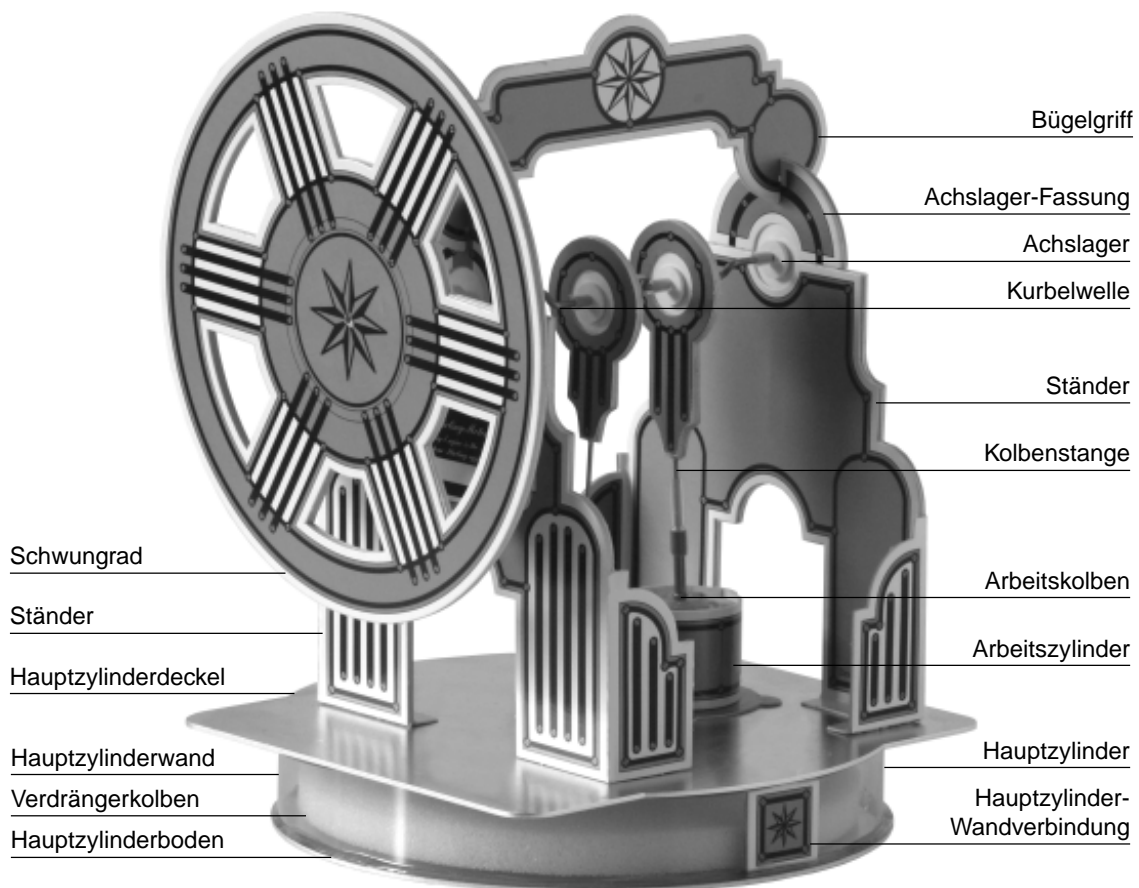


*Klaus Hünig*

# Der Stirling-Motor

## *Bauanleitung*



**AstroMedia**   
*Bastelspaß der Wissen schafft*

3. Auflage, ISBN 3-935364-36-9 - Best.-Nr. 228.STM - © Klaus Hünig - SunWatch Verlag - Grafik Nils Rhode



## Robert Stirling

Robert Stirling (1790 – 1878) était pasteur de l'Eglise Presbytérienne en Ecosse et un bricoleur passionné. Il vécut à l'époque de la première apogée de l'industrialisation dont les besoins en énergie furent satisfaits par des milliers de machines à vapeur inventées par James Watt en 1776. La pitié qu'il éprouvait pour les victimes des chaudières à vapeur qui explosaient régulièrement, fit mûrir en lui la vision d'une machine pouvant également travailler sans haute pression de vapeur.

Le 27 septembre 1816, il fit breveter un moteur à air chaud qu'il put mettre en service en 1818 dans une mine à Ayrshire comme pompe à eau. Avec son frère, il continua à développer sa machine avec laquelle il obtint finalement un degré d'efficacité encore jamais atteint de 18%. Il mourut le 6 juin 1878 à l'âge de 87 ans.

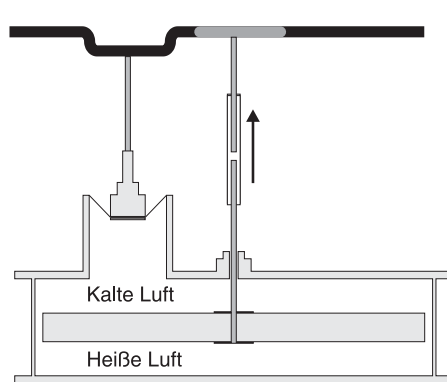
Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, il existait, dans le monde entier, env. 250.000 moteurs Stirling qui servaient de ventilateur de tables, de pompes à eau ou de moteurs pour petits appareils et alimentaient les ménages et les petites entreprises artisanales en énergie mécanique. L'apparition des moteurs à allumage commandé, des moteurs diesel et des moteurs électriques fit que les moteurs Stirling disparurent peu à peu du marché.

Ce n'est que maintenant, avec notre prise de conscience grandissante pour l'écologie et les prix du pétrole continuellement en hausse, que nous retrouvons de l'intérêt pour le moteur Stirling simple et silencieux. Entre-temps, de nombreux modèles ont été inventés, de plus en plus économiques et silencieux, avec de moins en moins de vibrations, et qui peuvent être chauffés avec n'importe quelle source de chaleur, dont également l'énergie solaire, ce qui est très favorable à notre environnement.

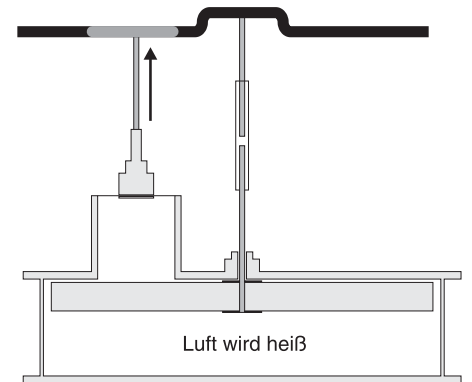
## Fonctionnement d'un moteur Stirling

Le principe est aussi génial que simple et peut s'expliquer en quatre phrases :

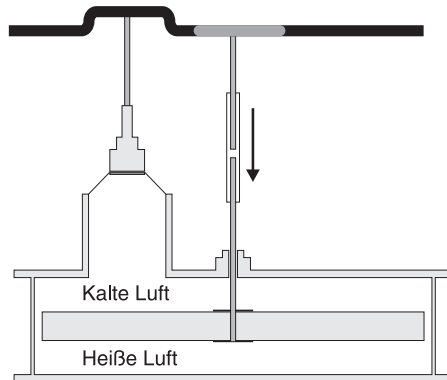
- Dans un cylindre étanche, chauffé d'un côté et refroidi de l'autre (« cylindre principal »), un piston (« piston déplaceur ») pousse l'air enfermé du côté chaud au côté froid et vis versa, dans un mouvement de va et vient permanent.
- Ainsi, l'air est alternativement réchauffé et refroidi, ce qui engendre une dilatation et contraction alternante de l'air et donc aussi une pression alternativement croissante et décroissante de celui-ci.
- Les pulsations engendrées par ce changement de pression d'air sont transformées en un mouvement de vilebrequin équipé d'un volant d'inertie, par le biais d'un piston (« piston moteur ») relié au cylindre principal.
- Une petite partie de l'énergie ainsi produite fait bouger le piston déplaceur ; de cette façon, le système se maintient lui-même en mouvement.



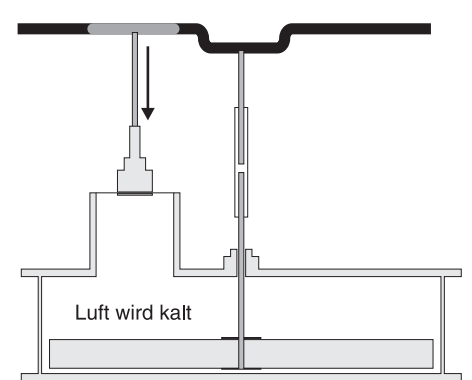
**Phase 1:** Le piston déplaceur monte. L'air est repoussé de la zone froide dans la zone chaude. La pression d'air est provisoirement la même à l'intérieur et à l'extérieur. Le piston moteur est arrivé en position basse (« point mort »).



**Phase 2:** Le piston déplaceur est arrivé au point mort supérieur. Tout l'air se trouve dans la zone chaude, se réchauffe et développe sa pression. La pression d'air est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. Le piston moteur doit lui céder et monte.



**Phase 3:** Le piston déplaceur redescend. L'air est repoussé de la zone chaude dans la zone froide. La pression d'air est provisoirement la même à l'intérieur et l'extérieur. Le piston moteur est arrivé au point mort supérieur.



**Phase 4:** Le piston déplaceur est arrivé au point mort inférieur. Tout l'air se trouve dans la zone froide, refroidit et perd sa pression. La pression d'air est plus grande à l'extérieur qu'à l'intérieur. Le piston moteur doit lui céder et redescend.

Le moteur Stirling d'AstroMedia fait partie de la famille des moteurs Stirling à fond plat. Ils ont un cylindre principal extrêmement plat et de très petites différences de températures suffisent déjà pour les faire tourner, certains d'entre eux fonctionnent même rien qu'en les posant sur la paume de la main. Le principe fut décrit pour la première fois en 1983 par le professeur Ivo Kolin de l'Université de Zagreb. Les moteurs Stirling modernes sont employés par ex. dans des installations à énergie solaire, dans lesquelles le côté chaud du cylindre principal se trouve dans le foyer d'un miroir parabolique, dans des centrales thermiques en montage-bloc pour maisons individuelles et, ce qui peut surprendre, dans le domaine spatial : des moteurs Stirling produisent du courant dans des sondes spatiales à partir des sources d'énergie radioactive se trouvant à bord. Le moteur Stirling peut également être utilisé comme thermopompe ou même groupe frigorifique : en le mettant en mouvement mécaniquement de l'extérieur, il pousse la chaleur d'un côté du cylindre principal à l'autre, causant ainsi un refroidissement ou un réchauffement.

