

# Die Checkliste für einen erfolgreichen Erstlauf

Kann man vor einem Erstlauf eines Stirlingmotors bereits vorhersagen, ob dieser ein Erfolg sein wird?

Schon mancher Stirlingfreund zeigte mir sein selbstgebautes Modell, weil es nicht oder nur sehr schwer in Schwung zu setzen war. Auch wenn jeder Motor ein Unikat darstellte, gab es doch ein bestimmtes Muster an Problempunkten. Im folgenden sollen solche Problempunkte aufgezählt werden.

## Leichter Lauf

Kleine Stirlingmodelle, die durch einen Tropfen Öl am Arbeitskolben dichten, verbrauchen mehr als die Hälfte ihrer thermisch erzeugten Leistung durch diese Ölschmierung, da Öl immer eine gewisse Zähigkeit besitzt. Da sollte es jedem einleuchten, dass Schwergängigkeiten am sonstigen Getriebe (Kurbelwellen-Lagerung, Pleuel-Lagerungen und Pleuel-Gelenken) nichts an einem Stirlingmodell zu suchen haben.

Einen Check-Test auf leichten Lauf macht man am besten mit heruntergenommenem Erhitzerkopf, also ohne störende Kompression. Man erwärmt den kalten Teil vorsichtig mit einem Bunsenbrenner, bis er die Temperatur hat, die später beim Dauerlauf vermutet wird. (in der Regel 40°C). Dadurch setzt man die Zähigkeit des Öls herab, das zwischen Arbeitskolben und dessen Zylinder schmiert und dichtet. Dann setzt man Daumen und Mittelfinger gegenüber auf das Schwungrad und tut so, als ob man den Motor mit mehreren hundert Umdrehungen anwerfen wollte. Dabei zählt man, wieviel Umdrehungen das Schwungrad nachläuft, bis es stehen bleibt. Sind dies nur drei oder weniger Umdrehungen, ist ein erster erfolgreicher Testlauf unwahrscheinlich.

Bei vier oder mehr Umdrehungen bestehen dagegen gute Chancen, wenn die unteren Punkte auch passen.

## Kompression

Jeder thermodynamischer Motor braucht eine gute Kompression. Alle beweglichen Teile müssen also zu den stehenden Teilen hinreichend gut abgedichtet sein. Beim Stirlingmotor ist das nicht nur die Passung zwischen Arbeitskolben und dessen Zylinderwandung (hier mit Öl gedichtet), sondern auch die Passung zwischen der Verdrängerkolbenstange und ihrer Buchse. Um die Kompression zu testen, müssen wir jetzt den Erhitzer montieren. Das tun wir bei einer Mittelstellung des Arbeitskolbens, also nicht in einem der Totpunkte. Daraufhin erfolgt der eigentliche Kompressions-Test: Man bewegt mit der Hand das Schwungrad innerhalb ungefähr einer halben Sekunde um ca. 60° und lässt dann das Schwungrad los. Wenn die Passungen gut genug gefertigt worden sind, wird der Kolben und damit die Kurbel zurückfedern. Man sollte diesen Test in beiden Drehrichtungen machen. Federt der Motor überhaupt nicht zurück, obwohl er beim oberen Test keine Schwergängigkeit zeigte, dann ist ein erster erfolgreicher Testlauf des Stirlingmotors unwahrscheinlich.

## Dichtigkeit

Was bei dem Kompressionstest auch deutlich wird, ist die Frage, ob die Arbeitsräume nach außen hin dicht sind. Wenn der O-Ring zum Beispiel nicht genügend dichten sollte, verpufft Kompression an diesem Leck. Metallische Dichtungen oder Presspassungen haben sich bei Modell-Stirlingmotoren nicht als

dicht genug bewährt. Aber die Kompression kann auch nach innen verpuffen, wenn der Verdrängerkolben nicht abgedichtet ist. Der Verdrängerzylinder gehört mit dem Verdrängerboden verklebt und die Kolbenstange, die meist in den Verdrängerboden verschraubt wird, muss ebenfalls mit vor der Verschraubung einen Tropfen Kleber oder Loctide abbekommen.

Mehr zum Thema Dichtigkeit im Beitrag „Dichtigkeit“ auf dieser Homepage.

