

Insugningsrör och avgasrör

Trimning av 4-takts motorer handlar om vassare kamaxel, bättre flöde i topparna, större ventiler, hårdare ventilfjädrar, högre kompression etc. Men även rätt utformning av motorns yttre delar som insugnings- och avgasrör kan ge en hel del effekt. Som vid all trimning så vill man öka motorns fyllnadsgrad – d v s att få in mer luft- och bränsle.

Hur funkar det?

Avstämning är att välja ”rätt” längd och diameter på insuget och avgasröret. Det hela bygger på samma fysikaliska fenomen som skapar ljudet i en orgelpipa d v s hur ljudet i ett rör uppträder vid resonans.

Luften består av ett stort antal gasmolekyler som far runt och kolliderar med varandra. Ljudet förflyttas i luften genom att luftmolekylerna rör sig och bildar förtätningar och förtunningar. Är molekylerna glest placerade innebär att det finns ett lokalt lufttryck som är lägre än normallufttrycket på ca 100 kPa, kilopascal. Ljudet är en longitudinell vågrörelse. Partikelrörelsen är alltså parallell med utbredningsriktningen. Det som händer i en orgelpipa är att luftpelaren i pipan sätts i svängning. Vid kvartvågsresonans, d v s $\lambda = \frac{1}{4}$, våglängden dividerat med fyra, är det i den slutna änden av pipan en nod och ett högre lokalt lufttryck och i den öppna änden en svängningsbuk och ett lägre lufttryck.



Vid resonans ligger svängningsbukan 0,6 x radien utanför rörets öppna ände. Vid kan här bortse från detta då andra felkällor, exempelvis fel antagande om avgasernas medeltemperatur påverkar beräkningarna betydligt mer.

När avgasventilen öppnar i slutet arbetstakten finns det fortfarande ett kraftigt övertryck i cylindern. Övertrycket hjälper till att trycka ut avgaserna från cylindern. Den snabba förändringen i lufttryck ger också upphov till en knall och det som vi uppfattar som ett avgasljud. Då antalet knallar redan vid tomgång är ca 500 per minut och cylinder uppfattas ljudet som ett brum.

– Alla seriöst trimmade racermotorer har avstämda insug och avgasrör.

– Alla standardmotorer har i dag avstämd insug. Kravet på effektiv ljuddämpning och avgasrening på standardmotorer begränsar till viss del möjligheten att få en bra fungerande avstämning på avgas-sidan.

Verkningsgrad över 100 %?

Volymetrisk verkningsgrad eller fyllnadsgrad är ett mått på hur bra gasväxlingen är i motorn. Andas motorn bra så lämnar alla förbrända gaser förbränningsrummet och ersätts med helt ny och färsk luft-bränsleblandning. Då definitionen av η_v har densiteten i insuget som referens så kan resonansfenomen i insuget skapa ett övertryck i insuget innan inloppsventilen stänger. Det ger en överladdningseffekt som avsevärt förbättrar gasväxlingen. Bra utformade insug kan ge värden på fyllnadsgraden på över 100 %.

Ljudhastigheten beror på temperaturen.

Temperatur	Hastighet
0°C	331 m/s
20°C	343 m/s
500°C	635 m/s

Ljudhastigheten ökar med 0,607 m/s för varje °C.

Ett insugningsrör och ett avgasrör har en viss längd och en viss diameter. Diametern är i stort sett samma men längden är olika. Det beror på ljudhastigheten. Ljudets hastighet är en viktig parameter när man beräknar insugets och avgasrörens längder. Ljudhastigheten ändras med temperaturen. I förgasaren är luften som sugts in ca 20°C och i avgasröret är medeltemperaturen ca 500°C.

Ram-charging

Ett resonansfenomen

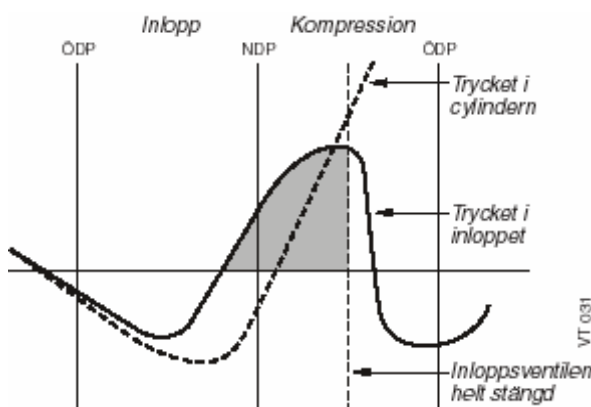
När kolven under motorns inloppstakt rör sig neråt i cylindern sugas luftbränsleblandningen genom inloppsröret in i cylindern. Trycket i insuget är då under lufttrycket utanför cylindern. Den snabba trycksänkningen ger upphov till ett ljud som går från inloppsventilen utåt mot förgasaren. Vid inloppsrörets kant reflekteras ljudpulsen och blir en förtätning som går tillbaka mot inloppsventilen. Om tryckökning finns i inloppet då kolven passerar NDP och under tiden som ventilen stänger hjälper den till att öka trycket i cylindern. Cylindern får då in mer luft och bränsle än vad kolven själv kan åstadkomma då den rör sig neråt under insugningstakten. Effekten kallas på engelska för ram-charging.

Reflektion i ett öppet rör.

När en ljudpuls lämnar ett rör med en öppen ände så reflekteras en del av ljudvågen tillbaka. Den reflekterade vågen är i motfas mot den ursprungliga pulsen. Genom resonansfenomenet ökar den reflekterade pulsens amplitud så kraftigt och den vida överstiger amplituden på den ursprungliga pulsen.

Med en bestämd längd på röret så får man vid ett bestämt varvtal kvartvågsresonans. Kan man bestämma tiden det tar för ljudpulsen att vandra fram och tillbaka och även placera övertrycket rätt så får man in mer luft och bränsle. Motorns effekt ökar inom varvtalsområdet där resonansfenomenet uppträder. Förloppets längd är ca 90 vevaxelgrader. Varvtalsområdet som påverkas har en bredd på ca 1500 r/min.