Les moteurs Stirling utilisés industriellement disposent d'un soi-disant régénérateur qui augmente énormément leur puissance : un treillis de fils métalliques placé dans le déplaceur qui réduit en partie la chaleur de l'air qui passe et la lui rend quand il repasse refroidi.

## Conseils à suivre pour la réussite du montage

1. La notice de montage a été divisée en de nombreuses petites étapes. Au premier abord, elle semble très longue, mais elle permet un assemblage facile à réaliser et vous mènera à un résultat couronné de succès. Nous vous conseillons de lire chaque étape entièrement avant de la mettre en pratique.

2. Chaque pièce est dotée d'un nom et d'un numéro. Les lettres figurant devant les numéros correspondent à l'ordre d'assemblage et sont en grande partie les mêmes à l'intérieur de chaque groupe d'éléments. Le mieux est de ne détacher que les pièces dont vous aurez besoin en prochain ou bien notez le numéro de la pièce au dos de celle-ci.

3. Ne détachez pas les pièces du carton en tirant dessus mais coupez les points d'attache avec un cutter afin que les arêtes restent lisses.

4. Là, où le carton doit être plié, il est perforé de petites incisions, suffisantes pour réaliser le pliage. Cependant, les plis sont plus nets quand on trace avant un sillon dans le carton à l'aide d'une règle et d'une pointe non coupante (voir colonne de droite). Presque toutes les lignes perforées doivent être pliées « en avant », d'autres, peu nombreuses, « en arrière ». Plier « en arrière » signifie que : quand je regarde le côté imprimé du carton, la partie à replier s'éloigne de moi. « En avant » veut dire : je plie dans ma direction.

5. Les surfaces sur lesquelles seront collées d'autres pièces sont en général marquées de gris. Pour que le séchage des petites pièces à coller soit plus rapide, mettez une couche de colle universelle pas trop fine sur une des deux pièces, pressez les deux pièces l'une contre l'autre de façon à ce que la colle se répartisse bien sur les deux surfaces et détachez-les à nouveau. Soufflez 2 à 3 fois dessus, remettez les pièces bien en place et pressez fortement – la colle tiendra de suite.

6. En particulier les grandes surfaces plates à coller devraient être pressées pendant le séchage p.ex. avec quelques livres sur une surface plane, afin qu'elles ne gondolent pas.

## Das benötigen Sie für den Zusammenbau:

- Une **colle à deux composants**. Cette colle sera utilisée pour le collage de la paroi transparente du cylindre en PVC sur les tôles en aluminium.
- Une bonne **colle universelle**, si possible avec busette pointue pour bien doser et bien répartir même les petites gouttes de colle. L'avantage d'une colle universelle à dissolvant par rapport à une colle sans dissolvant à base d'eau, est que la colle à dissolvant ne fait pas onduler le carton et sèche beaucoup plus vite.
- Un peu de **papier de verre** fin pour rendre un peu rugueuses les surfaces à coller et pour lisser, si nécessaire, les bords de carton.
- De l'**alcool à brûler** ou autre pour dégraisser les parties de métal à coller.
- Un peu d'**huile de silicone** ou d'huile pour machines, liquide et ne résinant pas (huile à machine à coudre, pas d'huile alimentaire !). Une seringue à canule pour appliquer avec précision les gouttelettes d'huile serait très pratique.
- Une **petite tige en bois**, p.ex. un cure-dent, pour appliquer avec précision les gouttelettes d'huile et de colle.
- Une grande **tasse** ou autre récipient d'env. 10 cm de diamètre sur lequel on pourra déposer le cylindre principal pendant le montage.
- Une petite paire de **ciseaux** et un couteau de bricolage coupant (cutter, p.ex. le couteau de bricolage d'AstroMedia) ou un scalpel à pointe fine pour couper les points d'attache par lesquels les pièces sont maintenues dans les plaques de carton et pour découper les lignes qui ne sont qu'estampées.
- Une **pointe de pliage** ou autre objet à pointe non coupante pour tracer les sillons sur les lignes de pliage. Un **couteau non coupant** ou une **mine de stylo** vide feront également l'affaire.
- Un **plan de travail pour les coupes** p.ex. en carton épais (pas de carton ondulé) ou en matière synthétique ou en bois.
- Une **équerre** pour vérifier les angles droits. Ceci peut se faire aussi avec les coins rectangulaires d'une feuille de papier.
- Un gros **stylo-feutre** (Ø env. 17 mm), une baguette ronde ou autre objet similaire avec une extrémité plate et non arrondie. Elle servira au cintrage de quelques petites pièces en carton et à l'assemblage du piston moteur en latex.
- Une petite **pince universelle** pointue ou une pince à épiler solide pour l'ajustage de précision final.
- Quelques **pinces à linge** ou **trombones**, un **crayon**, de la **bande adhésive (scotch)**, un **élastique** et un peu de **fil à coudre** fin.

## Ce modèle réduit se compose de :

- 4 plaques de carton de 0,5 mm d'épaisseur, imprimées et prédécoupées
- 1 plaque ronde Ø 126 mm en aluminium (fond du cylindre principal)
- 1 plaque 126 x 126 avec 2 trous en aluminium (couvercle du cylindre principal)
- 2 bandes transparentes de feuille en PVC de 0,5 mm d'épaisseur et 18 mm de large (paroi du cylindre principal)
- 2 tubes fins de 18 mm de long en laiton (glissière de la tige du piston déplaceur et support de la tige du piston moteur)
- 1 tuyau en silicone, long de 110 mm (pour le raccord des tiges de pistons et la fixation des rondelles-paliers d'axe)
- 1 gant en latex (joints en latex pour le piston moteur)
- 1 disque de mousse synthétique 113 x 8 mm pourvu d'un trou (piston déplaceur)
- 3 fils d'acier à ressorts Ø 1,0 mm avec petit crochet (tiges de pistons)
- 1 fil d'acier à ressorts Ø 1,5 mm avec 2 manetons, 117 mm de long (vilebrequin)
- 4 grandes rondelles avec trou, en PVC dur (rondelles-paliers d'axe pour le vilebrequin, le piston déplaceur et le piston moteur)
- 8 petites rondelles avec trou, en PVC dur (rondelles de guidage pour les rondelles-paliers d'axe)

**Remarque importante au préalable :** Comme tout autre moteur, ce moteur Stirling doit être monté minutieusement pour qu'il fonctionne sans problème, d'autant plus que la seule source de chaleur n'est qu'une tasse d'eau bouillante. Les deux conditions les plus importantes d'un bon fonctionnement sont l'**étanchéité** du cylindre principal et cylindre moteur et la **bonne mobilité**, sans frottements, de l'ensemble des pièces mobiles. Veuillez accorder à ces deux points une attention particulière. Prenez votre **temps** et ayez de la **patience**, en particulier pour l'ajustage à la fin de l'assemblage proprement dit. La récompense de vos efforts sera une belle maquette avec une durée d'action de la tasse particulièrement longue. Les pas d'assemblage et tests d'une importance particulière seront mis en valeur, comme ce paragraphe, sur un fond foncé.

L'assemblage s'effectue en **64 étapes** regroupées en phases **A** à **O**.

## Phase A:

### Volant d'inertie

Bien que le volant d'inertie soit fixé sur le moteur en dernier, on en a cependant besoin dès le début de l'assemblage car il sert provisoirement d'outil pour le collage de la paroi du cylindre principal.

**Etape 1 :** Tracez un trait vertical au crayon sur la face recto grise des deux pièces centrales du volant (A1) et (A2) ainsi que sur la face verso vierge de la pièce extérieure (A3) et de la pièce intérieure (A4). Détachez ensuite les pièces du carton et les morceaux intercalaires des disques. Conservez ces morceaux intercalaires qui pourront servir plus tard lors du gonflage du moteur (v. chapitre « Conseils pour le gonflage » à la fin de la notice de montage).

**Remarque :** Le trait de crayon marque le sens du carton. Le papier et le carton d'impression ont toujours un sens dans lequel le matériau est plus souple que dans le sens perpendiculaire. Si on tient compte du sens pour le collage, on peut faire du carton un composé résistant aux distorsions, comparable au contreplaqué.

**Etape 2 :** Le trou situé au centre des 4 pièces dans lequel sera introduit plus tard le vilebrequin a un si petit diamètre qu'il n'a été qu'estampé. Percez-le avec l'extrémité du vilebrequin du côté verso. Si cela est nécessaire, vous pouvez au préalable faire des petites incisions sur la périphérie de la découpe avec la pointe de votre cutter.

**Etape 3 :** Collez les deux pièces centrales du volant (A1) et (A2) en collant les côtés versos vierges l'un contre l'autre de telle façon que les traits de crayon soient dans le même sens, c'est à dire que le sens du carton des deux pièces soit le même. Quand la colle aura pris, collez la pièce extérieure (A3) et la pièce intérieure (A4) sur les pièces centrales en décalant le sens d'un rayon de roue. Pressez et laissez bien sécher.

## Phase B:

### Paroi et fond

#### du cylindre principal

La plaque alu de forme ronde formera le fond du cylindre principal, l'autre plaque en sera le couvercle. Pour des raisons techniques, il est possible que ces plaques aient une belle face et une autre moins belle présentant p. ex. des égratignures ou autres. Dans ce cas, effectuez l'assemblage de façon à ce que le côté moins beau se trouve à l'intérieur du cylindre.

La paroi du cylindre principal est constituée de 2 bandes de feuille en PVC transparentes qui seront reliées ensemble pour former un anneau et seront d'abord collées sur le

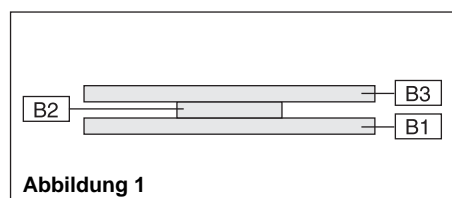
fond. Pour donner une forme parfaitement ronde à cet anneau lors du collage sur le fond, nous aurons besoin du volant d'inertie.

**Etape 4 :** Retirez la feuille de protection, s'il y en a une, de ces deux plaques aluminium. Dégraissez et nettoyez la plaque ronde (le fond du cylindre principal) avec un chiffon et un peu d'alcool à brûler. Si vous voulez préparer le moteur de façon à ce qu'il fonctionne aussi à l'énergie solaire (voir phase O, conseils pour le gonflage), vous pouvez déjà peindre en noir les « belles » faces des plaques qui seront sur le côté extérieur du cylindre principal. Veillez à ne pas mettre de peinture dans le petit trou et laissez-la bien sécher.