### Wärmelängsleitung

Bei vielen Bauanleitungen wird als Werkstoff Messing oder Aluminium im Erhitzerbereich angegeben. Messing leitet die Wärme gut und ist daher wirklich geeignet für die Wärmeübertragung von der Flamme auf das Arbeitsgas. Was dabei aber übersehen wird, ist die Wärmelängsleitung zwischen dem heißen und dem kalten Teil – und zwar sowohl außen am Zylinder, wie auch innen am Verdränger. Hier sollte kein Material eingesetzt werden, das die Wärme gut leitet, sondern schlecht, wie z.B. Stahl oder noch besser Edelstahl. Sonst heizt sich der kalte Teil unnötig auf und das Temperaturverhältnis zwischen Heiß und Kalt verschwindet zunehmens. Nach wenigen Minuten ist aus dem Motor keine Leistung mehr herauszukitzeln und nach ein paar weiteren Minuten kann der Stirling sogar stehen bleiben. Bei extrem kurzen Erhitzern kann es sogar vorkommen, dass der Motor überhaupt nicht läuft, obwohl er die beiden oberen Tests bestanden hatte. Schnell mal einen O-Ring oder eine Flachdichtungen zwischen den Erhitzer und den Kühler klemmen, um die Wärmelängsleitung zu begrenzen, bringt kaum was und ist gefährlich. Solche Ringe sind nicht für derart hohe Temperaturen geeignet und können beim Verschmoren giftige Dämpfe erzeugen. Auch kein Ersatz für schlecht wärmeleitende Materialien sind extrem dünne Wandungen aus Messing. Das hilft zwar etwas, aber nicht viel. Was dagegen sehr hilft, ist der Aufbau einer möglichst langen Regeneratorstrecke (siehe Beitrag VitaminR), also einem Zylinderbereich, der weder geheizt noch gekühlt wird. Und wenn diese Regeneratorstrecke dann noch aus Stahl, Edelstahl oder sogar Glas besteht, kann der Motor beim Erstlauf bereits ein richtig hohes Drehmoment entwickeln.

Werkstoff	Kupfer	Alu.	Messing	Stahl	Bronze	Edelstahl	Glas
Wärmeleitfaktor in W/mK	320	180	100	50	40	15 - 18	ca.1

### Ölwahl

Welches Öl nimmt man als Schmierung am Kolben und an der Verdrängerkolbenstange? Auch die Ölwahl kann dafür entscheidend sein, ob ein Modellmotor läuft oder nicht. Motorenöl zu nehmen, ist wegen der Additive nicht ratsam. Die meisten Modellbauer nehmen Nähmaschinenöl, aber nicht irgendwelches, sondern mit der zusätzlichen Aufschrift „harz- und säurefrei“. Verdünnen kann man das Öl mit 10 bis 30% Petroleum. Aber Vorsicht: Jede Verdünnung bewirkt auch, dass die Schmierung nachlässt und möglicherweise vorzeitig Abriebs-Erscheinungen auftauchen.

## Verdränger-Fertigung

Eine besondere Herausforderung beim Bau eines Stirlingmotors ist die Fertigung des Verdrängers. Neben dem dünnwandigen Zylinderkörper aus Stahl oder Edelstahl, ist es vor allem die Koaxialität zwischen ihm und der Kolbenstange, was einen richtigen Stirling-Baumeister ausmacht. Nur wer diese Hürde meistert, kann einen optimalen Ringschlitz einstellen, so dass der Motor ein gutes Drehmoment erreicht. Dagegen gar kein gutes Zeichen ist es, wenn die Verdrängerspitze seitlich am Erhitzer anschleift. Ob die Koaxialität ausreicht, kann man auf der Drehbank leicht ermitteln, indem man die Kolbenstange ins Backenfutter einspannt und den Taster einer Messuhr vorne am Verdränger gleiten lässt, während man von Hand langsam das Backenfutter dreht. Liegt die Koaxialität innerhalb eines Viertel des vorgesehenen Ringspaltes, so sollte der Motor funktionieren. Voraussetzung ist dabei allerdings, dass die Passung zwischen Kolbenstange und ihrer Buchse auch nur eine Kippbewegung von einem Viertel des Ringspaltes zulässt.

