

## Gutachten

zur

### Stirlingmaschine in Alphagamma-Anordnung

für die Fa. Frauscher Thermal Motors

erstellt von: Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas, Hochschule Reutlingen<sup>1</sup>

Stirlingmaschinen sind seit langer Zeit bekannt; das Patent von Robert Stirling datiert aus dem Jahr 1816. Somit ist der Stirlingmotor deutlich älter als die weithin verbreiteten Otto- und Dieselmotoren. Dennoch ist die Stirlingmaschine kaum in Anwendungen vertreten; allenfalls in der Tieftemperaturkältetechnik und seit jüngster Vergangenheit als Mikro-Blockheizkraftwerk findet man den Stirlingprozess in praktischen Maschinen verwirklicht. Die Motorentchnik wird stattdessen von Otto- und Dieselmotoren dominiert, und demzufolge ist hier sowohl ein Entwicklungsvorsprung als auch ein durch die Großserienfertigung bedingter Kostenvorteil entstanden, der von anderen Motorentchnologien nur schwer wettzumachen ist.

Mit der Abkehr von den fossilen Brennstoffen tun sich jedoch mittlerweile Nischen auf, in denen der Stirlingmotor seinen Konkurrenten technologisch überlegen ist, so dass die zuvor genannten Wettbewerbsnachteile in den Hintergrund treten. Ein Bereich dieser Art bietet sich in der Verstromung von Sonder- und insbesondere Schwachgasen sowie von fester Biomasse wie Holzpellets oder –hackschnitzeln. Diese Brennstoffe können von Otto- und Dieselmotoren aufgrund der geringen Zündfähigkeit und des Vorliegens in Stückform nur durch Zumischung und aufwendige Aufbereitung in Form von Vergasung verwertet werden. Im kleinen Leistungsbereich und damit unterhalb der großtechnisch angewandten ORC-Technologie öffnet sich hier dem Stirlingmotor ein Anwendungsbereich mit Alleinstellungsmerkmal, der zudem mit Blick auf die aktuelle Debatte um die Eindämmung der Erderwärmung von Tag zu Tag bedeutungsvoller wird. Mit Hilfe von Stirlingmotoren könnte mit der zunehmenden Zahl an Pellet- und Hackschnitzel-Heizkesseln nicht nur klimaneutral Wärme, sondern klimaneutral Wärme und Strom erzeugt werden.

Dieser zuletzt formulierte Gedanke ist keineswegs neu; es gibt bereits verschiedene Firmen, die versucht haben, den Stirlingmotor in dieser Anwendung zu etablieren und am Markt zu platzieren, bislang jedoch ohne durchschlagenden Erfolg. Aus den dabei verfolgten Konzepten lassen sich unschwer zwei Technologiebereiche ausmachen, die eine erfolgreiche Markteinführung mit entsprechender Verbreitung von Stirlingmotoren in der betrachteten Anwendung bislang verhindert haben: Dies ist die Verbrennungstechnik zum einen, und die Getriebetechnik zum anderen. Daraus folgt zunächst, dass der Stirlingprozess selbst und die Umsetzung dieses Prozesses in einem Motor nicht das technische Problem darstellt. Mittlerweile können Stirlingmotoren mit konkurrenzfähigen Leistungsgewichten und Wirkungsgraden gebaut werden. Dass die Verbrennungstechnik im Bereich der Biomasseanwendung hingegen nicht trivial ist, ist hinlänglich bekannt. Beim Antrieb eines Stirlingmotors kommt erschwerend hinzu, dass die Wärme bei hoher Temperatur aus den Rauchgasen ausgekoppelt werden muss. Nicht umsonst sind deshalb Firmen wie Mawera, Hoval oder ÖkoFEN mit der Entwicklung von biomassebetriebenen Stirlingmotoren befasst, deren Kompetenz in der Verbrennungstechnik ausgewiesen ist. Aus diesem Grund zeichnen sich in diesem Bereich entsprechende Lösungen ab, und sie werden teilweise bereits eingesetzt.