Posez le volant d'inertie bien centré sur la face la moins belle qui débordera d'env. 3 mm de tous les côtés et tirez un trait tout autour avec un crayon ou un stylo fin pour obtenir un trait circulaire sur la plaque. Rendez la tôle légèrement rugueuse le long et à l'intérieur de ce trait avec le papier de verre. Cela renforcera l'adhérence de la colle et une surface rugueuse transmettra mieux la chaleur à l'air enfermé dans le cylindre. Repassez ensuite le trait au crayon. Il vous aidera plus tard à bien répartir la colle à 2 composants.

Dégraissez et nettoyez par la même occasion l'autre plaque, le futur couvercle du cylindre, ainsi que les deux bandes de PVC qui formeront la paroi de ce même cylindre.

**Etape 5 :** Collez la pièce centrale du raccord (B2) de la paroi du cylindre au centre du dos de la pièce extérieure (B1). Comme la pièce centrale (B2) a la même hauteur, mais ne fait qu'un tiers de la largeur de la pièce extérieure, il en résulte un débord de 6 mm de chaque côté. Veillez à ce que la colle ne déborde pas sur cette partie. Collez ensuite l'autre pièce extérieure (B3) dessus. On obtient ainsi un raccord carré ayant une fente de 6 mm de profondeur des deux côtés, dans laquelle on enfoncera les extrémités des bandes PVC qui iront parfaitement dedans. (v. fig.1). Procédez de même avec les pièces (B4), (B5) et (B6) de l'autre raccord.



**Etape 6 :** Frotter légèrement des deux côtés les deux extrémités des deux bandes transparentes en PVC de la paroi du cylindre sur une largeur de 4 mm avec le papier de verre. La surface rendue ainsi rugueuse permettra à la colle de mieux s'accrocher que sur le plastique lisse.

**Remarque :** Pour les deux étapes suivantes, faites en sorte que la taille de l'anneau-cylindre soit telle que le volant d'inertie, qui sert de support provisoire, aille tout juste dedans.

**Etape 7 :** Mettez un peu de colle dans les deux fentes de l'un des raccords de la paroi du cylindre, enfoncez de 5 mm (donc pas entièrement), dans chacune de ces fentes, une des extrémités rugueuses d'une des bandes de paroi et essuyez, le cas échéant, les excédents de colle. La pièce de carton carrée relie maintenant les deux parties de la paroi du cylindre en une seule bande de 37 cm env. de longueur. Collez ensuite l'autre raccord à l'une de ces deux extrémités mais ne fermez pas encore le cercle. Pour vous assurer qu'aucun angle ne se forme aux raccords et que les deux bandes forment bien une ligne droite, posez cette unité sur son arête sur une surface plate. Si nécessaire, fixez les parties collées, le temps du séchage, avec des trombones ou des pinces à linge.

**Etape 8 :** Posez le volant d'inertie sur votre plan de travail et reliez, d'abord sans colle, les deux extrémités de la paroi du cylindre pour former un anneau. Celui-ci doit bien épouser la forme du volant. Si nécessaire, raccourcir un peu l'une des bandes en PVC. Retenez bien la profondeur à laquelle l'extrémité de la bande doit être enfoncé dans la fente du raccord pour que le volant ait juste de la place et puisse être coincé, et collez le tout en forme d'anneau après avoir retiré le volant. Veillez de nouveau à ce qu'il n'y ait ni angle ni différence de niveaux dans le bord de la paroi du cylindre. Fixez les parties collées avec des trombones ou des pinces à linge et laissez bien sécher.

**Etape 9 :** Posez le volant d'inertie dans l'anneau-cylindre de façon à ce qu'il soit bien coincé. Calez-le éventuellement avec des petits morceaux de carton. Il devrait être placé un peu au-dessus du centre et ne doit pas toucher les bords de la paroi du cylindre. Le volant donne à la paroi souple du cylindre une forme ronde stable. Il ne sera retiré qu'à la 15<sup>ème</sup> étape, quand la paroi du cylindre sera collée sur le fond du cylindre.

**Etape 10 :** Prenez le couvercle du cylindre principal, collez un morceau de scotch sur le petit trou au centre de la « moins belle » face et posez la plaque avec le scotch au-dessous sur votre plan de travail. Arrondissez légèrement les arêtes d'un des deux côtés de chacun des deux tubes en laiton avec du papier de verre. Cela permettra plus tard d'enfiler plus facilement le tuyau de silicone par dessus. Mettez un des tubes de côté et enfoncez l'autre dans le trou du couvercle du cylindre principal. Il fait partie du système de guidage de la tige du piston déplaceur. Il ne sera pas collé maintenant, mais après la prochaine étape.

**Etape 11 :** Préparez une quantité suffisante de colle à deux composants et déposez-en un filet de plusieurs millimètres de largeur et pas trop fin sur le cercle tracé au crayon

sur le fond du cylindre principal, en débordant de part et d'autre du trait, là où sera placée la paroi du cylindre. Posez la paroi du cylindre - avec le volant d'inertie placé à l'intérieur - sur la colle et faites-la tourner de quelques millimètres dans un sens puis dans l'autre pour être sûr que le bord de la paroi est complètement enduit de colle. Contrôlez minutieusement pour vous assurer qu'il y a bien de la colle partout autour de l'angle extérieur formé par la paroi et le fond du cylindre et bouchez les trous éventuels avec une gouttelette de colle. Pour parfaire l'étanchéité de la paroi du cylindre sur la plaque, vous pouvez l'alourdir en posant dessus, avec précaution, un livre ou autre objet similaire.

**Test :** Avant de mettre cet assemblage de côté pour laisser à la colle le temps de prendre, assurez-vous encore une fois que la paroi du cylindre ne s'est pas déplacée et qu'elle est toujours bien centrée sur le fond du cylindre, c'est-à-dire que le débord du disque doit être le même sur toute la circonférence.

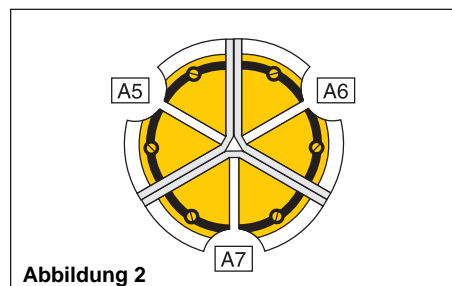
**Etape 12 :** A l'aide d'un cure-dent, appliquez un peu de colle à 2 composants dans l'angle formé par le tube en laiton et le couvercle du cylindre dans lequel il est enfoncé. Faites tourner le tube avec précaution et soulevez et baissez-le un peu en même temps afin que la colle s'étale bien entre la plaque et le tube. De l'autre côté de la plaque, le tube se trouve à ras de la surface du couvercle grâce au scotch ; il ne dépasse pas.

**Test :** Avant que la colle ne prenne, vérifier l'angle entre le tube et le couvercle du cylindre à l'aide d'une équerre ou d'un coin de feuille de papier rectangulaire. Il doit être de 90° de tous les côtés. Le système de guidage de la tige de piston (glissière) doit être exactement perpendiculaire au couvercle du cylindre, faute de quoi le piston déplaceur ne pourrait pas se déplacer parallèlement au fond et au couvercle du cylindre principal.

**Etape 13 :** Après la prise de la colle, sortez le volant d'inertie du cylindre principal et soumettez celui-ci à un nouveau contrôle visuel. La colle doit former une jonction parfaite, sans vides, du fond et de la paroi du cylindre, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Retirez également le scotch du couvercle du cylindre principal et vérifiez d'en haut, en utilisant l'une des 3 tiges de piston en fil métallique fin, si celle-ci peut coulisser librement. Retirez les restes de colle éventuels en vous servant du fil métallique.

**Etape 14 :** Maintenant, vous n'avez plus besoin du volant d'inertie comme auxiliaire d'assemblage et pouvez donc finir de le monter. Pour cela, détachez de la plaque de carton les 3 éléments du support de l'axe du volant (A5), (A6) et (A7), tracez un sillon sur les lignes de pliage marquées de petites incisions et pliez-les en avant. Les deux lignes parallèles estampées très proches

l'une de l'autre sont également à sillonner ; pliez-les aussi en avant. Les parties en forme de parts de gâteau et marquées d'un trait noir et d'une tête de vis seront collées plus tard sur le volant. En ce qui concerne les 2 volets supérieurs à doubles courbes, collez chacun d'eux dos à dos avec le volet correspondant d'un autre élément du support de l'axe. Le tout - vu d'en haut - ressemble à la fin, à une étoile à 3 branches, au pied de laquelle pendent les languettes à coller marquées du trait noir et de la tête de vis (voir fig.2).

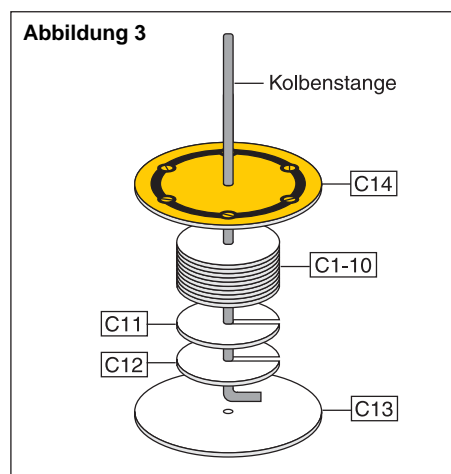


**Etape 15 :** Introduisez la longue extrémité du vilebrequin, d'abord par le dessous, dans le centre des trois branches le long des doubles lignes sillonnées et formez ainsi le canal pour le fil métallique. Retirez ensuite le vilebrequin, réintroduisez-le par l'autre côté du canal et enduisez les languettes de colle. Introduisez alors le vilebrequin dans le trou au centre du volant d'inertie, et cela, du côté où se trouvent les marques de collage pour les languettes. Poussez alors le support sur le vilebrequin contre le volant d'inertie et collez les trois paires de languettes sur les marques grises. Pendant cette phase, veillez à ce que le volant d'inertie soit bien d'équerre avec le vilebrequin pour éviter que, plus tard, il ne voile pas en tournant. Après le séchage, retirez le vilebrequin ; le volant d'inertie sera fixé au moteur en dernier.

**Remarque :** Avant de pouvoir finir de coller le cylindre principal, il faut d'abord monter le piston déplaceur, le cylindre moteur et le piston moteur.

## Phase C: Piston déplaceur

Le piston déplaceur est constitué du disque de mousse de 8 mm d'épaisseur et d'un support en carton (C1 à C14) (voir fig. 3) qui sera fixé dans le trou en son centre. C'est dans ce support que sera fixée la tige du piston en fil métallique.