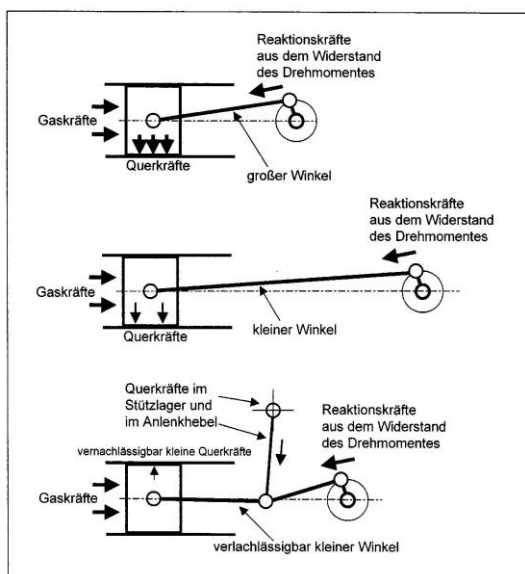
Soweit die Checkliste für kleine Modellmotoren mit Ölschmierung.

## Checkliste für Leistungsmotoren

Auch für größere Motoren, die Leistung abgeben sollen, gelten die oberen Punkte, außer dem der Schmierung.

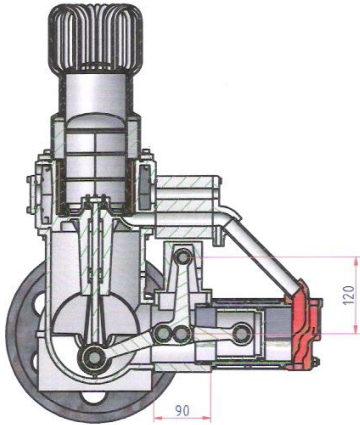
Es fragt sich nämlich, ob man auf die Ölschmierung verzichten sollte. Schließlich ist das Technik aus der Anfangszeit, als man nur Tropfschmierung kannte. Auch musste man damals die Erhitzer alle paar Wochen abnehmen und innen vom Ruß befreien, weil der Ölnebel auch in diesen Teil des Stirlingmotors kam. (Ruß hat einen Isolationsbeiwert, der Styropor oder Mineralfasern entspricht und war denkbar ungeeignet an wärmeübertragenden Teilen. Die zweite Generation hatte eine Ölspritz-Schmierung (wie in allen KFZ-Motoren). Um zu verhindern, dass Ölnebel zum Heißteil gelangte, erfand man besondere aufwändige Kolbenstangen-Dichtungen zum Arbeitsraum hin. Die Wartung dieser Dichtungen stellte sich als großes Problem heraus.

Deshalb ging man ab 1980 immer mehr zur dritten Generation über: Wie bei Elektromotoren fährt man jetzt ohne Öl, sondern schmiert die notwendigen Kugel- und Wälzlager mit Fett. Das Kurbelgehäuse sowie die Zylinder sind nun trocken.



## Querkraft-Entlastung

Das bedeutet, dass auch die Pleuellager trocken laufen müssen. Man behilft sich hier mit Teflon-Gleitlager. Die Querkräfte – speziell beim Pleueltriebwerk sind dabei so stark, dass diese Teflon-Gleitlager überfordert sind. Ein Pleuelmotor besitzt zum Beispiel eine recht großzügig bemessene Teflon-Bandage am Pleuel. Trotzdem ist diese nach 250 bis 300 Stunden abgearbeitet. Die Lösung dieses Problems liegt in einer Querkraft-Entlastung durch einen Anlenkhebel (z.B. wie im Bild unten). Damit kann die Lebensdauer auf über 10.000 Stunden gebracht werden. Auch die



Kolbenringe werden aus Teflon gefertigt. Es gibt heute eine ganze Reihe von Teflon-Sorten, die mit Kohlefasern oder Glasfasern gemischt sind. Die Firma ElringKlinger ist hier die richtige Adresse für Kolbenringe aus Kohlefaser-Compounds und Klüber Lubrication für Bandagen aus Klüberplast W. Bei der Bearbeitung von Teflon sollte allerdings beachtet werden, dass bei einer Temperatur von über 240°C gefährliche Dioxine entstehen. Beim Spanen kommen wir zwar kaum auf 100°C und auch im Betrieb der Motoren kommt keiner der Kolbenringe auf über 150°C, aber es darf kein Span zufällig auf die Glutspitze einer Zigarette fallen: Das Inhalieren des nächsten Zuges wäre tödlich. Die Teflon-Späne

müssen aus diesem Grund auch als Sondermüll entsorgt werden. Hierbei wird das Teflon zwar auch verbrannt, aber das entstehende Dioxin gleich mit Temperaturen über 2000°C in gefahrlose Gase umgewandelt.

