

Leistungssteigerung von Motoren mit Ram Air

Ein Versuch, etwas Licht in die mystische Stauluftaufladung zu bringen.

Mit der Stauluftaufladung soll die Fahrtgeschwindigkeit ausgenutzt werden, um dem Motor mehr Luft zuzuführen und somit die Leistung zu steigern.

Stauluftaufladung oder — wem es besser gefällt — Ram Air Charging, ist ein Thema, das bestimmt schon bei vielen Motorstammtischen und Benzingesprächen zu heißen Diskussionen geführt hat. Auch einige Beiträge in meinem Lieblingsforum (www.corvetteforum.de) drehen sich um dieses Thema. Hauptsächlich diese threads im Corvetteforum waren der Grund, dass ich mich näher mit diesem Thema beschäftigt habe. Nachdem mich das Ergebnis sehr verblüfft hat, möchte ich es auch den anderen Mitgliedern nicht vorenthalten.



Ist es nicht seltsam, daß man die charakteristischen Lufthutzen für die Stauluft fast nur bei Show- oder Muscle Cars sieht und nicht bei herkömmlichen Autos, wenn damit eine Leistungssteigerung so einfach möglich wäre? Am Ende werden wir mehr wissen.

Gleich vorneweg eine (natürlich nicht ernst gemeinte) Warnung: Das Ergebnis wird nicht allen Lesern gefallen.

Ihr lest weiter? Gut Ihr habt es selbst so gewollt.

Wenn man die Wirkungsweise der Stauluftaufladung erklären will, kommt man nicht um Strömungsmechanik herum. Das schlechte dabei, dieser Wissenschaftszweig entzieht sich nahezu völlig dem, was man als „gesunden Menschenverstand“ bezeichnet.

Praktisch nichts befolgt in der Strömungsmechanik die normale Logik. Um die Verwirrung komplett zu machen, wird sie mathematisch fast völlig durch experimentell festgestellte Formeln definiert. Deshalb ist es schwer, normal denkenden Menschen die Strömungsmechanik nahe zu bringen.

In diesem Artikel werde ich deshalb versuchen, manche Begriffe der Strömungsmechanik mit einfacheren, logisch nachvollziehbaren Begriffen aus der „normalen“ Mechanik zu umschreiben. Falls der geneigte Leser ein Studienfach belegt hatte, in dem Strömungsmechanik vorkam, so möge er wohlwollend über diese hinkenden Vergleiche (Vergleiche hinken immer) hinwegsehen. Falls er einen Fehler findet ist eine Korrektur natürlich willkommen. Die Verwendung mathematischer Formeln soll auf das allernotwendigste beschränkt werden, sie sind aber im Interesse der Beweisführung unersetzlich.

Um das staubtrockene Thema wenigstens ein wenig aufzulockern, habe ich mich entschlossen das ganze als Dialog zu verfassen. (Hoffentlich) viel Vergnügen.

🔗 Also gut Meister dann schieß mal los.

⚠️ Zum Grundverständnis müssen wir ein wenig in die Arbeitsweise von Verbrennungsmotoren hineinleuchten.

Luft und Kraftstoff müssen in einem genauen spezifischen Verhältnis, nämlich 14,2 Teile Luft zu 1 Teil Kraftstoff (dem stöchiometrischen Verhältnis von Superbenzin) gemischt werden. Nur dieses Verhältnis gewährleistet eine optimale Verbrennung im Zylinder bei maximaler Kraftentfaltung.

Wird lediglich mehr Kraftstoff eingebracht ohne die Luftmenge zu erhöhen, man sagt das Gemisch wird überfettet, würde die Leistung sogar sinken, bei gleichzeitig steigenden Kraftstoffverbrauch.

Es wäre das Gleiche, als wenn man einem Lagerfeuer mehr Hitze entlocken will, in dem man plötzlich eine große Menge Holz draufwirft. Wenn man Pech hat geht das Feuer aus, weil es unter Brennmaterial erstickt.