**Etape 16 :** Percez les trous des rondelles (C1) à (C10) avec l'extrémité d'une des 3 tiges de piston. Les rondelles (C11) et (C12) ont à la place d'un trou, une fente étroite seulement estampée qui va du centre au bord. Découpez complètement cette fente, retirez le morceau de carton découpé et collez les 12 rondelles les unes sur les autres en veillant à ce que les fentes des 2 dernières rondelles soient bien superposées (voir fig. 3). Passez immédiatement à l'étape suivante.

**Etape 17 :** Avant que la colle ne sèche, enfilez la longue extrémité d'une tige de piston dans le bloc de rondelles en carton de façon à ce que le petit crochet vienne se ranger dans la fente et collez ce bloc au centre de la rondelle un peu plus grande (C13) sur sa face non imprimée ; ne tenez pas compte du petit trou dans son centre. Faites un essai en enfonçant, par en dessous, la longue extrémité de la tige dans le tube en laiton situé au centre du couvercle du cylindre principal et contrôlez en poussant et en appuyant sur le bloc en carton, que celui-ci est bien à plat sur la plaque et qu'en tournant la tige de piston, il ne voile pas. Vous pouvez, de cette manière, vous assurer que la tige du piston dépasse bien du carton dans un angle droit.

**Important :** La longue extrémité du fil métallique doit sortir perpendiculairement du bloc. La tige du piston doit être d'équerre avec le bloc.

**Etape 18 :** Enfillez maintenant la rondelle (C14) sur la tige du piston selon fig. 3, d'abord sans colle, et contrôlez l'épaisseur totale du support en carton en le posant à côté du disque en mousse. Elle variera un peu en fonction de l'épaisseur de la colle et ne devra être que d'env. 7 à 7,5 mm max.; elle devra dans tous les cas être légèrement inférieure aux 8 mm de la mousse. Si cela s'avère nécessaire, il faudra retirer la dernière des petites rondelles avec un couteau. Collez ensuite la grande rondelle (C14). Le disque de mousse ne sera posé sur le support en carton qu'à la prochaine étape, quand celui-ci sera sec.

**Etape 19 :** Une fois le support en carton sec, enfoncez-le dans le trou du disque de mousse en tirant un peu sur la mousse. La tige du piston se trouve maintenant exactement au milieu de la mousse.

**Test :** Enfoncez la tige du piston déplaceur dans le tube en laiton situé dans le couvercle du cylindre principal par dessous. Tenez-le tout verticalement et faites tourner le déplaceur sur lui-même en faisant tourner la tige du piston entre vos doigts. De cette façon, vous pouvez tout de suite constater si le disque de mousse est bien perpendiculaire à la tige du piston ou s'il voile. Corrigez s'il le faut. Profitez de l'occasion pour vérifier une nouvelle fois l'angle du tube en laiton par rapport au couvercle du cylindre principal qui doit être droit et corrigez-le si nécessaire.

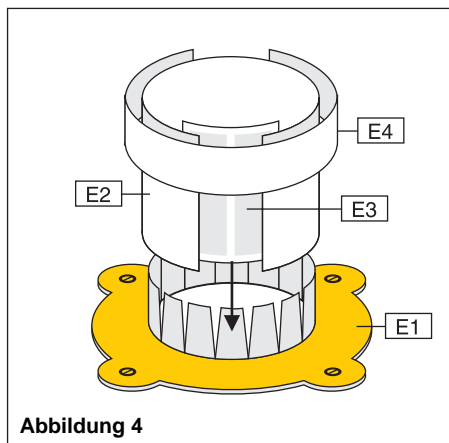
**Etape 20 :** Retirez le piston déplaceur de la glissière et fixez définitivement le support en carton avec quelques gouttes de colle qui seront appliquées avec un cure-dent entre les rondelles extérieures et la mousse. Pour plus de sûreté, vérifiez de nouveau l'angle comme ci-dessus – le bon fonctionnement du moteur en dépendra aussi.

**Etape 21 :** Percez les trous au centre des pièces (D1) à (D12) du support de la glissière de la tige du piston. Collez d'abord la grande rondelle de carton (D1) sur le couvercle du cylindre principal en l'enfilant sur le tube en laiton. Si elle ne peut pas être bien à plat sur la plaque à cause de la colle à 2 composants située entre le tube et le couvercle, il faudra agrandir le trou dans le carton. Collez ensuite les grandes rondelles restantes (D2) à (D8) par dessus et finalement, les rondelles un peu plus petites (D9) à (D12). Vous obtenez ainsi un petit bloc compact qui stabilisera la glissière de la tige de piston.

## Phase D: Cylindre moteur

Les pièces du cylindre moteur (E1) à (E6) se trouvent sur la feuille de carton 3/4. Ayant utilisé la même presse de prédécoupage pour la feuille 4/4, on retrouve dessus les doubles de ces pièces dont on n'a pas besoin et qui pourront servir de réserve. Si vous les gardez, vous pourrez ainsi remplacer les pièces originales éventuellement endommagées.

Le cylindre moteur (fig. 4) se compose d'un petit cylindre en carton (E2, E3) posé sur un fond (E1), pourvu d'une bordure (E4) en haut à l'extérieur et qui sera monté sur le gros trou du couvercle du cylindre principal. Le piston moteur (fig. 5) est composé d'un petit bloc de rondelles en carton (F1 à F10) avec un joint d'étanchéité en latex qui sera découpé dans un doigt de gant en latex. Le piston sera collé sur le joint en latex qui sera enfilé et attaché sur le cylindre moteur et assurera ainsi l'étanchéité et en même temps la mobilité. Pour cacher le latex, on collera, à la fin, la paroi extérieure (E5 + E6) autour du cylindre moteur.



**Etape 22 :** Frotter la paroi intérieure du cylindre moteur (E2) contre un angle et/ou enroulez-la autour d'un gros stylo feutre, un manche en bois ou autre objet similaire pour qu'elle ait une forme cylindrique régulière. La bande grise de collage prévue pour la bordure doit se trouver à l'extérieur. Arrondissez aussi la pièce de raccordement de la paroi intérieure (E3). Collez ensuite la pièce de raccordement derrière les deux extrémités de la paroi intérieure de manière à ce qu'elle soit cachée et que les bords de la paroi se touchent. Donnez au cylindre en carton un arrondi régulier en le manipulant avec précaution.

**Etape 23 :** Détachez la petite rondelle centrale du fond du cylindre moteur (E1) et repliez en avant les 14 dents dirigées vers le centre (repassiez éventuellement sur les lignes prédécoupées). Posez, à titre d'essai, la paroi intérieure du cylindre sur la couronne de dents de façon à ce que celles-ci soient à l'intérieur du cylindre et que la bande grise sur la paroi se trouve en haut, pas du côté des dents. Collez la paroi du cylindre dans cette position sur les dents avec de la colle en abondance.

**Important :** Le joint entre la paroi du cylindre et le fond doit être parfaitement étanche et ne doit pas avoir de fentes. Après le séchage, pour empêcher qu'il n'y ait de passages d'air à cet endroit, étalez, à nouveau, abondamment de colle de l'intérieur sur et entre les dents et sur le joint entre la paroi et le fond. Laissez bien sécher et enduisez une nouvelle fois de colle pour plus de sûreté.

**Etape 24 :** Arrondissez la bordure (E4) comme dans l'étape 22 et n'en collez d'abord que la moitié sur la zone grise à l'extérieur de la paroi du cylindre, mais pas là où les bords de la paroi se rejoignent, car la bordure doit recouvrir ce joint (les lignes de jonction de la paroi du cylindre et de la bordure doivent être décalées). A titre d'essai, enroulez-la ensuite tout autour et coupez le débord éventuel de façon à ce que les deux extrémités se rejoignent exactement bout à bout sans laisser de fente. Maintenant collez-la. Les petits espaces vides éventuels seront bouchés à la colle, les plus grands avec un morceau de carton.

## Phase E: Piston moteur

**Etape 25 :** Découpez l'index du gant en latex à une longueur d'env. 3,5 à 4 cm à partir du bout du doigt. Enfilez ce doigt de latex sur la pointe d'un crayon ou autre objet similaire de manière à ce que la pointe appuie bien sur le point culminant du bout du doigt. Tenez le bout du doigt de latex au-dessous de la pointe de façon à ce que celle-ci dépasse de vos doigts comme un petit bourgeon et retirez le crayon. Coupez ensuite la pointe du latex exactement au centre avec des ciseaux pour obtenir un trou de 4 à 6 mm de diamètre.

**Remarque :** Les autres doigts et le pouce du gant peuvent être utilisés comme pièces de rechange. - Les rondelles de carton (F1) et (F3) du piston moteur n'ont pas de trou. Dans les prochaines étapes, elles seront collées à l'intérieur et à l'extérieur du joint en latex et refermeront ainsi le trou.

**Etape 26 :** Enfilez le joint en latex sur le dos lisse et émoussé d'un gros stylo-feutre ou autre objet similaire d'env. 17 mm de diamètre et fixez-le avec un élastique légèrement serré. Tirez et tendez le joint de tous les côtés vers le bas avec précaution jusqu'à ce que le trou soit bien à plat sur le dos plat du stylo-feutre. Collez la rondelle de carton (F1) dessus en veillant à ce qu'elle soit centrée sur la pointe du doigt de latex, même si le centre du trou ne l'est pas exactement. Si vous constatez que le trou n'est pas exactement centré sur la pointe du doigt, cela ne fait rien car, en fin de compte, la rondelle le recouvrira. Laissez bien sécher. (Le fait que la rondelle colle sur le stylo à l'endroit du trou n'est pas un problème, elle se détachera facilement.)

**Important :** Il faut que la rondelle de carton soit centrée sur la pointe (qui a été découpée) du doigt de latex et non nécessairement sur le centre du trou qui pourrait être légèrement de travers, sinon elle serait, elle aussi, de travers sur le joint en latex. La colle ne doit pas dépasser de la rondelle et souiller le latex. Elle formerait une couche dure sur la peau en caoutchouc qui perdrait ainsi son élasticité.

**Etape 27 :** Retirez le joint du stylo-feutre, retournez-le et enfillez-le à nouveau dessus de sorte que la rondelle (F1) se trouve à l'intérieur. Collez la rondelle (F3) exactement sur la rondelle (F1). Les deux rondelles sont maintenant collées non seulement au latex mais aussi l'une sur l'autre à travers le trou.

