacht, daß er ohne die übliche Einschränkung des Druckbereichs bei normalerweise 21°C Wassertemperatur arbeitet.

Was gewöhnlich geschieht, ist, daß das Ventil für den Wasserzulauf eingestellt werden muß und ein „Tröpfeln“ während des Betriebs als normal akzeptiert wird. Falls das Zulaufwasser zu warm ist, vielleicht

weil das Wasser aus Seitentanks am Kessel entnommen wird, dann ist der maximal anwendbare Kesseldruck niedriger als im Normalfall und eine Nachspeisung ist nicht mehr bei jedem Druck möglich.

In seinem 1910 veröffentlichten Buch erklärt Professor Kneass die Theorie der Betriebsweise in beachtenswerter Detaillierung. Das Buch ist gut geschrieben und enthält viele Beispiele von Injektoren dieser Periode mit Testergebnissen der käuflichen Ausführungen und es enthält auch Einzelheiten zu den Prüf-Methoden. Schon 1910 war der Injektor über 50 Jahre hinweg entwickelt worden, und somit war er vielleicht genau so gut wie die modernen im Gebrauch befindlichen Bauweisen.

Aber das Buch versucht nicht zu erklären, weshalb der Injektor eventuell bei Druckabfall versagt, wenn er für höhere bis mittlere Drücke eingerichtet wurde. Den mathematischen Ausführungen des Professors folgend, kann jedoch die Antwort abgeleitet werden, auch wenn die Erklärung nicht direkt in einfachen Worten präsentiert wird.

Ein anderer Autor der selben Periode, Professor Pullen, hat ebenfalls ein Buch über die Original-Ausführungen erstellt, aber er unterließ es, die theoretischen Dinge und Darstellungen so früh zu präsentieren wie es Prof. Kneass getan hat. Dennoch mangelt es auch diesem Buch nicht an Berechnungsformeln und es enthält Beschreibungen von vielen ungewöhnlichen Beispielen aus jener Zeit. Beide Bücher haben leicht zu lesende Passagen, aber in signifikanten Abschnitten ist der Text sehr abhängig von Formeln, welche es erschweren, dem Sinn zu folgen, wenn der Leser nur wenig mathematische Übung besitzt.

Dieses Buch hier wird die Gründe erläutern für die Anwendungsgrenzen des Modell-Injektors und wird auch die Theorie der Dampf-Düsen und der Ausgangs-Konen abhandeln mit nur so viel Einzelheiten wie unbedingt nötig sind. Dabei schränkt es den mathematischen Formelbereich so weit wie möglich ein und lagert ihn in den Anhang aus, letzteres nur in der Absicht, den Wortlaut ordentlich lesbar zu erhalten. Die zweite Hälfte des Buchs wird den Leser hinüberleiten zu den verschiedenen Verfahren, um einen eigenen Injektor zu bauen.

Unglücklicherweise mangelt es bei der Beschreibung der Funktion des Misch-Konus in demselben Maß an mathematischer Analyse, wie sie für die anderen Konusstücke verfügbar ist. Und nur eine gute Erklärung der Prinzipien, die hinter seiner Arbeitsweise stehen, ist vorhanden; basierend auf Professor Kneass und Pullen's Büchern und Versuchsergebnissen.

Der Betrieb des Injektors insgesamt wird zuerst erläutert, bevor die Vorgänge innerhalb der drei Konusstücke mehr im Detail beschrieben werden. Danach folgen die Hinweise zur Auslegung einschließlich der Bemessung für einen "durchschnittlichen" Injektor und abschließend der mathematische Anhang.

In den Formeln bedeutet „ / “ das Divisionszeichen. Multiplikation ist in verschiedenen Schreibweisen dargestellt. Beispielsweise als  $A \cdot B$  oder als  $(A) (B)$  oder als  $A (B)$  oder  $A B$  oder auch als  $A \times B$ . Wenn es kein „-“ und kein „+“ und kein „ / “ gibt, dann wird  $A$  mit  $B$  multipliziert.

## Die Funktion

Der ursprüngliche Antrieb im Injektor ist der Dampf, welcher, der bei Verlassen der Dampf Düse Wärmeenergie, kinetische Energie (Geschwindigkeit) und Impuls (Massenträgheitsenergie) besitzt. Kinetische Energie bedeutet Bewegung wie in dem alten Wort "KINESCOPE" für bewegte Bilder. Die Kinetische Energie oder  $KE$  ist definiert als  $W \cdot V^2 / 2 \cdot g$ , wobei  $W$  die Gewichtskraft in lbs ist,  $V$  die Geschwindigkeit in ft/sec und  $g$  die Erdbeschleunigung von 32,2 lbs/sec<sup>2</sup>.

Es ist ja eine vernünftige Vermutung, daß der Energiegehalt des Dampfes hauptsächlich der antreibende Faktor sei, aber die Versuchsauswertungen zeigen, daß es tatsächlich der Impuls des Dampfes ist, der wirklich zählt und daß die meiste Energie durch Reibung in Wärme gewandelt wird. Schließlich geht sie so nicht verloren und geht zurück in den Kessel als Wärmemenge im Speise-Wasser.

Wenn zwei Tropfen von Wasser zusammen prallen, dann verschmelzen sie zu einem größeren Tropfen und bewegen sich weiter in einer Richtung, die definiert wird aus ihren vorherigen Richtungen und Geschwindigkeiten. Das Gleiche gilt auch für einen "Tropfen" Dampf, wenn er mit einem Tropfen kondensierenden Wassers zusammen prallt.

In einem Injektor ist die Geschwindigkeit des Dampfes so enorm viel größer als die Geschwindigkeit des Wassers, daß, obwohl der Wasserinhalt ungefähr das zehnfache des Dampfgehalts ausmacht, dabei die Richtung des Dampfes beim Verlassen der Düse weitgehend maßgeblich ist für die Bewegungsrichtung der nun kombinierten Masse. Die Theorie von der Erhaltung des Impulses besagt, daß die Vektorsumme  $M1 \cdot V1$  plus  $M2 \cdot V2$  gleichzusetzen ist mit  $(M1+M2) \cdot V3$ .  $M1$  oder  $M2$  sind, genauso wie hier speziell der

Dampfstrom als kontinuierliche Größe betrachtet wird, das Gewicht des Massenstroms dann auf Sekunden bezogen und die pro Sekunde verfügbare kinetische Energie wird betrachtet.  $V_1$ ,  $V_2$  oder  $V_3$  sind Geschwindigkeiten, und Vektor bedeutet die Richtung, die man in Anrechnung bringen muß.

Die Vorgänge in den drei Konus-Stücken werden später noch im Detail abgehandelt, aber momentan ist es ausreichend zu sagen, daß im Dampf-Konus die Arbeit geschieht, indem der Dampf dort expandiert und in kinetische Energie umgesetzt wird, sodaß am Austritt der Düse eine Super-Geschwindigkeit entsteht, welche bis zur Schallgeschwindigkeit ansteigen kann. Der Ausgangs-Konus empfängt aus dem Misch-Konus das Wasser mit höchster Geschwindigkeit und wandelt diese kinetische Energie wieder in Druck um. Und keine dieser Methoden ist zutreffend für den Misch-Konus, in welchen der Impuls des Dampfes die antreibende Kraft darstellt. Die Kinetische Energie der Dampfmasse mit der Geschwindigkeit  $V$  ist  $W * V^2 / 2 g$ , dagegen ist der Impuls  $W * V / g$ . In beiden Formeln ist  $W / g$  das was man Masse nennt.  $g$  ist die Erdbeschleunigung (Schwerkraft) und bei einer üblichen Geschwindigkeit von 2000 bis 3000 ft/sec ist der Unterschied zwischen der Energie  $W * V^2 / 2 g$  und dem Impuls  $W * V / g$  gewaltig. Wenn Dampf und Wasser Partikel so elastisch wären wie Billardkugeln, dann wäre der Verlust an kinetischer Energie sehr gering und die Teilchen würden sich abprallend in der Gegend verteilen. In der Realität verhalten sich die Teilchen wie Kugeln mit einem klebrigen Überzug aus einer Reibungs-Substanz und die abgegebene Energie wird umgeformt in Wärmegehalt und gelangt schließlich zurück in den Kessel.

Die Energie ist nicht die einzige Einbuße im Misch-Konus, weil auch ca. 20% des Impulses verloren gehen, sodaß nur 80% des Dampf-Impulses theoretisch in Anrechnung gebracht werden können. Wenn das zugeführte Wasser warm ist, fordert Professor Kneass, daß der anwendbare Prozentsatz sogar noch weiter reduziert wird.

Die Startbedingung für einen selbstansaugenden Injektor ist, daß zwar Wasser vorhanden ist, aber noch nicht angesaugt wird und bei den am meisten verbreiteten Bauformen nur paar Tröpfchen im Durchlass vorhanden sind. Wird nun der Dampfahn geöffnet, wird auch das Wasser eingesaugt durch einen Vorgang der später noch als Ansaugung beschrieben wird. Danach sind die Arbeits-Bedingungen für beide Betriebsweisen (selbstansaugend oder mit Zulauf) gleich.

Bis sich der volle Wasserdurchfluß stabilisiert hat, muß der Überschuß an unkondensiertem Dampf hauptsächlich durch das Überlauf-Kugelventil aus dem Misch-Konus in das Türmchen entweichen und nur ein geringer Anteil geht durch die Kehle des Misch-Konus.

Sobald die Kondensation beginnt, wird weiteres Wasser eingesaugt, bis sich die Verhältnisse stabilisiert haben. Dies geschieht so schnell, daß es aussieht, als ob es augenblicklich passiert, sogar wenn schnell arbeitende Prüfgeräte angewendet werden. Das Wasser umgibt den Dampfstrahl, welcher dadurch im Durchmesser schrumpft, sowie die Kondensation voranschreitet bis sie schließlich in der Kehle des Misch-Konus virtuell vollendet ist, weil dort wirklich nur ganz wenig Dampf übrig geblieben ist.

Das Wasser hat schließlich etwas Impuls aufgenommen von der Geschwindigkeit, mit der es durch den Ringspalt gesaugt wurde. Letzteres ist die kreisringförmige (zylindermantel-förmige) Fläche zwischen dem Dampf-Konus und dem Misch-Konus. Und es bekommt noch eine ganze Menge mehr Geschwindigkeit und Impuls vom Dampf, der in Düsenmitte vorbei schießt und in direktem Kontakt mit dem Wasser steht. Diese vom Dampf aufgenommene Geschwindigkeit wird auf die daran anschließende Wasserschicht übertragen und so geht es weiter und weiter. Folglich möchte die Wassermasse im Zentralkern der Misch-Konus-Kehle die höchste Geschwindigkeit annehmen, aber unter gewöhnlichen Umständen hat das gesamte umgebende Wasser genügend Geschwindigkeit, um es durch den Ausgangs-Konus in den Kessel zu treiben.

Einerlei, im Grenzbereich hat nur das am stärksten beschleunigte Wasser eine hinreichende Geschwindigkeit und der Rest wird durch den Überlauf zurückgewiesen. Das ist dann der Zustand nahe dem niedrigsten möglichen Arbeitsdruck und es ist besonders ärgerlich, wenn die Kehle des Ausgangs-Konus wie meistens ein wenig zu klein geraten ist. In diesem oft vorkommenden Fall wird, sogar wenn alles Wasser genügend Geschwindigkeit besitzt, nicht genug Ausdehnungsraum in der Kehle des Ausgangs-Konus vorhanden sein, mit den Ergebnis, daß es aus dem Überlaufrohr tröpfelt.

Der anfängliche Überlauf in das Kugelventil ermöglicht es dem Dampf zur Startzeit solange zu entweichen, bis genügend Zulauf-Wasser die Kondensation ermöglicht. Ein Kugel-Rückschlag-Ventil ist an dieser Stelle erforderlich, weil sonst die mögliche Ansaugung innerhalb des Misch-Konus verhindert wird. Der Spalt zwischen dem Misch-Konus und dem Ausgangs-Konus ermöglicht es dem Wasser und dem kondensierten Dampf auszuweichen, ehe eine ausreichende Geschwindigkeit erreicht ist, welche der Ausgangs-Konus verwenden (= in Spisedruck umsetzen) kann. Dieser Spalt kann sehr eng sein bei hohem

Druck, wo kein Geschwindigkeitsproblem entsteht, entsprechend der üblichen Größe des Dampf-Impulses. Jedoch ist dies bei niedrigem Druck so nicht der Fall und die Spaltweite muß dann angepasst werden, um auch die Startbedingungen für einen niedrigeren Druck abzudecken.

Wenn der Druck an der oberen Funktionsgrenze liegt, kann der Ausstoß des Misch-Konus einem Sprühnebel ähneln, anstatt einem massiven Wasserstrahl. Das ist dann das Ergebnis von zu langsamer Kondensation, verschuldet durch Wassermangel. Dieser sprayartige Ausstoß wird noch schlechter bei warmem Zulaufwasser, weil sich dadurch die Kondensation noch mehr verlangsamt. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, den Überlauf-Spalt zwischen den beiden Konusstücken so eng zu halten, wie es der niedrigste geplante Betriebsdruck zulässt, damit der Kehle des Ausgangs-Konus der kleinstmögliche Durchmesser an Sprühnebelstrahl angeboten wird.

Die später noch beschriebene Ansaugung im Ausgangs-Konus hilft ihm, diesen Sprühstrahl in seine Kehle zu ziehen.

Bei völligem Ausfall der Funktion durch zu niedrigen Druck hat das Wasser keine ausreichende Geschwindigkeit, um sein Volumen durch die Kehle des Misch-Konus zu treiben und es fließt stattdessen durch den Überlauf im Kugelventil. Die Ansaugung per Kondensation ist durch diesen Wechsel gestört und der Zustrom des Wasser wird vermindert. Um den Injektor bei dem gleichen, unveränderten Druck erneut in Gang zu setzen, kann eine externe Drosselung des Wasserzulaufs mit Vorsicht angewendet werden, falls keine Luft-Leckage im System existiert. Anderenfalls wird der Injektor solange nicht erneut anspringen, bis der Druck wieder höher ist als jener Druck, welcher die Funktionsstörung verursachte. Deshalb, weil die Ansaug-Strömungsgeschwindigkeit der durch das Gesamtsystem fließenden Wassermasse geholfen hat, den Betrieb in Gang zu halten.

Bevor wir nun zu einem Beispiel kommen und Kennzahlen in die Diskussion bringen, soll hier angemerkt werden, daß bei allem, was nun folgt, der berechnete Impuls nicht ganz exakt der Formel entspricht, die besagt, daß die Impulsgröße genau gleich der Masse mal der Geschwindigkeit ist. **Op<sub>m</sub>** oder Ounce pro Minute (also Masse pro Zeiteinheit) als Massenstrom an Dampf oder Wasser wird jetzt hier anstelle der reinen Masse oder **W / g** eingesetzt. Dieses ist eine Angelegenheit der Bequemlichkeit und auch zulässig, weil die Abwandlung von Masse zu Masse/min auf beiden Seiten aller Gleichungen erscheinen wird. Der Leser, der es gern möchte, kann den Wert **opm** durch  $16 \cdot 60 \cdot 32,2 = 30912$  dividieren um lbs/sec zu erhalten.

Mit diesem eben Gesagten im Gedächtnis, wollen wir nun ein Beispiel angehen.

Mit einem Eingangdruck von 80 psi Manometeranzeige (94,7 psia, a für Absolut-Druck), ist eine Dampföse ausgelegt für einen Ausstoß von 2,8 opm bei 2480 ft/sec. Der nutzbare Dampf-Impuls beträgt dann bei einem Wirkungsgrad von 80% ->  $2,8 \cdot 2480 = 5555$ .

Angenommen, es werden 50 opm durch den Ringspalt angesaugt. Weil der Spalt recht eng ist, wird es nicht langsam tröpfeln, sondern das Zulaufwasser schießt herein mit einer Geschwindigkeit von etwa 21 ft/sec. Dies gibt dem Wasser dann einen Impuls von  $50 \cdot 21 = 1050$ . Es ist zu erwarten, daß auch davon nur 80% wirksam sind, was dann noch 840 zum Addieren auf den nutzbaren Dampf-Impuls übrig lässt. Das Resultat ist dann  $840 + 5555 = 6395$ . Die gesamte Masse von Dampf und Wasser ist  $50 + 2,8 = 52,8$ . Das wird nun geteilt durch den gesamten Impuls, um die endgültige Austrittsgeschwindigkeit zu ermitteln.  $6395$  geteilt durch  $52,8$  ergibt 121 ft/sec.

Aus der Gleichung (**OP2**) im **Anhang für den Ausgangs-Konus** ist die mindestens erforderliche Geschwindigkeit  $Vt = 12,26 \cdot \sqrt{P \text{ Ausgang}}$ . Wobei **P Ausgang** gleich 80 psi Kesseldruck ist zuzüglich 2 psi extra Zugabe zur Überwindung des Rückstaus aus dem Rohrleitungssystem und der Rückschlagklappe des Speiseventils. Diese niedrigste Geschwindigkeit beläuft sich schließlich auf 121 ft/sec. Dieser Wert ist etwas geringer als die 121 ft/sec, der Wert aus der Berechnung des Impulses, es ist also etwas Geschwindigkeit in Reserve. Aber reicht das wirklich aus? Professor Kneass benennt in seinen Buch von 1910 über die Theorie der original großen Injektoren, daß die im Misch-Konus nahe dem Ringspalt erzeugte Ansaugung sich durch den Ausgangs-Konus hindurch fortsetzt, obwohl sie möglicherweise bei diesem Vorgang reduziert ist. Es existiert sicherlich eine Ansaugung (Unterdruck) am Kugelventil, welches auf der halben Konuslänge wirksam ist, und daher kann auch etwas Unterdruck noch im Ausgangs-Konus angenommen werden. Versuche mit einem Injektor ergaben, daß der Ansaug-Unterdruck, der das Wasser einzieht, bei -10 psi lag. Bedeutet das nun, daß der Massen-Impuls auch noch diesen zusätzlichen Betrag überwinden muß? Wenn das zutrifft, dann ist die benötigte Geschwindigkeit diejenige für den Ausgangsdruck **Pout** + 10 psi oder  $Vt = 12,36 \cdot \sqrt{80 + 2 + 10}$ , was wiederum 118,6 ft/sec entspricht. In diesen Fall ist der geforderte Wert noch immer übertroffen von dem vorher berechneten Wert in Höhe von 121 ft/sec. Aber wenn der Wasser Zulauf 52 anstatt 50 beträgt, dann wird die Geschwindigkeit für den Massen-Impuls just eben zu niedrig sein!

Man bedenke, daß der erzeugte Unterdruck im Ergebnis auf 80% von 21 ft/sec Strömungsgeschwindigkeit, also 16,8 ft/sec, bezogen auf die Wasser Eintritts-Geschwindigkeit beruht. Aber ebenso nötig ist ja auch der Geschwindigkeitsbedarf an der Austritts-Seite mit 6,6 ft/sec. Dieses bedeutet dann eine netto Geschwindigkeitszunahme von 10,2 ft/sec.

Wenn man nun die gleichen Argumente auf einen Injektor für sehr niedrigen Druck anwendet, dann entsteht ein ganz anderes Bild. Ein interner Unterdruck von 10 psi bringt nur etwa 5% des Impuls-Bedarfs für 80 psi. Jedoch bringt er 41% bei 10 psi und sogar 73% bei 5 psi. Letzteres ist wiederum der Hauptgrund, warum die Größenverhältnisse, die für einen Normaldruck-Injektor passend sind, nicht einfach linear umgerechnet werden können auf einen Injektor, der mit sehr niedrigem Arbeitsdruck betrieben werden soll.

## Die Ansaugung

Das Speisewasser wird in den Injektor eingesaugt und das kann leicht bewiesen werden, indem man nach dem Start des Injektors den Zufuhr-Wasserspiegel unter das Niveau des Injektors absenkt. Aber das funktioniert nur dann, wenn kein zwischengeschalteter Absperrhahn und auch keine Verschraubung eine Leckage durch eindringende Luft zulässt. Viele Injektoren werden auch das Wasser ansaugen, bevor sie in laufenden Betrieb gesetzt sind, ganz besonders im Bereich niedrigen Betriebsdrucks oder wenn der Dampfahh nur allmählich oder schrittweise geöffnet wird. Die Ansaugung vor dem eigentlichen Betrieb ist begründet durch eine oder sogar beide von zwei verschiedenen Ursachen. Die erste Ursache ist, daß der Ausgangsdruck einer Dampfdüse mit sich erweiterndem Innendurchmesser hinter der engsten Stelle möglicherweise unterhalb des atmosphärischen Drucks liegt. Die zweite Ursache ist vermutlich der stärkere Effekt und ist begründet in der Tatsache, daß Luft in die äußeren Bereiche eines Dampfstrahls von hoher Geschwindigkeit mit eingeschlossen und mitgerissen wird. Dies ist aber nur möglich, wenn der Dampf frei austreten kann, durch den Kugelventil Überlauf-Spalt im Misch-Konus und ohne sich zurückzustauen. Die Ansaugung infolge der Anziehung zwischen Dampf und Luft wird verstärkt durch einen sehr scharfkantigen Rand am Ende des Dampf-Konus, weil dies den engsten Kontakt zwischen der Luft und dem Hochgeschwindigkeits-Dampfstrahl ermöglicht.

Nachdem der Injektor in Funktion ist, berührt das zugeführte Kaltwasser den Dampf und es beginnt die Kondensation. Je schneller die Kondensation abläuft, desto stärker ist der Saugeffekt. Insofern ergibt kälteres Speisewasser auch einen stärkeren Saugeffekt als wärmeres Speisewasser. Niederdruck-(Satt-)Dampf wird eine schnellere/intensivere Kondensation beziehungsweise Saugeffekt hervorrufen als dichter überhitzter Hochdruck-Dampf. Weil die Ansaugung immer mehr Wasser einzieht, wird die Kondensation noch schneller, die Ansaugung steigert sich nochmals und so weiter und weiter. Umgekehrt bewirkt weniger Ansaugung von kaltem Speisewasser geringere Kondensation und weniger Saugeffekt. Wie auch immer, die Bedingungen stabilisieren sich schnell und der Injektor kommt zur Ruhe. Ein klein wenig Instabilität der Funktion macht sich auch bemerkbar, indem der Injektor „zwitchert“ oder wenn das fauchende Geräusch sich periodisch verändert. Die Veränderung durch Druck und Temperatur bedeutet, daß die eingesaugte Wassermenge kaum ausreicht für eine gute Funktionsfähigkeit. Sie sollte sich im Idealfall steigern mit dem Druck oder zumindest nicht zurückgehen. Und sie sollte sich ebenfalls steigern bei warmem Wasser, um übermäßiges Abblasen von unkondensiertem Dampf aus dem Überlauf zu vermeiden. In gleicher Weise bedeutet die übermäßige Ansaugung, sobald der Druck abfällt, daß der Injektor eventuell überflutet ist und seine Arbeit einstellt. Dieser Vorgang definiert die untere Grenze des funktionellen Arbeitsbereichs. Die obere Grenze wird erreicht, wenn ungenügender Wasserzulauf vorkommt, welcher verhindert, daß 99% des Dampfs kondensiert werden. Sogar nur 1% unkondensierter Dampf könnte eventuell schon die Kehle des Konus ausfüllen und keinen Freiraum für das Wasser übriglassen.

Der gerade eben beschriebene Ansaug-Mechanismus ist untermauert durch Versuche, welche ergaben, daß der Wasserzufluß in den Injektor zurückgeht sowie der Druck ansteigt und ebenso, wenn die Wassertemperatur erhöht wird. Versuchsmessungen haben ergeben, daß ein Rückgang des Wasserflusses von 16% zu verzeichnen ist, wenn der Druck von 50 psi auf 100 psi steigt und eine Verminderung um 13% bei 100 psi, wenn die Wassertemperatur von 21°C auf 50°C angehoben wird. Das ist völlig entgegen dem erwünschten Effekt.

## Externe Wasserzufluß-Steuerung

Externe Wasserzufluß Steuerung ist eine geeignete Möglichkeit, um den Injektor bei Drücken in Betrieb zu halten, die unterhalb des Überflutungsdrucks liegen oder um das „Tröpfeln“ zu reduzieren. Jedoch je mehr externe Steuerung benutzt wird, desto mehr steigt der Unterdruck in der Zufluss Leitung und infolgedessen wird irgendwelche Luft-Leckage an den Schraubverbindungen oder des Kugelventils die ganze Aktion beenden. Das kleinste, auch nur nadelstichgroße Loch in der Lötverbindung oder eine nicht

vollkommen dichte Schraubverbindung an der Zufluß-Leitung ist ausreichend, um die Funktion zusammenbrechen zu lassen.

Um einen problemlosen Betrieb zu erreichen, sollte der Absperrhahn in der Zufluß-Leitung einen großzügig ausgelegten Querschnitt haben oder als Schlauchverbindung auf einem Schlauchstutzen ausgeführt sein. Das Saug-Ende sollte reichlich unterhalb des Flüssigkeitsspiegels im Vorratsbehälter angebracht sein, sodaß es immer überflutet ist.

Externe Wasserzufluß-Steuerung ist nicht ganz so effektiv wie eine Verminderung des Ringspalts, obschon sie ein ganzes Stück komfortabler ist. Der Grund dafür ist, daß das Wasser besser durch einen engen Ringspalt hindurchschießen wird, als wenn es von außen gebremst langsamer durch einen erweiterten Ringspalt zuströmt. Jegliche zusätzliche Geschwindigkeit, die der Wassermasse innerhalb des Injektors gegeben wird, bringt ihren Anteil für den Gesamt-Impuls.

## Starten des Injektors

Von der höchsten oberen Betriebsdruck-Grenze bis hinunter zur ersten Abgrenzungsstufe des Betriebsbereichs kann beim Starten der Wasserzulauf voll aufgedreht sein. Das ist nämlich der einfachste Betriebszustand für die Funktion.

