

## **Drehkolben-Stirlingmotor mit dynamischer Abdichtung und dynamischer Aufladung**

Ziel dieser Erfindung ist die Verbesserung eines zuvor beschriebenen Stirlingmotors mit umlaufenden Drehkolben, nämlich von DE102014001954.

Stand der Technik ist es, einen Stirlingmotor mit möglichst hohem Druck seines Arbeitsgases zu betreiben, um eine gute Leistung und Leistungsdichte zu erzielen. Das Erhöhen des mittleren Arbeitsgasdrucks bezeichnet man als „Aufladen“.

Übliche Stirlingmotoren, die mit Zylindern und Kolben arbeiten, haben gleitende Dichtungen. Zwischen Zylinder und Kolben gibt es meist einen oder mehrere dichtende Kolbenringe. Zwischen bewegten Teilen ist meist ein Schmierstoff, der kein Gas hindurch lässt, insbesondere Öl. Auch an Wellen und Kolbenstangen gibt es vergleichbare Dichtungen. Einmal befüllt, bleibt der Arbeitsgasdruck im Stirlingmotor lange erhalten, auch weit oberhalb des Umgebungsdruckes.

Da Öl sich im Stirlingmotor allmählich verteilt und an unerwünschter Stelle ablagert, was wiederum die Leistung herabsetzt, verwendet man gerne trocken gleitende Dichtungen aus besonderen, teils selbstschmierenden Materialien, etwa aus Graphit oder Teflon. Deren Dichtigkeit ist weniger vollkommen als die eines flüssigen Schmierfilms. Solche Dichtungen halten den Druck über einige Arbeitszyklen aufrecht, aber nicht über einen längeren Zeitraum. Dann wird der ganze Stirlingmotor in einem Drucktank betrieben, und der Arbeitsgasdruck im Zylinder pendelt um den erhöhten Druck im Tank.

Gleitende Dichtungen sind immer mit Reibung behaftet, und ihre Lebensdauer ist oft sehr begrenzt. Bei hoher Temperatur kann die Schmierung versagen.

Der zu verbessernde Drehkolben-Stirlingmotor hat drei oder vier Drehkolben (5), die zusammen ein „Drehkolbenarray“ (1) bilden. Die Drehkolben sind zwischen zwei Planetengetrieben (2) montiert und drehen sich dort synchron auf einer umlaufenden Bahn. Zwischen den Drehkolben ist ein Arbeitsgas eingeschlossen. Die Enden des Zwischenraumes sind mit runden Platten verschlossen, den „Endplatten“ (6). Zwischen den Drehkolben sind winzige Spalte, so genannte Spaltdichtungen. Spaltdichtungen sind von vielerlei pneumatischen Maschinen bekannt, zum Beispiel vom Roots-Gebläse. Die Drehkolben sind längs unterteilt in einen mittleren, heißen Bereich (7), sowie in einen zweigeteilten, kalten Bereich (8) an den Enden. Ersterer wird von außen beheizt, letzterer von außen gekühlt. Im Zuge der Drehkolbenbewegung wird das Arbeitsgas zwischen dem heißen und dem kalten Bereich hin und her geschoben und vollführt den Stirlingprozess.

Eine Portion Gas benötigt eine gewisse Zeit, um bei gegebenem Druck durch eine gegebene Spaltdichtung zu entweichen. Je kürzer sie an dem Spalt verweilt, desto weniger Gas verschwindet. Ist beim Drehkolben-Stirlingmotor die Dauer eines Arbeitszyklus kurz genug, dann sind die Gasverluste an den Spaltdichtungen vernachlässigbar, jedenfalls im Vergleich zum Gasstrom, der im Arbeitsraum bewegt wird. Oberhalb einer gewissen Drehzahl kann der Arbeitsraum daher als gasdicht angesehen werden. Weil die Gasverluste aber nicht Null sind, wird sich mit der Zeit der mittlere Gasdruck im Arbeitsraum an den Umgebungsdruck angleichen.

Um den Drehkolben-Stirlingmotor mit erhöhtem Arbeitsgasdruck zu betreiben, wäre es naheliegend, ihn, wie die anderen

Stirlingmotoren mit unvollkommener Abdichtung, in einem Drucktank zu betreiben. Allerdings müssten dann Wärmeströme von und zu dem Stirlingmotor über Wärmetauscher in den Drucktank hinein oder heraus gelangen, und damit wäre der Hauptvorteil, nämlich das Fehlen von teuren und aufwändigen Wärmetauschern, zunichte.