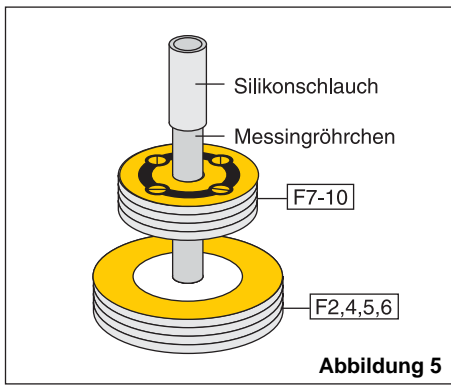


Abbildung 5

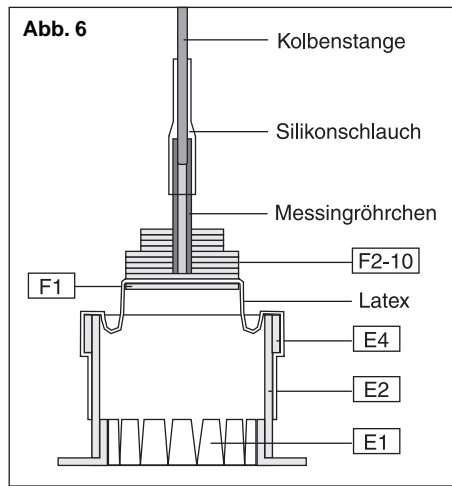
**Etape 28 :** Détachez les autres rondelles du piston moteur et percez-en les trous par derrière à l'aide p.ex. du deuxième tube en laiton. Collez d'abord les grandes rondelles (F2), (F4), (F5) et en dernier (F6) les unes sur les autres, ensuite sur ce bloc, les plus petites (F7), (F8), (F9) et en dernier (F10), les trous toujours bien les uns au-dessus des autres. Contrôlez si le tube en laiton entre bien dedans.

**Etape 29 :** Coupez un morceau de tuyau en silicone de 16 mm de long et enfoncez-le de 5 mm sur le tube en laiton. Il servira plus tard de pièce d'accouplement entre le piston moteur et la tige du piston. Pour faciliter la chose, utilisez comme outil l'une des deux tiges de piston restantes que vous enfoncerez dans le tube en laiton ; enflez alors le tuyau en silicone d'abord par dessus la tige et ensuite par dessus le tube. Retirez la tige de piston, tirez et poussez sur le silicone jusqu'à ce qu'il soit bien droit sur le tube. Nettoyez le tube encore une fois par précaution avec la longue extrémité de la tige de piston. Collez-le dans le bloc de carton et ensuite le bloc de carton sur la rondelle (F3) collée sur le joint en latex.

*Le piston moteur est maintenant terminé et peut être monté sur le cylindre moteur.*

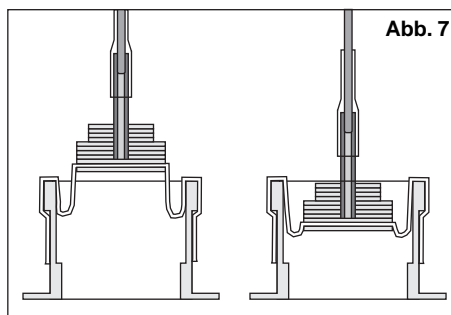
## Phase F: Montage du cylindre moteur et du piston moteur

**Etape 30 :** Enflez le joint du piston moteur, après le séchage, par dessus la bordure (E4) du cylindre moteur (voir fig. 6). Tirez sur le latex de tous les côtés jusqu'à ce que le piston équipé du tube en laiton soit placé juste au-dessus du centre du cylindre et se dresse à la verticale. Le petit bloc de carton du piston doit se situer entre 6 et 8 mm au-dessus du cylindre. En appuyant dessus pour le faire rentrer dans le cylindre, il doit descendre de 6 à 8 mm aussi au-dessous de l'arête supérieure du cylindre ; la hauteur du mouvement vertical est donc au total de p.ex.  $6 + 6 = 12$  mm. Elle peut être légèrement supérieure ou inférieure, mais pas inférieure à 10 mm. En maintenant le cylindre moteur à l'horizontale au-dessus d'une règle et en faisant rentrer et sortir le piston moteur, vous pourrez vérifier avec exactitude la hauteur de déplacement et la corriger s'il le faut.



### Premier test de fonctionnement – piston moteur :

*Vérifiez minutieusement si le bloc de carton équipé du tube en laiton exécute facilement et sans résistance le mouvement de va et vient. Le bloc doit se trouver au centre du joint en latex qui doit être pareillement souple de tous les côtés. Il ne doit pas se former de faux pli pouvant gêner le mouvement du piston, ce qui fait normalement un certain bruit. Si c'est le cas, essayez d'agrandir la partie mobile du joint et de positionner le bloc plus haut ou plus bas de manière à ce qu'il s'enfonce plus dans le cylindre ou bien en ressorte plus pendant une phase de déplacement, dans le but d'obtenir la liberté de mouvement voulue du piston. A la fin, la hauteur de déplacement doit toujours être d'un peu plus de 10 mm. Au cas où vous devriez changer le joint, vous savez que vous disposez encore de doigts de latex.*



**Etape 31 :** Entourez plusieurs fois le joint de fil à coudre au-dessous de la bordure du cylindre moteur et faites un nœud pour fixer le joint dans cette position et en même temps le rendre étanche à l'air. Rabattez vers le haut le bord du latex s'il est trop long. Posez ensuite le cylindre moteur bien centré au-dessus du trou du couvercle du cylindre principal dans la position où il sera collé plus tard et tracez le contour de son fond avec un crayon pour démarquer ainsi la surface de collage.

## Phase G: Montage final du cylindre principal

**Etape 32 :** Coupez un deuxième bout de tuyau en silicone de 16 mm de long et enflez-le de 5 mm sur le tube en laiton de la glissière du déplaceur qui dépasse au milieu du couvercle du cylindre principal. Procédez de la même manière que ci-dessus en vous servant d'une des tiges de piston comme outil que vous enfoncerez dans le tube en laiton par dessous ; enflez alors le tuyau en silicone d'abord par dessus la tige et ensuite par dessus le tube. Retirez alors la tige de piston.

**Etape 33 :** Posez un récipient assez grand (tasse, boîte) sur votre plan de travail et déposez le couvercle du cylindre principal dessus à l'envers de façon à ce que le tube en laiton pourvu du tuyau en silicone pend dans la tasse. Enfoncez maintenant la tige du piston déplaceur dans le tube en laiton par en haut. La tige pénètre facilement jusqu'au moment où elle reste coincée dans le tuyau en silicone situé de l'autre côté du tube en laiton. Le disque de mousse du piston déplaceur s'immobilise ainsi à env. 14 mm du couvercle du cylindre. Posez le fond et la paroi du cylindre collés ensemble à l'envers sur le piston déplaceur et appuyez dessus jusqu'à ce que le bord de la paroi touche le couvercle du cylindre principal.

**Important :** D'une part, le piston déplaceur doit être assez enfoncé pour que la paroi puisse être collée sur le couvercle. D'autre part, il doit en être assez éloigné pour ne pas entrer en contact avec la colle à 2 composants qui sera appliquée sous peu.

**Etape 34 :** Faites pivoter le fond du cylindre pour que les pièces de raccordement en carton de la paroi du cylindre soient à l'emplacement désiré, p. ex. au-dessous des arrondis du couvercle et positionnez-le de façon à ce que la paroi ait, de tous côtés, le même écart symétrique par rapport aux bords du couvercle du cylindre. Vérifiez que le piston déplaceur à l'intérieur ne touche pas la paroi et qu'il y a bien un espace libre d'env. 3 mm tout autour. Tracez le contour de la paroi du cylindre avec un crayon sur le couvercle du cylindre. Retirez le fond du cylindre du couvercle et poncez la plaque sur et à l'intérieur du trait comme dans la 4<sup>ème</sup> étape et refaites le trait.

**Remarque :** Le couvercle du cylindre n'est pas rond comme le fond ; il est constitué à la fois d'un rond et d'un carré. Il a cependant les mêmes dimensions extérieures de 126 x 126 mm et son arrondi est le même que celui du fond.

**Etape 35 :** Préparez une quantité suffisante de colle à 2 composants et appliquez-en un bon filet sur le couvercle, sur et légèrement à l'intérieur du trait de crayon, donc là où la paroi du cylindre entrera en contact avec le couvercle. Veillez à ne pas mettre de colle sur le piston déplaceur, sinon il pourrait coller à l'intérieur et ne pourrait plus bouger. Reposez à nouveau le fond du cylindre sur le couvercle avec précaution de manière à ce que le bord de la paroi vienne se poser sur la colle. Faites tourner un peu le fond dans un sens puis dans l'autre pour que la colle se répartisse bien et contrôlez qu'il y a bien de la colle partout dans l'angle formé par la paroi et le couvercle. En rajouter, au besoin, à l'aide d'un cure-dent. Si nécessaire, alourdissez le fond du cylindre avec un livre ou autre et laissez durcir la colle tranquillement après vous être assuré une nouvelle fois que le fond ne s'est pas déplacé et que la paroi est toujours bien centrée sur la plaque. L'étanchéité des joints collés entre la paroi, le fond et le couvercle du cylindre principal est une condition essentielle pour que le moteur fonctionne plus tard. Laissez bien durcir.

**Etape 36 :** Collez le fond du piston moteur au-dessus du trou situé dans le couvercle du cylindre principal.

**Important :** Utilisez beaucoup de colle pour que les joints soient étanches. L'étanchéité sera contrôlée lors du test suivant. Il n'est pas nécessaire ni utile d'utiliser de la colle à 2 composants pour coller le piston moteur sur le cylindre principal. De la colle universelle normale suffit pour le maintenir de façon étanche sur l'aluminium et a l'avantage que le cylindre moteur peut, au besoin, être redétaché de la plaque à l'aide d'un couteau fort coupant.