---

<sup>1</sup> Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas, Hochschule Reutlingen, email: bernd.thomas@reutlingen-university.de

Die Getriebetechnik stellt hingegen eine bislang nur unzureichend gelöste Problematik in der Stirlingmotorenentwicklung dar. Dies mag zunächst befremdlich klingen, da Getriebe in vielerlei Variationen entwickelt sind und eingesetzt werden. Beim Stirlingmotor kommen jedoch verschiedene Punkte zusammen, die die Getriebeentwicklung erschweren. Zum einen werden in der stationären Anwendung - im Gegensatz zur mobilen Anwendung - extrem hohe Anforderungen an die Lebensdauer mit größer 50.000 Betriebsstunden und an die Wartungsintervalle mit größer 5.000 – 6.000 Betriebsstunden gestellt. Zum anderen wird nach Möglichkeit versucht, lebensdauer geschmierte Lager und trockenlaufende Führungen einzusetzen, um auf Schmieröl verzichten zu können. Bei ölgeschmierten Motoren zeigt die Erfahrung, dass das Eindringen von Schmieröldämpfen in den Prozessraum nicht vollständig zu verhindern ist, was die Motoren auf lange Sicht zerstört, da sowohl der Regenerator durch das Öl verstopft als auch die Stähle im Hochtemperaturbereich durch Aufkohlung verspröden. Letztendlich sind alle oben genannten Entwicklungen von biomassetriebenen Stirlingmotoren an der Getriebetechnik gescheitert. Das einzig aktuell in der Markteinführung befindliche Aggregat dieser Art, der Pellematic Condens\_e von der Firma ÖkoFEN, ist ein Freikolben-Stirlingmotor, d.h., ein Stirlingmotor, der ohne Getriebe auskommt. Beim Freikolben-Stirlingmotor sind die Kolben federnd mit dem Gehäuse verbunden und bilden auf diese Weise ein schwingungsfähiges System, so dass kein Getriebe zur Synchronisation der Kolben erforderlich ist. Die elektrische Leistung wird über einen Lineargenerator ausgekoppelt. Aufgrund der mit den Federn zu beherrschenden Kräfte ist die Anwendung der Freikolbentechnik allerdings nur für sehr kleine Motoren mit Leistungen von einigen Watt bis zu sehr wenigen kW geeignet; der im Pellematic Condens\_e verbaute Freikolben-Stirlingmotor hat eine elektrische Leistung von 1 kW. Außerdem besitzen Lineargeneratoren schlechtere Wirkungsgrade gegenüber rotatorisch betriebenen Generatoren.

Größere Stirlingmotoren sind somit auf ein trockenlaufendes Getriebe mit hoher Lebenserwartung angewiesen, und hier setzt die Weiterentwicklung der Fa. Frauscher Thermal Motors an. Kern dieser Entwicklung ist jedoch nicht etwa ein neuartiges Getriebe. Hier hat es in der Vergangenheit ebenfalls eine ganze Reihe von Vorschlägen gegeben, die alle entweder aufgrund der Komplexität und damit der Kosten oder des Platzbedarfs gescheitert sind. Frauscher Thermal Motors schlägt stattdessen eine modifizierte Konfiguration des Stirlingprozesses vor, die eine Verminderung der aus dem Prozess auf das Getriebe wirkenden Kolbenkräfte verfolgt. Damit wird das Problem sozusagen an der Wurzel behandelt, und es bleibt der Freiraum einen klassischen Kurbeltrieb oder auch andere Getriebebauarten einzusetzen.

Bislang unterscheidet man drei Konfigurationen bei Stirlingmaschinen, die sogenannte Alpha-, die Beta- und die Gamma-Konfiguration. Bild 1 zeigt die drei Konfigurationen schematisch. Es ist zu erkennen, dass die Alpha-Konfiguration aus zwei klassischen Arbeitskolben aufgebaut ist, während in der Beta- und der Gamma-Konfiguration jeweils ein Arbeitskolben und ein Verdrängerkolben verbaut sind. Der Verdrängerkolben zeichnet sich dadurch aus, dass er auf der Ober- und der Unterseite vom Prozessdruck beaufschlagt ist und somit nur geringe Druckdifferenzkräfte auf das Getriebe überträgt, die im Wesentlichen durch den Querschnitt der Kolbenstange in ihrer Größe bestimmt werden. Es ist hinzuzufügen, dass die Druckdifferenzkräfte, die durch den Druckunterschied zwischen Prozess- und Getrieberaum hervorgerufen werden, gegenüber den Massen-, Reibungs- und Dämpfungskräften immer den größten Anteil an der Gesamtkraft am Kolben ausmachen. Daraus folgt unmittelbar, dass Verdrängerkolben im Vergleich zum Arbeitskolben eine geringere Kraft auf das Getriebe ausüben und dass deshalb die Beta- und die Gamma-Konfiguration in dieser Hinsicht gegenüber der Alpha-Konfiguration im Vorteil sind.