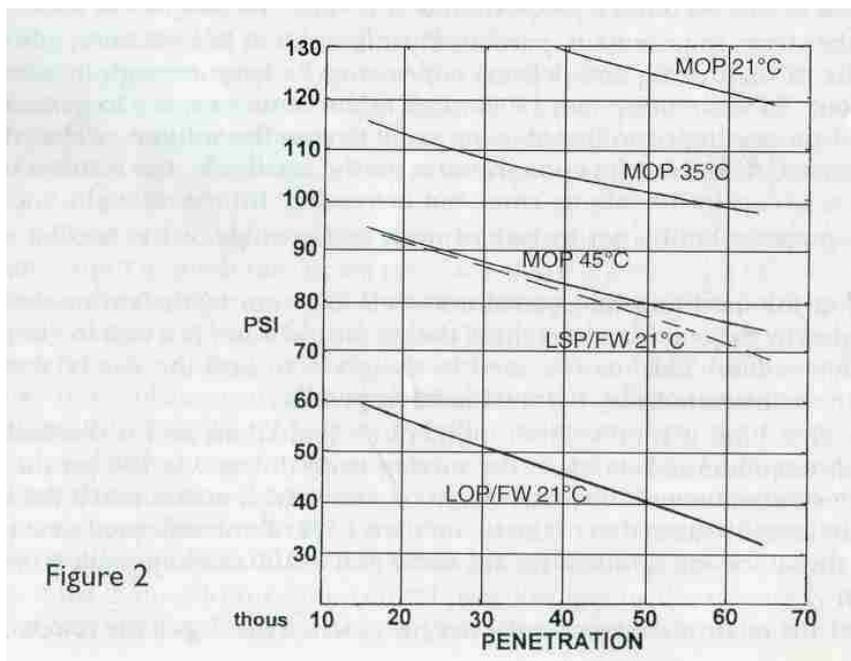
Im Bereich unterhalb der ersten Abgrenzungsstufe bis zur zweiten Abgrenzungsstufe darf das Wasser beim Start auch voll aufgedreht sein, obwohl es dann bald reduziert werden muß. Der Grund für diese Begrenzung zu Beginn des Betriebs ist, daß das Wasser ohne diese Einschränkung nicht genug Durchschlagskraft hat, um die volle vorgegebene Menge Wasser in das System einzuschleusen. Aber sobald das Wasser einen stärkeren Impuls (= Masse \* Geschwindigkeit) erfährt, ist es einfacher, auch den Rest mit zu bewegen. Unter den Anfahrbedingungen kann man ruhig die zuströmende Wassermenge reduzieren, aber die Einspeisung in den Kessel wird dann nicht die maximal mögliche Wassermenge erreichen. Wie auch immer, eine Mengenreduzierung, die gerade eben das bekannte „Tröpfeln“ am Überlauf verhindert, wird die Fördermenge nicht beeinträchtigen.

Ein „hebender/selbstansaugender“ Injektor kann dieselbe Handhabung benötigen, denn dabei gibt es keine automatische Begrenzungs-Funktion, die den Wasserzufluß steuert.

Unterhalb der zweiten Betriebsbereichsgrenze muß der Wasserzufluß durchgehend unter das Maximum eingeschränkt werden, weil sonst eine Überflutung des Misch-Konus auftritt. Ganz egal wie, der Wasserzufluß kann etwas über die Startbedingungen hinaus angehoben werden.

## Die Anpassung des Druckbereichs

Der Arbeitsdruckbereich kann nach oben erweitert werden (ebenso kann auch eine Anpassung an wärmeres Speisewasser erreicht werden), indem man die Eindringtiefe verringert, um welche die Mündung des Dampf-Konus in den Eingang des Misch-Konus hineinragt.



Diese Maßnahme bewirkt eine Vergrößerung der Fläche, die den Zufluß von (Kalt-)Wasser reguliert, indem der ringförmige Spalt zwischen den Konen dabei größer wird. Eine einfache Möglichkeit dieses auszuführen, ist der Einbau von zusätzlichen Distanzscheiben zwischen dem Kragen des Dampf-Konus und dem Injektor-Gehäuse. Eine Auswahl von 5 thou, 10 thou und 20 thou Scheiben wird dazu vermutlich ausreichen.

Ein Herabsetzen des Arbeitsdruckbereichs ist nicht so einfach, ohne den Kragen des Dampf-Konus mit einer Drehmaschine zu bearbeiten, um die Eindringtiefe des Dampf-Konus zu vergrößern. Falls man da zuviel abgedreht hat, können aber die oben genannten Beilage-Scheiben den Fehler schnell und einfach wieder korrigieren. Diese Verkleinerung der Zuflußmenge im Ringspalt kann andererseits auch durch eine externe Kontrolle des Wasserzuflusses erreicht werden. Ebenso kann eine geringfügige Erweiterung der Austrittsöffnung der Dampfdüse wirksam sein, oder sogar beides.

Das Diagramm (Bild 2) zeigt den Effekt von Beilage-Scheiben am Konus-Kragen, um einen weiten Arbeitsdruckbereich abzudecken. Dabei wurde ein Dicken-Bereich der Beilage-Scheiben bis zu 45 thou benutzt. Auf der x-Achse ist die erzielte Eindringtiefe des Dampf-Konus in den Misch-Konus aufgetragen.

Die Grenzwerte ***Pmin*** und ***Punt*** liegen niedriger, beziehungsweise die Tendenz zum "Tröpfeln" oder gar "Versiegen" kann vermindert werden, wenn eine externe Drosselung des Wasserzulaufs angewendet wird.

## Die Grenzen der Betriebsfähigkeit

Die untere Arbeitsdruck-Grenze ist festgelegt durch das Fehlen eines ausreichend starken Impulses (physikalisches Massen-Schwungmoment) und die obere Arbeitsdruck-Grenze wird erreicht, wenn keine oder zu wenig Kondensation des Dampfes stattfindet.

Der Massenstrom geht zurück mit fallendem Betriebsdruck und ebenso die ohnehin geringe Strömungsgeschwindigkeit.

Der Wasserzufluß und die Geschwindigkeit steigen bei fallendem Betriebsdruck zwar ein wenig an, infolge der wachsenden Ansaugung (durch frühere und schnellere Kondensation) und das wirkt sich zusätzlich zum Schwungmoment/Strömungsimpuls aus! Aber weil der Dampfverbrauch bei der Kondensation den überwiegenden Einfluß hat, ist das Netto-Ergebnis so, daß der insgesamt verfügbare Impuls bei steigendem Dampfdruck etwas sinkt.

Die effektiv benötigte Strömungsgeschwindigkeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Summe von Kesseldruck plus dem kleinen Gegendruck aus dem Strömungswiderstand des Rohrsystems und des Speise-Rückschlagventils plus dem Unterdruck (Ansaugung/Kondensation) innerhalb der Mischdüse.

Auch ohne die Überlagerung durch den Ansaug-Unterdruck und ohne den Gegendruck aus dem Rohrleitungs-System bedeutet die mathematische Quadratwurzel-Funktion, daß der Dampfbedarf schneller steigt als der Druck, aber es wird noch komplizierter, wenn der Druck abfällt. Jedoch mit Einbeziehung der oben genannten Überlagerung werden bei niedrigem Druck die Zusammenhänge nochmals komplizierter, weil dieses dann einen unverhältnismäßig großen Einfluss auf das Gesamtergebnis bewirkt.

Außerdem gibt es aber noch eine andere grundsätzliche Anforderung, besonders bei niedrigem Druck. Damit ist gemeint, daß der Düsenhals des Misch-Konus und des Ausgangs-Konus zum Kessel weit genug sein müssen, um den Wasserdurchfluß aufzunehmen. Daher sollte man ausreichend Schwungmoment/Impuls erübrigen können, um die erforderliche Strömungsgeschwindigkeit zu erzielen. Falls der Düsenhals zu klein ist, um das Volumen hindurch zu lassen, kann das Speisewasser nicht herauskommen. Wenn also der Düsenhals zu eng angelegt ist, wird das Ergebnis nicht einen Totalausfall darstellen, wie es bei "Überflutung" in der Mischdüse geschehen kann, sondern es wird in zunehmendem Maße nur noch "Tröpfeln".

Insofern ist der untere Grenzdruck festgelegt durch einen Mangel an Schubimpuls und eventuell durch einen zu engen Düsenhals der Mischdüse.

Die Berechnung für den unteren Grenzwert beschreibt, wann die Summe aus Dampf- und Wasser-Impuls dividiert durch das gemeinsame Gewicht von Dampf und Wasser gerade eben nicht mehr im Stande ist, die Mindest-Geschwindigkeit zu erzeugen. Diese Tatsache kann von Designern beim Entwurf benutzt werden, um die Größen der Düsen fest zu legen, welche für eine gewünschte Speisewassermenge benötigt werden. (siehe auch im "**Anhang Funktionsgrenzen**")

Die obere Druckgrenze ist weit entfernt von einer Impuls Beschränkung und wird erreicht, wenn zu viel unkondensierter Dampf im Düsenhals der Mischdüse vorhanden ist. Bei 100 psi ist das Dampfvolmen 220 mal so groß wie das entsprechende Volumen des gleichen Gewichts an Wasser. Das bedeutet, wenn beispielsweise das Gewicht des zuströmenden Wassers das 10-fache Gewicht des zuströmenden Dampfes beträgt, immer noch das 22-fache Volumen an unkondensiertem Dampf mit 100 psi den Düsenhals ausfüllt und somit dann dort keinen Raum für das Speisewasser lässt, und 1/100-stel gerade eben 77% Raum für das Wasser freiläßt.

Aber in der Zeit, in welcher die Mischung aus Dampf und Wasser den Düsenhals durchläuft, wird sich

der Dampf abgekühlt haben und der Dampfdruck reduziert sein. Sowie nun der Druck sinkt, expandiert der Dampf wieder in seinem Volumen und es ist unwahrscheinlich, daß auch nur 0,25% des Dampfolumens nicht kondensiert ist, ohne daß es Platzprobleme Düsenhals Platz gibt. Im Endeffekt muß schließlich der gesamte zugeführte Dampf wieder kondensiert werden. Der Düsenhals der Mischdüse wird ein wenig größer angefertigt als der Düsenhals der Ausgangsdüse, um dieses Problem zu beherrschen, nämlich die Fortführung der Dampf-Kondensation in den Düsenhals der Ausgangsdüse hinein.

Vorbedingung für eine vollständige Kondensation ist es, daß das zugesetzte Wasser die gesamte **latente Wärme** des zuströmenden Dampfes aufnehmen kann und dazu noch den Überschuß an Flüssigkeitswärme, ohne daß das zuströmende Wasser sich wieder auf seinen Siedepunkt erhitzt. Die physikalischen Zustandswerte für den Dampf können aus den allgemeinen Tabellen für Wasserdampf abgelesen werden und nebenbei auch noch andere physikalische Werte, wie beispielsweise das spezifische Volumen. Es wird unterstellt, daß bei der vorgegebenen Temperatur des Gemischs die Wärme Gleichung (Energieinhalt der Masse), wenn es den Düsenhals der Mischdüse verlässt, knapp unter dem Siedepunkt liegt. Die Wärme, die eine vorgegebene Menge an Wasser noch aufnehmen kann, ist festgelegt durch ihre spezifische Wärme und durch ihre Temperatur. Je wärmer das Wasser schon ist, um so weniger zusätzliche Wärme kann es noch aufnehmen, ehe es den Siedepunkt erreicht. Das ist der Grund, warum mehr (kühlendes) Wasser benötigt wird, wenn es schon warm ist.

Das Gewicht (Masse) und die Temperatur des verfügbaren Wassers und das Gewicht (Masse) des Dampfes und dessen Wärmeinhalt werden verwendet, um die oberen Grenz-Bedingungen vorab zu berechnen. Zum einen als Ausdruck der maximal anwendbaren Wassertemperatur bei gegebenem Druck, oder als maximaler Druck der angewendet werden kann.

Bei diesen Berechnungen ist die Expansion in der Dampf Düse nicht wichtig wegen der zusätzlichen Strömungsgeschwindigkeit, welche sie hervorruft (das ist nur bedeutsam bei niedrigen Druckstufen), sondern sie ergibt nasser Dampf wegen des Wärmeverlusts bei der Expansion. Letzteres beeinflusst die Wärme Gleichung, was bedeutet, daß weniger latente Wärme im Dampf enthalten ist. Der Trockenanteil am Ausgang der Dampf Düse liegt noch bei 90%. ( siehe auch im "**Anhang Funktionsgrenzen**" )

## Zustrom von Warmwasser

Das grundsätzliche Problem bei der Zuführung von Warmwasser ist es, daß die Kondensation des Dampfes langsamer erfolgt und eine größere Menge Wasser benötigt wird. Und bei sehr warmem oder gar heißem Wasser könnte die Dampfkondensation innerhalb des Misch-Konus nicht vollkommen sein. Das und auch andere Sachverhalte sollen nun betrachtet werden.

Zuerst einmal wird bei langsamer Kondensation die Ansaugung durch das partielle Vakuum vermindert. Das bedeutet, daß weniger Wassermenge für eine genügende Kondensation zur Verfügung steht, falls mal ein wenig mehr Kühlwasser benötigt wird. Und daraus entsteht das Problem. Der hauptsächliche Lösungsweg, um das zu kompensieren, ist den Ringspalt zu vergrößern, sodaß leichter mehr Kühlwasser eingesaugt werden kann.

Ein anderer Ansatz, welcher die Kondensation verbessert, ist eine Abänderung der Gestaltung der Mischdüse. Derart, daß sie mit einem Winkel von etwa 12° beginnt, danach weitergeht mit 7,5° und endet mit 6°, wobei die Gesamtlänge die gleiche bleibt. Der steilere Anfangswinkel zwingt das Wasser zu einem schnelleren Kontakt mit dem Dampfstrahl. Daraus ergibt sich eine schnellere Kondensation als bei der sonst üblichen Auslegung mit durchgängig konstantem Winkel.

Die zweite Angelegenheit ist der Bereich zwischen den Ausgang des Misch-Konus und dem Eingangsbereich des Ausgangs-Konus. Bei kaltem Wasserzustrom und gemäßigttem Druck ist ein sauberer, kompakter Wasserstrahl aus dem Misch-Konus gegeben. Aber wenn der Dampfdruck oder die Wassertemperatur ansteigen, dann wird der Wasserstrahl zunehmend sprayartig (dampfdurchsetzt) und ist weniger geneigt, seinen Weg in den Ausgangs-Konus zu finden. Wie auch immer, die Aufrechterhaltung der Bedingungen für einen guten Strahl ist besser gewährleistet, wenn der Misch-Konus über eine definierte Länge parallel (zylindrisch) verläuft und/oder wenn der Konus mit einem kleineren Innenwinkel endet. Der Zugang des Wasserstrahls in den Ausgangs-Konus wird auch leichter, wenn die Öffnungen der beiden Düsen so eng beieinander liegen wie es der niedrigste Dampfdruck zur Einhaltung der Startbedingungen noch zulässt.

Ein anderer Nachteil des Injektor-Betriebs mit Warmwasser ist der weite Bereich des angewendeten Misch-Konus und Ausgangs-Konus-Durchmesser-Verhältnisses von 1,35 : 1 bei handelsüblichen Injektoren; oder wie oft auch empfohlen wird 1,2 : 1. Die Anwendung eines Verhältnisses von 1,08 : 1 bei der Auslegung von Injektoren für Warmwasserzufuhr, welches also eine größere Austrittsöffnung ergibt , ist viel besser geeignet für diesen Zweck.

Als Drittes ist die Breite des Überlauf-Spalts in der Mitte des Misch-Konus von Bedeutung. Dieser wird gern etwas breiter angelegt, um den Start des Injektors zu erleichtern, aber für Warmwasser Betrieb ist ein schmaler Spalt die bessere Wahl.

Der vierte Punkt ist die absolute Größe des Injektors. Kondensation braucht Zeit. Und weil die Geschwindigkeit von Dampf und Wasser bei allen Injektorbaugrößen die gleiche ist, folgt daraus, daß in größeren Injektoren mehr Zeit zur Verfügung steht, um eine vollkommene Kondensation des Dampfstrahls im Misch-Konus zu verwirklichen. Ein Injektor für 2268 gr/min wird dabei besser funktionieren als ein Modell für 567 gr/min. Ein Injektor in Originalgröße mag Dampf von 17.5 bar verwenden, aber die Strömungsgeschwindigkeit ist dennoch nur wenig höher als bei einem Dampfdruck von 5,6 bar und seine Konuslänge ist 8-fach länger als bei einem Modell-Injektor. Dies gibt natürlich viel mehr Zeit für die Kondensation. Professor Kneass berichtet sogar von einem erfolgreichen Versuch mit sehr warmem bis heißem Zufuhr-Wasser bei einer original großen Ausführung, aber dabei wurde der Überlauf nach einem Start mittels Kaltwasser abgesperrt.

Als Regel gilt, daß der Ringspalt bis zu einer Wassertemperatur von 45° C proportional erweitert werden kann mit brauchbaren Ergebnissen. Für etwas höhere Temperaturen muß man die Erweiterung schon übertreiben, und ab 50°C ist eine Erweiterung kaum der Mühe wert. Derartig hohe Speisewasser-Temperaturen findet man eigentlich nur bei Seitentanks oder Satteltanks an Lokomotiven und es ist besser, das Speisewasser dann aus einer anderen Quelle zu beziehen.

In wärmeren Klimazonen kann die Temperatur des Speisewasser schon mal 35°C betragen und man sollte das bei der Auswahl eines geeigneten Injektors berücksichtigen.

Das Fazit all dieser Erschwernisse ist, daß eine saubere Vorhersage für die Warmwasser-Funktionalität eines Modell-Injektors ohne reichliche Erfahrung mit all den beschriebenen Effekten fast unmöglich ist.

Auslegungs-Berechnungen, welche nur auf der eventuell möglichen Kondensation beruhen, sollen in erster Linie lediglich den maximal möglichen Betriebsdruck bei kaltem Speisewasser belegen.

Der einzige Vorteil bei der Anwendung von etwas wärmerem Speisewasser ist eine kleine Absenkung des niedrigsten möglichen Betriebsdrucks, weil dabei der Überflutungstendenz durch eine langsamere Kondensation entgegen gewirkt wird.

## Der Ausgangs-Konus

Dieser ist das bemerkenswerteste Teil eines Injektors, weil es so einfach ist und dennoch Druck von mehr als 100 psi mittels eines Wasserstrahls aus kurzer Distanz erzeugen kann. Und das auch noch ohne komplizierte Kolben und Ventile! Die wissenschaftliche Erklärung dafür beruht auf folgenden Gesetzen:

1. In einem geschlossenen strömenden System, gefüllt mit einer nicht kompressiblen Flüssigkeit wie Wasser, ist der Volumenstrom an jeder Stelle des Systems konstant. Daraus folgt, daß das Produkt aus der Strömungsgeschwindigkeit und dem Leitungsquerschnitt ebenfalls konstant ist.

2. Wenn es keine Verluste im System gibt, dann kann die zugeführte Energiemenge, wie zum Beispiel kinetische Energie (**KE**) umgewandelt werden in eine entsprechende Energie-Abgabe (physikalische Arbeit).

3. Physikalische Arbeit ist Kraft mal Weg. Das bedeutet hier, daß die in einer Sekunde zu verrichtende Arbeit gleich Druck mal Fläche (=Kraft) multipliziert mit der Geschwindigkeit (Strecke pro Sekunde) ist.

Aus diesen Gesetzen ergibt sich, daß ein Wasserstrahl, welcher ja eine kontinuierliche Quelle an kinetischer Energie darstellt, entsprechend seiner hohen Geschwindigkeit gezwungen werden kann (wobei er durch eine konische Düse eingegrenzt ist) ununterbrochen eine Wassersäule durch die Speiseleitung gegen den Kesseldruck vorwärts zu treiben.

Die Theorie der kinetischen Energie leitet sich ab aus den Formeln für die Geschwindigkeit und Beschleunigung einer fallenden Masse. Der Zustand der erreicht wurde, indem man eine Masse entgegen der Schwerkraft auf eine bestimmte Höhe angehoben hat, ist genau gleich der kinetischen Energie der Masse, wenn sie wieder auf die Erde zurückstürzt. Und das ist der entscheidende Punkt! Diese Aktionen sind umkehrbar, sodaß die Arbeit, die aus der kinetischen Energie zurückgewonnen werden kann, genau gleich groß mit der ursprünglichen (hineingesteckten) Arbeit ist.

Im Anhang wird die kinetische Energie des Wasserstrahl errechnet, die man braucht, um das Speisewasser in den Kessel zu treiben. Als Ergebnis wird eine Formel erstellt für die niedrigste benötigte Geschwindigkeit in der Kehle der Düse, die bei einem vorgegebenen Druck noch funktioniert. Ein kleiner Aufschlag ist dabei schon enthalten für den Gegendruck aus den Strömungsverlusten in der Speiseleitung und zum Öffnen des Rückschlagventils. Die Formel lautet:

$V_t \text{ (minimum)} = 12,36 * \sqrt{P_{\text{Ausgang}}}$  , wobei  $P_{\text{Ausgang}}$  der geforderte Speisedruck ist.

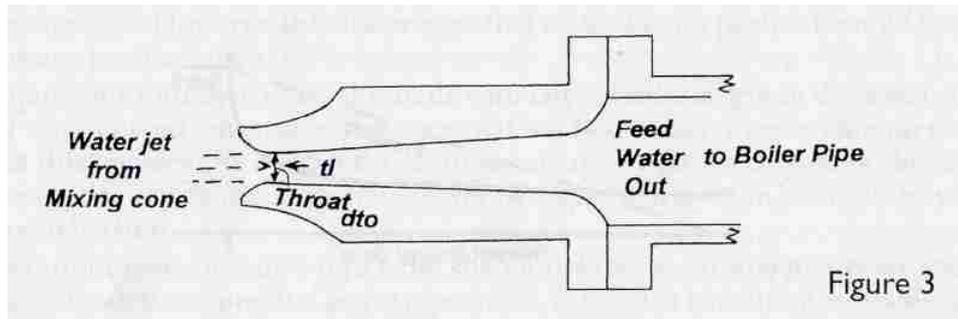
Bei 100 psi sollte  $V_t$  daher 123,6 ft/sec sein. Jedoch bei 50 psi ist das Ergebnis nicht die Hälfte davon, sondern 87,4 ft/sec! Also entsprechend der Quadratwurzel in oben genannter Formel.

Weil die Austrittsgeschwindigkeit aus der Mischdüse in etwa proportional dem Kesseldruck ist, dann

ist bei 50 psi bar eine Geschwindigkeit von 87,4 ft/sec verfügbar und folglich wird bei 100 psi Kesseldruck dort eine Geschwindigkeit von etwa 175 ft/sec angeboten. Dieser Wert deckt sehr gut die erforderliche Mindestgeschwindigkeit von 123,6 ft/sec ab.

Das ist einer der fundamentalen Gründe, warum bei niedrigem Kesseldruck das System versagt. Niedriger Kesseldruck verlangt so relativ viel mehr an Dampfimpuls als mittlerer bis hoher Druck.

Die Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit, Querschnittsfläche und Dampfdruck wird im Anhang mathematisch erläutert. Dort werden die Formeln für die Eintrittsgeschwindigkeit und die Öffnungsweite der Düsenkehle abgeleitet und ebenso für den Druckaufbau bei einer Änderung des Durchmessers.



Der Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl aus der Mischdüse geht in die Kehle des Austrittskonus durch einen kurzen gewölbten Eingangsbereich in der Absicht, außermittige Strahlenteile zurück zu lenken. Und nach der Kehle der Düse erweitert sich dann der Konus allmählich, bis der Innendurchmesser der Kessel-Speiseleitung erreicht ist. Durch die Konusverengung innerhalb der Misch-Düse werden Freiräume hoch komprimiert, beispielsweise auf eine Höhe von 230 ft statischem Druck entsprechend 100 psi, dabei wird die Wirkung der Schwerkraft um circa das 5000-fache übertroffen.

Auf diese Weise werden 100 psi erzeugt bei nur etwa ½ in. Distanz.

Nur wenn die Eintrittsgeschwindigkeit höher ist als das geforderte Minimum, kann Druck aufgebaut werden gegen den Kesseldruck plus den zusätzlichen Staudruck aus der Speiseleitung und dem Rückschlagventil.

Am Eingang, wo zwischen der Austrittsdüse und der Mischdüse ein Spalt für den Funktionsstart existiert, ist der Druck gleich dem normalen Luftdruck. Aber in der Kehle kann ein teilweises Vakuum vorhanden sein, infolge der später erklärten Ansaugung. Egal, wie im Anhang beschrieben (wo alle Berechnungen dargestellt sind), baut sich der Druck sehr schnell auf, bei nur geringer Vergrößerung des Durchmessers der Düsen-Kehle. Zum Beispiel bewirkt ein Zuwachs von 10% im Kehlen-Durchmesser schon einen Druckanstieg von 32% bezogen auf das Maximum und bei einem Zuwachs von 20% ist der Druckanstieg 52%.

Diese Fakten führen zu der Frage, was für eine Konusform, oder einfacher gesagt, welcher Innenwinkel bei der Düsenherstellung benutzt werden sollte. Falls der Winkel groß ist, ist die Druckspitze näher an der Kehle der Düse und es ergeben sich Stömungsabrissse von der Wandung. Das wiederum ergibt turbulente Rückströmungen und Wirbel oder Strudel. Wenn der Winkel klein ist, steigern sich die Wandreibungs-Verluste. Für Modellgröße ist der übliche Bereich zwischen 13° maximal und 6° minimal. Dabei wird ein Winkel von 6° vorzugsweise eingesetzt, denn er ist besser als ein großer Innenwinkel in der Lage, auch schwierigere Voraussetzungen zu bewältigen, beispielsweise warmes Speisewasser nahe der temperaturbedingten Funktionsgrenze. Manchmal findet man auch eine progressive Zunahme des Winkels, wobei die stufigen Abschnittsübergänge sorgfältig verrundet sind. Aber diese Komplizierung zeigt keinen signifikanten Vorteil, obwohl sie derjenigen Innenkontur nahe kommt, die einen gleichmäßigen Druckanstieg über die Konuslänge bewirkt. Die theoretische Innenkontur, die das eben genannte ermöglicht, beginnt mit einem Konuswinkel von 1,5° und steigert den Wert nur wenig bis zum Schluß eine Aufweitung ähnlich einem Schalltrichter existiert. Jedoch ist die Wandreibung bei so einem kleinen Konus-Innenwinkel übermäßig groß. Benutzt man eher übliche Winkel (beispielsweise 6°), dann wird der letzte Zuwachs auf den Innendurchmesser der Speiseleitung am besten erreicht, indem man eine ähnliche Aufweitung (Schalltrichterform) erst anbringt, nachdem der Konusdurchmesser schon das 2,5 bis 3-fache des

Kehlendurchmessers erreicht hat. Auch eine steile Verrundung ist brauchbar, obwohl die Konusgestalt eigentlich nicht kritisch für die Funktion ist.

Der Verlauf des Druckanstiegs bei unterschiedlichen Konusformen wird in den Diagrammen durch gestrichelte Linien dargestellt. Der Konus mit linearem Druckanstieg ist trompetenförmig und beginnt mit einem ganz kleinem Winkel. Das andere Diagramm stammt von einem geradflankigen Konus mit einer Erweiterung am Ausgang. Man sieht, daß der Druckanstieg im geradflankigen Bereich sehr gering ist und deshalb ist die Erweiterung am Ausgang auch unkritisch. Kurve 1 zeigt den Druckanstieg, wenn der Konus mit Wasser gefüllt ist und Kurve 2 zeigt den Zustand, wo dies nicht zutrifft und einige Luft mit angesaugt wird. Unabhängig vom Konuswinkel erfolgt der Druckanstieg bei geradflankigen Konen sehr rasch.