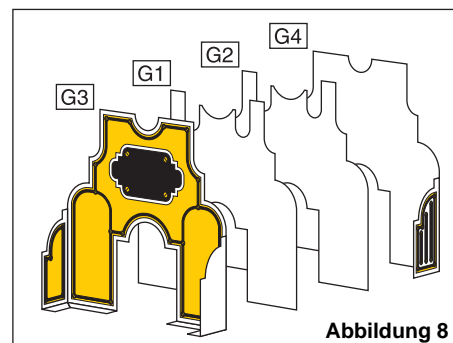
**Contrôle d'étanchéité :** Après le durcissement de la colle, on peut contrôler l'étanchéité du système. Pour cela, prenez le fond et le couvercle du cylindre principal entre le pouce et l'index et pressez les plaques l'une contre l'autre en exerçant une pression brève et rapide près du centre, ce qui fait augmenter la pression de l'air emprisonné. L'air ne pouvant s'échapper nulle part, il doit alors pousser le piston moteur vers le haut. Si tout est étanche, il montera sous la pression exercée sur les plaques et restera en position haute. Ce n'est qu'en relâchant les plaques qu'il redescendra. S'il ne monte pas ou s'il ne reste pas en position haute malgré la pression maintenue, c'est qu'il y a une fuite quelque part qu'il faudra éliminer. Les endroits susceptibles de ne pas être étanches sont toutes les ouvertures fermées à la colle (voir aussi le paragraphe réservé à la recherche des défauts à la fin de cette notice de montage).

**Etape 37 :** Tirez sur le tuyau en silicone placé sur le tube en laiton au centre du cylindre principal de façon à ce qu'il ne recouvre plus que les 5 derniers millimètres env. de la tige du piston déplaceur, qui est maintenant devenu mobile. On enfoncera, plus tard, dans l'autre extrémité du tuyau en silicone, l'autre moitié de la tige du piston déplaceur qui sera reliée au vilebrequin. Le tuyau reliera les deux tiges qui formeront alors la tige de piston complète et jouera en même temps le rôle d'une articulation mobile. – L'autre tuyau placé sur le tube en laiton du piston moteur ne sera pas retiré, il restera toujours à sa place.

**Premier essai de fonctionnement en pratique :** Posez le cylindre principal sur une tasse d'eau bouillante ; attendez env. 20 secondes jusqu'à ce que la plaque inférieure se soit réchauffée et faites bouger ensuite le piston déplaceur en tirant et poussant sur sa tige, mouvement qui se fera plus tard, lors du fonctionnement normal, par le biais du vilebrequin. Si tout est étanche, le piston moteur se mettra en mouvement au même rythme mais légèrement décalé. Profitez de l'occasion pour contrôler à nouveau la liberté de mouvement de la tige du piston déplaceur et surtout la souplesse du joint en latex du piston moteur. Si vous avez l'impression que le joint doit être remplacé, alors c'est le meilleur moment pour le faire : pour cela, détachez le bloc de carton avec le tube en laiton, du joint en latex de sorte qu'il ne reste plus qu'une fine couche de papier sur le latex ; découpez une nouvelle rondelle pour l'intérieur et découpez un nouveau joint en latex. Le reste sera réalisé comme décrit dans la phase E. Cette opération peut être effectuée plus tard aussi, mais le cylindre moteur ne sera plus aussi facilement accessible que maintenant.

## Phase H: Supports

**Etape 38 :** Collez les pièces centrales (G1) et (G2) du support 1, dos à dos. Veillez à ce que les figures soient exactement les unes sur les autres. Si cela s'avère nécessaire, vous pouvez presser les pièces pendant leur séchage pour qu'elles soient bien plates.



**Etape 39 :** Les lignes de pliage de la pièce intérieure (G3) du support 1 sont marquées de petites incisions. Comme décrit au préalable dans l'introduction, le pli sera mieux fait si, en plus des incisions, vous tracez un sillon dans le carton avec une règle et un outil approprié (ne pas couper !), p.ex. avec un couteau qui ne coupe plus. Pliez en avant au niveau de tous les sillons. Enduisez ensuite de colle, l'une des faces de la pièce centrale (G1 + G2), pas la pièce intérieure (G3) du support, et collez la face enduite sur le dos non imprimé de cette pièce intérieure du support. Contrôlez à nouveau l'exactitude des figures.

**Remarque :** La raison pour laquelle on applique la colle sur la pièce centrale et non sur le dos de la pièce intérieure est que la pièce centrale est pourvue d'échancrures dans sa partie supérieure, échancrures que la pièce intérieure et extérieure n'ont pas. Ces échancrures formeront, après le collage, un évidement demi-sphérique et deux évidements longitudinaux prévus pour la rondelle-palier de l'axe du vilebrequin et les pieds de l'encadrement du palier de l'axe. La colle ne devra pas déborder dans ces évidements.

**Etape 40 :** Tracez aussi un sillon sur les lignes de pliage de la pièce extérieure (G4) du support 1 et pliez les deux volets d'angle latéraux en arrière. Enduisez de nouveau la pièce centrale de colle et collez-la parfaitement au dos non imprimé de la pièce extérieure du support.

**Etape 41 :** Collez enfin les deux volets d'angle de la pièce intérieure et extérieure ensemble de manière à ce qu'une fois secs, ils soient bien d'équerre avec le support et les figures bien les unes sur les autres.

**Etape 42 :** Assemblez de la même façon les pièces (G5), (G6), (G7) et (G8) du support 2 et écrivez votre nom dans la case prévue à cet effet.



## Phase I:

### Etrier et montage des supports

Pour que les supports aient, dès le départ, le bon écart lors de leur collage, nous fabriquerons d'abord l'étrier.

**Etape 43 :** Collez les deux pièces centrales (H1) et (H2) de l'étrier dos à dos et ensuite, de chaque côté une des pièces extérieures (H3) et (H4). Contrôlez ici aussi l'exactitude de l'ajustage.

**Remarque :** Les deux fentes en bas à droite et à gauche ont exactement 2 mm de largeur, ce qui correspond à 4 couches de carton, et seront collées plus tard dans les fentes correspondantes de l'encadrement du palier de l'axe.

**Etape 44 :** Positionnez les deux supports de telle sorte que les volets d'angle se regardent et mettez en place l'étrier, provisoirement et sans colle, en faisant chevaucher les fentes sur les deux échancrures demi-sphériques. De cette façon, les supports ont en haut l'écart exact dont ils auront besoin plus tard. Posez-les d'abord sans colle sur le couvercle du cylindre principal. Du côté du cylindre moteur, l'écart entre le bord de la plaque alu et la face extérieure du support doit être exactement de 10 mm, de l'autre côté de 31 mm (voir fig. 9). L'écart est plus grand de ce côté parce que le volant d'inertie tournera, plus tard, à cet endroit. C'est de ce côté également que nous vous proposons de mettre le support sur lequel figure le nom du propriétaire (mais ce n'est pas une obligation). L'étrier est ainsi suspendu, bien centré, au-dessus du cylindre moteur.

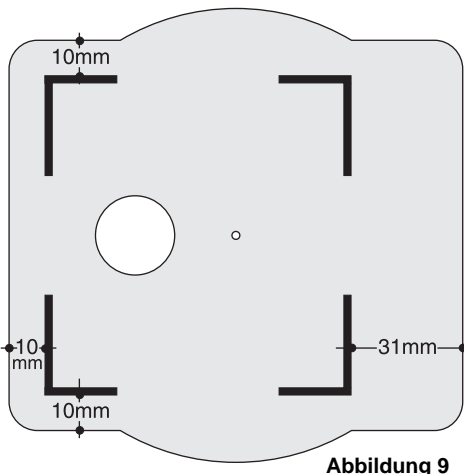


Abbildung 9

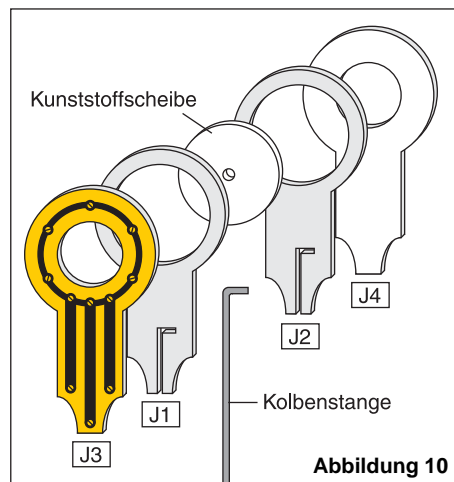
**Etape 45 :** Marquez l'emplacement des supports sur la plaque au crayon en utilisant une équerre, pour faciliter le collage ultérieur et respectez les écarts de 10 et 31 mm du bord de la plaque alu comme décrit ci-dessus. Collez les supports dans cette position ; les volets d'angle doivent tous être à la même distance du bord.

**Remarque :** Ici aussi, la colle universelle suffit à faire tenir les supports. Au cas où ceux-ci se détacheraient tous seuls ou intentionnellement (p.ex. pour une réparation), ils pourraient être recollés sans problème. Les lignes de collage sur la surface en aluminium peuvent alors, au besoin, être rendues légèrement rugueuses avec du papier de verre pour que la colle s'accroche mieux.

## Phase J:

### Bielles du piston moteur et piston d'placeur

Les paliers d'axe des bielles des deux pistons (voir fig. 10) sont formés de 4 couches de carton. Dans les deux couches du milieu seront collées une rondelle et une tige de piston. La fente, en forme de crochet, dans laquelle sera collé le crochet de la tige de piston, n'est que marquée et doit être découpée au cutter.



**Etape 46 :** Détachez les rondelles de 20 mm du centre de la tête des deux pièces centrales (J1) et (J2) du palier d'axe de la bielle du piston moteur et découpez les fentes en forme de crochet. Détachez la petite rondelle de carton de la pièce extérieure (J3) et collez sur son dos non imprimé d'abord l'une des pièces intérieures et ensuite sur celle-ci, l'autre. Enduisez de colle l'échancrure ronde qui s'est ainsi formée dans la tête du palier et posez à l'intérieur une des 4 rondelles de paliers en PVC dur. Posez et collez l'une des deux tiges de piston restantes dans la fente étroite de façon à ce que le crochet de la tige prenne place dans le crochet de la fente du carton. Collez ensuite la deuxième pièce extérieure (J4) dessus.

**Etape 47 :** Procédez de la même manière avec les pièces de la bielle du piston d'placeur (K1) à (K4).

## Abschnitt K:

### Encadrements des paliers d'axe du vilebrequin

Les encadrements des paliers d'axe du vilebrequin ont, dans leur partie supérieure, une fente qui correspond aux fentes de l'étrier, au milieu, une poche demi-sphérique comme dans la partie supérieure des supports et en bas, deux languettes arrondies longitudinales faites de deux couches de carton avec lesquelles ces encadrements seront ancrés plus tard dans les supports. Il ne doit pas y avoir de débordement de colle ni dans la poche ni sur les languettes.

**Etape 48 :** Collez les pièces centrales (L1) et (L2) de cet encadrement dos à dos. Ensuite, enduisez de colle l'une des faces mais uniquement sur la partie grise, pas sur les languettes blanches. Collez dessus la pièce intérieure (L3). Collez ensuite la pièce extérieure (L4) de l'autre côté. Evitez autant que possible que la colle ne coule dans la poche demi-sphérique ainsi formée.