Doch kommen wir wieder zum Stirlingmotor zurück.

### Zylinder - Kolbenpaarung

Auch für trockenlaufende Motoren gilt ein leichter Lauf als vorteilhaft. Dabei sollte die stützende Kolbenbandage möglichst nahe an der Zylinderwandung anliegen, damit keine unerwünschten Geräusche entstehen und die Bandage durch ständiges Hin- und Hergestoßen werden vorzeitig weggedängelt wird. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient von Teflon viel höher ist als bei allen Metallen, sollte die Teflon-Bandage so dünn wie möglich sein, jedenfalls nicht dicker als 1mm. Den Ringspalt zwischen Bandage und Zylinder stellt man in einem Wärmeschrank ein. Wenn man als Arbeitsgas Helium plant und eine Kühlwasser-Temperatur von 70°C zulassen will (Kraft-Wärme-Kopplung), dann bedeutet dies z.B. 110° an den Kolbenbandagen. Der Wärmeschrank ist in diesem Fall zuerst auf 120°C einzustellen. Bei dieser Temperatur sollte der Kolben blockieren oder schwergängig in der Zylinderbuchse laufen, beim Abkühlen auf 110°C muss der Kolben dagegen frei laufen. Tut er das nicht, muss weiter abgekühlt werden, um zu sehen, für welche Kühlwasser-Temperatur diese Paarung geeignet ist. (70°C zu 110°C, also 40K war hier für Helium angegeben, bei Luft oder Stickstoff liegt dieser Wert bei ca. 60K. Es kommt auch darauf an, wie gut die Zylinderwandung gekühlt werden kann. Bei schlechter Kühlung kann der Wert durchaus bei 80K liegen.)

Die Gegen-Laufflächen für die Teflon-Bandagen sollten am besten geschliffen oder gehohnt sein. Dabei kommt es nicht so sehr auf die Oberflächen-Rauigkeit an, sondern wie die Mikro-Struktur dieser Oberfläche aussieht. Beim Drehen erhält man runde „Wellentäler“ und spitze „Wellenkämme“, denkbar schlecht geeignet für einen Teflon-Gegenpartner. Beim Schleifen werden die Spitzen abgetragen, ja das Bild dreht sich förmlich um, weil auch neue Riefen entstehen. Diese sind jedoch alles andere als schlecht. In diesen Riefen haftet ein anfänglicher kleiner Abrieb an Teflonmaterial, so dass schließlich Teflon auf Teflon gleitet. Man kann dieses „Gegen-Teflon“ auch künstlich bei der Fertigung auftragen, so dass auch der anfänglicher Abrieb der Bandagen vermieden wird.

### Heliumgefüllter Verdränger

Bei Leistungsmotoren, die mit Helium gefüllt sind, um auch das Fett durch Nichtanwesenheit von Sauerstoff vor einer zu kurzen Lebensdauer zu schützen,

sollte auch im Verdränger kein Sauerstoff vorhanden sein. Das bedeutet, dass der Verdränger entweder unter Helium-Atmosphäre montiert werden muss, oder dass er nach der Fertigung mit Helium gefüllt oder ausgeblasen wird.

#### Automatisierte Nachfettung

Schließen möchte ich die Checkliste mit dem Hinweis, dass vor allem die hoch beanspruchten Wälzlager des Arbeitskolben-Triebwerkes regelmäßig mit neuem Fett versorgt werden müssen, um Laufzeiten über 3000 Stunden zu erreichen. Diese Fettversorgung sollte automatisiert werden, alle 500 bis 800 Stunden ungefähr ein Hundertstel des jeweiligen Lager-Innenraumes. Eine solche Automatisierung gibt es bisher (2015) noch nicht, muss aber entwickelt werden. Dann sind Laufzeiten von 30.000 Stunden durchaus denkbar.

Dieser Beitrag stammt aus „[www.stirling-und-mehr.de](http://www.stirling-und-mehr.de)“