Den reflekterade pulsens amplitud ökar med kvadraten på varvtalet. Det innebär att effekten av ram-charging vid 2000 r/min är fyra gånger större vid 4000 r/min och 16 gånger större vid 6000 r/min. Ju högre varvtal desto kraftigare blir ram-charging effekten.



Var i varvtalsområdet man lämpligen väljer att placera ram-charging effekten beror på motorns användning. En standardbil eller motorcykel har störst nytta av effekten från tomgång och upp i mellanregistret. I en racermotor placerar man gärna effekttillskottet i varvtalsområdet mellan max vridmoment och max varvtal. Effekttillskottet man får med rätt längd på insugningsrören är mycket påtaglig. I standardbilar brukar insuget vara längre på låga varv genom att

man leder luftbränsleblandningen en längre väg än vid högre varvtal. På racermotorer förekommer det att man har variabel avstämning. Genom rörliga insugningstrattar förkortas insugets längd då varvtalet ökar. På F1 bilar som varmkörs kan man tydligt se hur trattarna rör sig sex till tio centimeter när föraren snabbt trycker ner gaspedalen.

Insugningsrörets längd – enligt Smith & Morrison

Det finns flera olika sätt att räkna ut insugningsrörets längd. Den metoden som vi här använder är hämtad från Smith & Morrison. Formeln tar inte hänsyn till alla påverkande parametrar men är en fullt användbar approximation. Rörets längd kan beräknas på följande sätt:

$$L = \frac{V_{\text{ljud}}}{r/s} \cdot \frac{90^\circ}{720^\circ}$$

L	Inloppets längd i meter från ventilens centrum till ytterkanten på insugningsröret.
V_{ljud}	Ljudhastigheten vid 20 C° som är 340 m/s
r/s	Motorns varvtal i varv per sekund. Varvtalet per minut delat med 60
90°	Övertryckets längd i vevaxelgrader
720°	Motorns rotation i vevaxelgrader för de fyra takterna

Inloppsrörets längd vid 4000 r/min (66,6 r/s) blir då

$$L = \frac{340}{66,6} \cdot \frac{90^\circ}{720^\circ} = 0,63 \text{ m}$$

Vid 6000 r/min (100 r/s) blir längden = 0,425 m

Mäter man insugningsrörens längd på en V8 motor med en centralt placerad dubbelför-gasare med ett tvåplansinsug så stämmer längderna bra. I en V8 är längden på insugnings-rören olika för cylindrarna och ram-charging effekten fördelas därför över varvtalsområdet. På en motorcykel kan ett insug som sticker ut en halv meter ge en del praktiska problem.

Insugningsrörets längd – enligt John B. Heywood

Heywoods formel 7.23 tar hänsyn till fler parametrar och bör ge ett bättre riktvärde på insugets dimensioner än metoden enligt Smith & Morrison.

Formeln som gäller för ett enskilt inlopp bygger på Helmholtz beräkningar av resonans i hålrum.

Man måste först beräkna hålrummets effektiva volym. Det gör man på följande sätt.

$$V_{\text{Eff}} = \frac{V_d \cdot (r_c + 1)}{2 \cdot (r_c - 1)}$$

V_{Eff}	Effektiva volymen i cylindern
V_d	Slagvolymen i cm^3
r_c	Kompressionsförhållandet

Vi antar att slagvolymen är 1000 cm^3 på en cylinder och att kompressionen är 13:1. Den effektiva volymen blir då.

$$V_{\text{Eff}} = \frac{1000 \cdot (13 + 1)}{2 \cdot (13 - 1)} = 583 \text{ cm}^3$$

Hållrumsresonans

En större innesluten luftvolym är kopplad till luften utanför genom en mindre öppning i form av ett rör. Vid resonans i hålrummet bringas luftpelaren i röret i kraftig svängning.

Principen används bl a för att höja basen i högtalarlådor av basreflex typ.

Formeln för hålrumsresonansen har följande utseende.

$$r/s = 477 \cdot V_{Ljud} \sqrt{\frac{A}{L \cdot V_{Eff}}}$$

r/s	Motorns varvtal i varv/minut
477	En konstant. I originalformeln 955 dividerat med 2
V_{Ljud}	Ljudhastigheten vid 20 C° som är 340 m/s
A	Inloppets area i cm ²
L	Inloppets längd i cm från ventilens centrum till ytterkanten på insugningsröret.
V_{Eff}	Effektiva volymen i cylindern

Om vi antar att insugets inre diameter är 53 mm, d v s arean är 22,1 cm² och insugets längd är 63 cm så kan vi räkna ut varvtalet.

$$r/s = 477 \cdot 340 \sqrt{\frac{22,1}{63 \cdot 583}} = 3978 \text{ r/s}$$

Vi kan se att Heywoods formel för hålrum med valda värden ger ett något lägre varvtal än den enklare formeln enligt Smith & Morrison. I och med att Heywood även tar hänsyn till kompression och innerdiameter får man en helt annorlunda graf än med Smith & Morrison, även om värdena ibland kan överensstämma.

Plenum

På motorer där en förgasare är gemensam för flera cylindrar exempelvis på V8-or och H-D motorer med Y-format insug får man en del problem med pulserna som uppstår under inloppstakten. Pulserna från en cylinder stör insugningssekvensen till en annan cylinder. Det är då vanligt att man mellan insuget och cylindrarna placerar ett större hålrum som jämnar ut pulserna. Kallas plenum eller på svengelska plenumkammare. Kammaren utjämnar de kraftiga pulserna och ger en jämnare strömning genom förgasaren. Hålrummet fungerar också som ett magasin för luftbränsleblandning till nästa inloppssekvens.