Die vorliegende Erfindung vermeidet die genannten Nachteile des Standes der Technik und bildet letzteren in vorteilhafter Weise weiter.

Die folgende technische Lösung gilt nicht nur für den zu verbessernden Drehkolben-Stirlingmotor, sondern im Wesentlichen allgemein für alle Stirlingmotoren, deren Abdichtung unvollkommen ist.

Der Stirlingmotor erhält erfindungsgemäß ein Ventil, das einen Druckausgleich des Arbeitsgases mit der Umgebungsatmosphäre ermöglicht. Dieses Ventil wird kurzzeitig immer dann geöffnet, wenn im Stirlingzyklus der Arbeitsgasdruck einen minimalen Wert erreicht. Zuweilen genügt es, wenn dies nur in jedem zweiten, dritten, vierten usw. Arbeitszyklus geschieht. So wird nicht mehr der mittlere, sondern der minimale Arbeitsgasdruck mit dem Umgebungsdruck ausgeglichen. Je nach Kompressionsverhältnis wird der mittlere Arbeitsgasdruck dann deutlich über den Umgebungsdruck angehoben.

Die durch das Ausgleichsventil fließende Gasmenge ist relativ gering. Sie entspricht gerade derjenigen Gasmenge, die durch die Spaltdichtungen entweicht. Sie ist vernachlässigbar und spielt im thermodynamischen Prozess keine Rolle.

Zur Verstärkung dieses Effekts kann man vorkomprimiertes Gas an das Ausgleichsventil heran führen, dann erfolgt der Druckausgleich gegenüber diesem, und der mittlere Arbeitsgasdruck wird noch größer. Zum Vorkomprimieren kann man

beispielsweise ein kleines Roots-Gebläse verwenden, das von dem Stirlingmotor mit angetrieben wird.

Alternativ könnte man zum Ausgleich der Gasverluste auch einen mehr oder weniger konstanten Gasstrom in den Arbeitsraum einleiten, über ein einfaches Drosselventil ohne besonderen Schaltmechanismus. Dazu bräuchte man in der Umgebung der Maschine Druckgas, zum Beispiel aus einem Kompressor oder aus einer Druckflasche, was insgesamt aufwändiger wäre.

Figuren 3 und 4 zeigen, wie einfache Löcher in den Endplatten (6) eines Drehkolben-Stirlingmotors zu Druckausgleichsventilen werden. Die Drehkolben (5), die an ihren Enden einen kreisrunden Querschnitt aufweisen, führen eine umlaufende Bewegung aus und verdecken mal die Druckausgleichsöffnungen (11) in der Endplatte (Figur 3), und mal nicht (Figur 4). Ein ähnlicher Mechanismus wurde bereits vorgeschlagen in DE102006018183.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Arbeitsgasdrucks wäre das Einspritzen geringer Mengen Flüssigkeit in den Arbeitsraum, insbesondere das Einspritzen von Wasser. Ein Teil der Flüssigkeit würde im heißen Bereich des Arbeitsraumes verdampfen, und der Dampf würde zusätzlichen Druck erzeugen. Im Zusammenspiel mit dem zuvor beschriebenen, schaltenden Ausgleichsventil würde der Stirlingprozess mit einem leistungsfähigen Dampfmaschinenprozess überlagert, wobei aber erheblich weniger Wasser benötigt würde, als bei einer reinen Dampfmaschine. Der andere Teil der eingespritzten Flüssigkeit würde in den kalten Drehkolbenbereichen landen und diese von innen her zusätzlich kühlen, würde so die thermodynamische Effizienz der Maschine verbessern.

Flüssigkeit würde insbesondere auch in die Spaltdichtungen eindringen und diese dynamisch abdichten, weil diese einer Flüssigkeit erheblich größeren Strömungswiderstand entgegen

stellten, als jedem Arbeitsgas. Bevor Arbeitsgas entweichen könnte, müsste zuerst alles Wasser mit viel Kraft durch die engen Spaltdichtungen gepresst werden. Diese dynamische Abdichtung wäre vor allem auf den kalten Bereich der Drehkolben beschränkt, wo die Flüssigkeit nicht verdampft. Bei hinreichend niedriger Betriebstemperatur könnte man so auch den heißen Bereich abdichten.