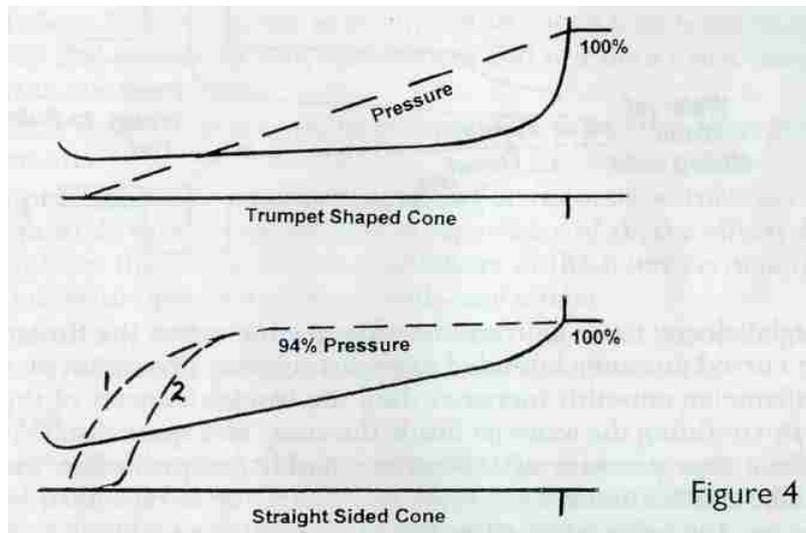


Figure 4

Die nächste Frage ist: Welche Größe sollte die Kehle haben? Die Kehlengröße hängt ab von den Injektordaten für den kleinsten Betriebsdruck und dem gewünschten Wasser-Ausstoß.

Die Formel  $12,36 \cdot \sqrt{(\text{kleinster Kesseldruck} [psi] + 2 [psi])}$  ergibt die benötigte Eingangsgeschwindigkeit. Danach ergibt sich der Wasserausstoß durch Anpassung der Fördermenge bei normalen Drücken, da diese bei fallendem Druck zunimmt. Danach wird es unter Benutzung der Formel für Volumen pro lb bei Ausgangstemperatur umgewandelt in Volumen pro Sekunde. Volumen pro Sekunde entspricht Geschwindigkeit mal Fläche der Kehle und letztlich wandelt ein bißchen Arithmetik die Fläche um in Durchmesser in thou. Schläge im Anhang nach für weitere Einzelheiten. In der Zwischenzeit aus dem Anhang:

$$\text{Minimaler Kehlen-Durchmesser } dt \text{ in thou} = 15,92 \cdot \frac{\sqrt{\text{oz pro Minute}}}{\sqrt[4]{\text{kleinster Kesseldruck} [psi] + 2 [psi]}}$$

Ein Beispiel: für 30 oz pro Minute bei 40 psi ist der kleinste Kehlen-Durchmesser  $dt = 34,25$  thou.

Beachte, daß  $\sqrt[4]{}$  die Wurzel aus einer Wurzel bedeutet ( $\sqrt{\sqrt{}}$ ).

Wenn der Wasserstrom mit Geschwindigkeit und Menge genau zur Fläche der Kehle paßt, so daß kein Tröpfeln und keine Luftansaugung stattfindet, dann ist der Druck in der Kehle genauso groß wie der Luftdruck. Ist die Geschwindigkeit kleiner als erforderlich, dann wird alles Wasser in den Überlauf fließen und sogar wenn die Geschwindigkeit ausreichend ist, aber die Wassermenge größer ist, als die Kehle des Ausgangs-Konus aufnehmen kann, wird Wasser überfließen. Das passiert, wenn die Kehle des Ausgangs-Konus zu klein ist für die Kehle des Misch-Konus, dann tritt die häufig zu beobachtende Situation des Tröpfelns ein. Ist die Kehle voll mit Wasser, bleibt dort der Druck gleich dem Luftdruck.

Wenn die Wassergeschwindigkeit über der Mindestgeschwindigkeit liegt, aber die Wassermenge nicht ausreicht, um die Kehle zu füllen, dann wird Luft mit angesaugt, um die Fläche vollständig auszufüllen. Diese Ansaugen kann man mit dem Finger am Überlaufrohr fühlen und außerdem verursacht es auch ein zischendes Geräusch.

Wenn der Druck abfällt, ist eine zyklische Veränderung des zischenden oder zwitschernden Geräuschs zu hören. Das wird durch allmählich beginnenden instabilen Betrieb verursacht, da sich die

Betriebsgrenze dem Überströmen nähert. Die Ansaugung entsteht durch die Reibung zwischen dem Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl und der umgebenden Luft, wenn der Wasserstrahl kleiner ist als der Konus-Durchmesser. Über diese Ansaugung stehen weitere Informationen im Anhang.

Die Ansaugung wird auch hervorgerufen durch den Siphon-Effekt des in der Kessel-Speiseleitung fließenden Wassers, wodurch auch eine Beeinflussung des Verhaltens bei kleinem Druck erfolgt. Angenommen, der Injektor arbeitet und der Druck fällt bis der Injektor versagt. Man wird feststellen, daß der Injektor nicht automatisch wieder „anspringt“, selbst wenn der Druck bis auf den Wert angehoben wird, bei dem der Injektor versagte. Das zeigt, daß die sich in dem Rohr bewegende Wassersäule den Einfluß des Öffnungsdrucks vom Kessel-Speiseventil hinter dem Ausgangs-Konus reduziert. Auf alle Fälle bedeutet es, daß etwas zusätzlicher „Schub“ erforderlich ist, um die Wassersäule wieder in Bewegung zu setzen.

Die Eingangsseite eines Ausgangs-Konus wird üblicherweise ausgerundet, um das Wasser in die Kehle zu lenken, wobei eine kleine Verrundung mindestens so gut, wenn nicht sogar besser ist als eine Variante mit großem Radius. Speziell dadurch ist es möglich, die Kehle des Ausgangs-Konus dichter an die Kehle des Misch-Konus heranzurücken. Die Größe dieses wichtigen Spalts zwischen den Konen wird später im Zusammenhang mit der Arbeitsweise des Misch-Konus erläutert werden.

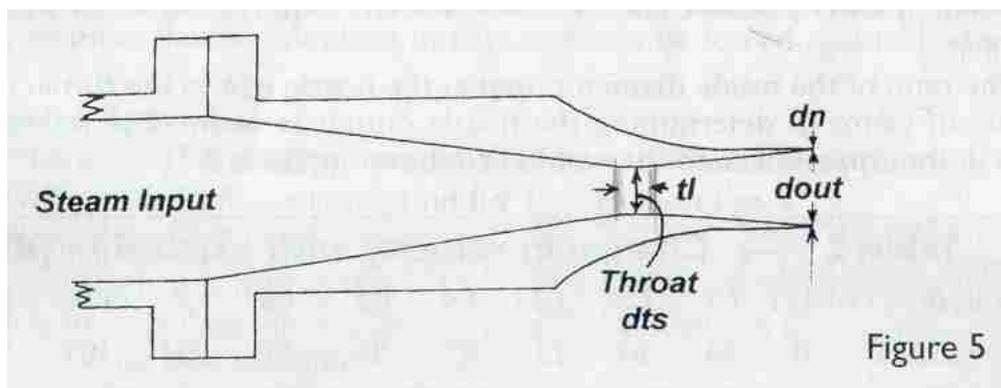
Die Konen der Modell-Injektoren unterscheiden sich von den Injektoren in Original-Größe, bei denen Vorkehrungen getroffen wurden, um sie ausbauen zu können, ohne die schwere und starre Verrohrung entfernen zu müssen. Die Verwendung von Überwürfen ermöglicht es, eine Verschlusskappe zu entfernen und den Konus herauszuschrauben. Außerdem wird der Überlauf mit einer Rückschlagklappe versehen, um das Ansaugen von Luft zu verhindern. Bei den Original-Injektoren gleicht der Konus-Eingang mehr einer Verlängerung des Misch-Konus und etwa 5° bis 6° werden für den Haupt-Konuswinkel verwendet.

## Der Dampf-Konus

Beachte: Sofern nicht anders angegeben, sind in diesem Abschnitt alle Drücke in psia angegeben, das entspricht der Manometeranzeige in psi + 14,7 psi.

Der Dampf-Konus ist das am leichtesten zu verstehende Teil eines Injektors, seine Theorie wird in Fachbüchern über Thermodynamik und Wärmekraftmaschine detailliert beschrieben. Eine einfache Version ist im Anhang zu finden.

Die Energiequelle für die Ausgangs-Geschwindigkeit ist die vom Dampf geleistete Arbeit während er expandiert wie z. B. in einem Zylinder, ausgenommen die adiabatische Expansion (adiabatisch = Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch), bei der keine externe Arbeit verrichtet wird. Mit beginnender Expansion nimmt die Geschwindigkeit schneller zu als das Volumen, daher nimmt der Durchmesser des Dampfstrahls ab, bis die kritische Kehlen-Geschwindigkeit erreicht ist, die der Schallgeschwindigkeit in Dampf bei Kehlendruck entspricht. Nach der Kehle wächst sich das Volumen schneller als die Geschwindigkeit und der Durchmesser der Düse vergrößert sich, um sich dem anzupassen.



Daher besteht der Dampf-Konus aus drei Abschnitten: dem Eingangsteil, in dem sich der Durchmesser der Dampf-Zuleitung bis auf den Kehlen-Durchmesser **dts** verringert, der Kehle mit der Länge **tl** und dem Durchmesser **dts** und der folgenden Erweiterung bis auf den Ausgangs-Durchmesser **dout**.

Die Eingangsseite ist überhaupt nicht kritisch, solange die Durchmesser-Verkleinerung allmählich erfolgt und ohne Kanten ist, besonders am Übergang zur Kehle. Idealerweise ist der Eingang kurz und geschweift, aber in Modell-Größe wird zusätzliche Länge benötigt, um Platz für die Verschraubung am Wassereingang zu haben, woran sich ein geradflankiger Konus anschließt, der sich vom Innen-Durchmesser der Dampf-Zuleitung bis auf den Kehlen-Durchmesser verjüngt, manchmal mit einer Verrundung am Eingang, um eine Stufe zu vermeiden. Dieser Teil spielt in der Theorie der Lehrbücher keine Rolle, da angenommen wird, dass wegen der geringen Länge die Reibung keinen Einfluss hat. Funktionell soll der Eingangsteil dem Dampf eine gleichmäßige Expansion bis auf den Druck in der Kehle ermöglichen, der nach den Regeln der adiabatischen Expansion ca. 58% des Absolutdrucks am Eingang beträgt, wie im Anhang gezeigt wird.

Die durchfließende Dampfmenge, die durch den Kehlen-Durchmesser bestimmt wird, wird nach der folgenden komplizierten Formel aus dem Anhang berechnet:

$$\text{Dampf-Durchfluß in oz pro Minute} = 1,241 * dt^2 * Pin^{0,97} / 100000$$

**Pin** ist der absolute Eingangsdruck in psia (Manometeranzeige plus 14,7 psi), **dt** ist der Kehlen-Durchmesser in thou.

Tabelle 1 - Dampfdurchsatz						
Kesseldruck	20 psi	40 psi	60 psi	80 psi	100 psi	110 psi
Kehlen-Ø	Dampfdurchsatz in oz/min					
20 thou	20 thou	0,15	0,24	0,33	0,41	0,49
40 thou	40 thou	0,62	0,96	1,30	1,64	1,98
60 thou	60 thou	1,39	2,17	2,93	3,69	4,44
80 thou	80 thou	2,48	3,85	5,21	6,56	7,90

Tabelle 1 zeigt die mit dieser Formel errechneten Werte. Wichtig daran ist, daß der Dampf-Durchfluß mit dem Quadrat des Durchmessers und etwa proportional mit dem Absolutdruck zunimmt.

Bis zu einer Grenze von etwa 1 \* Kehlen-Durchmesser hat die Kehlenlänge keinen wesentlichen Einfluss auf den Durchfluss. Das bedeutet, daß außer bei der Herstellung einer Mikro-Miniatur-Düse es keinen Vorteil bringt, mühevoll die maximale Länge von 15 thou einzuhalten, wie manche Konstruktionen es erfordern.

Betrachtet man die Kehle, zeigen die Regeln der adiabatischen Expansion, daß weitere Expansion des Dampfes auf niedrigere Drücke und zunehmende Geschwindigkeit eine größere oder sich erweiternde Düse erfordert.

Das Verhältnis des inneren Durchmessers **dout** am Düsenausgang zum Durchmesser **dt** der Kehle ist ein wichtiger Faktor bei der Festlegung der Ausgangsgeschwindigkeit der Düse. Die entsprechenden Formeln finden sich im Anhang, Berechnungsergebnisse zeigt die Tabelle 2.

Tabelle 2 Geschwindigkeits-Zunahme bei Erweiterung												
<b>d out / d t</b>		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Zunahme	[%]	0	44	61	73	83	91,0	98	104	109	114	118

Ein wichtiger Punkt ist, daß die Dampfgeschwindigkeit sehr stark zunimmt bei nur geringer Vergrößerung dieses Verhältnisses oberhalb des kleinsten Wertes von 1. Ab **dout / dt** = 1,8 ist die Zunahmerate klein und ein Verhältnis von etwa 1,6 für **dout / dt** wird üblicherweise benutzt. Das ergibt eine Vergrößerung der Geschwindigkeit von knapp 2-fach. Für 2,5-fach muß **dout / dt** 3,25 sein und 10 für 3-fach. Solch große Verhältnisse werden nur bei Turbinen benutzt.

Die erreichbare Ausgangsgeschwindigkeit hängt von dem Druck am Düsenausgang ab, sie kann theoretisch nur noch 10% der Eingangsgeschwindigkeit betragen. Ist der Umgebungsdruck am Düsenausgang zu sehr davon verschieden, können sich heftige Druckschwankungen entwickeln. Diese können negativen Einfluß auf die Arbeitsweise haben, da der Eingangsdruck schwankt, was zu intervallmäßigem Aussetzen führen kann. In einem Fall war das Verhältnis **dout / dt** von 1,83 die Ursache für ein solches Problem, das nur durch Verkleinerung des Verhältnisses beseitigt werden konnte. Daher ist es sicherlich ratsam, diese Probleme zu vermeiden, indem man das Verhältnis auf maximal 1,7 begrenzt.

Die Geschwindigkeitszunahme bei einem Kesseldruck von 20 psi bis 110 psi Manometeranzeige beträgt nur 4%, wie in **Tabelle 3** dargestellt. Das rührt daher, daß das Dampfvolumen pro Sekunde abnimmt mit steigendem Druck (die Dampfdichte nimmt zu), sodaß, obwohl das Dampfgewicht pro Sekunde eine Menge zunimmt, die Geschwindigkeit aber nur mit der in der **Tabelle 3** gezeigten Rate zunimmt. Die in der **Tabelle 3** aufgeführten Geschwindigkeiten sind gegenüber den theoretischen Werten für eine ideale Düse um 15% wegen Reibung reduziert.

<b>Tabelle 3 Geschwindigkeits-Zunahme über den Eingangsdruck (Expansion 1,5)</b>							
Manometer-Druck	[psi]	20	40	60	80	100	110
Geschwindigkeit	[ft/sec]	2321	2354	2376	2394	2408	2414
Zunahme	[%]	0	1,4	2,4	3,2	3,8	4,0

Die Außenkontur des sich innerhalb erweiternden Düsenausgangs ist üblicherweise ein kurzes Stück zylindrisch, um den Wasserzufluß in den Misch-Konus zu lenken, dabei ist der Durchmesser **dn** kritisch und wichtig für den Betriebsdruckbereich, der bestimmt wird durch die Wasserzufluß-Charakteristik. Der interne Konus, der sich von der Kehle an vergrößert, wird so hergestellt, daß sich ein möglichst scharfer Rand am Ende bildet. In der Praxis gibt es Schwierigkeiten, solch einen dünnen Rand herzustellen und bei 0,06 mm – 0,08 mm dürfte die Grenze erreicht sein. Der Vorteil eines sehr dünnen Randes ist, daß eine bessere Mischung von Dampf und Wasser erfolgt, wodurch eine niedrigere untere Betriebsdruckgrenze erreicht wird und ebenso eine bessere Mischung von Dampf und Luft, wenn der Injektor beim Starten Wasser ansaugen muß. Nachteilig sind die Schwierigkeiten bei der Herstellung und die Empfindlichkeit des fertigen Randes.

Der Winkel des inneren Konus ist nicht unbedingt kritisch, aber eine obere Grenze von 15° ist üblich. Düsen in Dampfturbinen benutzen Winkel von etwa 12° und ein gebräuchlicher Wert für Modell-Injektoren ist 9°.

Das Produkt aus dem durchfließendem Dampfgewicht und der Dampf-Geschwindigkeit im Dampf-Konus ist der wichtige Wert, der entscheidet, wieviel Wasser gegen den Kesseldruck gefördert werden kann. Formeln aus dem Anhang:

(2)  $r = 1 / (6 * (\mathbf{dout} / \mathbf{dt})^2 - 4,44)$  näherungsweise für **dout / dt** in den Grenzen von 1,3 bis 1,9

(5) Ausgangsgeschwindigkeit einschließlich einer Korrektur von 15% wegen Reibungsverlusten

$$\mathbf{Vout} = 4330 * \mathbf{Pin}^{0,031} * \sqrt{(1 - r^{1,1189})}$$
 ft pro Sekunde

**Pin** ist der absolute Eingangsdruck in psia (Manometeranzeige plus 14,7 psi), **dt** ist der Kehlen-Durchmesser in thou.

(6) Dampf-Durchfluß in oz pro Minute =  $1,241 * \mathbf{dt}^2 * \mathbf{Pin}^{0,97} / 100000$

(7)  $\mathbf{dt} = (284 * \sqrt{\text{oz pro Minute}}) / \mathbf{Pin}^{0,485}$

## Der Misch-Konus

Der Zufluß zu diesem besteht aus Dampf, der aus dem Dampf-Konus kommt und Wasser, das durch den Ringspalt angesaugt wird, der sich zwischen dem Ende der Dampfdüse und dem inneren Eingangs-Durchmesser des Misch-Konus bildet.

Der Misch-Konus wird üblicherweise aus zwei Teilen hergestellt, die durch einen Spalt getrennt sind, der zum Starten des Injektors benötigt wird. Der Eingangsteil wird manchmal auch als Saug-Konus bezeichnet, da in diesem Teil durch die Kondensation des Dampfes das Wasser hereingesaugt wird. Dieser Name ist wahrscheinlich abgeleitet von dem Ansaug-Unterdruck. Der Ausgangsteil wird manchmal Treib-Konus genannt, weil das Wasser aus der Kehle mit hoher Geschwindigkeit herausgetrieben wird.

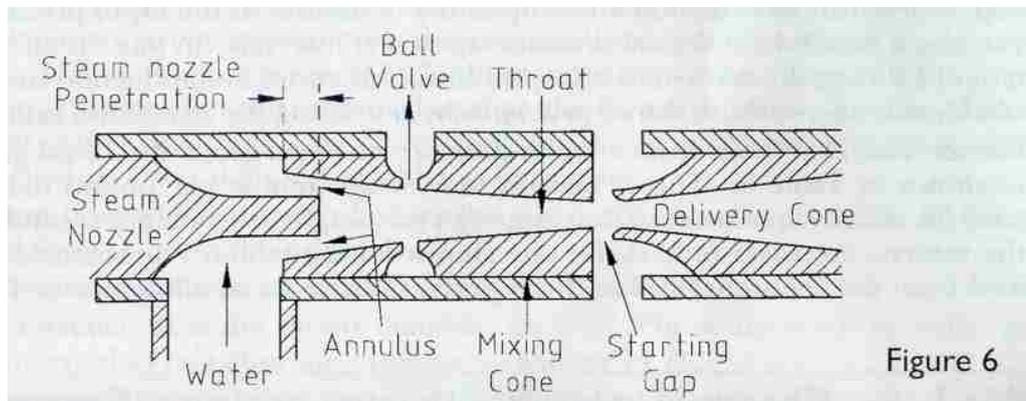


Figure 6

Manchmal wird der Name Vereinigungs-Konus statt Misch-Konus benutzt, aber der Name ist nicht so wichtig, wenn man seine Funktion versteht. Welcher Name auch benutzt wird, das Wasser wird mit dem Dampf gemischt und dieser dadurch kondensiert, wodurch der Unterdruck erzeugt wird, der das Wasser hereinsaugt. Gleichzeitig wird das Wasser durch die hohe Geschwindigkeit des Dampfes beschleunigt, sodaß die Gesamt-Masse des Wassers plus des kondensierten Dampfes durch die Kehle hinausgetrieben wird.

Die Einzelheiten zur Ansaugung und Probleme mit dem Betriebsdruck und warmen Wasser wurden bereits im Abschnitt über die Arbeitsweise beschrieben, darum wird dieser Abschnitt hier andere Aspekte behandeln.

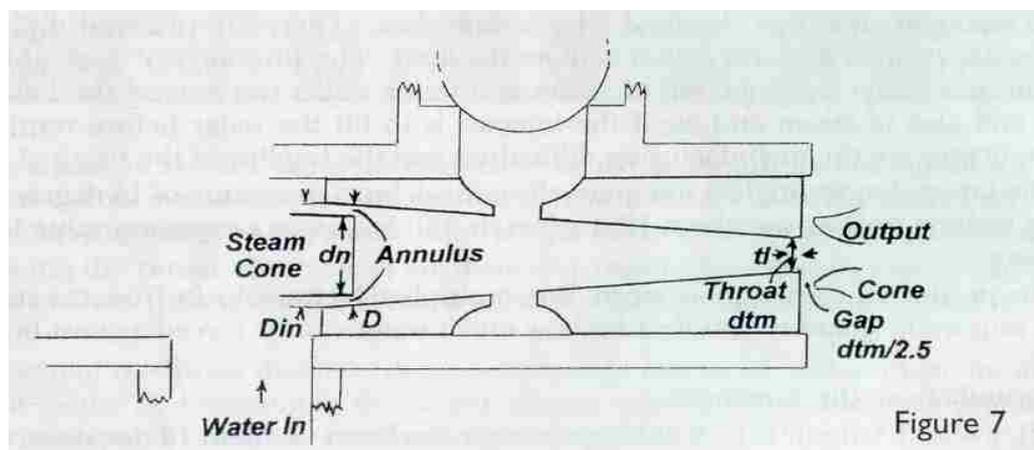


Figure 7

Der zentrale Ausströmsspalt muß so groß sein, daß der aus dem Dampf-Konus kommende expandierte Dampf frei abströmen kann, wenn nicht ausreichend Wasser zu seiner Kondensation vorhanden ist. Aus dem gleichen Grund ist es auch wichtig, daß der Spalt so angeordnet wird, daß der kleinste Durchmesser der Saugseite noch groß genug ist. Dieser Durchmesser wird größer, wenn der Spalt näher zum Eingang gelegt wird, aber er darf nicht zu dicht daran liegen, damit das Ansaugen nicht verschlechtert wird. Als guter Kompromiss wird die Spaltmitte üblicherweise etwa bei 40% bis 45% der Länge vom Eingang aus angeordnet, mit einer Spaltbreite von 0,7 bis 1,27 mal dem Durchmesser der Kehle des Dampf-Konus, wobei die größeren Werte bevorzugt werden, um die Möglichkeit zu reduzieren, daß Dampf in den Wassereingang zurückgeblasen wird, falls der Wasserzufluß unterbrochen wird oder wenn Ansaugen beim Starten nötig ist. Andererseits ist ein schmaler Spalt besser für warmes Wasser.

Beim Zusammenbau eines geteilten Konus muß große Sorgfalt darauf verwendet werden, den korrekten Abstand der beiden Konusstücke einzuhalten. Wenn der Abstand nach dem Zusammenbau zu klein ist, gibt es einen Absatz in der gleichmäßigen Verringerung des Durchmessers, der die Leistung beeinträchtigen kann. Eine mögliche Alternative zu dieser Ausführung ist es, die zwei Konusstücke unten (gegenüber dem Überlaufventil) miteinander verbunden zu lassen. Diese Ausführung setzt aber Feilarbeit voraus und ist daher für eine Serienproduktion nicht sehr gut geeignet.

Die Kehlengröße muß selbstverständlich mindestens so groß sein wie die Kehle des Ausgangs-Konus. Diese wiederum muß so groß sein, daß sie die geplante Fördermenge auch beim kleinsten Betriebsdruck aufnehmen kann. Es ist üblich, die Kehle ein wenig größer auszuführen, da ein geringer Restdampfgehalt auftreten kann, der ein großes Volumen einnimmt. Bei 100°C ist das Volumen von Dampf 1600 mal größer als das von der gleichen Menge Wasser, sodaß nur allergeringste Dampfrete vorhanden sein dürfen. Konstrukteure haben üblicherweise verschiedene Meinungen darüber, welchen Durchmesser die Kehle haben soll, gewöhnlich nimmt man ungefähr 82% der Dampf-Konus-Kehlengröße und durchschnittlich 20% bis 25% mehr als die Kehlengröße des Ausgangs-Konus.

Die Kehlenlänge erzeugt Reibung, wenn sie zu lang ist, aber andererseits ist es sehr schwierig sicherzustellen, daß die Kehle keine Länge aber doch den korrekten Durchmesser hat. Ein kurzer zylindrischer Düsenausgang, dessen Länge nicht größer ist als der Kehlen-Durchmesser, hat keinen Einfluß auf die Leistung und ist einfacher herzustellen, sonst müßte die Kegelreibahle äußerst genau hergestellt werden, um gleichzeitig den exakten Kehlen-Durchmesser und den exakten Eingangs-Durchmesser zu gewährleisten.

Der Abströmspalt zwischen dem Misch-Konus und den Ausgangs-Konus muß mindestens den gleichen Querschnitt haben wie die Kehle des Misch-Konus, um den gesamten Volumenstrom ableiten zu können, da der Querschnitt der Kehle  $\pi \cdot dtm^2/4$  ist und der Querschnitt des Abströmspalts  $\pi \cdot dtm$  mal Spaltbreite, sollte die Spaltbreite mindestens  $dtm/4$  sein.

Zum Beispiel muß für einen Kehlen-Durchmesser von 50 thou der Spalt mindestens 12,5 thou breit sein, aber  $dtm/2,5$  ist ein besserer Wert. Ein kleiner Spalt ist günstig für warmes Zulaufwasser bei hohem Betriebsdruck, aber ein größerer Spalt ist günstiger für den Start des Injektors bei kleinem Betriebsdruck. Dieses ist ein typischer Kompromiß, den man bei der Injektor-Konstruktion eingehen muß.