🔗 Klingt logisch, also ist das schon mal keine Lösung.

⚠ So ist es. Untersuchen wir doch mal das Motto der Motorentuner:

Mehr Verbrennungsluft = mehr Motorleistung.

Oder wissenschaftlicher: Finde einen Weg, bei einer gegebenen Drehzahl und gegebener Drosselklappenstellung, mehr Luft in den Zylinder zu bringen, und man kann mehr Kraftstoff verbrennen, was mehr Leistung bedeutet.

❓ Wieso denn das?

⚠ Nur der verbrennende Kraftstoff ist gleichbedeutend mit Energie, deshalb bringt mehr Luft wirklich mehr Energie. Unser Feuervergleich wäre hier das Schmiedefeuer. Erst wenn durch einen Blasebalg Luft zugeführt wird, ist es heiß genug, dass Eisen glühend wird. Beim Motor wird die Leistung ja auch direkt mit der Luftmenge über die Drosselklappe gesteuert.

❓ Gut, Die Lösung wäre also gefunden. Mehr Luft in die Zylinder bedeutet mehr Leistung, weil mehr Kraftstoff verbrannt werden kann. Wie geht das nun praktisch?

⚠ Dazu muss man etwas weiter ausholen.

Bei niedrigem Luftdruck und/oder hoher Temperatur nehmen die Gasmoleküle durch vermehrte Bewegung einen größeren Raum ein.

Die Luft wird also quasi dünner. Es gelangen dadurch weniger Sauerstoffmoleküle in den Verbrennungsraum. Anders gesagt kommt es nicht auf das Volumen an das angesaugt wird, sondern auf die Masse.

❓ Häh? Na ein Liter Luft ist doch immer dasselbe oder?

⚠ Schon richtig. Ein Liter ist immer ein Liter. Aber was ist im Maßkrug drin? Ist dichte Luft drin, in der viele Sauerstoffmoleküle schwimmen und die prima Verbrennung liefert? Oder ist es 'ne dünne Plörre mit wenig Molekülen bei der die Verbrennung so dahindümpelt? Es ist ja jedesmal ein Liter.

❓ Oha ich glaub ich hab's kapiert. Es ist nicht das angesaugte Volumen wichtig, sondern die angesaugte Masse. Deshalb haben moderne Motoren ja auch einen Luftmassemesser statt wie früher einen Luftmengenmesser.

⚠ Genau, denn die Masse der Luft ist ausschlaggebend, weil beim Volumen nicht gesagt werden kann wie dünn oder dick die Luft ist.

Vorsicht jetzt die erste Formel:

Die Masse ist das Produkt aus Volumen und Dichte.

Nachdem der Hubraum unveränderlich ist, saugt der Motor immer das gleiche Volumen an. Zumindest theoretisch, praktisch wird durch die Trägheit der Gassäulen bei höheren Drehzahlen die Füllung immer schlechter.

❓ Es kommt also auf die Dichte der Luft an, wievielt Kraftstoff verbrannt werden kann.

⚠ So ist es. Wir wollen jetzt mal das Problem einkreisen:

Während die Luft den Luftfilter die Einlasskanäle und die Einlassventile durchfließt, verliert sie Druck und wie schon vor zwei Sätzen erklärt, bedeutet niedrigerer Druck geringere Dichte und damit weniger Leistung.

Weil der Zylinder ein konstantes Volumen hat, haben wir bei Verringerung der Luftdichte eine Verringerung der Luftmasse im Zylinder. Die Folge: Weniger verbrennbarer Kraftstoff – weniger Leistung.

Um die Leistung zu steigern gibt es nun mehrere Lösungen:

Lösung 1:

Vergrößerung des Hubraumes

- ② Logisch, größerer Hubraum = mehr angesaugte Luft = mehr verbrannter Kraftstoff = mehr Leistung.