Auch oberhalb der Verdampfungstemperatur könnten eingespritzte Flüssigkeitströpfchen unter gewissen Bedingungen abdichtend wirken. Auf den heißen Drehkolbenoberflächen würden verdampfende Tröpfchen wie auf einer heißen Herdplatte herum springen, ohne diese zu benetzen. Bei den umlaufenden Drehkolben des Drehkolben-Stirlingmotors würden die tanzenden Tröpfchen durch Fliehkraftwirkung gezielt in die sich rinnenartig zuspitzenden Ausläufer des Arbeitsraumes gedrückt, hinter denen sich die Spaltdichtungen befinden, und dort würden sie sich dann zu einem abdichtenden, tanzenden Wulst vereinen.

Grundsätzlich könnte man auch eine brennbare Flüssigkeit in den Arbeitsraum einspritzen, am besten zusammen mit Luft, und man könnte diese Flüssigkeit zu den richtigen Zeitpunkten entzünden, falls sie das nicht schon von selbst tut. Durch die Verbrennung würde der Arbeitsgasdruck erhöht. Die Ventile in den Endplatten, und auch die Spaltdichtungen, würden das Abgas entweichen lassen. Der Stirlingprozess würde so mit dem leistungsfähigen Prozess einer Verbrennungskraftmaschine überlagert. Grundsätzlich könnte der letztere sogar vorherrschend werden.

Über das Einspritzen von Flüssigkeit könnte die Leistung des Stirlingmotors geregelt werden. Eingespritzte Flüssigkeit vergrößert den Druck im Arbeitsraum, und damit die Motorkraft.

Flüssigkeit könnte beispielsweise mit einer winzig kleinen Zahradpumpe eingespritzt werden, die vom Stirlingmotor mit angetrieben wird.

Das Einspritzen der Flüssigkeit kann beim Drehkolben-Stirlingmotor über Einspritzdüsen (12) an den Endplatten (6) erfolgen. Je nach Ausführungsform können von den Endplatten aus Ausläufer (10) bis weit in das Innere des Arbeitsraumes hinein ragen, bis zum heißen Bereich in der Mitte, sogar bis zur gegenüber liegenden Endplatte. Einspritzdüsen können an diesen Ausläufern vorgesehen sein, insbesondere an deren Spitzen, die sich vorzugsweise im oder am heißen Bereich befinden. Einspritzflüssigkeit kann durch Kanäle in den Ausläufern gepumpt werden. Sie würde dabei sogar vorgewärmt, und gleichzeitig würde der Ausläufer zum zusätzlichen Kühlelement im kalten, äußeren Bereich.

Die besagten Ausläufer sind eigentlich dazu gedacht, den Totraum zwischen den Drehkolben des kalten Bereichs auszufüllen, so genannte „Totraumfüller“ (10). Zwar wäre es grundsätzlich möglich, den Drehkolben-Stirlingmotor ganz ohne Totraum zu bauen. Doch wenn man durch Abrunden des linsenförmigen Drehkolbenquerschnitts einen gewissen Totraum schafft, werden gleichzeitig die Spaltdichtungen „tiefer“ und halten besser dicht. Auch kann man durch verschieden starke Abrundung im heißen und kalten Bereich, bei gleich bleibendem Hubraum, die wärmetauschende Oberfläche unterschiedlich groß machen. Der kalte Bereich braucht nämlich wegen der geringeren Temperaturdifferenzen allgemein eine größere Oberfläche, als der heiße. Die Totraumfüller füllen einen Teil des Totraums aus und machen ihn dadurch unschädlich. Der Querschnitt der Totraumfüller kann, muss aber nicht kreisrund sein.

Die Totraumfüller speichern auf ihren Oberflächen Wärme und wirken daher auch als Regeneratoren. Zu diesem Zweck sollte

ihre Oberfläche an den geeigneten Stellen besonders groß gestaltet werden, etwa mit feinen Lamellen oder Rippen.

Beim Drehkolben-Stirlingmotor müssen die Drehkolben in ihrer Achsrichtung relativ lang sein, relativ zum Durchmesser, damit hier Bereiche unterschiedlicher Temperatur nebeneinander existieren können. Je länglicher die Drehkolben sind, desto besser gelingt die Aufteilung, und auch die wärmetauschende und wärmespeichernde Oberfläche je Arbeitsvolumen wird größer. Allerdings biegen sich dann die Drehkolben zunehmend unter dem erhöhten Innendruck, und auch unter der Fliehkraftwirkung. Die Drehkolben sollten daher besonders biegesteif sein.