Der innere Konuswinkel wird üblicherweise zu 9° gewählt. Die eine Vorbildkonstruktion verwendet 5° und eine Modellkonstruktion verwendet 7,5°. Eine für warmes Zulaufwasser angepasste Konstruktion verwendet aufeinanderfolgende Winkel von 12°, 7,5° und 6°; es wurde ein Eingangswinkel von 17° als besser für besonders geringen Betriebsdruck herausgefunden. Aber es gibt keine theoretischen Argumente für die Verwendung eines bestimmten Winkels. Bei der Konstruktion eines Injektors für normale Verwendung ist ein Winkel von 9° so gut wie jeder andere. Welcher Winkel auch verwendet wird, das Werkzeug dafür muß äußerst genau hergestellt werden, damit der bearbeitete Konus auch der Konstruktion entspricht.

Die mit der Kegelreibahle hergestellte Kontur ist besonders wichtig am Konuseingang, da dieser Durchmesser in Verbindung mit Dampf-Konusaussgang den Ringspalt bildet, der den Wasserdurchlauf und folglich den Betriebsbereich des Injektors bestimmt.

## Anmerkungen für Konstrukteure

Es gilt die Regel, daß Injektoren in ihrer Größe skaliert werden können. Wenn von einem gut funktionierendem Injektor alle Maße skaliert werden, bleiben alle Eigenschaften erhalten außer der Fördermenge. Diese verändert sich mit dem Quadrat der Maße.

Eine Verdoppelung der Maße ergibt die vierfache Fördermenge; kleinere Änderungen wie 20%, die üblicher sind, ändern die Fördermenge um  $\pm 44\%$ . Es ist weder die Kugelgröße im Rückschlagventil kritisch, solange sie zum Dichtungssitz passt, noch ist es die Gehäusegröße oder der Gewinde-Durchmesser für die Überwurfmutter.

**RAS**, das Verhältnis der Ringspaltfläche zur Fläche des Dampf-Konus, ist das wichtige Kriterium für die Bestimmung der maximalen Betriebsbedingungen. Die größeren Werte geben den höchsten maximalen Betriebsdruck und die höchsten Zulaufwasser-Temperaturen mit dem Nachteil eines hohen Minimaldrucks für Start und Betrieb.

Der Wert von **RAS** kann für veröffentlichte Konstruktionen errechnet werden und es ist durchaus überraschend, daß Konstrukteure einer Injektorreihe Abmessungen benutzen, die eine breite Streuung für diesen ziemlich kritischen Wert zeigen. Zum Beispiel 1,24 bis 1,76 in einem Fall und 1,6 bis 3,71 in einem anderen, alle für Injektoren an Modell-Lokomotiven mit dem gleichen angenommenen Betriebsdruck aber mit unterschiedlichen Fördermengen.

## Durchschnittswerte veröffentlichter Konstruktionen

Von den verfügbaren veröffentlichten Konstruktionen mit Ausnahme von einer Gruppe mit großen unregelmäßigen Abweichungen, welche die Resultate verfälschen würden, sind die Durchschnittswerte für die wichtigen Parameter ermittelt worden. Diese können beim Experimentieren mit einer neuen Konstruktion nützlich sein. Es werden die Durchschnittswerte und die Wertebereiche angegeben.

Verhältnis Kehlen-Ø des Dampf-Konus zu Kehlen-Ø des Misch-Konus:  $1,22 \pm 4\%$

Verhältnis Kehlen-Ø des Misch-Konus zu Kehlen-Ø des Ausgangs-Konus:  $1,22 \pm 3\%$

Die gleichen Werte!

**RAS** (wie oben definiert)  $1,54 \pm 18\%$

Austrittserweiterung des Dampf-Konus  $1,58 \pm 5\%$ ,

Randbreite der Austrittserweiterung  $0,075$  mal Dampf-Konus-Kehlen-Durchmesser **dt**s

Siehe unten für **dt**s

Die Eindringtiefe des Dampf-Konus in den Misch-Konus ist unkritisch, durchschnittlich  $0,5 * dts  $\pm 80\%$$

Die Spaltbreite des Misch-Konus  $0,75 * dts  $+20\% -15\%$ , Abstand Eingangsseite Misch-Konus bis Spaltmitte  $44\% \pm 2\%$  der Länge des Misch-Konus.$

Der Abstand zwischen Misch-Konus und Ausgangs-Konus ist  $0,55 * \text{Kehlen-Durchmesser } dtm$  des Misch-Konus, der Wertebereich geht von  $0,4$  bis  $0,62$ . Die häufigste Wahl des Winkels für den Ausgangs-Konus ist  $6^\circ$ , aber bis zu  $15^\circ$  wird für diesen Winkel verwendet. Für die Austrittserweiterung des Dampf-Konus und des Misch-Konus ist  $9^\circ$  fast eine universelle Wahl.

## Durchschnittswerte für eine neue Konstruktion

Ein gut funktionierender Injektor kann unter Verwendung der Durchschnittswerte entworfen werden, aber diese Werte geben ja nur Maßverhältnisse und keine tatsächlichen Abmessungen wieder. Um diese zu finden soll ein ungefährender Wert für den Durchmesser **dt**s der Kehle des Dampf-Konus als Grundlage benutzt werden: Es sei **F** = die Fördermenge in Unzen pro Minute Wasser (1 Pint = 20 Unzen, 1 Liter = 35.2 Unzen)

Dann wird der Kehlen-Durchmesser des Dampf-Konus **dt**s (in thou) =  $\sqrt{(63 * F + 350)}$

Beispiele:  $F = 15 * dt$ s = 36,  $F = 25 * dt$ s = 44,  $F = 60 * dt$ s = 64,  $F = 100 * dt$ s = 82

Zum Bohren von **dt**s benutzt man die nächste Standard-Bohrergröße

Diese Abweichung beeinflusst nur die Fördermenge des Injektors.

Der Rest der Maße, basierend auf den oben angegebenen Durchschnittswerten, kann jetzt ausgearbeitet werden.

Benutzen Sie  $0,5 * dt$ s für die Dampf-Konus-Kehlenlänge und  $9^\circ$  für die Düsenenerweiterung bis zum inneren Ausgangs-Durchmesser **dout**, der  $dt$ s \* 1,58 beträgt.

Der äußere Düsen-Durchmesser **Dn** ist  $1,73 * dt$ s. Randstärke von  $0,075 * dt$ s.

Der Kehlen-Durchmesser **dtm** des Misch-Konus wird  $dt$ s / 1,22 und wenn dieses nicht einer Standardbohrergröße innerhalb 0,025 mm oder 2% entspricht, dann bearbeitet man den Konus weiter fertig und stellt dann ein einfaches Ausbohrwerkzeug aus einer alten Nähnadel her, die gehämmert und geschliffen wird und stellt damit den erforderlichen Durchmesser der Kehle her. Da die Durchmesser-Vergrößerung nur ca. 0,05 mm bis 0,07 mm betragen sollte, wird die Länge der Kehle nicht allzu sehr vergrößert.

Die restlichen Abmessungen des Misch-Konus werden, basierend auf **RAS** = 1,54 und  $\tan 9^\circ = 0,157$  wie folgt errechnet:

$(D^2 - Dn^2) / dt$ s<sup>2</sup> = **RAS** = 1,54. Das wird benutzt, um den Durchmesser **D** zu ermitteln, der Durchmesser des Misch-Konus an dem Ende der Eindringtiefe des Dampf-Konus **pen** =  $0,5 * dt$ s.

Max. Eindringtiefe **pen** des Dampf-Konus  $0,5 * dts$

Dann wird **Din**, der Eintrittsdurchmesser des Misch-Konus,  $D + 0,157 * pen$

Da  $Dn = 1,73 * dts$  ist, vereinfacht sich dieser Ausdruck zu  $D = \sqrt{(1,54 + 1,73^2)} * dts = 2,13 * dts$

Die Kehlenlänge **itm** macht man  $dtm / 2$

Die Gesamtlänge des Misch-Konus wird  $Lm = itm + (Din - dtm) / 0,157$

Der Spalt beginnt bei  $0,44 * Lm - 0,75 * dts / 2$  und endet bei  $0,44 * Lm + 0,75 * dts / 2$

Damit sind die Abmessungen des Misch-Konus komplett.

Den Spalt vor dem Ausgangs-Konus macht man  $0,55 * dtm$ .

Der Durchmesser der Kehle **dto** am Ausgangs-Konus wird  $dts / 1,49$  (entspricht  $dtm / 1,22$ ) und kann genauso wie **dtm** behandelt werden. Jedoch ist die Toleranz nicht so eng und diese Kehle kann ein bißchen größer sein, was etwas weniger Tröpfeln bewirkt und ein bißchen mehr Ansaugunterdruck ergibt.

$Dts / 1,34$  ( $dtm / 1,08$ ) ist eine übliche Obergrenze.

Ein kurzer ausgerundeter unkritischer Eingang, Öffnung  $2 * dto$ , Tiefe **dto**, führt bis zur Kehle, die eine bequeme kurze Länge von  $dto / 2$  bis **dto** haben kann. Dann folgt eine Erweiterung mit  $6^\circ$  bis auf  $3 * dto$ , woran sich eine unkritische Ausrundung bis auf den Durchmesser der Ausgangsleitung anschließt.

Nutzt man diese Vorgehensweise, kann man einen durchschnittlichen Injektor konstruieren. Durch die bisherigen Erläuterungen kann man den Einfluß von Änderungen an einer durchschnittlichen Konstruktion abschätzen. Es wäre nicht schwierig, für einen größeren Betriebsdruck oder eine höhere Wassertemperatur zu sorgen, indem statt 1,54 bis zu 1,8 bei der Berechnung von **D** eingesetzt wird, oder für eine Verringerung der Bedingungen durch Einsetzen eines kleineren Wertes.

Benutzt man diesen Entwurf, kann man Betrieb mit kühlem Wasser bis 120 psi, bis 100 psi mit Wasser von  $35^\circ$  und bis zu 80 psi mit Wasser von  $45^\circ$  erwarten. (siehe Anhang Betriebsgrenzen)

## Abweichungen an Kegelleibahlen

Um den Einfluß eines Fehlers im Winkel eines geriebenen Misch-Konus zu zeigen, wurde eine Berechnung für einen Beispiel-Konus durchgeführt, der mit einem Reibahlen-Winkel von  $8,75^\circ$  anstatt  $9^\circ$  bearbeitet wurde, eine Abweichung von nur  $0,25^\circ$ . Der Wasserzufluß wäre 57,5 anstatt 63, eine Verringerung von 9% weil der Ringspalt kleiner wäre als in der Zeichnung, nämlich 14 thou statt 15,15 thou. Der Wert von **RAS** würde nur 90% des geplanten Wertes betragen mit der Folge einer Verringerung der maximalen und minimalen Betriebsbedingungen. Nur durch Verkleinerung der Eindringtiefe des Dampf-Konus um 15 thou könnte dieser Fehler korrigiert werden. Anderenfalls, wenn der Eingang des Misch-Konus auf die korrekte Größe aufgerieben wurde, würde der Kehlen-Durchmesser etwa 2 thou größer, sofern seine Konstruktionslänge = Null war.

## Verbindungen

Das Rückschlagventil ist die Quelle des größten Gegendrucks im Ausgangssystem, wenn es nicht ausreichende Durchflußquerschnitte besitzt. Schlimmer als das ist ein Knick in der Verrohrung. Gut gemachte  $90^\circ$ -Bögen haben einen Widerstand, der einer Länge vom 24-fachen des Rohr-Durchmesser entspricht, z. B. 6 Zoll eines  $\frac{1}{4}$  Zoll Rohres, und ein gutes Rückschlagventil hat ungefähr das Doppelte davon. Bögen mit einem Radius von mindestens dem zweifachen Rohraußen-Durchmesser sind brauchbar, wenn sie gut geformt und nicht flachgedrückt sind.

Vorgeschlagene Größen für das Ausgangs-System sind:

20 oz oder	1 pint oder 0,6 Liter pro Minute braucht	3/16" OD Rohr-Ø und Sitz-Ø Rückschlagventil
40 oz oder	2 pint oder 1,2 Liter pro Minute braucht	7/32" OD Rohr-Ø und Sitz-Ø Rückschlagventil
60 oz oder	3 pint oder 1,7 Liter pro Minute braucht	1/4" OD Rohr-Ø und Sitz-Ø Rückschlagventil
80 oz oder	4 pint oder 2,3 Liter pro Minute braucht	5/16" OD Rohr-Ø und Sitz-Ø Rückschlagventil

Der Kugelhub im Rückschlagventil sollte mindestens ein Viertel des Sitzdurchmessers sein und der Radialabstand um die Kugel sollte mindestens  $1/8$  des Kugeldurchmessers sein.

Das Eingangs-System sollte am besten eine Stufe größer als das Ausgangs-System sein und wenn der Absperrhahn eine Stopfbuchse besitzt, sollte sie auf der Seite zum Vorratsbehälter liegen um den Einfluß eines Luft-Lecks zu verkleinern; die Verbindung zum Vorratsbehälter nochmals eine Stufe größer sofern möglich.

Das Dampfleitungsrohr und der Steuerhahn müssen nicht knapp gehalten werden, aber der Durchgangsquerschnitt könnte eine Stufe kleiner sein als der des Ausgangs-Systems.

## Ausgangs-Konus, Anhang

Die kinetische Energie **KE** des ankommenden Wassers ist gleich der ½ Masse multipliziert mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, wobei die Masse dem Gewicht **W** dividiert durch die Gravitationskonstante **g** entspricht. Da dieser Vorgang kontinuierlich abläuft, ist es bequemer, ihn über die Zeit zu betrachten, z.B. als **W** pro Sekunde und **KE** pro Sekunde.

So wie das Wasser den Konus durchfließt, wird **KE** in Arbeit umgewandelt, sodaß die Gleichung für die kinetische Energie für jede Stelle des Konus lautet:

Eingangs-**KE** pro Sekunde = verbleibende **KE** pro Sekunde + geleistete Arbeit pro Sekunde  
 Geleistete Arbeit pro Sekunde = Kraft \* Weg pro Sekunde = Druck \* Fläche \* Geschwindigkeit =  
 Druck \* Volumen pro Sekunde

Nach Substituieren der geleisteten Arbeit lautet die Gleichung für die kinetische Energie:  
 Eingangs-**KE** pro Sekunde = verbleibende **KE** pro Sekunde + Druck \* Volumen pro Sekunde

In diesen Gleichungen wird angegeben: die Geschwindigkeit in ft pro Sekunde; Druck in psft bzw. 114 \* psi; Volumen pro Sekunde in **W** lb pro Sekunde/Gewicht von 1 ft³ Wasser mit Konustemperatur. Kaltes Wasser wiegt 62,4 lb/ft³ und nahe dem Siedepunkt wiegt Wasser 59,8 lb/ft³. Bei 160°F, einer üblichen Temperatur, wiegt Wasser 61 lb/ft³ und das Volumen pro Sekunde kann als **W** / 61 ft³ oder **W** \* 0,0164 ft³ angegeben werden.

Wenn x eine beliebige Stelle im Konus zwischen der Kehle **t** und dem Ausgang **out** bezeichnet, kann die **KE**-Gleichung geschrieben werden als :

$$Vt^2 = W / 2g = Vx^2 * W / 2 * g + Px * 144 * W * 0,0164$$

Dabei ist **g** = 32,2 und es wird angegeben: **V** in ft pro Sekunde; **W** in lbs; **Px** \* 144 in psft³

$Vt^2 * W / 2 * g$  ist die Eingangs-**KE** und  $Vx^2 * W / 2g$  ist die verbleibende **KE** an der Stelle x.

Division durch **W** und Multiplikation mit  $2g$  führt zu

$$Vt^2 = Vx^2 + Px * 144 * 0,0164 * 2 * g \text{ was sich vereinfacht zu:}$$

$$(op1) \quad Vt^2 = Vx^2 + 152,1 * Px$$

## Vt minimum

Da das an jeder Stelle des Konus durchfließende Wasservolumen konstant ist, und da Volumen = Geschwindigkeit \* durchströmte Fläche ist, wird das Volumen =  $V * \pi * d^2 / 4$ .

Dieser Ausdruck ist in allen Teilen enthalten, ebenso  $\pi/4$  und kann deshalb weggelassen werden. Daher ergibt sich:

$$V * d^2 = Vout * dout^2 = Vt^2 * dt^2 = Vx * dx^2$$

**Dout** ist immer in den Grenzen von  $3 * dt$  bis  $10 * dt$  und da  $Vout = Vt * dt^2 / dout^2$  ist, liegt **Vout** zwischen den Werten  $Vt / 9$  und  $Vt / 100$  mit einem empfohlenen Wert von  $Vt / 16$ . **Vt** erhält man, wenn man den empfohlenen Wert von **Vout** für **Vx** einsetzt und **Pout** für **Px** in (op1).

Daher ist in (op1)  $Vt^2 = Vt^2 / 16^2 + 152,1 * Pout$  und

$$Vt^2 * (1 - 1 / 256) = 152,1 * Pout \text{ woraus folgt}$$

$$(op2) \quad Vt = 12,36 * \sqrt{Pout}$$

Der Ausgangsdruck **Pout** beträgt Kesseldruck plus Druckverlust in der Kesselspeiseleitung plus Öffnungsdruck für das Kesselspeiseventil, wofür 2 psi ein brauchbarer Durchschnittswert ist.

Eine Prüfung der Düsen mit Wasser zeigt, daß in der Praxis die Ausgangsgeschwindigkeit des Misch-Konus diesen Wert um 19% übersteigen muß (vermutlich wegen Reibungsverlusten), diese Abweichung wird für **vn** (erforderliche Geschwindigkeit) bei der Berechnung des kleinsten Betriebsdruckes eingerechnet.

## Kleinster Kehlendurchmesser dt

Für ein gegebenes Wasservolumen pro Sekunde erfordert die kleinste Geschwindigkeit die größte Öffnung. Daher bestimmt die kleinste Geschwindigkeit den Durchmesser der Kehle **dt** und nach **(op2)** ist das für den niedrigsten Ausgangsdruck **Pout** von Interesse.

Es sei **opm** der Durchfluß beim kleinsten **Pout**, dann wird

Das Volumen in ft<sup>3</sup>/sec = **opm** / (16 \* 60) bei 160°F = **opm** / 58560

Die Fläche **A** der Kehle in ft<sup>2</sup> wenn **dt** in thou angegeben wird

$$A = \pi * dt^2 * (4 * 12000^2)$$

Da Volumen = Geschwindigkeit \* Fläche ist, wird Fläche = Volumen / Geschwindigkeit

$$\pi * dt^2 / (4 * 12000^2) = opm / (58560 * 12.36 * \sqrt{Pout})$$

$$dt^2 = 253,3 * opm / \sqrt{Pout}$$

Daraus ergibt sich

$$(op3) \quad dt = 15.92 * \frac{\sqrt{opm}}{\sqrt[4]{Pout}} \text{ in thou}$$

Dieses ist der minimal mögliche Kehlen-Durchmesser **dt** für die geforderte Wassermenge beim kleinsten Ausgangsdruck **Pout**.

## Druckverlauf

Dieser entspricht **Px** an jedem beliebigen Durchmesser **dx**, wobei **dx** der Durchmesser des fließenden Wassers ist. **dx** ist normalerweise genauso groß wie der innere Durchmesser des Eingangs-Konus, aber wenn die Fließgeschwindigkeit größer als erforderlich ist oder wenn die fließende Wassermenge kleiner ist als maximal möglich, so kann **dx** besonders nahe der Kehle kleiner sein als der Konusdurchmesser.

Durch Umstellen von **(op1)** ergibt sich **Px = (Vt<sup>2</sup> - Vx<sup>2</sup>)/152,1**

Aber **Vx \* dx<sup>2</sup> = Vt \* dt<sup>2</sup>**

Was bedeutet, daß **Vx<sup>2</sup> = Vt<sup>2</sup> \* dt<sup>4</sup> / dx<sup>4</sup>**

und **Px = Vt<sup>2</sup> \* (1 - dt<sup>4</sup> / dx<sup>4</sup>) / 152,1**

Wenn das System mit Wasser gefüllt ist, entspricht es der Situation von **(op2)**,

wo **Vt = 12,36 \* sqrt(Pout)** ist. Setzt man diesen Wert von **Vt** in die Gleichung

für **Px** ein, ergibt sich

$$Px = 152,8 * Pout * (1 - dt^4 / dx^4) / 152,1$$

$$(op4) \quad Px = 1,004 * Pout * (1 - dt^4 / dx^4)$$

Für **dx = 4 \* dt** wird **Px = Pout**

Für **dx = dt** wird **Px = 0**

Die anderen Werte sind wie folgt:

<b>dx/dt</b>	=	1	1,05	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	3	4
<b>Px/Pout</b>	=	0%	18%	32%	52%	65%	74%	81%	94%	99,2%	100%

Beachten Sie, daß an der Stelle **dx = dt + 10%** (= **dt \* 1,1**) der Druck **Px = 32%** von **Pout** beträgt

und an der Stelle **dx = dt + 20%** (= **dt \* 1,2**) der Druck **Px = 52%** von **Pout** beträgt.

Zur grafischen Darstellung des Druckverlaufs wird das Verhältnis **Px/Pout** über der Durchmesseränderung des Innenkonus aufgezeichnet.

## Ansaugvorgang

Wenn der Durchmesser **dx** des durch die Kehle fließenden Wassers kleiner ist als der Kehlen-Durchmesser **dt**, wird der Ausdruck  $(1 - dt^4 / dx^4)$  negativ, d.h. **Px** wird negativ. Da flüssiges Wasser keinen negativen Druck haben kann, wird der verbleibende Raum durch angesaugte Luft aufgefüllt, oder wenn der Zutritt von Luft durch ein Ventil verhindert wird, füllt Wasserdampf diesen Raum.

Dieser Vorgang tritt auf, wenn der Wasserdurchfluß kleiner ist als maximal für den Kehlen-Durchmesser möglich und wenn die Wassergeschwindigkeit in der Kehle größer ist als die minimale, also ein normaler Zustand oberhalb des kleinsten Betriebsdrucks.

Die verbleibende Fläche für Luft oder Wasserdampf ergibt sich aus der Differenz der Flächen vom effektiven Durchmesser  $dx$  des Wasserstrahls, berechnet durch eine Kombination aus (op2) und (op3), und der Fläche des Kehlen-Durchmessers  $dt$ . Die Gleichung dafür lautet:

$$\text{Fläche} = (\pi / 4) * (dt^2 - 3133 * (\text{aktuelle } opm / \text{aktuelle Geschwindigkeit}))$$

Beachte:

- 1.) 3133 ergibt sich aus  $15,92^2 * 12,26$
- 2.) Aktuelle  $opm$  und aktuelle Geschwindigkeit müssen wie erforderlich berechnet werden.
- 3.) Der Ansaugunterdruck verändert sich mit der verbleibenden Fläche und der Geschwindigkeit des Wassers. Die Fläche vergrößert sich, wenn sich die aktuelle  $opm$  verkleinert oder sich die aktuelle Geschwindigkeit vergrößert.

- 4.) Die Luft wird angesaugt durch Reibung am Wasserstrahl.

Der Druckverlauf entlang des Konus wird beeinflusst durch das Vorhandensein von Luft oder Wasserdampf, da diese kompressibel sind im Gegensatz zu Wasser, wodurch auch ein schnellerer Druckaufbau erfolgt.

## Dampf-Konus, Anhang

Die Gleichung (5) für die Ausgangs-Geschwindigkeit, (7) für die Treibdampfmenge und (8) für den Kehlen-Durchmesser sind die wichtigen Ergebnisse.

Die Gleichungen und Berechnungen in diesem Anhang sind Büchern über Wärmekraftmaschinen und Thermodynamik entnommen, diese sollten für detailliertere Informationen hinzugezogen werden.

Beachte: Alle Drücke in psia absolutem Druck, dieser ist Manometeranzeige + 14,7 psi.  $P_{in}$  und  $P_{out}$  sind die Ein- und Ausgangsdrücke,  $dt$  ist der Kehlen-Durchmesser und  $dout$  der Innen-Durchmesser des Ausgangs.

Ehe die Austrittsgeschwindigkeit aus der Energieänderung des Dampfes zwischen Ein- und Ausgang berechnet werden kann, muß zuerst  $r$ , das Verhältnis von  $P_{out}$  (Druck am Düsenausgang) zu  $P_{in}$  (Eingangsdruck) bestimmt werden durch Lösen der folgenden Gleichung für  $r$ , das in der Gleichung (3) benutzt wird.

$$(1) \quad (dout / dt) = 0,155 / \sqrt{(r^{1,762} - r^{1,881})}$$

Die Lösung kann gefunden werden, wenn man  $dout/dt$  für Werte von  $r$  zwischen 0,02 und 0,6 grafisch aufzeichnet und dann für  $dout / dt$  im Bereich von 1 bis 2 den entsprechenden Wert für  $r$  abliest. Einen Annäherungswert für  $r$  erhält man aus:

$$(2) \quad r = 1 / (6 * (dout / dt)^2 - 4,44) \text{ (nur korrekt für } dout / dt \text{ von 1,3 bis 1,9).}$$

Der Druck in der Kehle ist  $0,5774 * P_{in}$  weil  $r = 0,5774$  ist, wenn  $dout / dt = 1$  ist in Gleichung (1).

Die nächste Gleichung ist abgeleitet aus der Berechnung der geleisteten Arbeit während der adiabatischen Expansion von 1 lb Dampf. Diese Arbeit wird umgewandelt in kinetische Energie, diese entspricht  $\frac{1}{2} * \text{Masse} * V^2$ , wobei  $V$  die Austrittsgeschwindigkeit ist und die Masse ist 1 lb dividiert durch die Gravitationskonstante  $g$ . Die Rechengänge zur Bestimmung der geleisteten Arbeit sind zu komplex, um sie hier mitzuteilen, daher ist nur das Ergebnis angegeben.

$$(3) \text{ Austrittsgeschwindigkeit} = 279,23 * \sqrt{(P_{in} * V_{in} * (1 - r^{0,1189}))} \text{ ft pro Sekunde}$$

Gleichung (3) enthält  $V_{in}$ , das spezifische Volumen von Dampf bei dem Druck  $P_{in}$ , welches man in Dampftafeln findet. Um den Gebrauch dieser Tafeln zu vermeiden, kann die folgende Näherungslösung verwendet werden:

$$(4) \quad \text{Spezifisches Volumen} = \frac{333,3}{P^{0,938}}$$

Nutzt man diese Näherungslösung für  $V_{in}$  und setzt 15% Reibungsverlust im Expansionsteil des Konus an, indem man mit 0,85 multipliziert, so ergibt sich:

$$(5) \text{ Austrittsgeschwindigkeit} = 4330 * P_{in}^{0,031} * \sqrt{(1 - r^{0,1189})} \text{ ft pro Sekunde}$$

Die Geschwindigkeitsänderung bei Variation von  $dout / dt$  kann durch Verwendung von (2) und (5) leicht berechnet werden. Durch Variation von  $P_{in}$  zwischen 125 psia und 35 psia (entspricht einer Manometeranzeige zwischen 120 psi und 20 psi) findet man die Geschwindigkeitsänderung für diesen Druckbereich.