Das ist die einfachste Möglichkeit der Leistungssteigerung. Wir wollen aber den schwierigeren Weg gehen und lassen den Motor und damit den Hubraum unverändert

Lösung 2:

Verringerung des Druckabfalles vom Ansaugfilter bis zum Brennraum.

Das lässt sich in begrenzten Umfang tun. Man kann z.B. einen Luftfilters einbauen, der weniger Druckabfall erzeugt als der Serienfilter. Die Zubehörindustrie bietet in dieser Richtung ja manches an. Einen Betrieb ohne Luftfilter, soll man im Interesse einer guten Motorlebensdauer nicht machen.

Weiterhin kann man die Rohre im Ansaugtrakt glätten und störenden Ecken, Kanten und Passungenauigkeiten beseitigen.

- ② Ja das kenn' ich, bei meinem Moped habe ich damals die Kanäle sogar auf Hochglanz poliert.

△ Das früher gerne praktizierte hochglanzpolieren bringt gegenüber dem einfachen glätten kaum eine Verbesserung der Strömung. Wichtig ist, dass es keine Vorsprünge und scharfkantigen Einschnürungen gibt. Ein Beispiel für schlechte Luftführung ist der Faltenbalg am Einlassstrakt des LS1 Motors. Ungünstiger kann man eine Luftführung eigentlich nicht machen.

Kleine flache Mulden können dagegen sogar eine Verbesserung bringen. Der Golfball ist dafür ein gutes Beispiel, wie eine gewisse Rauigkeit eine Strömung verbessern kann.

Sagte ich schon daß Strömungsmechanik nicht mit dem gesunden Menschenverstand vereinbar ist?

Eine weitere Möglichkeit wäre es, das Einlassventil zu vergrößern. Nachdem das nicht unbegrenzt möglich ist, werden häufig zwei oder sogar mehrere kleine Einlassventile eingebaut.

Diese Maßnahmen führen zu einer Leistungssteigerung bei höheren Drehzahlen. Bei niedrigen Drehzahlen kann dadurch sogar eine Verschlechterung eintreten.

Lösung 3:

Erhöhen des Druckes vor der Drosselklappe, damit der Druckabfall im Ansaugtrakt ausgeglichen werden kann, oder daß sogar mehr als der normale atmosphärischen Luftdruck in die Zylinder gelangt.

Diesen Ansatz wollen wir gleich vertiefen.

Lösung 4:

Senken der Temperatur der angesaugten Luft.

Auch ein guter Ansatz. Darüber später mehr

- ② OK Jetzt haben wir Lösungen aber was hat das jetzt mit der Ram Air zu tun?

△ Stauluft ist der Versuch Lösung 3 zu verwirklichen.

Unter normalen Umständen ist der Druck an der Drosselklappe der atmosphärische Luftdruck. Dieser Druck fällt dann noch etwas, bis die Luft die Zylinder erreicht hat. So weit — so schlecht.

Stauluft soll nun mit einem höheren Druck als dem atmosphärischen Druck an der Drosselklappe anliegen. Nachdem der Druckabfall im Ansaugtrakt gleich bleibt, ist der Zylinderdruck wegen der Druckzunahme vor der Drosselklappe insgesamt höher.

- ② Genau so hatte ich mir das ja auch vorgestellt.

△ Wie würde nun diese Drucksteigerung entstehen? Die „schlüssige, logische, vernünftige, oder wie auch immer“ Theorie besagt, wenn man eine Lufthutze direkt im Luftstrom des Fahrzeuges platziert, dann wird die Luft wegen der Fahrtgeschwindigkeit in den Lufteinlass hineingedrückt.

Eine schöne und schlüssige Theorie — aber leider falsch.