Glücklicherweise ist es möglich, die Drehkolben von außen her abzustützen, und zwar mit Stützringen (9), die rollend auf den Drehkolben aufliegen und diese zusammen halten. Die Drehkolben haben an solchen Stellen einen kreisrunden Querschnitt.

Die Stützringe müssen in axialer Richtung gehalten werden, vielleicht mit besonderen Führungsrollen, oder auch durch magnetische Kräfte, damit sie sich nicht auf den Drehkolben verschieben.

Grundsätzlich kann man mit Stützringen die Drehkolben viel länger machen, als ohne. Die Stützringe platziert man am besten an den Übergängen zwischen dem heißen und dem kalten Bereich, dort, wo die Drehkolben durch die Ofenwand treten. So bilden die Stützringe die kleinsten möglichen, runden Durchtrittsöffnungen für die Drehkolben.

Mit vorliegender Erfindung werden die folgenden Vorteile erreicht.

Sowohl durch schaltende Druckausgleichsventile als auch durch das Einspritzen von Flüssigkeit kann mit geringem Aufwand der mittlere Arbeitsgasdruck eines Stirlingmotors wesentlich über

den Atmosphärendruck hinaus erhöht werden. Die Leistungsdichte des Stirlingmotors wird größer.

Das Einspritzen von Flüssigkeit erlaubt eine schnelle Anpassung der Motorleistung an den Leistungsbedarf, wie sie bei herkömmlichen Stirlingmotoren nicht gegeben ist.

Eingespritzte Flüssigkeit verbessert die Dichtigkeit des Arbeitsraumes, speziell an den Spaltdichtungen eines Drehkolbenmotors.

Nachfolgend werden die Zeichnungen näher erläutert.

Die Ziffern in den Zeichnungen bedeuten: Drehkolbenarray (1), Planetengetriebe (2), Maschinenrahmen (3), Ofen (4), Drehkolben (5), Endplatte (6), Heißer Bereich (7), Kalter Bereich (8), Stützring (9), Totraumfüller (10), Druckausgleichsventil oder Druckausgleichsöffnung (11), Einspritzöffnung (12).

Figur 1 zeigt ein Drehkolbenarray (1) für einen Stirlingmotor mit Druckausgleichsventilen (11) und Stützringen (9). Die Druckausgleichsventile sind hier einfache Löcher in den Endplatten (6). Das Drehkolbenarray dreht sich relativ zu den Endplatten. Dabei verdeckt es mal die Druckausgleichsöffnungen (11), mal nicht.

Figur 2 zeigt ein geöffnetes Drehkolbenarray (1) für einen Stirlingmotor, mit Totraumfüllern (10) und Einspritzdüsen (12). Der vordere Drehkolben wurde entfernt. Die Totraumfüller sind Ausläufer der Endplatten (6), die weit in den Arbeitsraum hinein ragen, hier bis an den Anfang des mittleren, heißen Bereichs. An deren Spitzen sind die Einspritzdüsen.

Figur 3 zeigt ein geschlossenes Druckausgleichsventil. Die runde Endplatte (6) verschließt den Arbeitsraum zwischen den Drehkolben (5), die an ihren Enden einen kreisrunden

Querschnitt aufweisen. Die Druckausgleichsöffnungen (11) sind hier von den Drehkolben verdeckt, also geschlossen.

Figur 4 zeigt ein geöffnetes Druckausgleichsventil. Die Drehkolben (5) haben sich gegenüber der Endplatte (6) gerade soweit bewegt und gedreht, dass die Druckausgleichsöffnungen (11) jetzt nicht mehr verdeckt sind, also geöffnet.

Figur 5 zeigt einen Drehkolben-Stirlingmotor. Der mittlere, heiße Bereich (7) des Drehkolbenarrays (1) befindet sich in einem Ofen (4), wo ihm von außen Wärme zugeführt wird. Der kalte Bereich (8) an den Drehkolbenenden befindet sich außerhalb des Ofens und wird an der Umgebungsluft gekühlt. Die Drehkolben (5) sind zwischen zwei Planetengetrieben (2) montiert, und diese wiederum sind an einem Maschinenrahmen (3) befestigt. Zwei Stützringe (9) verhindern das Verbiegen der Drehkolben unter dem erhöhten Arbeitsgasdruck, wobei sie auf den Drehkolben rollen und diese zusammen halten, und sie verengen gleichzeitig die Öffnungen in der Ofenwand.