$(125/35)^{0,031} = 1,04$ ; eine Steigerung von nur 4%.

Um die durchströmende Dampfmenge zu finden, benutzt man die folgende Prozedur:

Volumen  $\text{ft}^3$  pro Sekunde = Geschwindigkeit in der Kehle in  $\text{ft}$  \* Fläche der Kehle in  $\text{ft}^2$

Die Geschwindigkeit  $Vt$  in der Kehle erhält man aus  $r - 0,5774$  in (5) ohne die 15% Zuschlag für Verluste der Expansionsfläche. Daraus erhält man

(6)  $Vt = 1282 * Pin^{0,031}$

Fläche der Kehle =  $\pi * d^2 / (4 * 12000^2)$  in  $\text{ft}^2$  und  $dt$  in thou

Die durchströmende Dampfmenge findet man aus dem Gewicht pro Sekunde, das aus dem Volumen pro Sekunde abgeleitet wird und durch Umwandeln von lbs pro Sekunde in oz pro Minute (\* 16 \* 60).

Gewicht in lbs pro Sekunde = Volumen pro Sekunde / spezifisches Volumen  $\text{ft}^3$  pro lb bei dem Druck in der Kehle,  $0,5774 * Pin$  nach adiabatischer Expansion.

Beachte: Nach adiabatischer Expansion ist der Dampf naß, daraus folgt:

Das spezifische Volumen bei dem Druck in der Kehle =  $541 / Pin^{0,938}$

Aus diesen Änderungen ergibt sich zusammengefasst:

(7) durchströmende Dampfmenge in oz pro Minute =  $1,241 * d^2 * Pin^{0,97} / 100000$

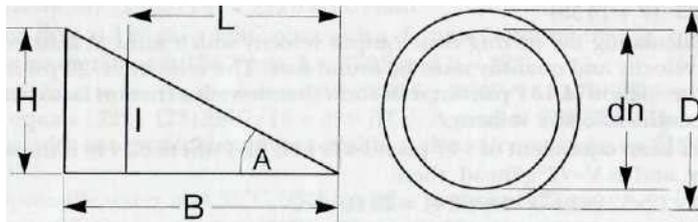
wobei  $Pin$  in psia = Kesseldruck in psi + 14,7 psi, angegeben werden muß.

Durch Umstellen von (7) erhält man die Formel für den Kehlen-Durchmesser

(8)  $dt = (284 * V \text{ oz pro Minute}) / Pin^{0,485}$  ( $Pin$  in psia)

## Ein bißchen Mathematik

1.) In der Zeichnung ist der Tangens des Winkels  $A = \tan A = H / B$



2.) Die Höhe von  $H$  ist  $B * \tan A$  und bei einer dazwischenliegenden Höhe  $I$  mit dem Abstand  $L$  vom Ursprung des Winkels ist  $I = L * \tan A$ .

Umgekehrt bedeutet das  $B = H / \tan A$  und  $L = I / \tan A$ . Diese Zusammenhänge werden bei der Konstruktion der Konen benutzt.

Beachte: Da die Kone Kegelstümpfen entsprechen, wird  $2 * \tan A/2$  benutzt, was geringfügig kleiner als  $\tan A$  ist.

Die Fläche eines Kreises =  $\pi$  (auch geschrieben als  $\pi$ ) \*  $d^2 / 4$ . Wenn  $D$  größer als  $dn$  ist, erhält man die Differenz der Flächen der Kreise mit den Durchmessern  $D$  und  $dn$  aus  $\pi * D^2/4 - \pi * dn^2/4$ . Da  $\pi$  und 4 in beiden vorkommen, wird es als  $\pi * (D^2 - dn^2) / 4$  geschrieben. Die Differenzfläche zweier konzentrischer Kreise ist ein Kreisring, hier jedoch wegen seiner Funktion als Ringspalt bezeichnet, der häufig in diesem Text erwähnt wird und dessen Fläche mit der zuletzt angegebenen Formel ermittelt wird.

Die Fläche der Kehle im Dampf-Konus =  $\pi * dts^2 / 4$  und das Verhältnis des Ringspalts zu dieser Fläche heißt  $RAS = (D^2 - dn^2) / dts^2$ .  $\pi$  und 4 wurden herausgekürzt, da sie im Zähler und Nenner vorkommen.

# Grenzen des Betriebsbereichs, Anhang

## Die untere Grenze

Diese wird erreicht, wenn der Dampfimpuls und Wasserimpuls zu gering sind, um am Misch-Konusausgang mindestens die erforderliche Geschwindigkeit  $V_n$  zu erreichen, die auf der Summe des effektiven Ausgangsdrucks  $P_{out}$  in der Gleichung für  $V_t$  des Ausgangs-Konus plus des bremsenden Unterdrucks im Misch-Konus basiert.

$V_t$  ergibt sich gemäß der Gleichung im Anhang für den Ausgangs-Konus als  $12,36 * P_{out}$ , wobei  $P_{out}$  gleich Kesseldruck  $P$  plus 2 psi ist. Es wurde schon festgestellt, dass in der Praxis der Wert von  $V_t$  um 19% erhöht werden muß, um Reibungsverluste auszugleichen. Das geschieht bequem durch Multiplikation von  $P_{out}$  mit 1,19<sup>2</sup> oder 1,416, wodurch man den effektiven Druck  $P_{out}$  erhält =  $1,416 * P + 283$ .

Der bremsende Unterdruck im Misch-Konus erreicht typisch einen Höchstwert von 14,7 psi bei 20 psi Betriebsdruck, was ein nahezu perfektes Vakuum bedeutet. Bei höheren Betriebsdrücken geht dieses jedoch zurück um etwa 0,3% pro psi über 20 psi. Das bedeutet, dass sich die Eingangsgeschwindigkeit des Wassers im gleichen Maße ändert und man erhält die Geschwindigkeit beim Druck  $P$  aus einer Formel, die die Reduktion von 0,3% berücksichtigt:  $VP = V_{20} * (1 - 0,003 * (P - 20))$ .

Das kann vereinfacht werden zu:  $VP = V_{20} * (1,06 - 0,003 * P)$

Der Ansaug-Unterdruck verändert sich mit  $V^2$ , deshalb:

Ansaug-Unterdruck bei  $P$  / Ansaugunterdruck bei 20 psi =  $VP^2 / V_{20}^2 = (1,06 - 0,003 * P)^2$

Daher ist der Ansaug-Unterdruck bei  $P = 14,7 * (1,06 - 0,003 * P)^2$ .

Für die gebräuchlichen Werte von  $P$  an der unteren Grenze des Betriebsdrucks vereinfacht sich das zu: Ansaug-Unterdruck bei  $P = 16,5 - 0,09 * P$

Das wird zum effektiven  $P_{out}$  addiert und ergibt den Gesamtdruck, der zur Berechnung von  $V_n$  benutzt wird.

Der Druck zur Berechnung von  $V_n = 1,416 * P + 2,83 + 16,5 - 0,09 * P = 1,326 * P + 19,33$

Deshalb wird  $V_n = 12,36 * \sqrt{(1,326 * P + 19,33)}$  was sich vereinfachen lässt zu

$$V_n = 14,23 * \sqrt{(P + 14,58)}$$

Ehe die Ausgangsgeschwindigkeit des Misch-Konus berechnet werden kann, die mindestens gleich  $V_n$  sein muß, ist erst die Eingangs-Wassermenge und -Geschwindigkeit zu ermitteln. Die Geschwindigkeit bei 20 psi wird so groß angenommen, wie es dem Ansaug-Unterdruck von 14,7 psi entspricht, aber wie Versuche gezeigt haben, muß ein Faktor von 0,6 für Reibung angewendet werden, wodurch sich die tatsächliche Geschwindigkeit verringert.

Die äquivalente Wassersäule(-höhe) zu 14,7 psi ist  $14,7 * 144 / 62,4$  wobei 62,4 lb das Gewicht von 1 ft<sup>3</sup> kalten Wassers ist, und da  $V = \sqrt{(2 * g * h)}$  ist, ergibt sich:

$$V_{20} = 0,6 * \sqrt{(21 * 32,2 * 14,7 * 144 / 62,4)} = 28 \text{ ft / Sekunde.}$$

$$VP = V_{20} * (1,06 - 0,003 * P) = 28 * (1,06 - 0,003 * P) = 29,7 - 0,084 * P \text{ ft / Sekunde.}$$

Die Wassermenge ist  $VP * \text{Ringspaltfläche } AA$  (Annulus Area), alles in der Einheit ft.

Wandelt man in oz pro Minute um und die Ringspaltfläche in thou<sup>2</sup>, so wird

$$\text{Wasserzufluß} = 0,000417 * (29,7 - 0,084 * P) * AA \text{ oz pro Minute Wasser}$$

Impuls des Wassers  $WM = 80\%$  von Wasserzufluß \*  $VP$

Impuls des Dampfes  $SM = 80\%$  von (Dampfmenge in oz pro Minute) \* (Dampf-Geschwindigkeit), was man aus der Formel für den Dampf-Konus erhält, wenn man den Druck  $P$  in psi zu Absolutdruck in psia umwandelt.

Man kann diese Formeln an einem Beispiel zur Berechnung eines „durchschnittlichen“ Injektors ausprobieren, der Druck betrage 40 psi und für  $dts$  nimmt man 50 thou an. Dann wird:

$$AA = 1,54 * dts\text{-Fläche} = 1,54 * \pi * 50^2 / 4 = 3024$$

$$\text{Wasserzufluß} = 33,2 \text{ oz pro Minute und } VP = 26,34$$

$$\text{Impuls des Wassers } WM = 80\% \text{ von } 33,2 * 26,34 = 700$$

Mit  $dts = 50$  thou und  $P = 40$  psi wird die Dampfmenge 1,505 oz pro Minute und die Dampfgeschwindigkeit = 2422 ft / Sekunde.

Diese Werte erhält man aus den Formeln für den Dampf-Konus, wenn man eine Expansion von 1,6 einsetzt.

$$\text{Impuls des Dampfes } SM = 80\% \text{ von } 1,505 * 2422 = 2916$$

$$\text{Gesamtimpuls } TM = 2916 + 700 = 3616$$

Dividiert man **TM** durch Wasser- plus Dampfmenge (in oz pro Minute), so erhält man die Einström-Geschwindigkeit in den Ausgangs-Konus

Geschwindigkeit aus dem Impuls =  $3616 / 33,2 + 1,505 = 104 \text{ ft/s}$

$$Vn = 14,23 * \sqrt{(40 + 14,58)} = 105 \text{ ft/s}$$

Die erforderliche Geschwindigkeit **Vn** ist gerade eben größer als die durch den Impuls bei 40 psi erreichbare. Das zeigt, dass die untere Grenze des Betriebsdruckes ein bißchen größer als 40 psi ist, vielleicht 42 psi. Für 40 psi müsste die **RAS**-Zahl auf 1,52 reduziert werden, aber das würde auch die obere Grenze des Betriebsdruckes verkleinern. Diese Berechnungen sind ein wenig mühsam und basieren auf einer Mischung von Theorie aus Lehrbüchern und experimentell ermittelten Werten. Der tatsächliche Wert kann nur durch Versuch gefunden werden.

## Temperaturgrenzen bei hohem Betriebsdruck

Diese werden geprüft, indem die Wärmemenge bestimmt wird, die das Wasser aufnehmen kann, wenn seine Temperatur durch kondensierten Dampf bis auf 205°F angehoben wird, verglichen mit der Wärmemenge, die der Dampf abgeben muß. 205°F wurde gewählt, weil es nahe, aber nicht zu nahe am Siedepunkt liegt. Den Wärmehalt des Dampfes findet man in Dampftafeln und die fließende Dampfmenge wird wie vorher mit den Formeln für den Dampf-Konus berechnet.

Die Berechnungen werden ebenso den „durchschnittlichen“ Entwurf eines Injektors als Beispiel verwenden, beginnend bei 120 psi mit Wasserzufluß von 70°F. Beachte, dass psi die Manometeranzeige bedeutet und psia den Absolutdruck, der Manometeranzeige + 14,7 psi ist.

Da 32°F die Bezugstemperatur für die Flüssigkeitswärme **h** in den Dampftafeln ist, wird für die Berechnungen der Flüssigkeitswärme 173°F statt 205°F benutzt. Da die Formeln zu Wärmeberechnungen immer auf Gewicht in lb basieren, werden die verschiedenen Angaben in opm durch 16 dividiert (1 lb = 16 oz).

Der Wasserdurchfluß bei 40 psi betrug 33,2 opm. Bei 120 psi wäre er  $0,76 * 33,2 = 25,23 \text{ opm}$ .  
( 0,3% Verringerung pro psi oberhalb 20 psi).

Die Wassertemperatur darf sich von 70°F auf 205°F erhöhen. Dann beträgt die Wärmeaufnahme  $(205 - 70) * (25,23 / 16) = 212,8 \text{ BTU / Minute}$ .

Der Dampfdurchfluß ist bei 120 psi = 3,607 opm bei einem Nässegrad von 0,9.

Aus den Dampftafeln erhält man bei 134,7 psia  $L = 870,5$  und  $h = 322$

An das Wasser abzugebende latente Wärme =  $0,9 * 870,5 * 3,607 / 16 = 176,6 \text{ BTU}$  und die Flüssigkeitswärme, die abgegeben werden kann, beträgt  $(322 - 173) * 3,607 / 16 = 33,6 \text{ BTU}$ . Das ist in Summe 210 BTU. Deshalb sollte ein Betrieb bei 120 psi mit kaltem Wasser möglich sein, da das Wasser 212,8 BTU aufnehmen kann. Eine Differenz von 28 BTU !

Jetzt nehmen wir an: Wasser 35°C, 95°F und der Druck ist 100 psi

Wasserdurchfluß =  $27,22 \text{ opm} (1 - 0,0025 (95 - 70)) = 25,52 \text{ opm}$

$(1 - 0,0025 (T - 70))$  ist die Korrektur für den Durchfluß bei einer Wassertemperatur über 70°F.

Dampfmenge bei 100 psi = 3,087 opm, Nässegrad wie oben = 0,9

Das Wasser kann  $(205 - 95) * (25,52 / 16) = 175,45 \text{ BTU / Minute}$  aufnehmen.

Bei 1147 psia,  $L = 880,5$  und  $h = 309$

Wärmemenge, die an das Wasser abgegeben werden kann  $0,9 * 880,5 * 3,087 / 16 = 153 \text{ BTU}$  latente Wärme plus  $(309 - 173) * 3,087 / 16$  Flüssigkeitswärme. In Summe 179 BTU.

Deshalb sollte ein Betrieb mit Dampf von 100 psi und Wasser mit 35°C, 95°F möglich sein, da das Defizit nur  $179 - 175,45 = 3,55 \text{ BTU}$  beträgt. Die Verhältnisse kommen ins Gleichgewicht, wenn die Temperatur des Wassers auf 33,9°C gesenkt wird.

Ähnliche Berechnungen zeigen mit Wasser von 45°C, 113°F bei 80 psi Dampfdruck, daß noch ein positiver Überschuß von  $150 - 148 = 2 \text{ BTU}$  besteht.

Diese Beispiele zeigen, wie die Grenzen bei hohem Druck berechnet werden.

Beachte: Die Betriebszustände, die für eine „durchschnittliche“ Konstruktion angegeben wurden, waren ungefähr richtig.

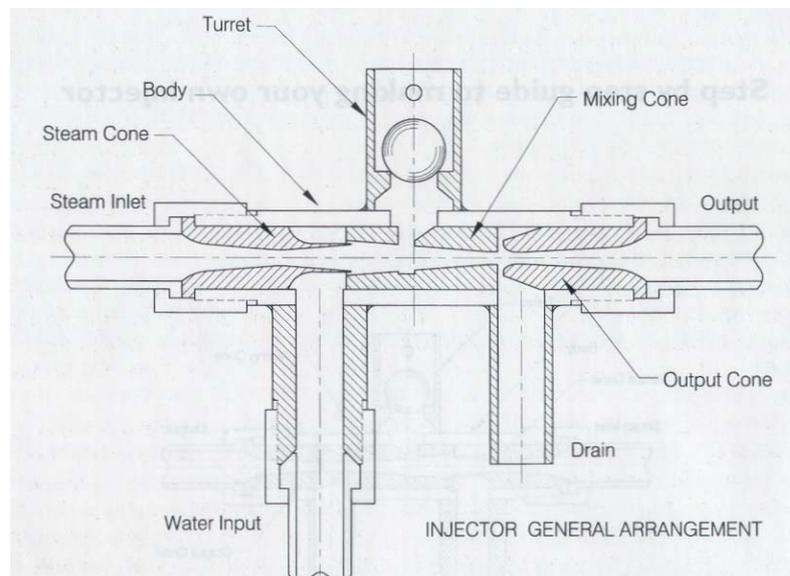
Wenn man RAS größer macht als 1,54 wie für den „durchschnittlichen“ Entwurf benutzt, würden die angegebenen Druckgrenzen von z. B. 40, 120, 100 und 80 psi höher werden, da die zufließende Wassermenge größer wäre.

# Notizen

# Teil 2

## Herstellung von Injektoren

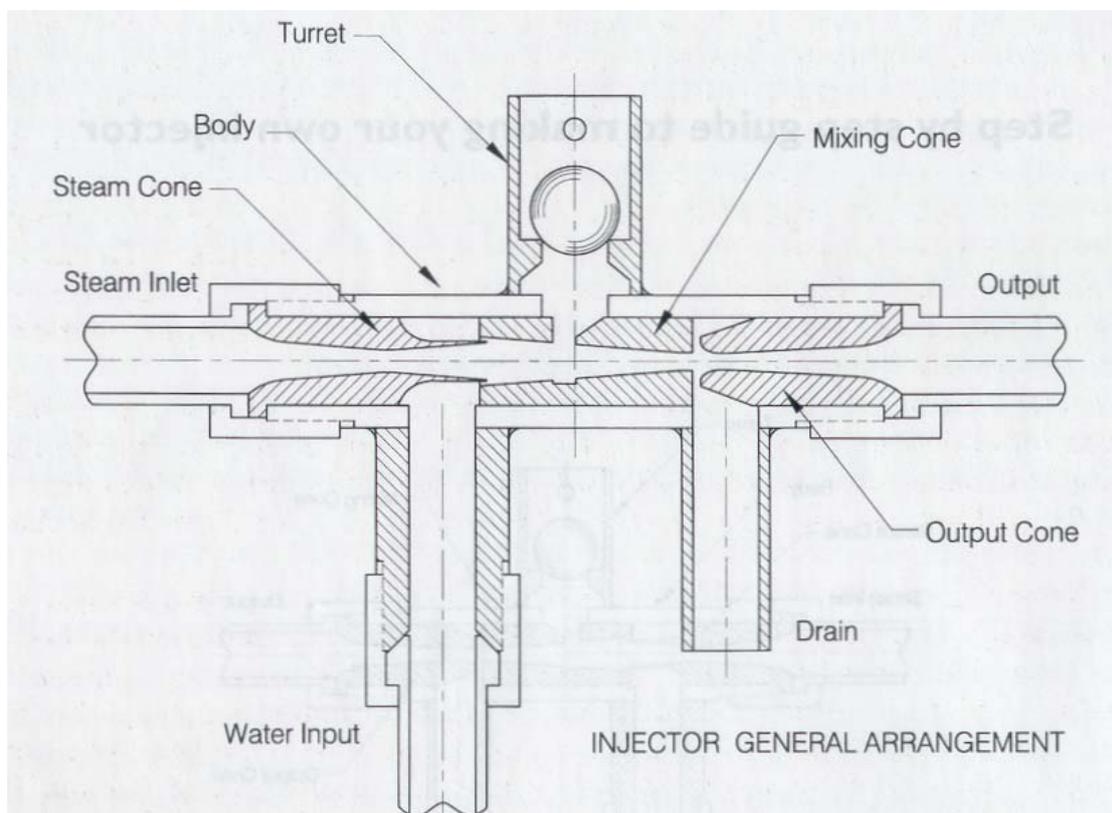
Schritt für Schritt zum selbstgebauten Injektor



# Die Herstellung von Injektoren

## Einführung

Der Zweck dieses Abschnitts ist es, zu erklären, wie Teile des Injektors, speziell die Konen, unter Verwendung einfach selbst anzufertigender Werkzeuge hergestellt werden, sowie alle Punkte, um einen funktionsfähigen Injektor daraus zu bauen. Das Reiben der Innenform der Konen scheint das Haupthindernis zu sein, aber Kegelreibahlen, deren Herstellung aus abgebrochenen Sägeblättern hier beschrieben wird, machen den Arbeitsgang einfach. Das Injektorgehäuse sollte immer hergestellt werden, bevor mit den Konen begonnen wird, daher wird das der erste Punkt nach dieser Einführung sein. Es ist verhältnismäßig einfach, ein solches Gehäuse herzustellen, eine fluchtende Bohrung vorausgesetzt; der Wassereingang, das Überlauf-Türmchen und das Rohr des Ausgangs-Überlaufs sind genau an der richtigen Stelle und die Silberlötstellen sind fachgerecht ausgeführt, sodaß das Gehäuse nett und ordentlich aussieht und keine winzigen Löcher hat, durch die Luft einströmen kann. Aber die Konen erfordern einen Reibvorgang mit speziell geformten Kegelreibahlen, und wenn diese nicht genau mit dem erforderlichen Winkel hergestellt wurden, können verschiedene Abmessungen der Kehlen außerhalb der normalen Toleranz von  $\pm 0,5$  thou bei kleinen Bohrungen liegen oder noch schlimmer außerhalb von  $\pm 2$  thou.



Die Herstellung einer exakten Kopie einer Konstruktion setzt natürlich voraus, daß die Konstruktion vorher optimiert wurde. Das ist nicht immer der Fall und es ist sehr wahrscheinlich, daß die Änderung einer oder mehrerer Abmessungen nützlich ist, wenn die Anwendung von der originalen abweicht. Doch wer weiß ohne Versuche, in welche Richtung er ändern soll? Beim ersten Mal ist es daher sinnvoll, mit einer Konstruktion zu beginnen, von der bekannt ist, daß sie funktioniert. Es wird später erklärt, daß einige Abmessungen etwas „elastisch“ sind, ohne die Eigenschaften zu beeinflussen, was bei der Herstellung hilfreich sein kann. Es wird auch erklärt, wie Reibahlen mit Winkelfehlern innerhalb praktikabler Grenzen noch benutzt werden können, um damit zufriedenstellende Konen herzustellen.

Der mögliche Betriebsbereich eines Injektors ist bestimmt durch die Dampfdüse und den ringförmigen Wasserspalt („Annulus“) zwischen dem Düsenausgang und dem Misch-Konus am Ende der Eindringtiefe der Dampfdüse. Ist die restliche Konstruktion gut, kann das Meiste aus dem möglichen Funktionsbereich erreicht werden. Schlechtere Konstruktionen werden einen eingeschränkten Funktionsbereich haben und das gilt auch für die Art, wie der Injektor hergestellt wurde, beste Ergebnisse ergeben sich aus bester Arbeitsausführung.

Der Textabschnitt endet mit Einzelheiten über Zusammenbau und Test eines Injektors, der 60 oz/Minute fördert. Diese Konstruktion benutzt die Konen mit den Beispielabmessungen aus der Beschreibung.

## **Bemerkungen zur Herstellung des Gehäuses**

Die Gehäuseabmessungen, die zu den Beispielkonen passen, werden kurz vor dem Ende des Abschnitts angegeben.

Wird ein Gehäuse aus Teilen zusammengesetzt, was fast immer der Fall ist, außer man verwendet ein Gussteil, so ist es vorteilhaft, vierkantiges Material für das Gehäuse zu nehmen, wenn es verfügbar ist, anderenfalls müssen am Wasserzulauf und dem Überlauf-Türmchen gebogene Formen ausgeschnitten werden, damit sie auf das runde Gehäuse passen. Diese gebogenen Ausschnitte müssen in einer Toleranz von etwa 0,1mm liegen, besonders an den Ecken, damit das Silberlot den Spalt gut füllen kann, damit Leckstellen vermieden werden und alles muß winklig zum Gehäuse ausgerichtet sein, damit es ordentlich aussieht. Das Rohr für den Ausgangs-Überlauf muß ebenso behandelt werden, wobei hier Leckstellen beim Löten nicht wichtig sind. Dieses kleine Rohr kann zur Unterstützung in das Gehäuse eingelassen werden, selbst bei runden Gehäusen gibt es normalerweise dafür eine Möglichkeit.

Nach dem Plandreihen der Dampfseite sind zuerst die Mittelpunkte von Wasserzulauf, Türmchen und Ausgangs-Überlauf festzulegen. Kennzeichne die Position des Türmchens und drehe das Futter um 180°, markiere dann die Positionen von Wasserzulauf und Ausgangs-Überlauf.

Die Position des Ausgangs-Überlaufs ist möglicherweise von der Ausgangsseite vermaßt, aber das kann leicht in eine Entfernung von der Dampf-Seite umgerechnet werden. Beachte, daß üblicherweise der Wasserzulauf so angeordnet wird, dass der Rand der Bohrung in einer Linie mit dem Anfang des Misch-Konus liegt. Die Kante der Bohrung für den Ausgangs-Überlauf liegt ähnlich gerade neben dem Ende des Misch-Konus. Die Bohrung für das Türmchen liegt über dem Spalt im Misch-Konus, häufig wird sie soweit verschoben, dass die Mitte über dem Spaltende liegt. Ein kleiner Überstand des Misch-Konus am Ausgangs-Überlauf ist nicht wichtig, aber beim Wasser-Zulauf sollte jeder Überstand vermieden werden.

Als nächstes das Gewinde passend zur Überwurfmutter für den Dampf-Konus schneiden und mögliche Grate, die an der Planseite überstehen, durch eine kleine Fase entfernen. Es werden mindestens 4 voll ausgeschnittene Gewindgänge benötigt, aber die Gewindelänge ist begrenzt, um nicht mit der Verschraubung für den Wasser-Zufluss in Konflikt zu kommen. Üblicherweise wird 26 tpi Messing-Gewinde benutzt, aber 1/8" BSP (hat 27 tpi) paßt auf Material mit 3/8" Ø und 6 bis 7 Gewindgänge bei diesen Steigungen benötigen etwa 1/4" Länge.