Insugningstratt

Skillnaden i motoreffekt mellan ett vanligt luftfilter och en tratt, på engelska velocity stack eller air horn är 5 till 10 % i vridmoment och effekt. Tratten leder in luften med betydligt mindre störningar i form av virvelbildningar än en tvärt avhuggen förgasarhals.

Fiberpackningen

Mellan förgasaren och insuget har alla motorer en värmeisolerande packning. Packningens uppgift är att hindra motorns värme att nå förgasaren. I ett kallt insug finns bränslet som vätska i botten på insuget. Insuget måste vara 60°-80° för att bränslet ska kunna förångas och i finfördelad form blandas med luften som sugas in i cylindrarna. Luften i förgasaren ska däremot vara kall för att så mycket syre som möjligt ska finnas i luften till motorn. Därför skiljer man det varma insuget från förgasaren. Det finns också risk för att om motorvärmen når förgasaren så kan bränslet koka. Vissa ämnen i bensinen har kokpunkter som ligger så lågt som under 30°C.

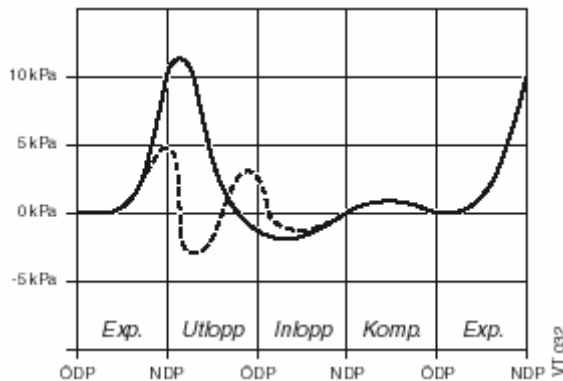
Avgasrör

Vad händer i motorn?

På samma sätt som för insugningsrören så kan man även stämma av avgasrören till bra funktion. Även här handlar det om kvartvågsresonans. När avgasventilen öppnar pressas avgaserna ut. Dels av trycket som uppstått i cylindern under förbränningen och dels av att kolven rör sig uppåt och trycker ut avgaserna i avgasröret. Övertryckspulsen rör sig utåt i avgasröret med en hastighet på 70-90 m/s. Samtidigt rör sig ljudet utåt med en högsta hastighet på ca 600 m/s. Medelljudhastigheten brukar vara i storleken 500-600 m/s.

Ljudbakpulsen

Pulsen är ett lokalt luftundertryck. Lufttrycket är alltså lägre än lufttrycket utanför motorn. Omkringliggande luft sugas till undertrycket. Att inte avgaserna sugas tillbaka beror på att de har hastigheten 80 m/s och på väg utåt. Dess rörelseenergi motverkar att de sugas tillbaka in i motorn.



Trycket i utloppet, omedelbart efter utloppsventilen, inverkar i hög grad på motorns funktion och prestanda. Trycket ges av kolven under utloppstakten men också av reflektioner från avgasrörets slut. Den streckade kurvan visar vad som händer med trycket i utloppet då avgasrörets längd är fel. Den heldragna linjen visar trycket då avgasröret har rätt längd. En viktig punkt är ÖDP mellan utlopps- och inloppstakten. I den punkten är i en modifierad motor både in-

lopps och utloppsventilen öppna samtidigt. Innan ÖDP så trycker resterna av förbränningstrycket och kolven ut alla avgaser de kan. När kolven vänder vid ÖDP suger undertrycket i utloppet utanför utloppsventilen ut resterande avgaser från förbränningsrummet.

Avgasrörens längd – enligt Smith & Morrison

Det som påverkar hur långt ett avstämt avgasrör ska vara är två huvudfaktorer.

- Vid vilket varvtal ska avgasröret fungera bäst, d v s vara avstämt till?
- Hur varma är avgaserna?

Längden på ett enkelt avgasrör kan beräknas på samma sätt som för ett insugningsrör. Skillnaden är att avgaserna har högre temperatur än luften som sugas in i motorn och dels att tiden i vevaxelgrader för full verkan av undertrycket är 120° till skillnad från insuget där det var 90°. Vi har antagit att medeltemperaturen i avgasröret är 500°C. Temperaturen gäller vid full gas. På engelska WOT, wide open throttle. Ljudhastigheten är 635 m/s. Formeln får då följande utseende:

$$L = \frac{V_{Ljud}}{r / s} \cdot \frac{120^\circ}{720^\circ}$$

L Avgasrörets längd i meter från ventilens centrum till ytterkanten på röret.
 V_{Ljud} Ljudhastigheten vid 500°C som är 635 m/s

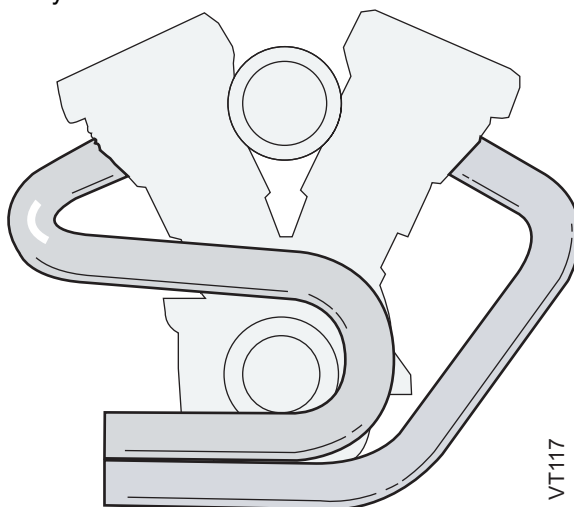
r/s	Motorns varv per sekund. Varvtalet per minut delat med 60
120°	Undertryckets längd i vevaxelgrader
720°	Motorns rotation i vevaxelgrader för de fyra takterna

Avgasrörets längd vid 4000 r/min (66,6 r/s) blir då

$$L = \frac{635}{66,6} \cdot \frac{120^\circ}{720^\circ} = 1,58 \text{ m}$$

Vid 6000 r/min (100 r/s) blir längden = 1,05 m

Det verksamma varvtalsområdets bredd är totalt ca 3000 r/min. Utanför detta varvtalsområde finns ingen påverkan alls. Det märkbart verksamma varvtalsområdet är ca 2000 r/min. Det innebär att för en motor som max varvar 6000 r/min bör man lägga sig på 5000 r/min. Längden är då ca 1,25 m. Att stämma av till maxvarvtalet innebär att halva avstämningseffekten hamnar utanför det användbara varvtalsområdet.