② Hah! wieso soll das denn falsch sein? Wenn ich meine Hand aus dem offenen Fenster eines fahrenden Autos halte, dann spüre ich doch den Druck und der ist gewaltig. Offensichtlich entsteht ja Druck durch die Geschwindigkeit der Luft. Das ist der Beweis, dass die Theorie richtig ist.

⚠ Nun, zur Beantwortung, warum die Theorie falsch ist, muss man den Begriff „Druck“ näher definieren.

Es gibt zwei Arten von Druck: statischen Druck und dynamischen Druck, und als Summe daraus den Gesamtdruck.

② Wie, was, dynamisch? statisch? gesamt? Na Druck ist doch einfach Druck.

⚠ Leider nein, die Erklärung ist schwierig, darum soll hier ein mechanischer Vergleich weiterhelfen.

Statischer Druck,	
<i>Wissenschaftliche Erklärung:</i>	<i>Mechanischer Vergleich:</i>
Statischer Druck, ist eine Eigenschaft die dem Gas innewohnt, weil sich die Moleküle ständig bewegen. Es ist der Druck, den ein Gas im Ruhezustand auf eine Behälterwand ausübt.	Der statische Druck ist mit einer gespannten Feder vergleichbar. Die gespeicherte Energie kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt direkt freigesetzt und damit genutzt werden (Beispiel: Uhrenantrieb, Luftgewehr, Federspeicher-Bremszylinder am LKW).

Dynamischer Druck	
<i>Wissenschaftliche Erklärung:</i>	<i>Mechanischer Vergleich:</i>
Dynamischer Druck, ist nur ein Momenteneffekt während der Massenbewegung des Gases beim Auftreffen auf ein Hindernis.	Der dynamische Druck ist vergleichbar mit einer Masse die fällt. Solange sie am fallen ist, ist ihre kinetische Energie völlig nutzlos. Erst wenn sie auf einen Körper aufschlägt, wird die Energie wirksam und nutzbar (Beispiel: Hammer der auf einen Nagel schlägt).

Gesamtdruck	
<i>Wissenschaftliche Erklärung:</i>	<i>Mechanischer Vergleich:</i>
Jedes beliebige Medium (Gas oder Flüssigkeit), das sich bewegt, kann dynamischen und statischen Druck haben, aber ein Medium im Ruhezustand kann nur statischen Druck haben. Der Gesamtdruck ist die Summe aus statischem und dynamischen Druck.	Eine fallende Masse kann auch eine gespannte Feder enthalten, deren Energie beim Aufprall zusätzlich frei wird. Eine unbewegte gespannte Feder kann aber nur „statische“ Energie haben.

② Aha, so in etwa ist das jetzt schon klar, aber was hat das mit dem Motor zu tun?

⚠ **Ein Verbrennungsmotor benötigt statischen Druck.**

② Wieso denn das, im Ansaugrohr herrscht doch eine Strömung und die ist nicht statisch.

⚠ Der Kolben bewegt sich vom oberen zum unteren Totpunkt. Dadurch wird ein Unterdruck erzeugt. Der statische Druck der Umgebungsluft versucht nun diesen Unterdruck auszugleichen und es strömt Luft in den Zylinder. Wenn genug Zeit vorhanden ist, strömt so lange Luft in den Zylinder bis dort der gleich Druck herrscht wie im Freien, danach gibt es keine Strömung im Ansaugrohr mehr. Größerer statischer Außendruck bedeutet also größeren Druck im Zylinder.

② So einfach ist das also. Gut, ist verstanden.

⚠ Weiter geht's. Mechanische Lader oder Turbolader machen nun genau das, was auch die Ram Air tun soll. Sie erhöhen den statischen Druck. Eine Leistungssteigerung durch Verwendung eines Laders ist ja Tatsache oder?

❓ Klar durch Lader lässt sich ordentlich die Leistung steigern. Aber ein Lader ist doch auch nur ein Gebläse das eine Strömung erzeugt.