Danach sollte die Bohrung von der Dampfseite aus hergestellt werden. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, abhängig von den zur Verfügung stehenden Werkzeugen. Ist keine passende Reibahle vorhanden, dann ist das beste Fertigbearbeitungswerkzeug ein neuer Bohrer, nachdem zuerst bis auf Tiefe (mit ein klein wenig Zugabe) vorgebohrt wurde mit einem guten Bohrer, der etwa 0,2 bis 0,25 mm Untermaß hat. Der technische Berater eines Bohrerherstellers hat empfohlen, die scharfen Kanten der Fasen ab ca. 1/4" hinter der Bohrerspitze abzustumpfen, um damit zu vermeiden, dass die Bohrung auf der Seite, wo sie begonnen wurde, sich erweitert, was bei dieser großen Bohrtiefe vorkommen kann. Wenn für das Fertigbohren weder ein neuer noch als Nächstbestes ein korrekt nachgeschliffener und noch nicht fehlerhaft benutzter Bohrer zur Verfügung steht, dann ist allergrößte Sorgfalt nötig! Die wichtigste Bedingung ist, daß die Bohrung gerade verläuft. Eine kleine Abweichung im Durchmesser kann durch Anpassung der Konendurchmesser bei deren Herstellung korrigiert werden. Üblicherweise wird die Bohrung auf der Seite, wo sie begonnen wurde, einen geringfügig größeren Durchmesser haben als der restliche Teil. Diese Seite sollte das Dampf-Ende sein und die Bohrungsvergrößerung von etwa 0,02 mm bis 0,03 mm kann hilfreich sein bei der Montage des Misch-Konus.

Bevor das Teil abgetrennt wird, sollten die Kanten der Bohrung mit einem Schaber gebrochen werden. Eine Breite von 0,25 mm bis 0,40 mm ermöglicht ein planes Anliegen des Absatzes des Dampf-Konus, für den Fall, dass der Absatz an der Innenseite nicht ganz scharfkantig ausgeführt wurde.

Danach den Körper vom Rohmaterial abtrennen und an diesem Ende auf die korrekte Länge planen. Dann das Gewinde für die Überwurfmutter des Wasser-Ausgangs schneiden, alle Grate an der geplanten Stirnseite entfernen und mit einem Schaber die Bohrungskante brechen, wie oben beschrieben.

Damit eine gute Abdichtung zwischen den Flanschen der Konen und dem Gehäuse erreicht wird, sollten dessen Stirnseiten sauber geplamt und rechtwinklig sein. Eine geringfügige Längenabweichung, die vom Vorgang des Plandrehens herrührt, kann in dem Maß „Länge des Ausgangs-Konus innerhalb des Injektorkörpers“ aufgefangen werden.

Es gibt nun drei Markierungskreuze für die drei Bohrungen, diese müssen angekört und dann bis in die zentrale Bohrung durchgebohrt werden. Jeglicher Grat, der bei diesem Durchbohren entstanden ist, muß sorgfältig entfernt werden. Im Allgemeinen macht man das, indem man das Fertigbearbeitungswerkzeug (Bohrer oder Reibahle) in ein Bohrfutter spannt, das man in der Hand hält und dreht, wobei man auch das Gehäuse wegen des besseren Gefühls in der Hand halten sollte.

Damit sollte das Gehäuse nun soweit fertig sein, daß die anderen Teile daran hartgelötet werden können.

Die Arbeitsreihenfolge kann von der beschriebenen abweichen. Z. B. kann man das Türmchen und den Wasserzulauf zuerst herstellen. Doch bevor das Gehäuse zentral durchbohrt wird, sollten diese beiden Teile bereits hart am Gehäuse angelötet sein, nicht jedoch der Überlauf, da diese Gehäusesseite noch benötigt wird, um sie nach dem Hartlöten für den Bohrvorgang in das Drehbankfutter spannen zu können. Diese Arbeitsreihenfolge vermeidet eine mögliche Verformung des Gehäuses beim Hartlöten, wodurch auch die Bohrung nicht mehr fluchten würde. Meistens passiert das durch Überhitzung und das Ergebnis kann eine bananenförmig gebogene Bohrung sein. Man sollte darauf achten, daß zuerst alle Bohrungen für die aufzulötenden Teile in voller Größe gebohrt werden, damit die entsprechenden Teile positioniert werden können, da nachträgliches Bohren die zentrale Bohrung verformen kann. Deshalb sollte ein anders System zum Positionieren der Teile verwendet werden, wie z. B. durch ganz kleine Pilotbohrungen.

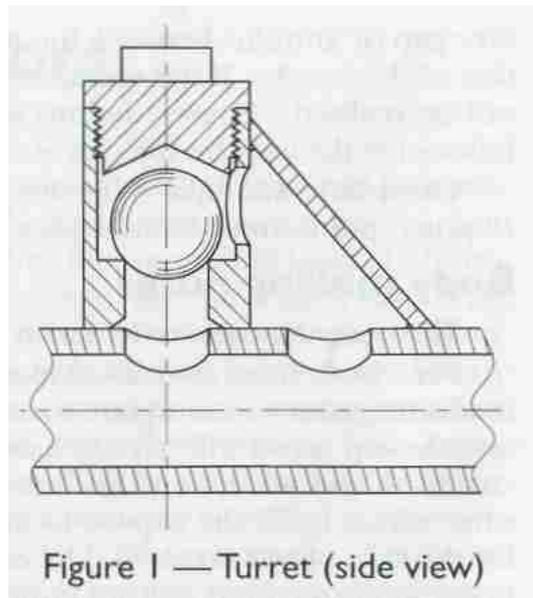
Üblicherweise, wenn die Teile vorher nicht mit Hartlot überzogen werden, sollten die Bohrungen mit einer Führung benutzt werden, um die Teile zu positionieren. An dieser Stelle wäre es praktisch, ein Stück Material zu haben, das in die Bohrungen paßt und das nicht von Lot benetzt wird. Eine praktikablere Methode ist es, Klammern mit einer Durchgangsbohrung zu verwenden, durch die der Schaft eines passenden Bohrers gesteckt werden kann, um die Teile zu zentrieren und den Bohrer vor dem Löten wieder zu entfernen. Sei besonders vorsichtig um nicht den Kugelsitz im Türmchen zu beschädigen! Unter diesem Aspekt ist auch zu empfehlen, die Bohrung unterhalb des Kugelsitzes im Türmchen zu erweitern, dadurch wird die Positionierung weniger kritisch und eine etwas losere Führung kann benutzt werden. Siehe auch die Bemerkungen zum Türmchen.

Die beste Klemm-Anordnung ist eine universelle Vorrichtung, die sich an verschiedene Positionen anpassen läßt und die alle Teile gleichzeitig an der richtigen Stelle sichert. Wie bei jedem Schweißen und Löten ist das Sichern aller Teile an ihrem Platz der anstrengendste Teil der Arbeit, wobei auch die einfachste Klammer es wert ist, benutzt zu werden. Das können zwei Streifen ausreichend steifen Materials sein, etwa 70 mm bis 100 mm lang und mit Löchern an beiden Enden, sodaß man sie mit zwei Stücken Gewindestange und Muttern zusammenspannen kann. Eine derartige Klammer mit einem Durchgangsloch in der Mitte für die vorübergehende Verwendung eines Positionierstiftes kann jedes der drei Teile zum Löten an seinem Platz halten.

Die Herstellung des Überlauf-Rohrs und des Wasserzulaufs ist einfach, abgesehen von der Herstellung gebogener Kanten zur Anpassung an das Gehäuse. Mit der passende Größe eines Radius- oder Schlitzfräasers ist der Herstellung einfach, sonst muß man es sorgfältig mit einer Rundfeile machen. Ein Test für die eigene Geduld ist es, gleichzeitig die gebogene Form und eine gute Passung an das Gehäuse zu erzielen! Die Höhe oder Länge dieser Teile ist nicht kritisch, das macht ihre Herstellung einfach. Die Lötungen müssen absolut leakagefrei sein, besonders am Wasserzulauf und am Türmchen ist das äußerst wichtig. Am Ausgangs-Überlauf ist es allerdings nicht erforderlich.

## Das Türmchen

(siehe Bilder 1 und 2) Das wichtige Merkmal des Türmchens ist die Bohrung für das Kugelventil, die als erstes gebohrt werden sollte, gefolgt von der Bohrung für den Freigang der Kugel. Ist ein entsprechendes



Werkzeug verfügbar, sollte die Sitzfläche für die Kugel geplant werden. Der Sitz der Kugel sollte nach den Regeln für ein Sicherheitsventil geprüft werden, sonst werden die Eigenschaften bei mittleren und kleinen Drücken verdorben. Wenn die Sitzfläche nicht rechtwinklig zur Bohrungsachse ist, dann ist die Bohrung in einem gewissen Maß oval, selbst wenn die Bohrung gerieben wurde. Übliche Methoden zur Fertigstellung des Kugelsitzes sind, entweder die Kugel mit einem leichten Hammerschlag auf ihren Sitz zu schlagen oder durch Einschleifen des Sitzes, indem man die Kugel mit einem Rohr festhält und den Sitz rotieren lässt. Dafür sollte man aber weder eine Bronze-Kugel noch eine rostfreie Kugel verwenden sondern einfach eine normale Stahlkugel aus einem Kugellager. Beide Methoden bewirken eine Verbesserung des Kugelsitzes, die nahezu perfekt ist. Auf alle Fälle sollten Kugel und Sitz auf Leckage geprüft werden, bevor sie am Gehäuse angebaut werden.

Um auf ausreichende Dichtigkeit zu prüfen, schließt man einen flexiblen Druckluftschlauch an und testet unter Wasser, ob die Kugel keine Luft vorbeiströmen lässt (das muß gemacht werden, bevor irgendwelche seitlichen Abflußlöcher gebohrt werden). Eine Kette von Luftblasen zeigt uns an, daß der Sitz noch nicht dicht ist. Innerhalb des Injektors ist an der Bohrung besser eine schmale Schräge statt einer scharfen Kante, weil das einer kleinen Menge zurückbleibenden Wassers hilft, den Sitz abzudichten. Beide beschriebenen Behandlungsmethoden formen eine schmale Schräge an den Kugelsitz.

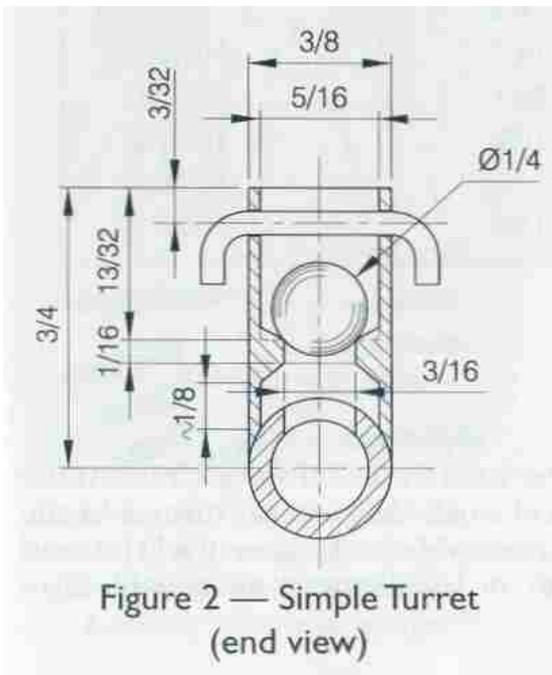
Wenn ein Schafffräser oder ein anderes Werkzeug zur Planbearbeitung des Sitzes nicht zur Verfügung steht, ist es sinnvoll, zu untersuchen, ob die kegelförmige Bohrung, die ein üblicher 120°-Spiralbohrer hinterlässt, als Sitz geeignet ist. Die Bohrung, in der sich später die Kugel bewegen kann, sollte nur mit ganz geringem Vorschubdruck fertiggestellt werden, damit der kegelige 120°-Sitz an der Oberfläche so glatt wie möglich wird. Nach dem Entgraten prüfe die Dichtigkeit, bevor Du weitermachst.

Fertige Gehäuse mit unzureichender Dichtigkeit konnten dadurch gerettet werden, daß der Sitz vorsichtig mit Weichlot verzinnt wurde, weil das Zinn sich der Kugel unter etwas Druck anpasst. Aber das kann erst durchgeführt werden, nachdem Türmchen und Injektor-Körper hart zusammengelötet wurden.

Es gibt für den Konstrukteur eine lästige Aufgabe, wenn der Überlauf aus dem Türmchen mit durch den Abfluß des Misch-Konus geleitet werden soll (eine gefällige Anordnung, die aber nicht unbedingt erforderlich ist; das seitliche Abfluß-Loch oder -Löcher muß ausreichend groß sein, um den Dampf durchlassen zu können, aber nicht so groß oder in einer Lage, daß die Kugel hineinrutschen oder sie verschließen kann. Üblicherweise wird die Verschlusschraube innen entsprechend geformt, z. B. durch eine 90°-Ansenkung, welche die Kugel in der Mitte hält und gleichzeitig den Kugelhub begrenzt, der typisch bei 1/4 bis 1/3 des Kugelsitz-Durchmessers ist. Die Verschlusschraube braucht nicht luftdicht zu sein. Eine derartige Konstruktion des Türmchens ist in Bild 1 gezeigt.

Die aufgeführten Probleme lassen sich vermeiden, wenn der Überlauf direkt oben aus dem Türmchen erfolgt und die Kugel durch einen Querdraht gehalten wird. Diese Lösung wird bei dem Beispiel-Zusammenbau benutzt und ist das einfache Türmchen, das in Bild 2 gezeigt wird, wo ein flach gefräster Kugelsitz durch gestrichelte Linien gezeigt wird. Das Tröpfeln, das man oft am Überlauf von Injektoren beobachten kann, stammt nicht aus dem Überlauf des Türmchens, sondern aus dem Spalt zwischen Misch- und Ausgangs-Konus. Wasser-Überlauf aus dem Türmchen passiert nicht während des Betriebes, sondern wenn das System startet oder versagt wegen Wasserüberschuß.

Verschieden Arten von Abdeckungen werden benutzt, um den Überlauf aus dem Türmchen mit seitlicher Bohrung durch die gegenüberliegende Bohrung auf der Oberseite des Injektor-Gehäuses in das Überlaufrohr zu leiten. Die Abdeckung kann, wenn man es möchte, auf ihrem Platz weichgelötet werden. Das Weichlöten kann



auch für alle anderen Teile benutzt werden, aber das ist nicht empfehlenswert, da diese Teile Beanspruchungen unterliegen, z. B. beim Anziehen der Überwurfmutter und bei Reparaturen würden alle Lötstellen gleichzeitig schmelzen.

## Der Tangens

Der Tangens ist das Verhältnis der Breite eines Kegels zu seiner Länge, gemessen von der Spitze. Der Tangens eines Winkels ist das Gleiche, nur eben eine Steigung oder Schräge. Wenn nun eine Steigung z. B. 1 Einheit in die Höhe geht auf 6 Einheiten in der Waagerechten, dann ist der Gradient 1 : 6, und 1/6 oder 0,166 dezimal geschrieben, ist der Tangens des Winkels mit einer Steigung 1 : 6 und aus der untenstehenden Tabelle kann man entnehmen, daß das ein Winkel von 9,5° ist. Wenn der Winkel mit „**A**“ bezeichnet wird, dann ist der Tangens  $\tan A$ . Laß Dich nicht erschrecken durch Worte wie Tan oder Tangens, das sind nur Namen! Der Arctan oder Atan oder  $\tan^{-1}$  ergibt den entsprechenden Winkel zu einem bestimmten Tangens-Wert. Z. B.  $\text{Atan } 0,166 = 9,5^\circ$ .

Die verschiedenen Konen in einem Injektor werden Konen genannt, weil sie eine kegelige Innenkontur haben. Mit dem Tangens eines Konuswinkels läßt sich die Veränderung des Konus-Durchmessers für eine gegebene Länge berechnen. Andererseits, wenn die Durchmesser-Änderung eines Konus auf einer gemessenen Länge bekannt ist, kann man den zugehörigen Winkel aus der nachstehenden Tabelle entnehmen oder man benutzt die  $\tan^{-1}$  – Funktion auf einem Taschenrechner, die den Winkel für einen gegebenen Tangens ausgibt. Die praktische Anwendung all dieser Informationen wird genau erklärt, wenn sie für den Fortgang der Arbeit gebraucht werden. Die Tangens-Werte für die gebräuchlichen Konuswinkel sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Werte „**B**“ und „**C**“ werden an der Drehbank benötigt, wenn gedrehte Reibahlen hergestellt werden. Beachte, daß ein Kegel in der Mittelebene zwei rechtwinklige Dreiecke enthält, wobei der genaue Wert des Tangens, definiert als Verhältnis Breite zu Länge,  $2 * \tan A / 2$  beträgt, was ein wenig kleiner ist als  $\tan A$ . Z. B.  $\tan 9^\circ = 0,1584$ , aber bei einem Konus ist der korrekte Wert  $2 * \tan 4,5^\circ = 0,1574$ . Die Differenz macht typisch etwa 1/2 thou im Innen-Durchmesser des Misch-Konus aus und bewirkt eine Veränderung des maximalen Betriebsdruckes von etwa 2%.

Table of Tangents			
Angle A	Tangent (2*Tan(A/2))	B=1000*tan(A/2)	C=1000/cos(A/2)
6	0,105	52,4	1001
7,5	0,131	62,5	1002
8	0,140	70,0	1002,5
8,5	0,149	74,3	1003
9	0,157	78,7	1003
9,5	0,166	83,1	1003,5
12	0,210	105,0	1005,5
13	0,228	114,0	1006,5
15	0,263	132,0	1009

## Reibahlen

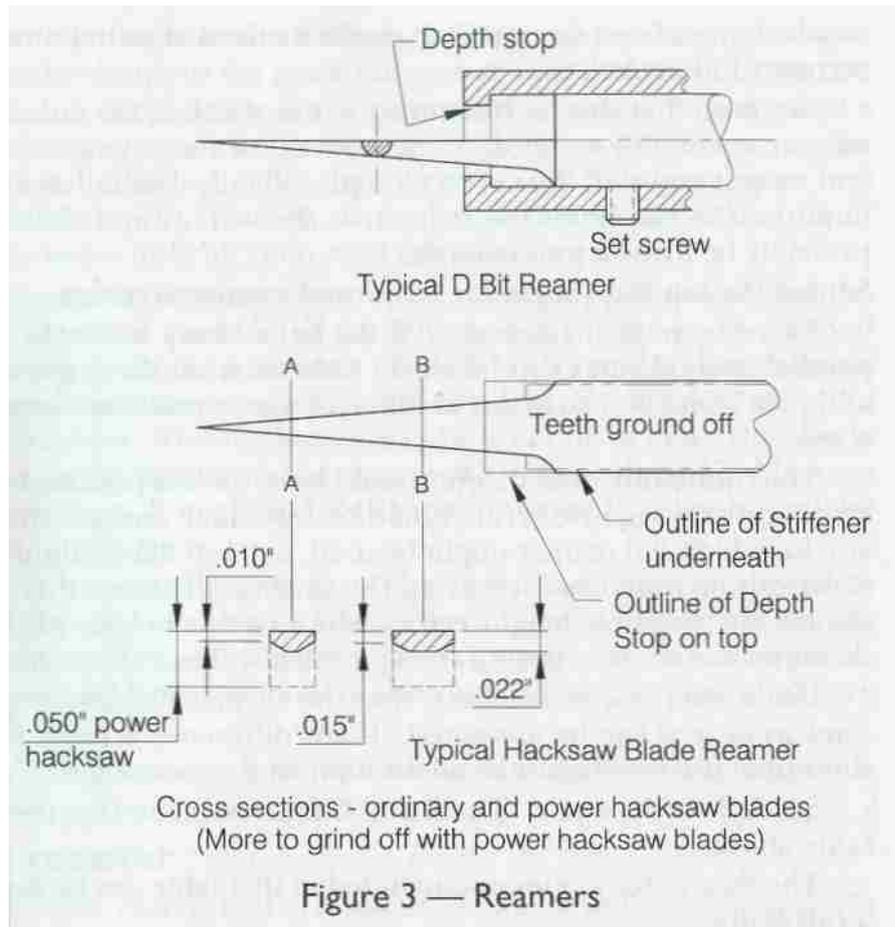
### Die Herstellung einer Reibahle

(Siehe Bild 3) Um eine Reibahle herzustellen, die in professioneller Manier im Futter eines Reitstocks benutzt werden soll, wird Rundmaterial benutzt, das auf den Kegelwinkel gedreht wird, danach durch Fräsen oder Feilen einen halbmondförmigen Abschnitt bekommt, der benötigt wird, um wie ein D-Bit schneiden zu können und muß dann gehärtet werden. Silberstahl ist ein geeignetes Material, 3/16 in., 6 mm oder 1/4 in. Durchmesser sind Abmessungen, die für einen üblichen Modell-Injektor ausreichen.

Als einfache Alternative für eine kleine Anzahl Konen kann man einfache Handsägeblätter verwenden, vorausgesetzt, sie sind aus Stahl mit hohem Kohlenstoffgehalt hergestellt. Wenn es bricht oder knickt statt sich zu verdrehen oder zu verbiegen, so ist es brauchbar. Die billigen „chinesischen Blätter“ sind für diesen Zweck sehr gut geeignet. Ein Stück eines verbrauchten Maschinensägeblatts ist eine stabilere Alternative, erfordert aber auch mehr Schleifarbeit.

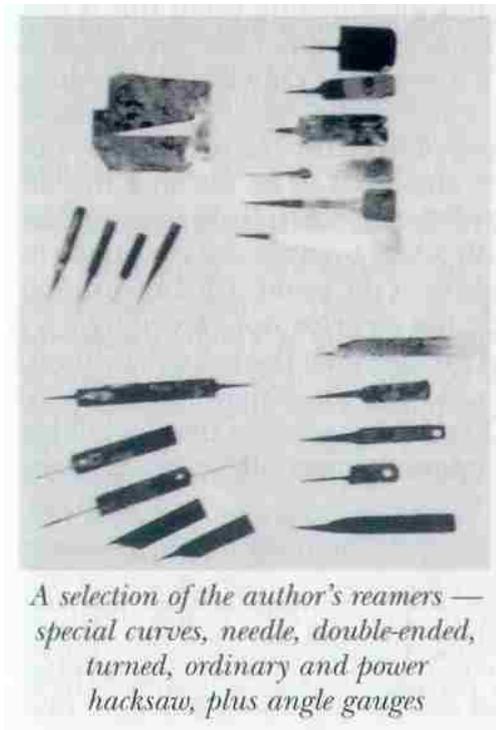
### Die gedrehte Reibahle (wie sie Profis benutzen)

Für die Produktion oder eine größere Anzahl Injektoren ist die gedrehte Reibahle von unerreichbarer Bequemlichkeit. Sehr sorgfältige Bearbeitung ist erforderlich, um eine



Cross sections - ordinary and power hacksaw blades  
(More to grind off with power hacksaw blades)

Figure 3 — Reamers



Reibahle perfekt herzustellen, besonders den Kegelwinkel. Aber der einzige wirklich kritische Winkel ist der des Misch-Konus, aber auch nur dann, wenn eine spezielle Auslegung in dem erwarteten Druckbereich arbeiten soll und daher die Winkelabweichung möglichst kleiner als  $0,1^\circ$  sein soll, was einer Abweichung von 1,8 thou pro Zoll vom idealen Winkel entspricht. Das folgende Beispiel zeigt, warum die Genauigkeit für den Misch-Konus so wichtig werden kann.

Nehmen wir an, die Konstruktionszeichnung zeigt für den Misch-Konus eine Winkel von  $9^\circ$ , eine Kehlen-Durchmesser von 37 thou, eine Gesamtlänge von 411 thou und die Eindringtiefe des Dampf-Konus mit einem Außen-Durchmesser von 77 thou ist 35 thou. Das ergibt eine Länge von der Kehle bis zum Dampf-Konus bzw. zu dem Ringspalt von  $411 \text{ thou} - 35 \text{ thou} = 376 \text{ thou}$ . Der Außen-Durchmesser des Ringspalts ist 37 thou (Kehlen-Durchmesser) +  $376 \text{ thou} \cdot \tan 9^\circ$  was 96 thou ergibt. Daraus ergibt sich eine Spaltweite von  $\frac{1}{2} \cdot (96 - 77) = 95 \text{ thou}$ . Wir nehmen jetzt einmal an, daß der geriebene Winkel nur  $8,75^\circ$  statt  $9^\circ$  beträgt. Der maximale Betriebsdruck würde proportional verringert auf 92% von dem, was wir anstreben. Ein Winkel von  $8,9^\circ$ , eine Abweichung von nur  $0,1^\circ$ , ergibt 97,5% vom erwarteten maximalen Betriebsdruck, und nur der korrekte Winkel ergibt 100% Genauigkeit.

Eine Genauigkeit von  $0,1^\circ$  ist mit der üblichen Winkelskala am Oberschlitten nur schwer zu erreichen, daher ist eine

Methode zur genauen Winkeleinstellung nachfolgend beschrieben.

Aber denke daran, daß sich diese hohe Genauigkeit nicht lohnt, wenn Futter, Spindelstock und Reitstock nicht genau fluchten. Anderenfalls wird der Versuch mißlingen, einen Konus auf genauen Durchmesser am Eingang und Ausgang zu reiben und gleichzeitig die korrekte Länge einzuhalten. Die Reibahle wird vom Futter des Reitstocks gehalten, daher ist dessen Ausrichtung wichtiger als die des Werkstücks, sofern es nicht unrund läuft, wird es sicherlich genau genug gedreht werden.

### **Das Einrichten des Oberschlittens für 0,1° Genauigkeit der gedrehten Reibahle**

Zuerst überzeuge Dich davon, ob die Voraussetzungen für eine solche Genauigkeit gegeben sind. Wenn das Drehbankfutter exakt schlagfrei spannt, dann kann ein Stück geschliffenes Rundmaterial für diese Prüfung verwendet werden. Anderenfalls stelle den Oberschlitten nach seiner Skala auf 0 Grad und drehe in dieser Einstellung nur mit dem Oberschlitten ein Stück Material etwa auf 1 Zoll Länge ab, dieses Stück sollte dann ein exakter Zylinder sein.

Die Schneidhöhe des verwendeten Radius-Drehstahls sollte so korrekt wie möglich sein, ohne eine Abweichung über die Drehmitte und auch nicht unter die Drehmitte, wenn jedoch unter Mitte, dann sollte die Abweichung so klein wie möglich sein und nicht größer als 10% des kleinsten Kehldurchmessers, der mit dieser Reibahle hergestellt werden soll, für einen Kehldurchmesser von 30 thou also maximal 3 thou. Diese Höhendifferenz kann man ermitteln, indem man den kleinsten Durchmesser mißt, der mit diesem Stahl gedreht werden kann; dieser ist dann doppelt so groß wie die Höhendifferenz. Weitere Einzelheiten dazu folgen später (steht der Drehstahl über Mitte, kann damit kein kleiner Durchmesser gedreht werden). Eine kleine Abweichung in der Höhe beeinflusst nicht die nachstehend beschriebene Winkeleinstellung.

Überprüfe den gedrehten Zylinder mit einer Mikrometer-Meßschraube im Abstand von 1 Zoll, ob die Durchmesser genau gleich sind. Wenn die Differenz größer als ein kleiner Teil eines thou ist, muß dieser Fehler beim nächsten Schritt berücksichtigt werden.