Hur avgastemperaturen påverkar längden på avstämda avgasrör framgår av följande tabell. Varvtalet är 6000 r/min. Längden på röret är i meter.

Motorvarv r/min	300°C 513 m/s	400°C 574 m/s	500°C 635 m/s	600°C 695 m/s	700°C 756 m/s	800°C 817 m/s	900 C° 877 m/s
2000	2,56	2,87	3,17	3,47	3,78	4,08	4,38
3000	1,71	1,91	2,11	2,32	2,52	2,72	2,92
4000	1,28	1,43	1,59	1,74	1,89	2,04	2,19
5000	1,03	1,15	1,27	1,39	1,51	1,63	1,75
6000	0,85	0,96	1,06	1,16	1,26	1,36	1,46
7000	0,73	0,82	0,91	0,99	1,08	1,17	1,25

För den som vill jämföra värdena med amerikanska hastigheter och temperaturer så är omräkningen så här.

$$F^\circ = \frac{C^\circ \cdot 9}{5} + 32$$

Celsius till Fahrenheit.

m/s till feet/sec dividera med 3,2808399

Det är relativt svårt att mäta eller beräkna medeltemperaturen i avgasrören då temperaturen varierar utefter rörets längd, beror på motorn och rörets grundtemperatur och kylning och även ökar med varvtalet. En racermotor går normalt på en fetare blandning än en standardmotor och har därför kallare avgaser. Det bästa är att utgå från ett antaget värde på temperaturen och sedan prova i bromsbänk.

Att avgastemperaturen varierar kraftigt över varvtalsområdet kan man själva kontrollera genom att hålla handen en bit utanför avgasröret på tomgång och sedan öka varvtalet.

Avgasernas hastighet och rörens diameter

Det är alltså två saker som händer i avgasröret. Dels ljudfronten som går med ca 500 till 600 m/s och dels avgaspulsen som rör sig utåt med en hastighet på i storleken 75-90 m/s. Den lägsta acceptabla gashastigheten som fungerar bra är 75 m/s. Den högsta är 90 m/s. 80 m/s är alltså ett bra riktvärde för bra funktion. Väljer man för grova rör ger det för låg gashastighet och dålig avgasevakuerings. Resultatet blir att motorn tappar effekt. Samma sak händer med för smala rör. Gashastigheten blir då för hög och avgasevakueringen blir för dålig.

En beräkning av avgasrörets inre diameter utgår från medelkolvhastigheten och kolvens diameter enligt följande Vi börjar med medelkolvhastigheten.

Vi har valt att räkna på en tvåcylindrisk kvadratisk motor med slag och borrh på 0,1016 m och en slagvolym på 1 646,4 cm³ och som varvar 6 000 r/min. Eller med amerikanska mått, borrh och slag 4 tum, slagvolymen 100 CI.

$$S_{Kolv} = 2 \cdot L_{Slag} \cdot \text{Varvtalet} / \text{sekund}$$

S_{Kolv}	Kolvens medelhastighet
2	Kolven rör sig fram och tillbaka
L_{Slag}	Slaglängden
Varvtalet	Motorns varvtal per sekund

Om slaglängden är 0,1016 meter och att högsta varvtalet man vill använda är 6000 r/min (100 r/s) så blir medelkolvhastigheten.

$$S_{Kolv} = 2 \cdot 0,1016 \cdot 10 = 20,3 \text{ m/s}$$

Medelkolvhastigheten är 20,3 m/s.

Formeln som vi använder för att räkna ut avgasrörets inre diameter ser ut så här.

$$D = \sqrt{\frac{S_{Kolv} \cdot D_{Kolv}^2}{S_{Gas}}}$$

D	Avgasrörets inre diameter i meter
S_{Kolv}	Kolvens medelhastighet
D_{Kolv}	Kolvens diameter i m
S_{Gas}	Gashastigheten

Vi vet att kolvens diameter är 0,1016 meter. Avgasernas hastighet har valts till 80 m/s.

$$D = \sqrt{\frac{20,3 \cdot 0,1016^2}{80}} = 0,051 \text{ m}$$

Rörets inre diameter blir då 51 mm. Genom att byta värden på nämnaren som är gashastigheten så får man innerdiametern vid några olika gashastigheter:

70 m/s	54,7 mm
80 m/s	51,1 mm

Avgasventilens diameter?

Verkar det krångligt att räkna på rörets diameter så är en bra regel att för en standardmotor välja ett rör som har samma inre diameter som avgasventilen. För rena racermotorer kan man gärna öka diametern ytterligare några mm.

90 m/s	48,25 mm
100 m/s	45,7 mm

Innerdiametern på ett lämpligt rör ligger alltså inom området 48,25 till 54,7 mm. OBS, det gäller bara för den här motorn med borrningen 0,1016 m och slaglängden 0,1016 och vid varvtalet 6000 r/min. Andra motorer har andra värden på avgasrörens inre diameter.

Trimma med rörets diameter

På samma sätt som med avgasrörens längd så kan man även välja en diameter som stämmer med det varvtalsområde där man vill ha den bästa funktionen. Man kan välja att placera gashastigheten 75 till 80 m/s vid det varvtal som motorn "ramlar tillbaka till" när man lägger i nästa växel. Det gör att man troligen hamnar en bra bit över 91 m/s, 300 feet/sec, vid max varvtal. Ja, kanske uppåt 100 m/s. Det gör inte så mycket då effekten redan är levererad där den behövdes bäst. Generellt så kan man faktiskt gå ner ¼ till ½ tum från den diameter man får när man räknar på max varvtal.