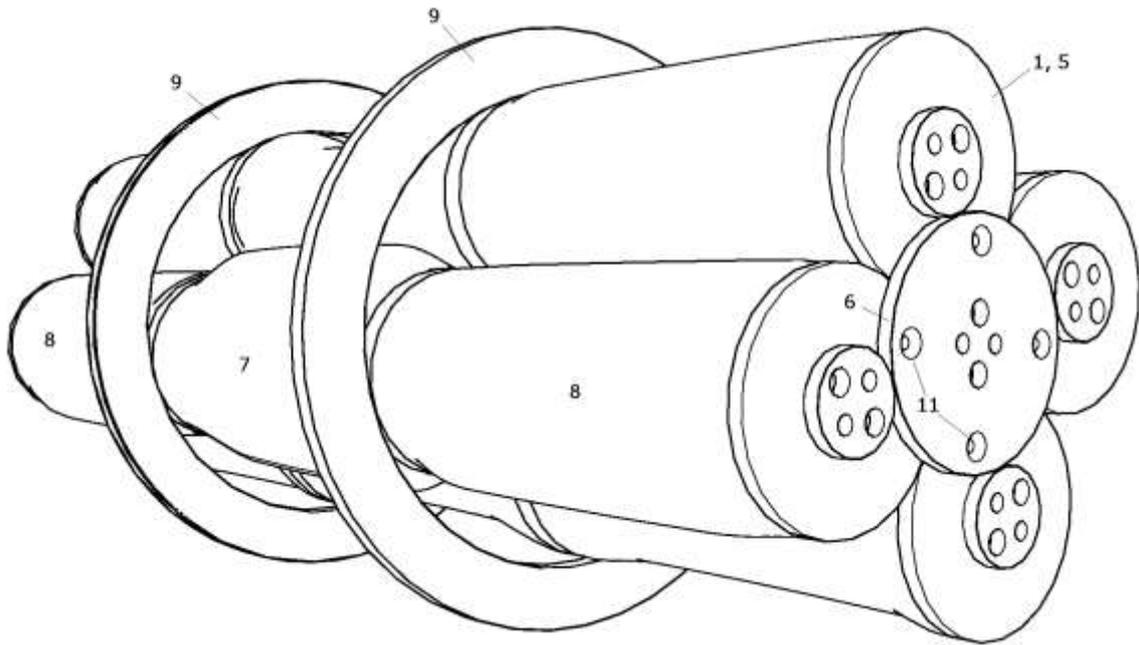
## Patentansprüche

1. Stirlingmotor, insbesondere ein Drehkolben-Stirlingmotor mit Spaltdichtungen zwischen den Drehkolben (5), umfassend  
  
wenigstens einen volumenveränderlichen Arbeitsraum, der in wenigstens einen heißen Bereich (7) und wenigstens einen kalten Bereich (8) unterteilt ist, und der eine Portion Arbeitsgas einschließt,  
  
dadurch gekennzeichnet,  
  
dass die Abdichtung des Arbeitsraumes unvollkommen ist,  
  
und dass sein ständig entweichendes Arbeitsgas durch wenigstens eine technische Maßnahme laufend ersetzt oder ergänzt wird, oder darüber hinaus auch am Entweichen gehindert wird.
2. Stirlingmotor nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei dieser an seinem Arbeitsraum ein Druckausgleichsventil (11) hat, welches zu geeigneten Zeitpunkten immer kurzzeitig einen Druckausgleich zwischen dem Arbeitsgas und einem anderen Gas, insbesondere der Umgebungsatmosphäre, ermöglicht.
3. Stirlingmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zu geeigneten Zeitpunkten immer eine Flüssigkeit in den Arbeitsraum eingespritzt wird, insbesondere Wasser.
4. Drehkolben-Stirlingmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei wenigstens eine sich gegenüber der Drehkolbenanordnung (1) drehende, besonders gestaltete Endplatte (6) als Druckausgleichsventil (11) dient.