Als zweiter Schritt wird der Winkel eingestellt. Für die üblichen kleinen Winkel sind die Werte für „**B**“ und „**C**“ in der vorstehenden Tabelle enthalten.

Werte für Winkel, die nicht in der Tabelle stehen, ermittelt man mit mathematischen Tafeln für Winkelfunktionen oder mit einem Taschenrechner.

Jetzt verdrehe den Oberschlitten gegen den Uhrzeigersinn nach Skala auf den halben Wert des gewünschten Kegelwinkels und klemme ihn dann. Stelle den Ober- und Querschlitten so ein, dass der Drehstahl gerade eben das parallel gedrehte Material am Durchmesser berührt. Um Gleichmäßigkeit zum Erreichen, ist es eine gute Idee, ein dünnes Stück Blech zu benutzen, um festzustellen, wann der Drehstahl das Werkstück gerade eben berührt. Wenn diese Vorgehensweise ab jetzt durchgehend benutzt wird, ist es nicht erforderlich, die Blechdicke zu berücksichtigen. Achte auf den toten Gang und verfähre jetzt den Oberschlitten um den Wert „**C**“ aus der Tangens-Tabelle von Seite 38 in Richtung Drehfutter. Das wären genau 1000 thou für einen 0-Grad-Winkel, aber die Tabelle auf Seite 38 zeigt zunehmende Werte für größere Winkel. Idealerweise ist die Drehstahlspitze jetzt von dem gedrehten Durchmesser genau um den Wert „**B**“ entfernt, ermittelt durch den Skalenring am Querschlitten; der Winkel des Oberschlittens muß jetzt solange verändert werden, bis der ermittelte Wert für „**B**“ innerhalb der Toleranz von  $\pm 0,9$  thou liegt, damit der Winkel  $\pm 0,1^\circ$  genau wird. Wenn die Drehstahlspitze ein wenig unter Drehmitte liegt, dann wirkt eine Einstellung der Toleranz Richtung der Grenze „+ve“ der Verkleinerung des Kegelwinkels an der Spitze entgegen. 0,9 thou auf 1000 ist der Tangens von  $0,05^\circ$ , was verdoppelt für den Winkel einen Fehler kleiner als  $0,1^\circ$  bedeutet.

Beachte: Wenn der gedrehte Durchmesser an der Futterseite um  $x$  thou größer war als am anderen Ende, wobei  $x$  hoffentlich ein sehr kleiner Wert ist, dann subtrahiere  $x/2$  vom „**B**“-Wert als Kompensation; war der Durchmesser kleiner, dann addiere die halbe Abweichung zum „**B**“-Wert. Damit sich das alles lohnt, leuchtet es ein, daß die Drehbank, die Mikrometer-Meßschraube und der Mensch in ausgezeichneter Verfassung sein sollten.

### **Das Drehen einer Reibahle**

Das eigentliche Drehen ist jetzt ein einfacher Vorgang und der einzig wichtige Punkt ist, daß die fertig gedrehte Oberfläche so glatt wie möglich ist. Um alle Mühen zu vermeiden, die sich aus der Korrektur der Abweichung von der richtigen Drehstahlhöhe ergeben, ist es besser, den Drehstahl vor Beginn der Arbeit auf die korrekte Höhe einzustellen.

Mit einem passenden Stück Rundmaterial von kleinem Durchmesser kannst Du feststellen, welcher kleinste Durchmesser an der Kegelspitze noch gedreht werden kann und sollte dieser Durchmesser noch zu groß sein, so muss die Drehstahlhöhe korrigiert werden. Dafür muss natürlich der Drehstahl scharf geschliffen sein, sonst springt das Werkstück auf den Stahl anstatt zerspannt zu werden.

Ist die Stahlschneide zu hoch, so wird sie, wenn überhaupt, bei kleinen Durchmessern nicht korrekt schneiden. Die Auswirkung einer zu tief stehenden Stahlschneide ist, daß der Kegel der Reibahle nicht in einer Spitze ausläuft und somit der Bereich der Kehle dann zu groß wird, entsprechend den nachfolgend erläuterten Werten. Für eine 5 thou unter Mitte liegende Schneide wird die Abweichung im Durchmesser +0,5 thou bei 100 thou Durchmesser, -0,8 thou bei 60 thou Durchmesser, +1,6 thou bei 30 thou Durchmesser und +2,4 thou bei 20 thou Durchmesser. Wenn das Einstellen der korrekten Schneidenhöhe zu kompliziert ist, dann beachte die folgende Bemerkung.

Anmerkung: Korrektur der Auswirkung einer zu geringen Drehstahlhöhe, nachdem das Drehen beendet ist. Nimm den korrekten Kehldurchmesser **dx**. Auf dem fertiggedrehten Kegel markiere die Stelle, die 100 thou Durchmesser hat. Von dort miß in Richtung Spitze die Strecke  $(100 - dx) / (\tan A)$  ab. Z. B. für einen Kehlen-Durchmesser von 40 thou ist die abzumessende Strecke  $(100 - 40) / (\tan A)$ . Wenn der Winkel **A** z. B. 9° beträgt, dann wird die Strecke  $(100 - 40) / (0,157) = 382$  thou. Die Strecke muß exakt abgemessen werden, damit sich die ganze Prozedur lohnt, denn ein Fehler von 3 thou in der Strecke ist gleichbedeutend mit einer Abweichung von 0,5 thou im Durchmesser **dx**. Dann miß den Reibahlen-Durchmesser an dieser Stelle. Für einen exakten Kegel von 9° sollte er 40 thou betragen, aber er wird größer sein, wenn der Drehstahl unter Mitte gestanden hat.

Durch sorgfältige Anwendung eines Ölsteins oder einer kleinen feinhiebigen Feile kann der Fehler an dem Kegel korrigiert werden, dabei sollte die Arbeit mit einem Haarlineal kontrolliert werden. Bedingt durch die fehlerhafte Drehstahlhöhe wird der Kegel in Richtung auf die Spitze zu dick sein, wodurch die Mantellinie zur Mitte hin durchgebogen erscheint. Für einen Misch-Konus sind der Eingangs- und Kehlen-Durchmesser und ihr Abstand zueinander die maßgeblichen Abmessungen. Beende diese Bearbeitung mit einem Ölstein oder einer feinhiebigen Feile, um eine möglichst glatte Oberfläche zu erreichen.

## Das Fertigstellen einer gedrehten Reibahle

Nachdem diese wichtigen Arbeiten erledigt sind, muss genau die Hälfte abgefeilt oder abgefräst werden, um ein Werkzeug mit einem D-förmigen Querschnitt zu erhalten. Ein Autor schlägt vor, der Reibahle die Querschnittsform einer Dreikantfeile zu geben, das wäre eine Alternative. Danach folgt die schon oft beschriebene Prozedur des Härtens, wobei aber sorgfältig darauf zu achten ist, daß die Spitze nicht überhitzt wird. Die Anlassfarbe sollte vor dem Abschrecken zwischen hell- und dunkel-strohgelb liegen (230°C - 240°C). Anschliessend wird die Reibahle mit einem Ölstein fertig abgezogen. Wenn das alles korrekt durchgeführt wurde, hat man eine Reibahle der Profiklasse.

Wenn andererseits die Reibahle fast ideal geraten ist, aber Zweifel am korrekten Winkel bestehen, so wirf sie nicht weg, denn sie kann noch für weniger kritische Anwendungen gebraucht werden. Oder Du kannst das tun, was ein „Hersteller“ machen würde: passe die restlichen Abmessungen daran an; typischerweise muss die Länge des Misch-Konus und die unkritische Länge des Ausgangs-Konus angepasst werden.

## Wie ein „Hersteller“ vorgehen würde

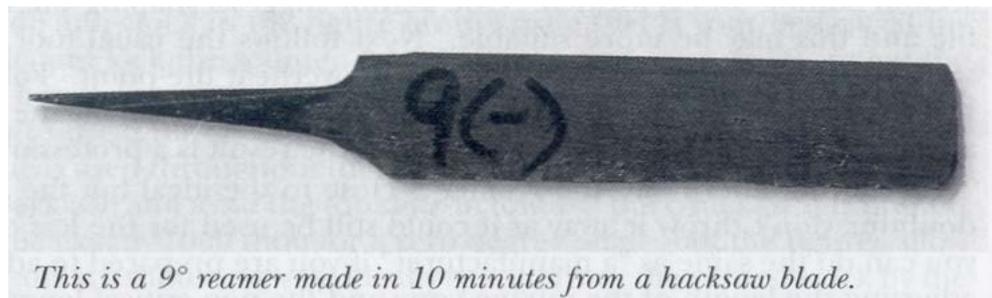
Üblicherweise basiert deren Vorgehensweise nicht auf öffentlich zugänglichen Zeichnungen, daher steht es ihnen frei, ihre eigenen Konstruktionen zu verändern. Daher ist es für sie das Beste, eine ausreichend große Anzahl gleicher Reibahlen herzustellen, deren Winkel so genau wie möglich ist, um damit für die Lebensdauer des Produkts versorgt zu sein.

Danach kann die Konstruktion auf die Eigenschaften der Reibahlen abgestimmt werden, die Abmessungen der Konen werden den erzeugten Winkeln angepaßt. Z. B. ein Misch-Konus mit Überlänge wird gebohrt und aufgerieben, bis der Eingangs-Durchmesser korrekt ist. Dann wird der Tiefenanschlag auf die Reibahle geklemmt um damit die Ausführung der Eingangsseite zu fixieren. Als nächstes wird die Entfernung der Kehle vom Eingang gemessen und die Überlänge abgedreht. Nehmen wir an, das Ausreiben wird wiederholt, dann wird die angepaßte Länge der Standard für den Misch-Konus, der Ausgangs-Konus und/oder die Gehäuse-Abmessungen werden einfach angepaßt, da die Differenz zum Nennwert wahrscheinlich 15 thou nicht überschreiten wird. Um den gleichen Winkel an einem anderen Konus zu reiben, z. B. an einem Dampf-Konus, sollte eine andere Reibahle mit Tiefenanschlag benutzt werden. Für jeden Konus-Typ sollte mindestens eine Reibahle plus eine als Reserve vorhanden sein.

## Die Sägeblatt-Reibahle

Eine solche Reibahle ist niemals so genau wie eine professionell gedrehte Reibahle, aber mit ein bißchen Geschick kann man damit fast genauso gute Ergebnisse erzielen und sie hat den Vorteil, daß sie viel einfacher herzustellen ist, wenn man ein gutes Auge hat und vorsichtig beim Arbeiten am Schleifbock ist. Ausserdem ist sie einfach zu verändern und benötigt keine Wärmebehandlung. Laß Dir etwa eine halbe Stunde Zeit für diese Arbeit. Benutze dafür ein gehärtetes Sägeblatt von der Sorte, die bricht und sich nicht biegen lässt. Im Schraubstock brich etwa ein Viertel von dem Sägeblatt ab und schleife danach die Zahnung ab, vergiss nicht, bei der Bearbeitung harten Materials immer eine Schutzbrille zu tragen. An einem Ende des Blattes zeichne oder reiße den gewünschten Winkel an, mit einem guten Winkelmesser oder mit dem Steigungsverhältnis aus der Tangens-Tabelle. Z. B. ist für  $9^\circ$  die Steigung 157 thou pro Zoll. Es ist unwahrscheinlich, daß die größte Breite mehr als 200 thou sein muss, da 250 thou Breite bereits für ein Modell mit 8 pints/min reichen würde, ausserdem verringert unnötige Länge nur die Stabilität. Dann schleife die Winkelform, zuerst am groben Schleifstein und dann am feinen, aber belasse dabei noch überall die volle Dicke des Blattes. Kühle zwischendurch immer wieder mit Wasser. Wenn Du etwa bis auf 25 thou an die angezeichneten Linien herangekommen bist, ist es günstig, das Schleifen an der Seite des Steins fortzusetzen, wobei Du das Blatt nach unten zeigen lässt, in einer leicht ziehenden Position. Das hilft dabei, eine gerade Kante zu erhalten. Bearbeite die Kanten so, daß ein gleichmäßig breiter Lichtspalt zu sehen ist, wenn Du ein gutes Lineal anlegst. Das Bearbeiten mit einem Ölstein ist eine gute Methode, um alle Abweichungen von einer genau geraden Kante zu beseitigen. Jetzt zeichne zwei Querlinien, die erste da, wo die Breite 30 thou beträgt, eine zweite genau 1 Zoll weiter entfernt. Jetzt messe die Breite an der 30 thou-Stelle. Diese Breite nennen wir „*W*“. Dann miss genau 1 Zoll entfernt, hier sollte die Breite  $W + 2$  mal den Wert „*B*“ aus der Tabelle betragen. Ein Beispiel: „*W*“ betrage 33. Bei einer  $9^\circ$ -Reibahle sollte dann die Messung an der breiteren Stelle  $33 + 2 \times 78,7 = 190,4$  ergeben. Das Ergebnis sollte auf  $\pm 1,8$  thou genau sein für eine Winkelabweichung von  $\pm 0,1^\circ$ , denselben Wert wie für die gedrehte Reibahle. Eine Abweichung von  $\pm 4,5$  thou ergibt  $\pm 0,25^\circ$  und  $\pm 9$  thou entsprechen  $\pm 0,5^\circ$ .

Schneidet man ein Stück flaches Weissblech genau gerade und fast ganz durch, so lässt es sich zum gewünschten Winkel aufbiegen, der durch einen an der weitesten Stelle aufgelöteten Blechstreifen



stabilisiert wird (s. Abb. 4). Danach kann man es als Lehre für die Reibahlen benutzen, indem man beide zusammen gegen das Licht hält, um vorhandene Abweichungen zu erkennen. Eine Spaltweite von 1 thou ist gut erkennen. Mit einer genau geraden Kante als Bezug ist es nicht schwierig, die Abweichungen zu schätzen. Zwei Stücke Sägeblätter mit genau geradem Rücken können an Stelle des Weißblechs verwendet werden. Um den Winkel einzustellen, benutze ein Stück dünne Stahlfolie oder dünnes Blech, das genau die Dicke vom 1000fachen Wert des Tangens hat; in dem genauen Abstand von 1 Zoll  $\pm 5$  thou von der Spitze wird das als Abstandsmaß benutzt. Für einen Winkel von  $9^\circ$  beträgt die Dicke genau 157,4 thou.

Für die meisten Zwecke ist eine Genauigkeit von  $\pm 0,5^\circ$  ausreichend, genauere Winkel werden nur für besonders kritische Anwendungen benötigt, z. B. wenn die Abmessungen eines existierenden Misch-Konus berücksichtigt werden müssen. Aus Gründen, die sich aus der gegebenen Dicke des Sägeblattes ergeben und die später erklärt werden, ist der Winkel besser ein bißchen zu groß als zu klein. Die Winkel von Dampf-Konen sind normalerweise bis  $\pm 1^\circ$  nicht kritisch, aber der Hauptwinkel eines Ausgangs-Konus sollte etwas besser sein, etwa  $-0,5^\circ$  bis  $+1,0^\circ$ . Ausnahmen hiervon sind nur bei extrem kritischen Anwendungen erforderlich.

Wenn die Reibahle noch nicht korrekt ist, dann zurück an den Schleifstein, bis Du damit zufrieden bist. Die gleichen Arbeitstechniken benutzt man, wenn man ein Stück Maschinensägeblatt verwenden will; nur muß dieses zuerst zu einer handlichen Größe zurechtgeschliffen oder abgebrochen werden, außerdem erfordert es mehr Schleifarbit, da es viel dicker ist.

## Fertigstellen einer Reibahle aus einem Sägeblatt

Beide Kanten müssen abgezogen werden, indem man sie auf einem Ölstein hin und her bewegt.

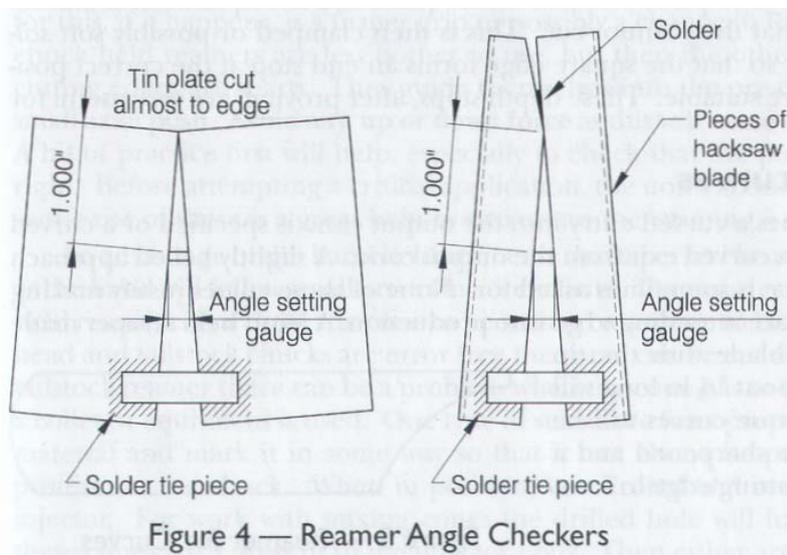
Kennzeichne die ausgewählte Oberseite mit dem angeschliffenen Winkel, dabei solltest Du bekannte Abweichungen mit angeben z. B.  $9\frac{1}{4}$  oder mindestens  $9+$  oder  $9-$ , je nachdem.

Die einfache Reibahle aus einem Sägeblatt kann verstärkt werden, indem man ein weiteres rechteckiges Stück Sägeblatt auf die Rückseite weich auflötet, dabei sollte die Verstärkung bis 1/8 Zoll vor die Stelle reichen, bis zu der die Reibahle benutzt werden soll. Aber ein fester Griff nahe dem Werkstück im Futter ist normalerweise ausreichend, um ein Verbiegen eines nicht verstärkten Werkzeugs zu verhindern.

## Der Einfluss der Dicke des Sägeblattes

Da die üblichen Sägeblätter eine Dicke von 22 thou haben, werden Bohrungen mit kleinem Durchmesser zu groß, wobei die Abweichung mit abnehmendem Bohrungsdurchmesser größer wird. Z. B. würde eine 30 thou Bohrung 37 thou werden und eine 40 thou Bohrung würde 46 thou werden. Aber eine 150 thou Bohrung würde nur 152 thou werden. Der tatsächlich erzeugte Winkel ist typischerweise  $0,4^\circ$  kleiner, der Effekt ist ähnlich dem, der bei einer gedrehten Reibahle durch einen Drehstahl unter Mitte auftritt. Das erklärt, warum eine Winkelabweichung besser nach der Plus-Seite liegen sollte, da das gegen den Fehler wirkt, der durch die gegebene Dicke hervorgerufen wird. Dieser Fehler ist, wenn nichts dagegen unternommen wird, extrem groß bei Reibahlen aus Maschinensägen, die ohne Korrektur eine Dicke von 60 thou haben können. (Diese Art braucht keine Verstärkung). Um die Abweichungen zu verkleinern, die von der Dicke herrühren, wird die Rückseite dachförmig unter einem Winkel von  $45^\circ$  abgeschliffen, sodass die größte Dicke und der Winkel nicht verändert werden. Die Reduzierung der Kantenstärke auf 10 thou genügt bei beiden Arten von Sägeblättern, aber mehr Schleifarbit ist bei den Maschinensägeblättern nötig, wobei diese etwa halbrund geschliffen werden können bei kleinen Dicken. Ziel ist, dass immer nur die oberliegende Kante Kontakt zu dem Werkstück hat, das bedeutet, dass die Reibahle immer nur weniger dick sein darf als der Hälfte der Breite entspricht. Den nötigen Freigang kannst Du an Bohrungen mit typischen Durchmesser prüfen.

Für Misch-Konen von Miniatur-Injektoren, bei denen die Konstruktion im Misch-Konus einen Kehlen-



Durchmesser von 30 thou oder sogar noch weniger vorsieht, sind Reibahlen aus Sägeblättern ziemlich ungeeignet, es sei denn, ihre Dicke wird reduziert wie oben beschrieben, da der Diagonal-Fehler extrem groß wird. Mit Diagonale ist der Abstand zweier gegenüberliegender Ecken im Querschnitt der Reibahle gemeint, z. B. ist die Diagonale eines Quadrates 40 % länger als eine Seite. Für kleine Bohrungen kann die Kantenstärke zur Spitze hin im Bereich der Kehle bis auf weniger als 10 thou verringert werden. Im allgemeinen kann eine Reibahle mit Vorsicht benutzt werden, wenn sich ihre Spitze durch eine Öffnung in Größe des Kehlen-Durchmessers stecken lässt.

Ein Beispiel: Benutzt man zum Reiben eines Misch-Konus mit 30 thou Kehlen-Durchmesser (was einer Fördermenge von etwa 20 oz/min entspricht) Material eines normalen Handsägeblatts mit einer Dicke von etwa 22 thou ohne Korrektur der Kantenstärke, so wäre die Abweichung bei einem 9°-Konus 1,13° und der Eingangsdurchmesser wäre zu klein. Wird die Kantenstärke überall auf 10 thou verkleinert, so wäre der Winkelfehler nur etwa 0,2°. Wird die Kantenstärke einer Reibahle, ausgehend von 22 thou am Konus-Eingang, bis auf 10 thou an der Spitze gleichmäßig verringert, würde der effektive Winkel der Reibahle bei 9° typischerweise um 0,2° vergrößert. Diese Werte setzen voraus, daß der Kehlen-Durchmesser durch das Reiben nicht vergrößert wurde und der verbleibende Fehler nur am Eingang auftritt.

Gute Ergebnisse erzielt man, wenn die Kantenstärke etwa 10 thou im Bereich der Kehle beträgt und sich bis zum Eingang des Misch-Konus auf 16 thou vergrößert, der effektive Winkelfehler durch die Kantenstärke kann dann vernachlässigt werden.

Die Winkelfehler, die von der Kantenstärke herrühren, werden mit zunehmendem Kehlen-Durchmesser kleiner und ohne Korrektur der Kantenstärke wird der Winkelfehler kleiner als 0,5° bei Kehlen-Durchmessern größer als 40 thou.

Später wird noch eine Methode erklärt, mit der kleine Winkelfehler in Misch-Konen korrigiert werden können.

## Das Schärfen der Reibahlen

Bei allen beschriebenen Reibahlentypen ist die Schneidkante nahezu rechtwinklig. Die gedrehte halbmondförmige Type kann nur dadurch nachgeschärft werden, indem man sie auf der Oberseite, wo sie abgefräst oder abgefeilt wurde, mit einem Ölstein nachschleift. Die Sägeblatt-Typen schärft man am besten, indem man die Kante des Blattes in Längsrichtung auf einem flachen Ölstein nachschleift, wobei man das Blatt ein wenig zur Seite kippen sollte, damit die Schneidkante einen Winkel von 90° oder kleiner erhält. Beim Arbeiten mit der Reibahle sieht man genau, welche Kante schneidet. Das wird die dem Anwender zugewandte Oberseite. Diese Seite sollte gekennzeichnet werden, z. B. mit dem Winkel der Reibahle.

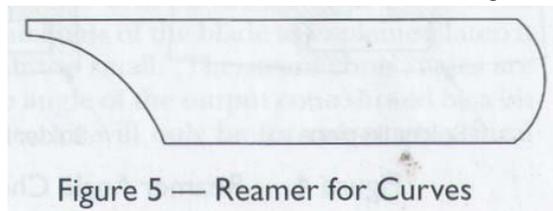
## Tiefen-Anschläge

Bei den gedrehten Reibahlen kann ein rohrförmiges Stück Metall mit einer Klemmschraube auf dem zylindrischen Schaft befestigt werden, sodaß der korrekte größte Durchmesser, wie gezeichnet oder berechnet, genau erreicht wird. Ist jedoch der Schaft der Reibahle dicker als der Außendurchmesser des Konus, genügt ein Stück Rohr nicht. Um dieses Problem zu lösen, muß der Tiefenanschlag eine plane Stirnseite besitzen mit einem zentrischen Loch, das kleiner als der Außendurchmesser des Konus ist. Eine Tangentialklemmung auf dem Schaft der Reibahle ist die bessere Alternative zur Klemmschraube, weil diese auf gehärtetem Material rutschen kann.

Bei den Sägeblatt-Typen wird ein Stück Sägeblatt rechtwinklig abgeschnitten und die Kanten an der Stirnseite verrundet, sodaß sie nicht schneiden können. Dieses Stück wird dann so auf die Oberseite der Reibahle geklemmt oder weich aufgelötet, daß die Stirnseite als Anschlag bei einer korrekten Tiefe wirkt. Miniatur-„G“-Klemmen sind auch brauchbar. Diese Tiefenanschläge sind nach Überprüfung sehr nützlich bei wiederholtem Reiben.

## Reibahlen für kleine Rundungen

(siehe Bild 5) Bei manchen Konstruktionen wird ein gerundeter Ausgangskonus verlangt, oder ein gerundeter Eingang des Dampf-Konus oder auch ein gerundeter Austritt am Ausgangskonus. Manchmal wird auch ein glockenförmiger Eingang am Misch-Konus gefordert. Keine von diesen Formen rechtfertigt die Anfertigung einer speziellen Reibahle dafür, es sei denn, Du willst eine Serienproduktion beginnen. Da keine von diesen Rundungen kritisch ist, genügt ein von Hand gehaltener Schaber, den man aus einem Stück Sägeblatt herstellt, mit einer etwa 3/8 in. langen schmalen Spitze an einer Seite. Beide Kanten können geschärft werden und es kann von Vorteil sein, eine Schneidkante sichelförmig zu schleifen.



Eine besonders scharfe Version dieser Art kann man dazu benutzen, um richtig und sorgfältig die Innenseite einer Dampf-Düse auszuschaben, nachdem man den Außen-Durchmesser auf Maß gedreht hat und zu sehen ist, daß die Ausgangskante noch nicht dünn genug ist. Wenn dafür eine normale Reibahle benutzt wird, kann es möglich sein, daß die Düse gedehnt wird und sich der Außendurchmesser vergrößert.