⚠ Nein, nicht nur. Würde man die Luft die ein Lader liefert, in einen geschlossenen Behälter leiten (was der Zylinder zum Zeitpunkt des Ansaugtaktes ja auch ist), wäre der statische Druck in diesen Behälter höher als der Luftdruck.

❓ Auch wieder wahr.

⚠ Damit Stauluftaufladung funktionieren könnte, müsste die Energie der strömenden Luft, verursacht durch die Fahrtgeschwindigkeit, also in statischen Druck umgewandelt werden.

❓ Wieso umwandeln die Stauluft drückt doch auch so in den Zylinder?

⚠ Ohne Umwandlung wäre es so, als würde man in ein leeres Trinkglas hineinblasen. Das Glas ist ja mit dem statischen Druck der Umgebungsluft „gefüllt“. Bläst man nun in das Glas wird nur die gleiche Menge Luft die man hineinbläst an den Seiten wieder herausgewirbelt.

❓ OK so einfach geht es also nicht.

⚠ Die einzige Möglichkeit mit Luftgeschwindigkeit den statischen Druck zu erhöhen, ist den dynamischen Druck abzubremsen. Dies kann nur in einer Düse geschehen.

❓ Das verstehe ich nicht, wieso Abbremsen? Mit einer Düse?

⚠ Das ist ein Teil der Strömungslehre den die meisten Menschen nicht verstehen, es ist einfach irgendwie unlogisch. Eine mechanischen Analogie soll wieder helfen:

Strömungsmechanik:	Normale Mechanik:
Dynamischer Druck ist nutzlos solange die Luft strömt.	Eine fallende Masse ist nutzlos, solange sie fällt.
Um die kinetische Energie der strömenden Luft nutzen zu können muss sie abgebremst werden.	Um die kinetische Energie der bewegten Masse nutzen zu können muss sie abgebremst werden.
Lässt man die strömende Luft in einer Düse abbremsen kann man die kinetische Energie nutzen um den statischen Druck zu erhöhen.	Bremst man die Masse ab, in dem man sie auf eine gespannte Feder aufprallen lässt, kann man die kinetische Energie nutzen um eine gespannte Feder noch stärker zu spannen.

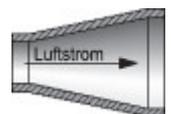
❓ Aha, ist ja gar nicht so schwer — eine Düse muss her. Aber wie soll die denn aussehen?

⚠ Prinzipiell gibt es zwei Bauformen:

Bei der ersten Bauform verengt sich der Luftstrom, man sagt die Düse ist konvergierend also am Einlass größer als am Auslass. Alles klar?



Bei der zweiten Bauform erweitert sich der Luftstrom, man sagt die Düse ist divergierend also am Einlass kleiner als am Auslass. Wieder klar?



❓ Jaaaa, Klar

⚠ Ihr habt nun die Aufgabe eine von beiden Düsen zu wählen:

❓ Na, das ist doch leicht, sie muss sich verjüngen, also wie war das gleich: sie muss konvergierend sein, dann steigt der Druck an.

⚠ Möööööööp, falsche Antwort. Danke fürs Mitspielen, das wäre Ihr Preis gewesen ... Fast jeder, der nicht mit Strömungsmechanik vertraut ist, hätte diese falsche Antwort gegeben¹.

🤔 Ach was, das kann doch gar nicht sein. Wieso ist denn meine Antwort falsch?

⚠ Jetzt wird es schwierig. Um das beantworten zu können müssen wir die berühmte Formel von Bernoulli bemühen.

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{const}$$

Sehen wir uns die beiden Summanden einmal genauer an:

Der erste Summand (p) ist der statische Druck. Er entsteht aufgrund der Teilchenbewegung und wirkt gleichmäßig in alle Richtungen. Das hatten wir ja schon.

Der zweite Summand ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$) das ist der dynamische Druck oder Staudruck. Er wirkt nur in Strömungsrichtung. Das ist aber auch nichts Neues mehr.