Värmeisolerande band

Det förekommer att man både på bilar- och motorcyklar lindar avgasrören med värmeisolerande band. Temperaturen i avgasrören blir då högre. Höjs temperaturen i avgasrören så ökar ljudhastigheten. För att bibehålla samma avstämning med lindade avgasrör som med oisolerade rör så måste rören vara längre.

Avgasrörens diameter

När man anger avgasrörs diameter – om inget annat anges – så talar man alltid om den yttre diametern. Ett "tvåtumsrör" är utvändigt 50,8 mm, men den inre diametern beror på plåtens tjocklek. Är plåttjockleken 1,2 mm så är den inre diametern 48,4 mm d v s 5 % mindre.

Ytterdiameter tum	Ytterdiameter tum	Ytterdiameter mm	Innerdiameter vid 1,20 mm plåttjocklek	Innerdiameter vid 1,5 mm plåt- tjocklek
1 3/8	1,375	34,925	32,525	31,925
1 1/2	1,5	38,1	35,7	35,1
1 5/8	1,625	41,275	38,875	38,275
1 3/4	1,75	44,45	42,05	41,45
1 7/8	1,875	47,625	45,225	44,625
2	2	50,8	48,4	47,8
2 1/8	2,125	53,975	51,575	50,975
2 1/4	2,25	57,15	54,75	54,15
2 3/8	2,375	60,325	57,925	57,325
2 1/2	2,5	63,5	61,1	60,5
2 3/4	2,75	69,85	67,45	66,85
2 7/8	2,875	73,025	70,625	70,025
3	3	76,2	73,8	73,2

Dimensionera avgasrör – enligt A. Graham Bell

Formlerna som används här är baserade på ett antal körningar som Bell skriver att han gjort i en bromsbänk.

Avgasrörens längd beräknas i den här formeln med hänsyn till när utloppsventilen öppnar före NDP i avgastakten.

$$P = \frac{850 \cdot (180 + N)}{Rpm} - 3$$

P	Avgasrörets längd i tum
850	Faktor
180	Gradtal
N	Utloppsventilens öppnande före NDP i utloppstakten
3	Avståndet från avgasröret till ventiltallrikens centrum i tum

Om utloppsventilen öppnar 60 grader före NDP och att varvtalet är 6000 rpm så blir uträkningen.

$$P = \frac{850 (180 + 60)}{6000} - 3 = 31 \text{ tum} \quad 31 \text{ tum gånger } 2,54 \text{ cm} = 78,74 \text{ cm}$$

Rörets diameter får man genom följande formel.

$$ID = \sqrt{\frac{cc}{(P + 3) \cdot 25}} \cdot 2,1$$

ID	Avgasrörets inre diameter tum
cc	Cylinderns volym
P	Primärrörets längd i tum

Om cylindervolymer är 700 cc.

$$ID = \sqrt{\frac{700}{(31 + 3) \cdot 25}} \cdot 2,1 = 1,90 \text{ tum} \quad 1,90 \text{ gånger } 2,54 \text{ cm} = 4,8 \text{ cm}$$

Formeln för längden på rören ger något kortare rör än Smith & Morrisons rör. Diametern verkar stämma för motorer med en cylindervolym upp till ca 600 cm³ men rören blir för grova vid större cylindervolymer. Den stora diametern ger för låga gashastigheter.

Vilka formler är bäst?

Spridningen i resultaten beror i många fall på att man räknar på – eller avser – olika varvtal då rören ska fungera optimalt. Exempelvis så skriver Bell att man i hans formler ska sätta in varvtalet som gäller mellan max vridmoment och max varvtal. Formlerna i The V-Twin Tuners Handbook, som är samma formler som Bell använder, gäller för "the engine's rpm midpoint". I de formler som Smith & Morrison beskriver så ska man sätta in maxvarvtalet. Burn's, som är en känd tillverkare av headers och megafoner till amerikanska V8-motorer och V2-motorer hamnar vid sina beräkningar på något klenare och kortare rör än de formler som vi här har redovisat.

Detta visar lite av svårigheten att bara förlita sig på att enbart "skrivbordstrimma". Man kan gärna använda formeln som utgångsvärden men sen får man själv prova sig fram.

Två avgörande frågor som man bör ställa sig innan man sätter i gång och räkna på både insugningsrör och avgasrör är:

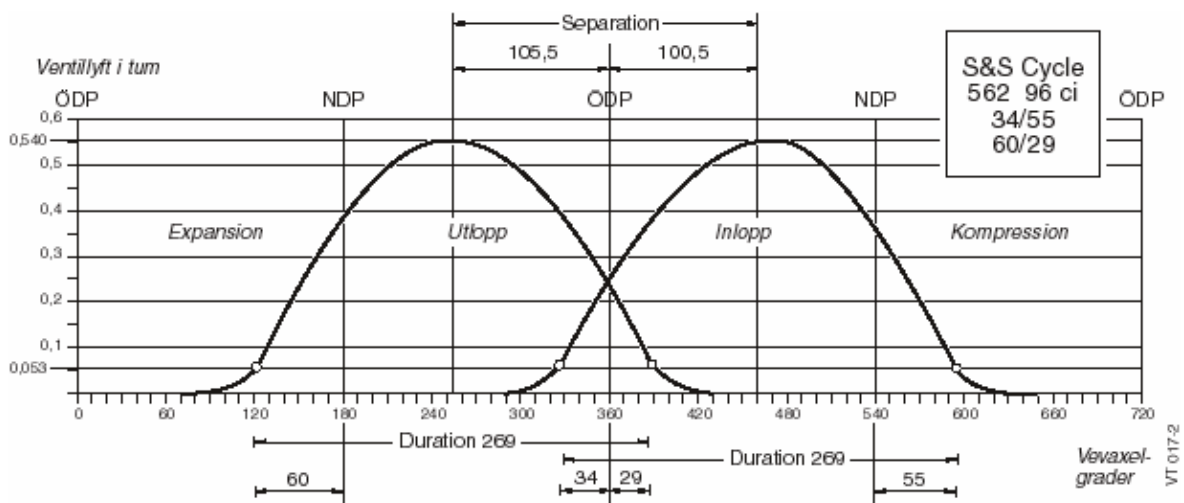
- Vilket varvtal vill jag stämma av till?
 - Mitt i varvtalsområdet?
 - Vid max vridmoment?
 - Vid varvtalet som nästa växel ger?
 - Mellan max vridmoment och max varvtal?
 - Vid max effekt?
 - Vid max varvtal?
- Gäller det avgasrör så är det också viktigt att känna till avgastemperaturen?