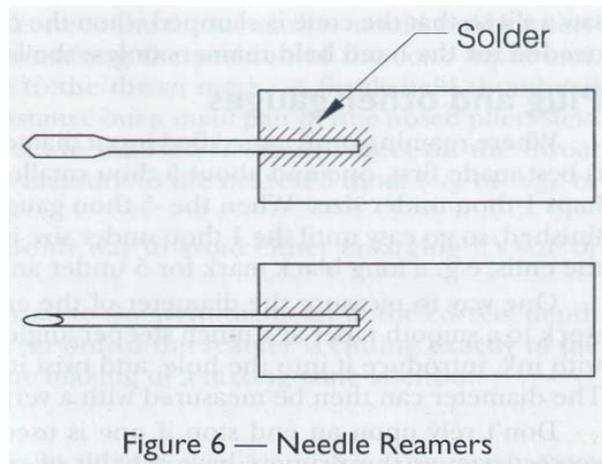


Figure 6 — Needle Reamers

## Die Nadel-Reibahle

(siehe Bild 6) Diese wird benutzt, um eine Bohrung wie z. B. die Kehle eines Konus zu vergrößern, wenn kein Bohrer mit dem korrekten Durchmesser zur Verfügung steht. Mit dieser Methode ist eine Bohrungsvergrößerung von etwa 5 thou bei einem Durchgang zu erreichen, aber das ist abhängig vom Inhalt des Nähkästchens! Darin findet man meistens als größte eine Stopfnadel Nr. 14, die knapp unter 80 thou ist. Suche eine Nadel heraus, die im Schaft ein klein wenig dünner ist als die gewünschte Bohrung. Schleife die Spitze ab und schlage das Ende mit einem Hammer flach. Bei dicken Nadeln ist es wahrscheinlich nötig, sie vorher bis zur Rotglut zu erhitzen. An dem flachen Ende schleife eine Spitze mit einem Winkel von etwa 90° an, dann schleife die Außenkante so lange, bis das Diagonalmaß die richtige Größe hat. Zur besseren Handhabung wird die Nadel dann in ein passendes Stück Metall weich eingelötet. An Stelle der Nadel kann ein ausgemusterter Bohrer in der gleichen Weise geschmiedet und geformt werden, außerdem ist er noch aus besserem Material. Sollte der Bohrer zu dick sein, so kann man ihn drehend am Schleifstein dünner machen, bevor man die speerförmige Spitze herstellt.

Benutzt man diese Reibahlen nur für geringe Bohrungserweiterungen, so wird man feststellen, daß sie automatisch zentrisch laufen, vorausgesetzt, sie werden mit der Hand gehalten und es wird ausschließlich axialer Druck ausgeübt.

## Die Benutzung der Reibahlen aus Sägeblättern

Das Gefühl bringt's! Reibe ein wenig, ziehe sie wieder heraus, um die Späne herauszulassen und dann mache wieder weiter. Heftiges Drücken oder zu schwaches Festhalten führt möglicherweise zu einem schreienden Ton. Wenn das passiert, gibt es nur die Möglichkeit, die Reibahle fester zu halten oder möglicherweise die Drehzahl zu verändern. Natürlich sind die im Futter des Reitstocks eingespannten Reibahlen weniger umständlich im Gebrauch, dafür sind diese sehr einfach, solange ihre Schneidkanten scharf sind. Sie führen sich selbst im vorgebohrten Loch und benötigen nur einen geringen axialen Druck. Vermeide jede Kraft nach oben oder unten, weil dadurch der erzeugte Winkel zu groß wird. Zuerst ein bißchen üben ist sehr hilfreich, besonders um zu prüfen, ob ein vorhandener Tiefenanschlag richtig eingestellt ist. Bevor man mit einer kritischen Anwendung beginnt, sollte man den Abschnitt über die Lehren gelesen haben, da ihre Anwendung eine große Hilfe ist und man so sichergehen kann, daß das Reiben richtig vonstatten geht.

Es ist ein Vorteil der handgeführten Reibahlen, daß dafür das Drehbankfutter nicht exakt rund laufen muß, da die Hand kleinen Rundlauffehlern folgt. Das gilt aber nicht für Reibahlen, die vom Reitstock geführt werden. Bei diesen muß der Konus, der gerieben werden soll, in einer Spannzange gespannt werden, denn sonst wird, wenn Spindelstock und Reitstock nicht genau fluchten, der Konus zu groß werden. Aber auch mit den im Reitstock gespannten Reibahlen kann es ein Problem geben, wenn der Konus umgespannt werden muß, es sei denn, es wird eine Spannzange oder etwas vergleichbares benutzt. Um eine richtige Spannzange zu ersetzen, gibt es die Möglichkeit, ein Stück Rundmaterial derart zu kennzeichnen, daß es immer wieder in exakt der gleichen axialen und radialen Position eingespannt werden kann. Ist es in dieser Position, wird es gebohrt und gerieben um z. B. das Gehäuse eines Injektors aufzunehmen. Zur Arbeit an Misch-Konen muß die gebohrte und geriebene Bohrung äußerst genau hergestellt werden, da diese Konen eine Preßpassung im Injektorgehäuse erfordern. Dann benutze ein oder zwei Klemmschrauben oder säge

einen Schlitz in das Material, sodaß der Konus geklemmt wird, wenn das Futter gespannt wird. Genaue Spannzangen sind für die handgeführten Reibahlen nicht erforderlich, außer wenn das Futter sehr verschlissen ist.

## **(Grenz-)Lehrdorne und andere Lehren**

Ist Reiben bis zu einem genauen Eingangs-Durchmesser erforderlich, fertigt man am besten zuerst einen zweiseitigen Lehrdorn, die eine Seite etwa 5 thou unter Fertigmaß und die andere Seite etwa 1 thou unter Fertigmaß. Wenn die 5 thou-Seite gerade anschnäbelt, ist das Reiben nahezu abgeschlossen, dann mache vorsichtig weiter, bis die 1 thou-Seite gerade passt. Markiere den Lehrdorn so, daß Du die beiden Seiten gut unterscheiden kannst, z. B. eine lange schwarze Markierung für die -5 thou-Seite und eine kurze Markierung für die -1 thou-Seite.

Um den Eingangs-Durchmesser eines Konus zu messen, ist eine Möglichkeit, an einen Stück Rundmaterial einen glatten Kegel anzudrehen, der wesentlich stumpfer als der Konus-Winkel ist, sagen wir etwa 20°. Dann schwärzt man den Kegel mit einem Filzstift, führt ihn vorsichtig in den Konus ein und dreht ihn, damit sich die Bohrungskante markiert. Danach kann der Durchmesser genau an der Markierung mit einem Mikrometer gemessen werden.

Wenn Du einen Tiefenanschlag benutzt, verlasse Dich nicht darauf, bis Du geprüft hast, ob er wirklich bei der korrekten Tiefe begrenzt, da die Reibahlen die Eigenart haben, ein klein wenig größer zu reiben, als ihrem gemessenen Durchmesser entspricht.

## **Eine praktische Lehre für die Kehlentiefe**

Für den Vorgang des Reibens ist die genaue Kenntnis der Position der Kehle außerordentlich wichtig. In einer Serienproduktion kann man ein Dutzend Probebearbeitungen machen, um einen Tiefenanschlag korrekt einzustellen, aber für einen Amateur ist es besser, eine Tiefenlehre für die Kehle zu benutzen, dafür ist ein Lehrdorn mit 1 thou Übermaß besonders gut geeignet. Dieser Lehrdorn setzt genau 6 thou vor der Kehle auf, wenn der Konuswinkel 9° beträgt, bzw. 10 thou vor der Kehle bei 6°.

Die Herstellung dieser Lehrdorne mit dem kleinen Durchmesser kann ein Problem sein. Aber ein schlanker Kegel, gemäß der anschließenden Beschreibung hergestellt, der an dem dünnen Ende eine plangedrehte Stirnseite hat und dort das benötigte Übermaß (1 thou/5 thou) des Kehlen-Durchmessers besitzt, ist einfach anzufertigen. Alternativ kann man das Nähkästchen überprüfen, ob sich dort eine Nadel findet, die stattdessen benutzt werden kann, wenn man ihr die Spitze abgeschliffen hat.

Eine weitere Variante, die vielseitiger ist und für unterschiedliche Durchmesser verwendet werden kann, wird als nächstes beschrieben.

Ein etwa 2 Zoll langes Stück 1/8 Zoll Rundmessing oder Schweißdraht ist das Ausgangsmaterial für diese Lehre und kann durch Drehen mit einem scharfen Radius-Stahl oder durch Feilen hergestellt werden.

Die herzustellende Form ist ein glatter Kegel mit einer Steigung von 75 thou bis 80 thou pro Zoll, ausgehend vom glatten Rundmaterial mit 125 thou Durchmesser bis herunter zu 10 thou weniger als der kleinste zu messende Kehlen-Durchmesser. Dieser Kegel ergibt einen Winkel von 4,5° bis 4,75°, das ist mehr als 1° weniger als die gebräuchlichen Konuswinkel.

Um diese Lehre zu drehen, muß zuerst der Oberschlitten um 2,25° im Gegenuhrzeigersinn verstellt werden. Das Drehen muß in kleinen Längenabschnitte erfolgen, weil das Ausgangsmaterial sich durchbiegt, achte darauf, einen glatten gleichmäßigen Kegel zu erzielen. Die Drehstahlspitze sollte, wenn überhaupt, minimal unter Mitte stehen. Wahrscheinlich ist es am besten, die letzte Bearbeitung durch Feilen zu machen.

Beim Feilen geht man ähnlich in der schrittweisen Bearbeitung der Länge vor, zum Schluß benutzt man eine feinhiebige Feile quer und längs zur Werkstückmitte, immer am Futter beginnend. So erzielt man eine glatte und riefenfreie Oberfläche.

Die typische Länge für eine fertige Lehre ist 1,3 Zoll, beginnend mit einem Durchmesser von 125 thou, die sich kegelig verjüngt bis auf 20 thou. Auf dem zylindrischen Teil, kurz vor Beginn des Kegels, drehe eine schmale Nute ein, diese dient als Bezugslinie bei der Bestimmung der Kehlentiefe.

Bei dem Gebrauch der Lehre mußt Du zuerst die Spitze in eine Bohrung mit dem Kehlen-Durchmesser stecken, dann markiere die Stelle des Kehlen-Durchmessers mit einem Filzstift. Notiere Dir die Entfernung dieser Stelle bis zu der Nute oder bis zur Spitze des Kegels. Während des Reibens beobachtet

man die Entfernung zwischen dem Ende des Konus und der Markierung des Kehlen-Durchmessers, indem man die Lehre in den Konus einführt bis man an die Kehle stößt, dann markiert man an der Lehre die Position des Konus-Eingangs, zieht die Lehre wieder heraus und mißt die Entfernung bis zur Markierung des Kehlen-Durchmessers. Am Anfang ist es ausreichend, einen Fingernagel fest auf die Lehre zu halten, aber mit fortschreitendem Reiben ist eine Spitzzange, die über den Konus-Eingang gelegt wird und damit die Lehre festgehalten wird, wesentlich genauer. Fehler bei dieser Messung ergeben eine falsche Kehlen-Länge. Mit einem guten Stahlmaß kann man bis auf 5 thou genau messen (1/3 von 1/64 oder 1/8 von 1 mm). Nur wenn man die Kehlentiefe genau kennt, kann man vermeiden, daß man den Kehlen-Durchmesser vergrößert oder die Kehle zu lang macht.

Man sollte sich darüber im Klaren sein, daß bei korrektem Kehlen-Durchmesser und exakter Kehlentiefe ein richtiger Eingangs-Durchmesser nur erreicht werden kann, wenn die Reibahle mit einem genauen Winkel arbeitet. Dieses Problem wird später bei der Herstellung eines Misch-Konus genauer erläutert.

## Die Kehlen-Länge

Die Kehle ist der kleinste innere Durchmesser eines Konus und ist beim Misch-Konus an der Ausgangsseite, beim Dampf-Konus etwa bei 20% der Gesamtlänge vor der Ausgangsseite und beim Ausgangs-Konus 3% bis 20% der Gesamtlänge hinter der Eingangsseite.

Die meisten Konstruktionen von Modell-Injektoren zeigen eine Kehlenlänge von fast Null, wenn überhaupt, dann nur mit einem kurzen zylindrischen Abschnitt; so etwas ist nur herstellbar mit Null-Toleranz-Werkzeugen zum Reiben auf Null-Toleranz-Tiefe, es sei denn, man kann während der Bearbeitung äußerst präzise Messungen durchführen. Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, wird die Kehle zu kurz oder hat einen zu langen zylindrischen Teil durch zu kurzes Reiben oder die Kehle wird zu groß durch zu langes Reiben.

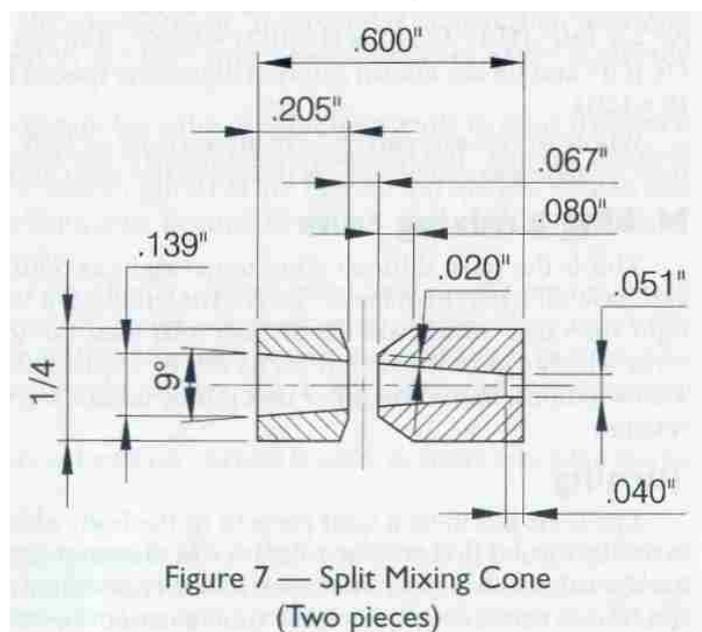
Wie sich herausgestellt hat, ist eine derartig hohe Präzision zur Erzielung einer Kehlenlänge von nahezu Null nicht erforderlich. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß mit  $T$  als Kehlen-Durchmesser, bei Dampf-Konen die Kehlenlänge bis zu  $1,25 \times T$  betragen kann, ohne den Dampfdurchfluß signifikant zu beeinflussen; Misch-Konen und Ausgangs-Konen funktionieren gut bis zu einer Kehlenlänge von  $1,0 \times T$ .

Aus diesen Gründen wird folgendes empfohlen: wo Zeichnungen oder die Konstruktion eine Kehlenlänge von nahezu Null zeigen oder vorschreiben, sollte eine minimale Ziellänge von 20 thou und eine maximale Länge von  $T$  bei Misch-Konus und Ausgangs-Konus und eine maximale Länge von  $1,25 \times T$  für den Dampf-Konus benutzt werden. Der Begriff „Ziellänge“ wird benutzt, weil die Schwierigkeiten bei der praktischen Messung ein Ergebnis von 20 thou zeigen können, der wahre Wert aber näher bei 10 thou liegt.

Beachte: Bei den folgenden Beschreibungen der Konen ist der Beispiel-Außendurchmesser 250 thou. Weicht jedoch die Bohrung des tatsächlich verwendeten Injektor-Gehäuses davon ab, z. B. 6 mm oder Bohrer-Größe G, dann ersetze die 250 thou durch den tatsächlichen Durchmesser.

## Der Misch-Konus

(siehe Bild 7) Der Misch-Konus sollte hergestellt und in das Injektor-Gehäuse eingebaut werden, ehe man mit der Fertigung von Dampf- und Ausgangs-Konus beginnt. Der Misch-Konus ist innen kegelig und verjüngt



sich vom Eingang bis zur Kehle, die üblicherweise mit einer zylindrischen Länge von Null dargestellt ist. Etwa bei 40% der Länge vom Eingang aus ist der Kegel durch einen Spalt unterbrochen, der das Starten des Injektors ermöglicht, indem er vorübergehend das Entweichen von Flüssigkeit im Türmchen ermöglicht. Dieses Entweichen wird noch verbessert, wenn der Spalt außerhalb des Kegels erweitert wird (siehe Bild 7). Im Gegensatz zu den beiden anderen Konen müssen bei diesen beide End-Durchmesser korrekt sein, was eine Reibahle mit dem exakten Winkel erfordert und sorgfältige Beobachtung des Arbeitsfortschritts bei der Herstellung.

**Erforderliche Abmessungen mit Beispielen.** Die kritischen Abmessungen, das sind fast alle, sind mit einem # gekennzeichnet.

# Einpresstiefe am dampfseitigen Ende des Injektor-Gehäuses 600 thou (beeinflusst die Eindringtiefe des Dampf-Konus)

# Länge **L** des Misch-Konus 600 thou

# **OD** Außendurchmesser; leichte Presspassung in der Bohrung von 250 thou durch + 0/-0,1 thou. Kontrolle durch Versuch. Bei anderem Bohrungs-Durchmesser des Gehäuses benutze angepaßte Durchmesser. Das gilt auch für die anderen Konen.

# Kehlen-Durchmesser **T** = 51,2 thou oder 1,3 mm. Bohrer Nr. 55 = 52 thou und Bohrer Nr. 56 = 46,5 thou: Dieser Schritt ist zu groß! Übliche Länge der Kehle **tl** = 40 thou

# Reibahlen-Winkel **A** =  $9^\circ \pm 0,1^\circ$  wenn möglich, aber bis zu  $\pm 0,5^\circ$  können bei anderen Abmessungen korrigiert werden.

# Eingangs-Innendurchmesser **ld** = 139 thou. Bei den meisten Konstruktionen muß diese Abmessung errechnet werden.

# Überlauf-Spalt beginnt 205 thou hinter dem dampfseitigen Ende des Konus.

# Breite des Überlauf-Spalts 67 thou bzw. 1,7 mm.

Der Spalt sollte sich zum (Rückschlag-)Kugelventil hin erweitern. Wenn ein zweiteiliger Konus verwendet wird, dann sollte am zweiten (Ausgangs-)Teil stirnseitig eine plane Ringfläche mit einer Breite von 20 thou stehen bleiben, damit der Konus den Einpreßkräften standhält.

Verrundungen der Kanten am Eingangs-Teil max. 10 thou; empfohlener Wert, für das Beispile nicht erforderlich.

## Berechnungen

# Eingangs-Durchmesser **ld** =  $T + (L - tl) * \tan A$  : wird benötigt, wenn **ld** bei den Abmessungen nicht mit angegeben ist. Wenn **tl** nicht angegeben ist, setzt man nur für die Berechnung **tl** = 0.

Beispiel mit **A** =  $9^\circ$  **ld** =  $51,2 + (600 - 40) * 0,157 = 139$  thou.

Soll ein Konus kopiert werden und **A** ist nicht bekannt, aber es können **ld**, **L**, **tl** und **T** gemessen werden:

$$A = 2 * \tan^{-1} ((ld - T)/(2 * (L - tl))) = 8,95^\circ$$

$\tan^{-1}$  ist das gleiche wie  $\text{Atan}$  oder  $\text{Arctan}$ . Oder, wenn **d1** und **d2** als innere Durchmesser bei einem Abstand **L2** bekannt sind:  $A = 2 * \tan^{-1} ((d1 - d2)/(2 * L2))$ .

Für den Konus werden nur ganze und gelegentlich auch halbe Grade benutzt, daher ist  $8,95^\circ$  tatsächlich  $9^\circ$ . Beachte, daß zweimal der halbe Winkel berechnet wurde, weil das die größere Genauigkeit ergibt.

## Die Herstellung eines Misch-Konus

Das ist der am schwierigsten herzustellende Konus, da beide End-Durchmesser, der Außen-Durchmesser und der Überlaufspalt stimmen müssen. Um die End-Durchmesser korrekt zu erhalten, benutze eine Reibahle mit einer sehr kleinen Toleranz, die die wenigsten Schwierigkeiten macht, oder eine, deren Abweichung nicht größer als  $0,5^\circ$  ist, denn diese Abweichung kann noch korrigiert werden, wie später noch erklärt wird. Wenn Dir die ganzen beschriebenen Prüfungen lästig erscheinen, so denke daran, daß diese nur einen Bruchteil der Zeit beanspruchen, die bereits für die Reibahle benötigt wurde.

## Der Drehvorgang

Der Konus muß mit einer leichten Presspassung im Injektor-Gehäuse sitzen, das bedeutet, daß der Außen-Durchmesser sehr sorgfältig und genau hergestellt werden muß. Die Durchmesser-Toleranz ist für diesen Konus viel geringer als für die anderen, da er angreifenden Kräften innerhalb des Injektors standhalten muß und auch nicht durch Flansche geklemmt werden kann, so wie das bei den anderen der

Fall ist. Andererseits kann er auch keine großen Einpreßkräfte vertragen, weil er dadurch beschädigt werden könnte. Bei einem Konus mit 1/4 in. Durchmesser ist die innere Kraft, die den Konus zu bewegen versucht, kleiner als 1 lb wt, das zeigt, daß eine Einpresskraft von 5 lb wt eine ausreichend große Sicherheit gegen Bewegung ergibt. Eine völlig glatt gedrehte Oberfläche ist schwieriger einzupassen als eine, die noch deutliche Drehriefen hat, deren Spitzen nachgeben können, damit sich das Material der Bohrung anpassen kann. Ist ein Konus fertiggestellt ist und dann gerade eben zu lose, hilft ein dünnes Verzinnen oder Rändeln, indem man den Konus mit einer Dreikantfeile auf einer glatten Fläche hin- und herrollt. Oder er kann durch zwei Klemmschrauben gehalten werden.

Spanne ein Stück Rundmessing sicher in das Drehfutter. Zuerst plane die Stirnseite und achte darauf, daß sie ohne Mängel ist und in der Mitte keine Spitze mehr hat. Danach überdrehe die Stange in der nötigen Konuslänge plus der Breite für das Abstechen. Später wird noch erklärt, wie man durch eine Feder den toten Gang beseitigen kann, wodurch das Drehen mit kleinen Toleranzen erleichtert wird.

Bist Du kurz vor dem Fertigmaß, nimm eine feine Feile und säubere damit die Kante und mache daran nur den Hauch einer Fase, sodaß man mit dem Ende des Injektor-Gehäuses versuchen kann, ob der Konus schon paßt. Läßt er sich durch festen Druck von Hand einschieben, ist es in Ordnung, aber man muß das Gefühl haben, daß der Konus sicher sitzt. Bei zu loser Passung wird sich der Konus unter Dampf bewegen, wenn Du jedoch nicht noch einmal von vorne beginnen willst, dann versuche durch Verzinnen und erneutes Überdrehen die richtige Passung zu erhalten. Rändeln sollte man erst, wenn der Konus im Betrieb lose geworden ist, z.B. wenn der Konus zur Wartung herausgenommen wurde und man beim Wiedereinbau feststellt, daß er nun zu lose sitzt.

Eine andere Möglichkeit zur Befestigung des Konus ist, im Injektor-Gehäuse Klemmschrauben anzubringen.

## Der Bohrvorgang

Zuerst zentriere das rotierende Werkstück mit einem spitzen Werkzeug, eingespannt im Futter des Reitstocks, das schärfer ist als der übliche Zentrierbohrer. Das ergibt einen guten Start für den Bohrer, der den genauen Kehlen-Durchmesser haben sollte und einwandfrei geschliffen sein muß. Sind die beiden Schneiden des Bohrers in Größe oder Winkel nicht gleich, so wird die Bohrung zu groß. Wenn erforderlich, läßt sich dieses Problem vermeiden, indem man zuerst mit einem kleineren Bohrer beginnt, der eine zentrische Bohrung erzeugt, auch wenn er nicht ganz einwandfrei geschliffen ist. Diese Bohrung wird dann vergrößert auf das gewünschte Fertigmaß. Der Bohrer mit dem richtigen Durchmesser wird der Vorbohrung folgen, sodaß die Unsymmetrie der Schneidkanten weniger einflußreich ist.

Bohre bis zu einer Tiefe, die der Gesamt-Länge des Konus entspricht und gib etwas für die Länge der Bohrerspitze dazu, um sicherzustellen, daß die ganze Bohrungslänge den vollen Durchmesser hat. Wenn der Bohrer kleiner ist als der richtige Durchmesser, muß die Kehle später mit einer Nadel-Reibahle, deren Herstellung schon beschrieben wurde, auf den richtigen Durchmesser aufgerieben werden.

Während des Bohrens ist es erforderlich, den Bohrer regelmäßig zurückzuziehen, damit die Späne ausgeworfen werden; der Bohrer wird schmerzhaft quietschen, wenn seine Nuten mit Spänen vollgestopft sind. Wenn das passiert, sollte man den Bohrer nicht weiter ins Werkstück drücken. Hohe Drehzahlen sind nützlich für den Bohrvorgang, aber nicht unbedingt erforderlich, weil mit 800 U/min ein gutes Ergebnis erzielt wird. Die eigentliche Bohrzeit ist relativ kurz, weniger als die Zeit, die zum Entfernen der Späne benötigt wird.

Wenn der Bohrer ein wenig kleiner als die korrekte Größe ist, dann sollte danach eine von Hand geführte spitze Nadelreibahle benutzt werden, die wie schon vorher beschrieben hergestellt wird. Es ist nicht nötig damit tiefer zu gehen als  $2 \cdot$  Kehlen-Durchmesser, da dieses Ende für die Kehle benutzt wird, weil die genaue Mittigkeit wichtig ist und der Rest sowieso größer aufgerieben wird. Kennzeichne dieses Ende mit einem Filzstift oder durch einen Kratzer, um es später wieder erkennen zu können.

## Der Reibvorgang

Bevor mit dem Reiben begonnen wird, Stelle Dir Lehren für Innen-Durchmesser her, eine für Innen-Durchmesser minus 5 thou und eine für Innen-Durchmesser minus 1 thou. Die Lehren können bequemerweise an den beiden Enden eines Stücks Rundmaterial hergestellt werden, aber kennzeichne sie z. B. mit einer langen schwarzen Markierung für die - 5 thou-Seite und mit einer kurzen schwarzen Markierung für - 1 thou, dadurch werden Verwechslungen vermieden. Sofern nicht vorgegeben, muß der

Innen-Durchmesser bestimmt werden, wie weiter oben unter „Berechnungen“ angegeben wurde.

Führe die kegelige Lehre in die Bohrung der Kehle ein und kennzeichne die Stelle des Kehlen-Durchmessers auf der Lehre. Mach eine zweite Kennzeichnung, die von der ersten um die Gesamtlänge „ $L$ “ des Konus minus Länge  $t$  der Kehle (sofern  $t$  nicht Null ist) entfernt ist. Genauigkeit ist dabei wichtig für die Prüfung der Tiefe beim Reibvorgang. Mache Dir auch eine Notiz darüber, wie tief die Spitze der Lehre in die Bohrung der Kehle eintaucht, doch wird das später wahrscheinlich noch mal erfolgen.

Wenn die Kehlenlänge  $t$  nicht angegeben ist oder offensichtlich die Länge Null haben soll, dann setze dafür mindestens 20 thou an.

Als nächstes stecke die Spitze der Reibahle in die Kehlenbohrung und miß die gleiche Länge  $L - t$  ab, mache dort eine Markierung als Hilfe für die maximale Tiefe beim Reibvorgang. Notiere Dir auch, wie weit sich die Reibahle in die Kehlenbohrung hineinstecken läßt, denn wenn der Reibvorgang zu Ende ist. Ist die Länge, um die Reibahle noch heraussteht gleich Länge der Kehle minus der Länge welche die Reibahle zu Beginn in der Kehle steckte. Wird dieser Messvorgang sorgfältig ausgeführt, ist er fast so gut wie eine richtige Lehre.