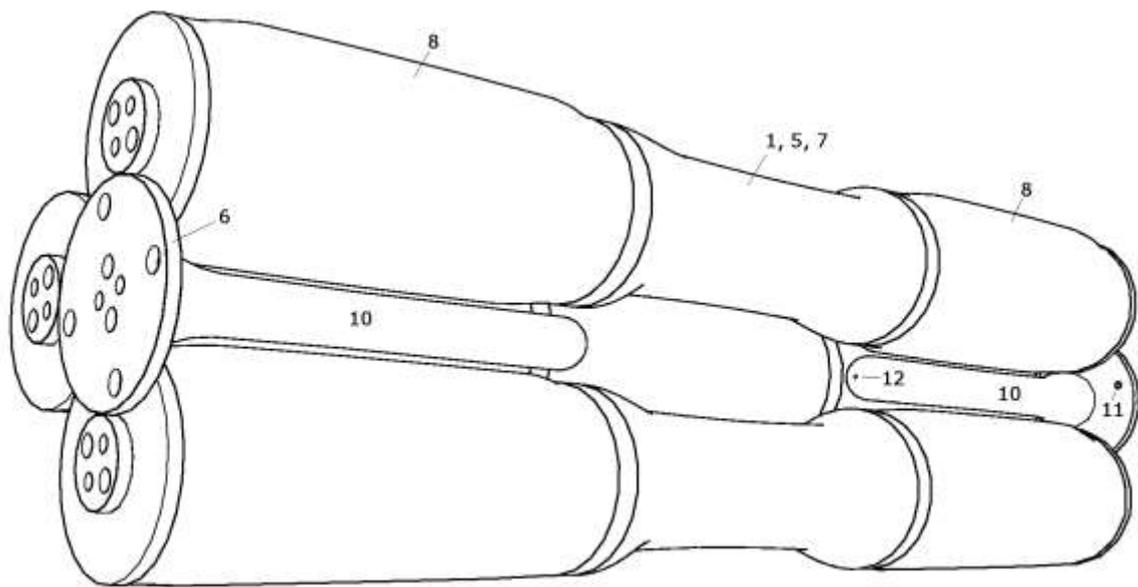
5. Drehkolben-Stirlingmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei dessen Drehkolben (5) gegen Auseinanderbiegen abgestützt sind, insbesondere durch wenigstens einen umlaufenden Stützring (9).

## **Zusammenfassung**

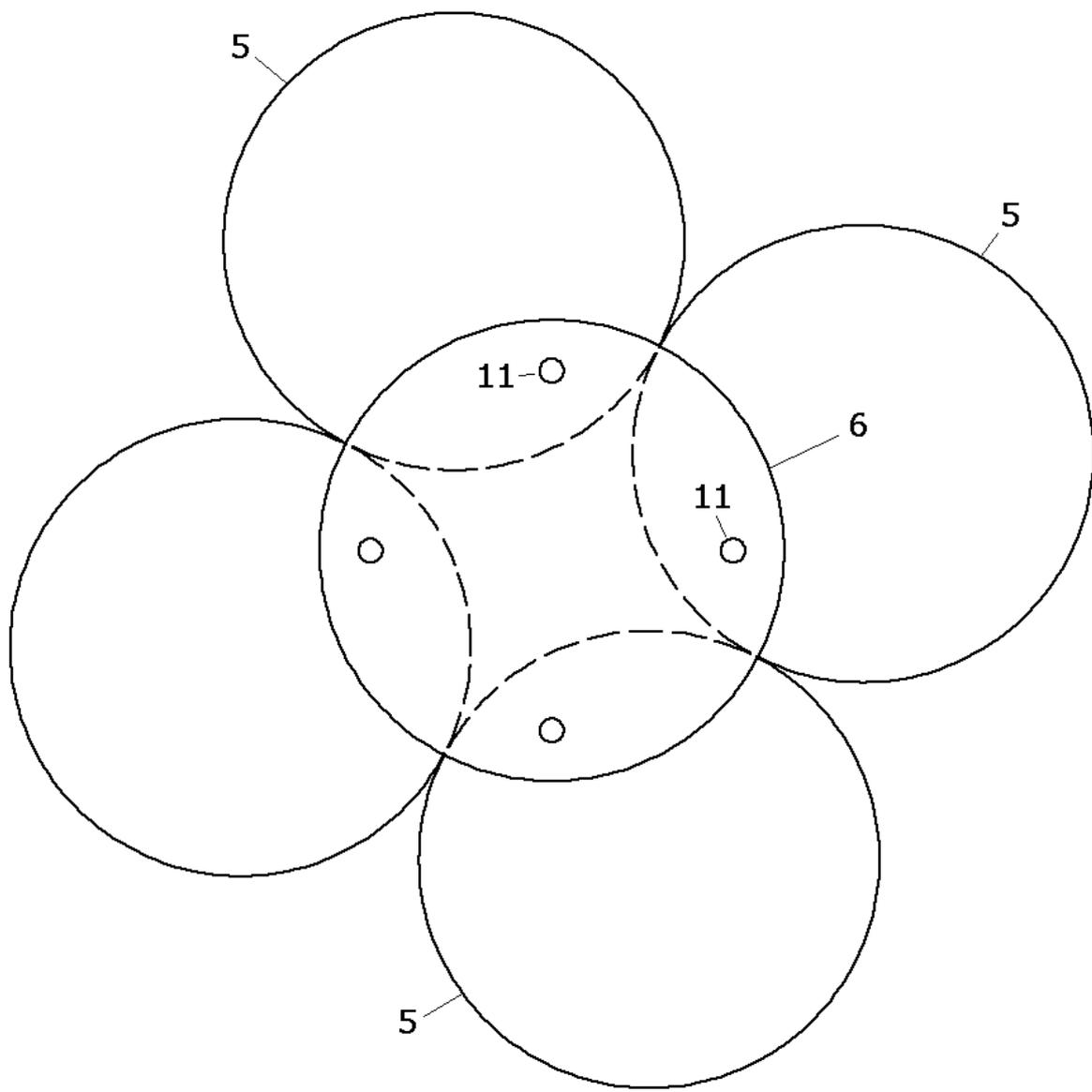
Ein Stirlingmotor mit unvollkommener Abdichtung des Arbeitsraums, insbesondere ein Drehkolben-Stirlingmotor mit Spaltdichtungen zwischen den Drehkolben, erhält ein Druckausgleichsventil, welches immer im Moment des minimalen Arbeitsgasdrucks einen Druckausgleich zwischen dem Arbeitsgas und der Umgebungsatmosphäre ermöglicht. Dadurch wird der mittlere Arbeitsgasdruck dynamisch über den Umgebungsdruck angehoben. Eine weitere Drucksteigerung, und auch eine verbesserte Abdichtung des Arbeitsraumes, wird erreicht durch Einspritzen einer verdampfbaren Flüssigkeit, insbesondere von Wasser. Das Verbiegen der länglichen Drehkolben unter erhöhtem Arbeitsgasdruck lässt sich durch Stützringe vermindern.