Löptider i avgasrör

En typisk motor

Antag att vi har en motor med en avgasventil, ett avgasrör och att motorn går med 6000 r/min. Det innebär att den går med 100 motorvarv per sekund. Den levererar då en avgaspuls och en ljudpuls vartannat motorvarv dvs 50 pulser per sekund. En hel fyrtaksssekvens är två motorvarv och 720 vevaxelgrader. Antalet vevaxelgrader som motorn roterar under en sekund är då $50 \times 720 = 36000$. Vi har tidigare räknat ut att avgasrören vid 6000 r/min bör vara ca 1,05 meter. Vi hade då antagit att avgstemperaturen var 500°C och att ljudhastigheten var 635 m/s. Vi har också antagit att den bästa hastigheten på avgaspulsen för bra partikelevakueringen är 80 m/sek.

När avgasventilen öppnar 60° före NDP – det är vid 120 vevaxelgrader i 720 graders cykeln – börjar avgasevakueringen på grund av trycket i cylindern med en knall. Avgaspulsen och ljudpulsen startar nu samtidigt sin resa i avgasröret. När avgaspulsen hunnit ungefär $1/8$ längd ut i avgasröret så har ljudpulsen nått avgasrörets slut och en negativ ljudbakpuls bildats och vänder tillbaka mot avgasventilen. När avgaspulsen hunnit ca $1/4$ väg ut i avgasröret är den negativa ljudbakpulsen vid avgasventilen. Tiden som förflutit är då $0,95 \times 2/635 = 0,0029921$ sekunder eller i vevaxelgrader 108 grader. Ljudpulsen $120 + 108 = 228$ hamnar något innan utloppsventilen nått sin största öppning mitt i utloppspulsen och är verksam 120 grader framåt, $228 + 120 = 348$ d v s strax innan ÖDP mellan utlopp och inlopp.

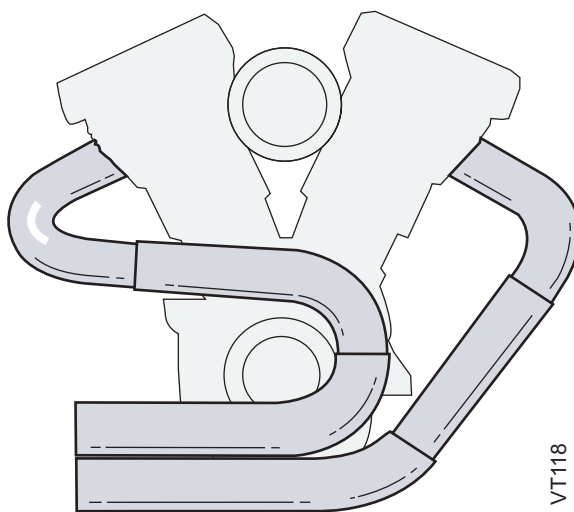


Ljudet ger upphov till en stående våg i avgasröret. Luftpelaren i avgasröret som har en längd på $\lambda = 1/8$ sätts då i kraftig vibration. Genom resonansfenomenet blir bakpulsens amplitud betydligt större än den ursprungliga ljudpulsen. Resonansen i avgasröret bibehålls genom att nya ljudpulser tillförs för varje vevaxelsekvens, d v s vid halva motorvarvet. Pulsens amplitud ökar också med kvadraten på varvtalet.

Stepped headers

Bättre än raka rör!

Rör med stegvis diameterökning, s.k. stepped headers är en form av expanderande rör eller "fusk megafoner" som ger en bättre avgasevakuering än raka rör. Man använder som regel tre sektioner som stegvis ökar i diameter. Den sektion som sitter närmast cylindern brukar vara 25 % av totallängden, sektion två 32 % av totallängden och sektion tre 43 % av totallängden. Diametern ökar vanligen 3-10 mm per sektion. Det är ganska praktiskt då tillgängliga avgasrör brukar ha en diameterökning som gör att rören passar i varandra. Det som händer i röret är att den tryckvågspuls som lämnar cylindern efterhand som den löper genom röret pressa ihop luften framför sig. Det innebär att tryckvågen successivt bromsas upp. Om man låter röret expanderar efterhand som trycket ökar kan man minska tryckstegringen och underlätta för avgaspulsen att passera genom röret. För varje diameterökning får man en negativ ljudbakpuls. Det gör att man får flera samverkande ljudbakpulser som fördelas över varvtalsområdet. Avstämningen täcker en bredd på ca 2000 r/min i varvtalsområdet men effektpuckelns höjd blir lägre än i ett rakt rör.



Expanderande rör.

När en ljudpuls i ett rör kommer till en expansion av rörets area så får man en mindre reflektion med motsatt fasläge och en fortsatt utbredning med samma fasläge som ursprungspulsen.

Totallängden på röret kan man beräkna på samma sätt som för ett avstämt rör. Då röret expanderar i två steg så ger det en kylande effekt på avgaserna, vilket gör att rören kan vara något kortare än då man använder parallella rör.