**Etape 49 :** Procédez de la même manière avec les pièces de l'autre encadrement de palier (L5) à (L8).

**Etape 50 :** Après le séchage, vérifiez que les languettes des encadrements vont bien dans les fentes des supports prévus à cet effet. Le sens de l'encadrement est en fonction du dessin des supports.

Arrivé à cette phase de montage, toutes les pièces en carton de la maquette sont à leur place à l'exception de la paroi extérieure du cylindre moteur. Le montage du moteur Stirling peut maintenant être achevé.

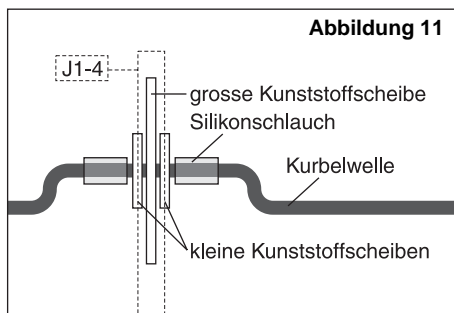
## Phase L:

### Montage du vilebrequin

**Etape 51 :** Découpez 8 morceaux de tuyau de silicone de 5 mm de long. Préparez en outre les pièces suivantes : les deux rondelles-paliers d'axe restantes, les 8 petites rondelles de guidage, la bielle du piston moteur et celle du piston d'placeur équipées de leur tige de piston mise en place ainsi que le vilebrequin. Celui-ci a 2 manetons rectangulaires de 22 mm de longueur et 4 mm de largeur, décalés de 90° et deux extrémités droites de longueurs différentes : 45 mm et 22 mm.

**Remarque :** Les rondelles-paliers d'axe ainsi que les bielles des deux pistons sont toutes montées sur le vilebrequin de la façon suivante (voir fig. 11) : au milieu, la grande rondelle-palier d'axe, respectivement la bielle, de chaque côté, une petite rondelle de guidage et à l'extérieur à côté de ces dernières, un petit morceau de tuyau de silicone. Cet ensemble (tuyau>rondelle de guidage>rondelle-palier d'axe<rondelle de guidage<tuyau) permet de fixer l'emplacement d'un palier d'axe en tous points du vilebrequin parce que les morceaux de tuyau se laissent, certes, facilement déplacer à la main, mais ne peuvent pas bouger tous seuls. Les rondelles de guidage, qui ne sont pas fixées, empêchent que la grande rondelle-palier entre en contact avec le silicone et soit freinée par celui-ci.

**Etape 52 :** Enfillez un des petits morceaux de tuyau en silicone sur le vilebrequin par l'extrémité courte, faites-le passer sur 2 coudes jusqu'au premier maneton. Enfillez ensuite d'abord une petite rondelle de guidage, ensuite la bielle du piston moteur pourvue de sa tige, ensuite une autre rondelle de guidage et finalement encore un morceau de tuyau en silicone, toujours par la même extrémité (voir fig. 11). Positionnez ce groupe de pièces au centre du maneton et veillez à ce que les rondelles de guidage soient proches de la rondelle-palier de la bielle mais puissent quand même bouger librement.



**Important :** Le palier d'axe doit avoir juste assez de jeu pour pouvoir tourner librement sans frottement. - Ne confondez pas les deux bielles pourvues d'une tige de piston. Vous pouvez les distinguer facilement de la façon suivante : La bielle du piston moteur, que vous venez de mettre en place, a, avec sa tige, une longueur totale de 76,5 mm, soit 7 mm de plus que celle du piston déplaceur qui ne fait que 69,5 mm et qui sera mise en place dans la prochaine étape.

**Etape 53 :** Enfillez par la longue extrémité du vilebrequin, le même groupe de pièces jusqu'à l'autre maneton, mais cette fois-ci avec, au milieu, la bielle du piston déplaceur. Positionnez cet ensemble ici aussi au centre du maneton en veillant à ce que le palier puisse bouger librement.

**Etape 54 :** Montez le même groupe de pièces sur les deux extrémités droites du vilebrequin en mettant cette fois-ci les deux rondelles-paliers restantes au centre. Sur l'extrémité courte du vilebrequin, le tuyau en silicone doit se trouver presque au bord du fil métallique qui ne dépassera que de quelques millimètres. Sur la longue extrémité, le groupe de pièces sera monté de façon à ce que la rondelle-palier se trouve à env. 83 mm de la rondelle-palier placée à l'autre extrémité.

**Etape 55 :** Posez maintenant les deux rondelles-paliers dans les cavités situées dans la partie supérieure des supports. Vérifiez que toutes les rondelles tournent librement et que les bielles des pistons moteur et déplaceur soient bien juste au-dessus de leur tube en laiton respectif. Rectifiez la position des groupes de pièces s'il le faut.

**Etape 56 :** Retirez les rondelles-paliers des supports. Avant de les remettre en place, enfoncez les 2 tiges des bielles des pistons moteur et déplaceur dans leur tuyau en silicone respectif. Pour cela, vous pouvez tenir le tuyau d'une main et de l'autre, faire tourner un peu le palier dans un sens et dans l'autre pour faire rentrer la tige.

**La tige de la bielle du piston moteur :** Elle doit être enfoncée jusque dans le tube en laiton placé sur le joint en latex. Pour ne pas tirer sur le latex du piston moteur en faisant tourner le palier d'axe, le mieux est de maintenir le tube en laiton immobile avec une petite pince pointue (ou avec le bout de vos doigts s'ils sont assez fins). Veillez à ce qu'à la fin de cette opération, le palier ne soit pas incliné sur le vilebrequin.

**La tige de la bielle du piston déplaceur :** Enfoncez-la dans le tuyau en silicone d'abord jusqu'à ce qu'il reste encore 5 mm entre son extrémité et celle de la tige du piston déplaceur venant du côté opposé. Etant donné que le piston déplaceur peut tourner librement sur lui-même, le palier ne peut pas s'incliner – le piston suivra toujours le mouvement de rotation. Au cas où le disque de mousse du déplaceur ne serait pas parallèle au fond et au couvercle du cylindre principal, il est possible de compenser cette irrégularité en faisant tourner le piston du déplaceur par rapport au palier d'axe.

**Etape 57 :** Enfoncez maintenant les languettes des encadrements de paliers dans les fentes des supports prévues à cet effet, la moitié supérieure des rondelles-paliers venant se glisser dans ces encadrements qui leur donnent ainsi une bonne stabilité. Le sens de l'encadrement est en fonction du dessin des supports.

**Remarque :** Il n'est pas nécessaire de coller les languettes dans leurs fentes ; le frottement qui a lieu entre les couches de carton est suffisant. D'ailleurs, sans colle, le moteur pourra facilement être démonté si un réglage ou une réparation s'avérait nécessaire.

## Phase M: Montage de l'étrier du volant d'inertie

**Etape 58 :** Posez une première fois l'étrier dans les fentes des encadrements prévus à cet effet, en guise d'essai. Puis collez-le dans les fentes.

**Etape 59 :** Mettez un peu de colle sur le trou du support à trois branches de l'axe du volant d'inertie et enfoncez le volant, avec son support d'axe en premier, sur l'extrémité libre du vilebrequin.

**Remarque :** La colle entre le fil métallique du vilebrequin et le carton ne tient pas très bien ; le frottement entre eux est cependant largement suffisant pour les besoins du moteur. Cela permet aussi, en cas de besoin, de retirer facilement le volant du vilebrequin.

## Phase N: Réglage de précision et premier essai de fonctionnement

**Ayez de la patience !** Comme pour tous moteurs, le réglage de précision de ce moteur Stirling est essentiel pour un fonctionnement sans problème. Ne soyez pas déçu s'il ne fonctionne pas du premier coup. Robert Stirling a mis des années avant de pouvoir présenter son premier moteur !

**Etape 60 :** Faites tourner lentement le vilebrequin à l'aide du volant d'inertie. Un tour entier représente une course de 8 mm pour les deux manetons du vilebrequin (4 mm vers le haut, 4 mm vers le bas). Contrôlez si la longueur de la tige du piston moteur est correcte et modifiez-la, si nécessaire, en maintenant le tube en laiton avec la pince pointue et en faisant bouger la bielle, comme décrit ci-dessus. Le piston moteur doit suivre facilement le mouvement de va et vient du vilebrequin sans que le joint en latex ne se distende en position haute ou basse – il freinerait sinon le mouvement du vilebrequin. Le latex ne doit pas faire non plus de faux-ppli qui gênerait le mouvement et forcerait au passage du piston.

**Important :** Prenez suffisamment de temps pour trouver la position optimum du piston moteur, c'est à dire sa hauteur ou profondeur dans ou au-dessus du cylindre moteur qui causera le moins de résistance. Si nécessaire, il faudra tirer encore un peu sur le latex pour lui donner plus ou moins de jeu. Assurez-vous finalement que la bielle d'axe ne s'est pas inclinée sur le vilebrequin.

**Etape 61 :** La course du piston déplaceur est également de 4 mm vers le haut et 4 mm vers le bas. Le disque de mousse a lui-même une épaisseur de 8 mm, ce qui fait que sa course est en tout de 16 mm (8 + 4 + 4), soit 2 mm de moins que la hauteur libre du cylindre principal. C'est pourquoi l'écart des tiges de piston dans le tuyau en silicone doit être réglé de façon à ce que le piston déplaceur ne cogne ni au couvercle ni au fond du cylindre principal lorsque le vilebrequin fait un tour complet. Il serait idéal que le bord du disque de mousse ne touche pas la plaque alu ni en position haute ni en position basse. En aucun cas, cependant, le support en carton situé au centre du disque ne devra toucher le fond ou le couvercle du cylindre. Cela freinerait fortement.

**Test :** Faites tourner le volant d'inertie avec beaucoup de précaution et de délicatesse. Cela vous permet de sentir si le piston déplaceur produit encore une résistance dans sa position haute ou position basse. Vérifiez aussi si le piston déplaceur tourne et s'incline un peu dans un mouvement de vague en position haute et basse lorsque vous faites bouger sa bielle dans un sens et dans l'autre. C'est signe alors que dans ces positions, il y a encore un tout petit peu de jeu entre le disque et la plaque alu, ce qui est bien. Veillez aussi à ce que le morceau de tuyau en silicone ne soit pas trop enfoncé. Il ne doit pas toucher le tube en laiton.