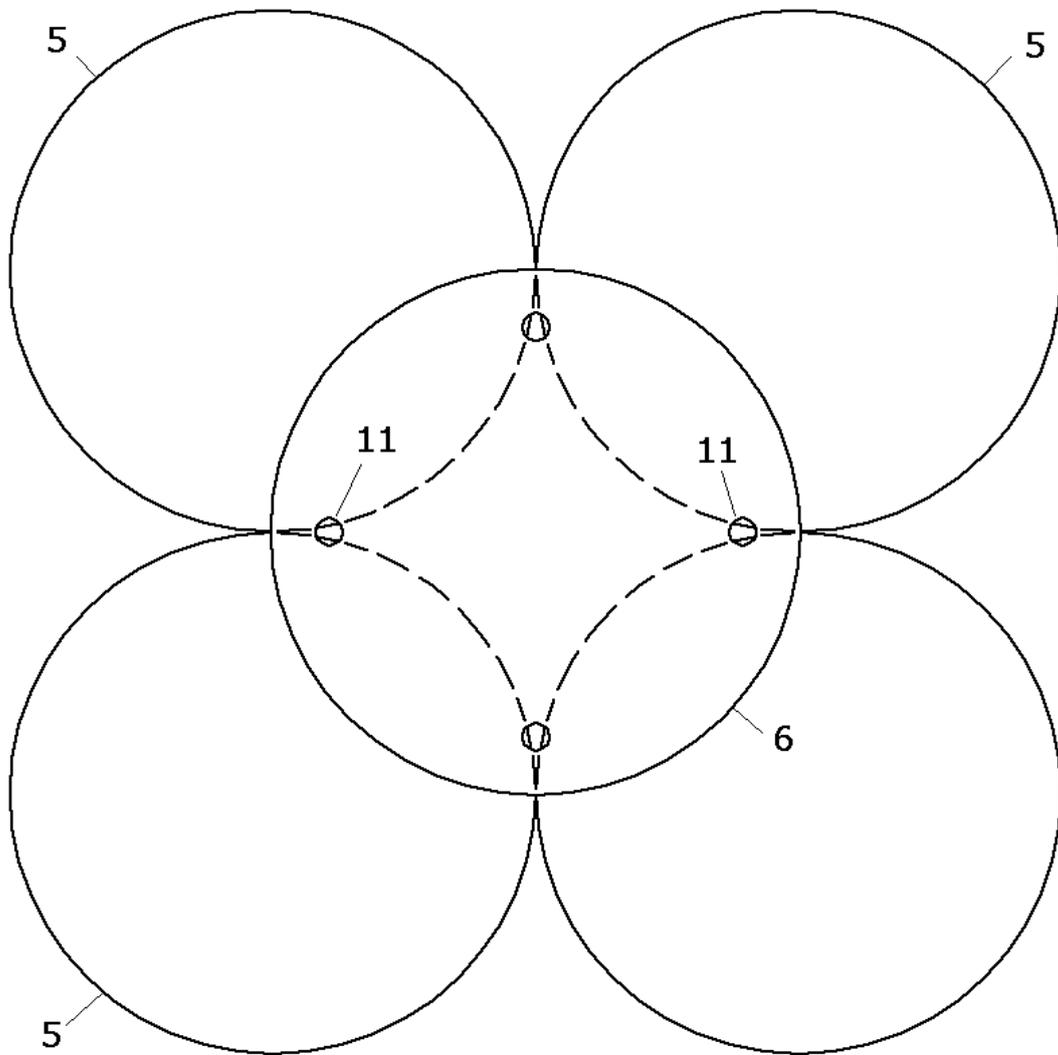
Figur 1. Drehkolbenarray für einen Stirlingmotor mit Druckausgleichsventilen und Stützringen.