Rören till en 2 liters V2 motor som varvar 7000 r/min kan ha följande utförande:

Steg	Innerdiametern i tum	Innerdiametern i mm	Stegens längd i mm
1	2	50,8	222
2	2 1/8	53,9	284
3	2 1/4	57,15	382
			Totalt 888

Observera att totallängden gäller från ventiltallrikens centrum till rörets slut.

Kopplade avgasrör

Allmänt

Det är svårt att ge generella regler för hur man på ett enkelt sätt dimensionerar kopplade avgasrör. Anledningen är att det är stora skillnader på avgasrören för 2, 4, 5, 6 och 8-cylindriga motorer. Om motorn är rak eller av V-typ. Dels kan de flercylindriga motorerna ha olika tändföljd och dels olika vevaxeldelning.

En standardbil har normalt ett grenrör tillverkat i gjutjärn. Brukar på grund av formen kallas för avgaslimpa. Grenröret leder avgaserna från cylindrarna till en gemensam anslutning mot avgasröret. Den dåliga strömningen i den här typen av grenrör i kombination med dålig avstämning stjälar en hel del effekt från motorn. En vanlig trimning är därför att byta ut grenröret mot en kombination av avgasrör som har ett individuellt rör från varje cylinder. Rören kan beroende på hur de fungerar vara kopplade på två olika sätt nämligen som ett interferenssystem eller med oberoende rör.

Interferenssystem

I ett interferenssystem använder man korta primär-rör. Exempelvis kan en fyrcylindrig motor ha cylindrar 1 och 4 ihopkopplade och 2 och 3. De två grupperna kopplas senare ihop i ett gemensamt rör. När avgaserna från den ena cylindern lämnar cylindern så finns det dels ett öppet rör som avgaserna ska ut igenom och dels också ett rör som är slutet och som är kopplat på det andra röret. Det beror på att den andra cylindern befinner sig i kompressionstakten och att avgasventilen är stängd – röret är slutet. I det rör som är slutet får man en snabb och kraftig tryckstegring som reflekteras och sammanlagras med pulserna i röret som är öppet. Mätt i vevaxelgrader ger det en lång och kraftig undertryckspuls vid avgasventilen då kolven passerar ÖDP i utloppstakten. Resultatet blir en bättre avgasevakuerings än i ett enkelt rör.

Då de båda hopkopplade rören har en ömsesidig påverkan på varandra så kallas den här typen av avgassystem för interferenssystem.

Oberoende rör, d v s extraktorgrenrör eller headers

I ett oberoende system använder man långa primärrör som löper ihop i en kollektor. Längden beräknas som för avstämda avgasrör. Från kollektorn brukar man ha ett gemensamt och grövre rör eller megafon. För bra funktion och en kraftig negativ bakpuls låter man rören sluta tvärt i kollektorn.

Extraktorgrenrör eller headers?

System med individuella rör från varje cylinder brukar på europeiska bilar kallas för extraktorgrenrör och på amerikanska V8:or för headers. Det man avser är system med individuella och lika långa rör från varje cylinder som avslutas med en sammankoppling i en sk kollektor. Kollektorn kan mynna i ett grövre rör, en megafon eller ett avgasrör med ljuddämpare

Reflektion i slutet rör.

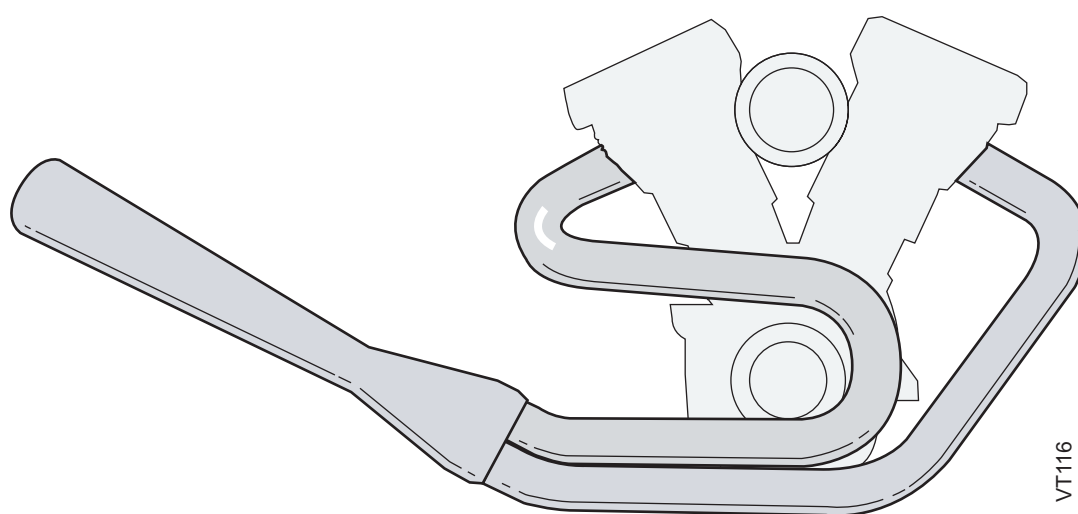
När en ljudpuls i ett rör reflekteras mot en sluten ände reflekteras en stor del av ljudvågen tillbaka. Den reflekterade ljudvågen har samma fasläge som den ursprungliga pulsen. Genom resonansfenomenet ökar amplituden så kraftigt och den vida överstiger amplituden på den ursprungliga pulsen.

Megafon

Funktion

Att en stor plåtratt fungerar som en ljudförstärkare är ett välkänt fenomen och har använts i bl. a mekaniska trattgrammofoner. Den ljudförstärkande effekten används också i blåsinstrument. Även högtalare för utomhusbruk använder trattens passiva ljudförstärkning.