Der Satz des Bernoulli besagt nun:

der Gesamtdruck, also die Summe aus dynamischen und statischen Druck ist immer konstant.

Das klingt vielleicht banal ist aber extrem wichtig.

🤔 Naja die Formel ist ja nicht so schwer, aber ich seh' jetzt immer noch nicht, warum meine Antwort mit der Düse falsch gewesen sein soll.

⚠ Zugegeben, es ist auch schwer zu verstehen. Nehmen wir mal die Düse die vorgeschlagen wurde, die verjüngende oder konvergierende Düse, auch Konfusor genannt:

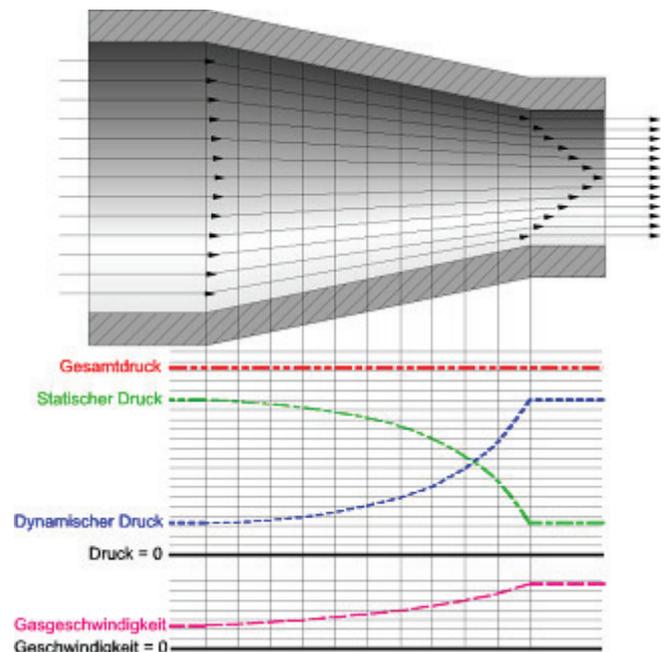
Die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

besagt, daß die Geschwindigkeit in einem engen Strömungsquerschnitt höher sein muss, als in einem weiten, weil das Volumen gleich bleibt.

Durchfahrt also in Zukunft Autobahnbaustellen, die einen Fahrstreifen sperren, einfach doppelt so schnell, dann bildet sich kein Stau.

An der Verengung **muss die Luft also beschleunigt werden**, weil alles was vorne reingeht auch hinten wieder raus muss.



🤔 Das ist wie bei einem Fluss. Wenn er breit ist fließt er langsam und wenn dann Stromschnellen kommen, wo sich das Flussbett verengt, fließt er viel schneller.

⚠ Gutes Beispiel, könnte von mir sein. Aber weiter: Nach der Teilgleichung $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ für den dynamischen Druck steigt dieser im Quadrat der Geschwindigkeit.

🤔 Hah! na bitte, sagte ich doch, der Druck steigt, wenn man eine Düse nimmt die sich verjüngt.

⚠ Richtig aber es steigt der **dynamische Druck**! Welchen Druck braucht der Motor?

🤔 Ähem, der Motor braucht statische Druck.

So ist es! Wie gesagt am Ende der konvergierenden Düse herrscht ein höherer dynamischer Druck, weil die Geschwindigkeit höher ist.

¹ Falsch ist es nur für Unterschallströmungen. Bei Überschallströmungen wäre es sogar richtig gewesen. Bei Überschall ist strömungstechnisch eigentlich alles genau umgekehrt wie beim Unterschall und noch etwas komplizierter. Das nur, damit das Ganze nicht zu einfach wird.

Achtung jetzt wird es spannend. Wie war der Satz des Bernoulli:

⊙ **Statischer Druck + Dynamischer Druck = konstant**

Am Lufteintritt ist die Geschwindigkeit niedrig und somit der dynamische Druck auch niedrig.