**Etape 62 :** Mettez une petite goutte d'huile dans l'espace entre la tige du piston déplaceur et le tube en laiton à l'aide d'un cure-dent pour le rendre complètement étanche à l'air. Vous pouvez également mettre un peu d'huile là où une rondelle-palier est en contact avec le vilebrequin ou avec les rondelles de guidage voisines pour réduire le frottement.

**Dernier contrôle avant le démarrage :** Contrôlez encore une fois si les deux biellettes se trouvent bien juste au-dessus du piston moteur et du piston déplaceur, s'ils ne sont pas inclinés, si le vilebrequin dispose bien d'une fraction de millimètre de jeu pour bouger librement dans ses rondelles-paliers et n'est pas éventuellement freiné par celles-ci.

**Important :** Les enfants ne devraient pas mettre le moteur Stirling en marche seuls sans surveillance. Même s'il ne s'agit que d'une petite quantité d'eau correspondant au contenu d'une tasse à café, elle peut causer des brûlures très désagréables.

**Etape 63 :** Remplissez une grande tasse d'eau bouillante et posez le moteur dessus. Attendez env. 30 secondes que le fond du cylindre principal se soit bien réchauffé et faites tourner le volant d'inertie doucement. Vous remarquerez qu'il ne se laisse légèrement tourner que vers la gauche ; vers la droite, il ne tardera pas à freiner. Si tout est bien réglé, le moteur commencera à tourner de plus en plus vite jusqu'à ce qu'il ait atteint la vitesse optimum pour la différence de températures momentanée entre le fond et le couvercle du cylindre principal. Il ralentira ensuite tout de doucement, mais de façon imperceptible.

**Si le moteur tourne :** Félicitations ! Si la mise en marche a réussi du premier coup, le moteur devrait tourner au moins 20 minutes environ. Si vous êtes satisfait, vous pouvez effectuer la 6<sup>4</sup><sup>ème</sup> et dernière étape et mettre en place la paroi extérieure du cylindre moteur. Mais peut-être avez-vous envie de « gonfler » le moteur en effectuant des réglages supplémentaires et de prolonger ainsi la durée d'action de la tasse – toujours est-il que nous avons déjà atteint des temps de marche supérieurs à une heure ! Dans ce cas attendez un peu avant de réaliser la 6<sup>4</sup><sup>ème</sup> étape et essayez toutes les possibilités décrites dans les pas précédents et les conseils qui suivent.

**Etape 64 :** Arrondissez la paroi extérieure du cylindre moteur (E5) et la pièce de raccordement (E6) en les frottant contre un angle ou en les enroulant autour d'un gros stylo feutre ou autre objet similaire et collez à peine la moitié de la pièce de raccordement sur l'une des extrémités de la paroi extérieure, mais tout juste assez pour recouvrir la partie marquée de gris. Enroulez-la ensuite autour du cylindre moteur et collez la pièce de raccordement sur l'autre extrémité de manière à ce qu'on puisse encore soulever facilement la paroi extérieure et ainsi la retirer au besoin sans problème. Elle ne sera donc pas collée sur le cylindre moteur, elle sert uniquement à cacher le joint en latex et le fil qui le maintient. Arrondissez également la pièce de décoration (E7) et collez-la sur le côté opposé, de façon symétrique par rapport à la pièce (E6).

## Phase O:

### Conseils pour le gonflage: Prolongement de la durée de fonctionnement et sources d'énergie alternatives

Voici quelques conseils qui vous diront comment prolonger la durée de fonctionnement du moteur Stirling si vous avez déjà fait le maximum de réglages de précision et comment utiliser l'énergie solaire comme source d'énergie alternative :

- Prenez une tasse plus grande et préchauffez-la.
- Posez le moteur sur une bouteille Thermos à grande contenance et grande ouverture.
- Placez le moteur au-dessus d'une petite bougie chauffe-plat. Mais attention ! Ne pas surchauffer ! Le mieux est de mettre quelque chose entre le moteur et la bougie (p.ex. tôle, plaque de carrelage).
- Prenez deux petits supports en alu de petites bougies chauffe-plat que vous remplirez de glaçons et posez-les sur le couvercle du cylindre principal entre les supports. Cela augmentera la différence des températures entre les deux plaques alu et donc prolongera la durée du fonctionnement.
- Posez le moteur sur une source froide, p. ex. un pain de glace, un gros bloc de glace ou un coussin froid-chaud sortant du congélateur. Le volant d'inertie tournera alors dans l'autre sens parce que la différence de températures des deux plaques alu sera inversée.
- En peignant en noir la surface extérieure des plaques alu (voir pas 4), celles-ci absorberont et évacueront plus facilement la chaleur.
- La peinture noire permet aussi un fonctionnement à l'énergie solaire : Dirigez la lumière du soleil sur le dessous du fond du cylindre à l'aide d'un miroir. Cela pré suppose une forte radiation solaire, p. ex. en plein été et/ou vers midi, et la mise à l'ombre du couvercle du cylindre qui devra rester le plus frais possible.
- Débalourdez le volant d'inertie soit en mettant des trombones sur un côté, soit en collant ensemble les pièces intercalaires du volant retirées au début de l'assemblage, que vous coincez dans 2 ou 3 espaces vides (les uns à côtés des autres) du volant. Changez ensuite la position du volant sur le vilebrequin jusqu'à ce que le moteur tourne le plus rond possible.

## *Si le moteur ne tourne pas ou que peu de temps :*

---

Ne perdez pas patience et recherchez une à une les causes possibles. En fait, seuls deux défauts peuvent être responsables du mauvais fonctionnement, un seul ou les deux ensemble.

### *Une des causes possibles :*

#### *Défaut d'étanchéité*

---

- Y a-t-il quelque part aux **joints collés du cylindre principal** un endroit non étanche ? Normalement, on peut voir, éventuellement en utilisant une loupe, s'il y a un trou dans la colle appliquée entre la paroi et le couvercle et/ou la paroi et le fond du cylindre. En appuyant sur les deux plaques alu et en passant la bouche le long des joints collés, vous sentirez passer de l'air sur vos lèvres très sensibles à l'endroit des trous. **Si c'est le cas :** les boucher avec de la colle, éventuellement avec de la colle à 2 composants.
- Le joint entre le **cylindre moteur et son fond** en carton n'est-il pas étanche ? Un trou de la taille d'une tête d'épingle serait déjà de trop ! L'assemblage étant fait à l'intérieur par une couronne de languettes collées, il pourrait y avoir un trou entre deux de ces languettes qui n'a pas été bien obturé par la colle au moment de la réalisation de la partie D. **Si c'est le cas :** Remplir le joint de colle de l'extérieur et le rendre ainsi étanche.
- La colle entre le **fond du cylindre moteur et la plaque en aluminium** n'est-elle pas étanche ? C'est certes très peu probable mais pas impossible. **Si c'est le cas :** Soit étancher l'arête extérieure avec de la colle (ce qui n'est pas très joli), soit détacher avec précaution le cylindre moteur de l'aluminium avec un couteau (détacher éventuellement les supports aussi avant pour avoir un meilleur accès) et ensuite, le recoller.
- Y a-t-il une fuite entre le **cylindre moteur et le joint en latex** ? **Si oui :** Renouveler et renforcer le ficelage autour du joint et contrôler qu'il ne s'échappe pas d'air le long du joint en carton situé dans la paroi du cylindre.
- Avez-vous peut-être oublié la **goutte d'huile** qui devrait obturer l'espace entre la **tige du piston déplaceur** et le **tube en laiton** qui sert de glissière à la tige ? **Si oui :** Le faire maintenant.
- **Si toutes ces retouches n'ont servi à rien et qu'il y a encore une fuite quelque part :** Retirez les supports, poussez le tuyau en silicone de la tige du piston déplaceur vers le bas jusqu'à ce qu'il glisse sur le tube en laiton qui sera ainsi étanche et tirez le piston moteur avec son joint en latex complètement vers le haut. Refaites d'abord le test avec les lèvres. Si vous ne découvrez rien, enduisez d'eau savonneuse les endroits soupçonnés de ne pas être étanches, avec un petit pinceau et faites bouger le piston moteur de haut en bas et vis versa jusqu'à ce qu'une bulle se forme à l'endroit du trou. Si vous faites sécher rapidement le carton, il ne sera pas endommagé.

### *L'autre cause possible :*

#### *Résistance due au frottement*

---

- Le **piston moteur** subit-il une trop grande résistance dans son mouvement de va et vient ? **Si oui :** Repoussez le joint en latex vers le haut ou vers le bas et constatez dans quelle position le piston moteur travaille plus facilement, quand il s'enfonce plus profondément dans le cylindre ou quand il en sort plus, avec plus ou avec moins de mou dans le latex. Si nécessaire, changez le latex.
- Y a-t-il des restes de colle sur la partie mobile du **joint en latex** qui auraient durci le latex ? **Si oui :** changez-le.
- La **tige du piston moteur** est-elle enfoncée trop profondément ou pas assez profondément dans son piston si bien que celui-ci ne peut pas se déplacer librement ? **Si oui :** Corriger selon la description du pas 60.
- La **bielle du piston moteur** est-elle inclinée sur le vilebrequin ? **Si oui :** Faites tourner la tige du piston dans le tube en laiton pour compenser cette anomalie.
- Le **piston déplaceur** colle-t-il ou reste-t-il coincé dans le cylindre principal ? **Si oui :** Il n'y a qu'une chose à faire : retirez le piston moteur (ou le cylindre moteur entier si nécessaire) et essayez de débloquer le piston déplaceur par l'ouverture dans la plaque alu.
- Est-il possible que vous ayez confondu les bielles ? **Si oui :** faire l'échange. Rappel : le plus grand doit se trouver au-dessus du piston moteur.
- Le **tuyau en silicone** est-il trop enfoncé sur la **tige du piston déplaceur** si bien qu'il touche le tube en laiton ? **Si oui :** Corriger.
- La **longueur totale** des fils métalliques reliés ensemble par le tuyau en silicone pour former la **tige du piston déplaceur** est-elle trop courte (le piston percute le couvercle en position haute) ou trop longue (le piston percute le fond) ? **Si oui :** Corriger la longueur selon description au pas 61.
- Y a-t-il trop de frottement à la hauteur d'une ou de plusieurs des quatre **rondelles-paliers d'axe sur le vilebrequin** ? **Si oui :** Déplacez les petits morceaux de silicone jusqu'à ce que tous les paliers aient assez de jeu. Tous les paliers du vilebrequin devraient être huilés.
- Est-ce que les deux bielles ne se trouvent pas exactement au-dessus du cylindre moteur et du cylindre principal ? **Si c'est le cas :** Déplacez les morceaux de silicone en conséquence.