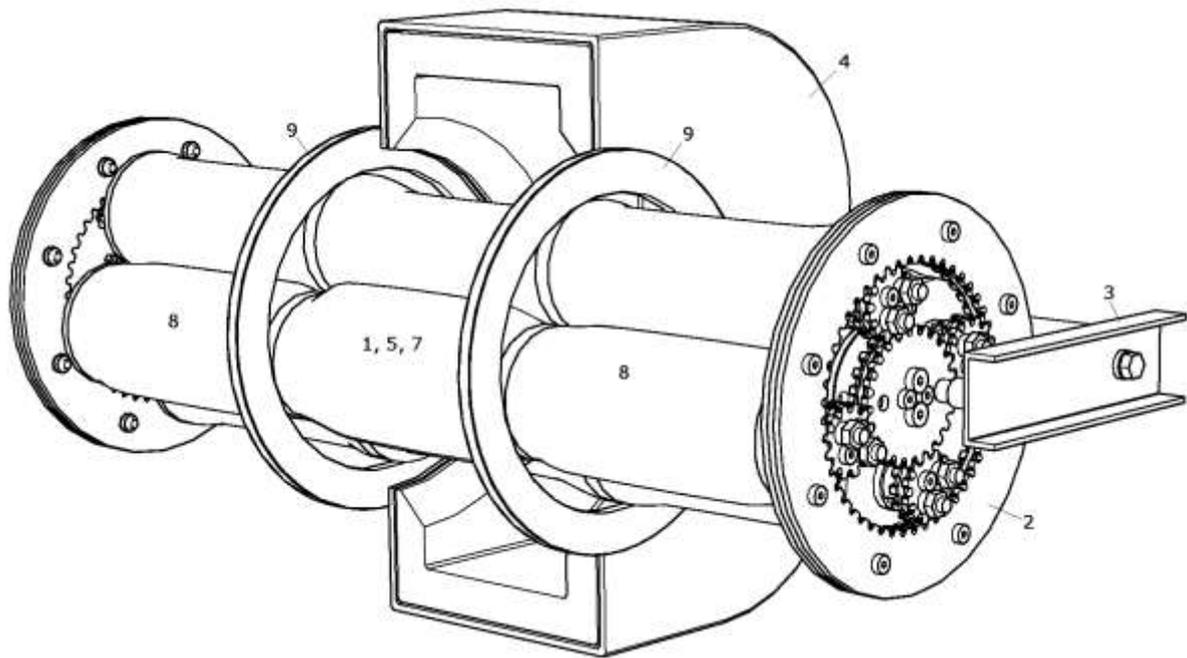
Figur 2. Geöffnetes Drehkolbenarray für einen Stirlingmotor, mit Totraumfüllern und Einspritzdüsen.



Figur 3. Geschlossenes Druckausgleichsventil.



Figur 4. Geöffnetes Druckausgleichsventil.



Figur 5. Drehkolben-Stirlingmotor.