Am Luftaustritt ist die Geschwindigkeit hoch und damit ist auch der dynamische Druck hoch.

Gut aufpassen, denn jetzt kommt der Knackpunkt:

Die Bernoullische Gleichung besagt nun ja nichts anderes, als dass die Summe aus statischem Druck und dynamischen Druck immer gleich ist.

⊙ **Klar, aber wo ist jetzt der Knackpunkt?**

⚠ Wenn am Lufteintritt der dynamische Druck niedrig ist, ist der statische Druck hoch. Wie ist das dann auf der Luftaustrittsseite?

⊙ **Jetzt hat es geknackt. Wegen der Konstanz ist dann am Luftaustritt der dynamische Druck hoch und der statische Druck muss infolgedessen niedrig sein.**

⚠ Völlig korrekt. Und was braucht der Motor noch mal

⊙ **Schon gut schon gut, er braucht statischen Druck, mit dynamischen Druck kann er nichts anfangen. Eine Düse bei der sich der Durchmesser verjüngt, verringert also den statischen Druck, verringert also somit die Leistung.**

Manoman und ich wollte schon vorschlagen, dass man vorne am Lufteinlass doch einen großen Trichter anbringen könnte, der dann möglichst viel Luft einfängt und in die Zylinder drückt.

⚠ Der gesunde Menschenverstand würde den Luftfangtrichter vorschlagen. Aber diese verflixte Strömungsmechanik verhält sich eben genau gegensätzlich.

Die Idee mit dem „Luftfangtrichter“ wäre das falscheste was man tun könnte, denn der am Trichterende zur Verfügung stehende statische Druck wäre niedriger als ohne diese „Luftfanganlage“ und dementsprechend die Leistung verringert.

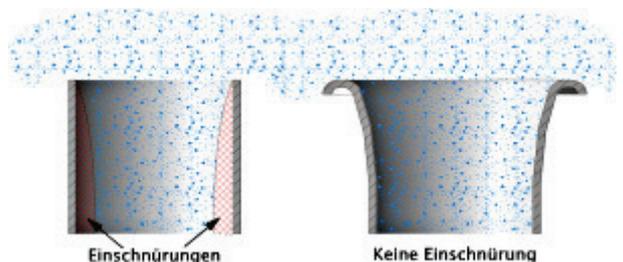
⊙ **Aber Moment mal, früher hatte man doch auf diesen Mehrfachvergäsern die schönen trompetenförmigen Lufttrichter. Das waren dann doch auch Düsen?**



⚠ Es waren keine Düsen zum Zweck den „dynamischen Druck einzufangen“. Denn sie befanden sich nicht im Luftstrom des Fahrtwindes. Außerdem waren die Durchmesserunterschiede gering. Wichtig ist die Abrundung am oberen Ende. Sie dienten dazu einen möglichst strömungsgünstigen also aerodynamischen Lufteinlass zu bilden.

In der linken Skizze sieht man wie die Strömung bei einem einfachen zylindrischen Rohr einströmt. Es erfolgt eine Einschnürung wegen der scharfen Kante.

Rechts eine Strömung mit einem Einlasstrichter. Hier gibt es keine Einschnürung, weil der Rand abgerundet ist.



Obwohl unten beide Einlässe den gleichen Durchmesser haben, ist der Querschnitt beim Lufttrichter besser ausgefüllt, die Luftmenge kann also etwas größer sein.

⊙ **OK ähnliches Aussehen, verschiedene Funktion.**

⚠ Also wieder zurück zur richtigen Düse. Welche Düse brauchen wir?

⊙ **Es muss eine Düse sein die sich erweitert. Eine divergierende Düse.**

⚠ Richtig so eine Düse wird übrigens auch Diffusor genannt. Und wie lautet die Begründung?