När avgaspulsen når megafonen minskas pulsens rörelseenergi och dess amplitud på grund av trattens utvidgning. Den ljudförstärkande effekten i megafonen - och att den reflekterade pulsen vid en utvidgning av ett rör är i motfas mot ursprungspulsen - gör att en stor del av bakpulsens ljudinnehåll reflekteras tillbaka mot avgasventilen. Ljudet som lämnar megafonen är i samma fasläge som ursprungspulsen och har genom ljudförstärkningen hög ljudnivå.



Med en megafon som slutdel på avgasröret startar resonansfenomenet vid lägre varv och bibehålls upp till det varvtal som de primära rören är avpassade till. Rätt utformat kan det verksamma varvtalsområdet bli cirka 2000 r/min. Bakpulsen blir med en megafon längre i vevaxelgrader och även mycket kraftigare än i ett parallellt rör.

Konstruktion

Att inte alla racermotorer använder megafoner kan delvis bero på att funktionen inte är tillräckligt känd men kan också bero på att det krävs en hel del räknande och experimenterade innan det fungerar som det ska. De experiment som Smith & Morrison redovisar visar dock att även godtyckligt "tillyxade" trattar ger betydligt kraftigare bakpulser än ett parallellt rör.

Många – och väldigt olika bud

Det är svårt att ge några generella riktlinjer för hur en bra fungerande megafon ska vara utformad. De tre parametrarna längden, öppningsvinkeln och slutdiametern kan variera en hel del beroende på motorns utförande och användning. Den vanligaste formen är att mata megafonen med ett parallellt rör. Eller om motorn har flera cylindrar från ett antal parallella rör och en kollektor. Det förekommer även på V2-motorer att man matar megafonen från två rör utformade som stepped headers.

Diametern på hålet från kollektorn mot megafonen brukar för flercylindriga motorer vara större än rören som matar kollektorn. På en tvåcylindrig motor är hålet ut ca 10 % större än innerdiametern på rören till kollektorn.

Den bäst fungerande megafonen som Smith & Morrison redovisar har en öppningsvinkel som är i storleken 30°.

Bell redovisar en del erfarenhet om hur megafonens öppningsvinkel påverkar effektområdet för, OBS! 2-takts motorer. Den angivna vinkeln är den totala vinkeln.

10°-14°	Brett varvtalsområde utan markerad effektpuckel
16°	Ger bra och samlad effekt
18°	Mer effekt men då inom ett smalare varvtalsområde

När Ford i början på 60-talet utvecklade sin klassiska F1 V8-motor med 90° cylindervinkel så byggde de ett 100-tal olika avgassystem med och utan megafoner innan det slutliga systemet var klart. Resultatet blev ett så kallat ormbö med parallella och lika långa pipor som slutar i en kollektor med megafon. Enligt vad som framgår av bilder på motorn så har megafonerna en öppningsvinkel på ca 6° till 8°.

På V8 motorer i NHRA Pro Stock klass använder man megafoner som har en öppningsvinkel på 6° till 10° och en längd på 45-50 cm.

I slutet av 90-talet utrustade BMW sina F1 motorer med megafoner. Resultatet blev så bra att man på Williams-bilarna byggde in avgassystemet i karossen för att dölja konstruktionen för konkurrenterna. Vad som framgick av dem som "av misstag" sett systemet så är öppningsvinkeln något större än den vinkel man får i stepped headers.

Grundtipset för en bra fungerande megafon på en H-D motor som varvar 6500 till 7000 r/min och som har en kamaxel med ett överlapp över 60° och en kompression på över 13:1 är att öppningsvinkeln rimligen bör vara 6° till 8° och att trattens längd bör vara 45-50 cm.

Vridmomentet

En rätt fungerande megafon ger en rejäl vridmomentökning inom varvtalsområdet den är avstämd till men ger också en försämring vid lägre varvtal. På en del megafonkonstruktioner finns därför baktill en strypning i form av en stympad kon. Den bakre strypningen plattar till och vidgar vridmomentkurvan. Det kan också vara en bra och lämplig lösning på en standardmotor eller en motor där man vill ha ett brett varvtalsregister.

Appendix 1

Resonans

Ett fysikaliskt system som utsätts för en periodisk störning med en specifik frekvens och som kan lagra energi från störningen kan bringas i resonans. I vårt fall så består systemet av ett rör med en viss längd och diameter och en till viss del innesluten avgas eller luftvolym. Vågformerna som uppträder vid resonans kallas för stående vågor. De byggs upp när vågorna reflekteras i ett öppet eller slutet rör.

Grunden i resonansfenomenet är att systemet kan lagra energi. Det innebär att systemet kan bringas i svängningar som är avsevärt större än störningen. Förutsättningen är dock att störningens uppträder med en viss frekvens och att den ligger inom området där energin som lagras är större än energiförlusterna i systemet i form av exempelvis luftmotstånd, friktion i materialet etc.

Det finns ett intressant förhållande mellan den energi som lagras i systemet som är i resonans och den energi som går förlorad i systemet innan en ny störningspuls påverkar systemet. Det är resonanssystemets eller kretsens Q-värde. Eng. Quality factor. Kallas på svenska för godhetstal. Ju högre Q-värde desto högre blir amplitud i det svängande systemet.

Önskade, godartade och trevliga resonanser är de som uppstår i musikinstrument som i sträng- och blåsinstrument. Oönskade och oönskade resonanser kan få broar att störta samman ge rattfrossa i bilar och ge "oförklarliga" materialbristningar.

Superposition

När två pulser med olika riktning möts så kan man möjligen tänka sig att de skulle ta ut varandra och försvinna. Men så är inte fallet. De kan nämligen passera igenom varandra utan att pulsformerna förändras. Under själva krocken så uppstår det dock en ny puls som är summan av de två pulserna. Men efter krocken så återtar de ursprungliga pulserna sin form och fortsätter sin utbredning och summapulsen dör ut. Fenomenet kallas superpositionsprincipen.