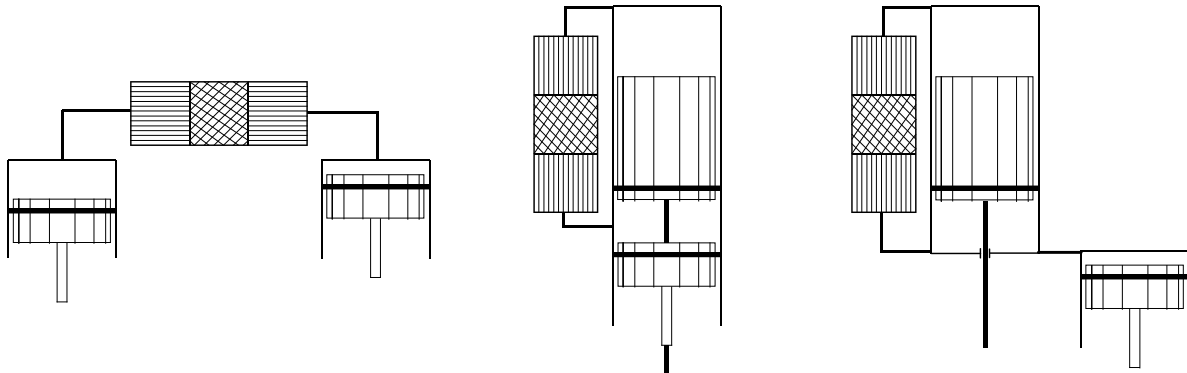
Bei der Beta-Konfiguration besteht allerdings der Nachteil, dass durch die beiden ineinanderlaufenden Kolbenstangen nur spezielle Getriebebauarten, wie Rhomben- oder Vier-Gelenk-Getriebe, eingesetzt

werden können; ein Kurbeltrieb ist nicht geeignet, weshalb sich die Fa. Frauscher Thermal Motors auf die eingehende Untersuchung der Alpha- und der Gamma-Konfiguration im Hinblick auf die resultierenden Kolbenkräfte beschränkt hat.

**Alpha-Konfiguration**

**Beta-Konfiguration**

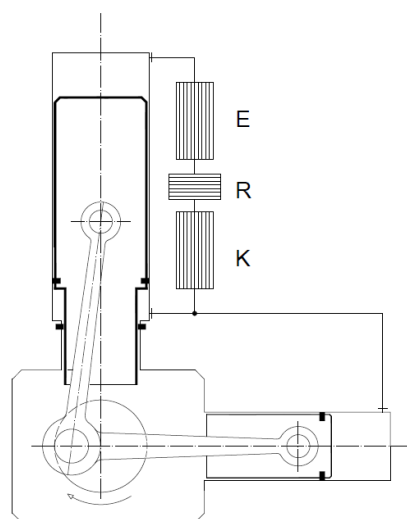
**Gamma-Konfiguration**



*Bild 1: Stirlingmaschine in Alpha, Beta und Gamma-Konfiguration*

Dabei zeigt sich, dass eine deutliche Vergrößerung des Stangenquerschnitts am Verdrängerkolben der Gamma-Konfiguration zwar einen Anstieg der Druckdifferenzkraft für diesen Kolben bewirkt. Dies allein ist nicht weiter verwunderlich, aber parallel ergibt sich durch diese Maßnahme eine Verringerung der Kolbenkraft am Arbeitskolben. Dieser Effekt ist insofern bedeutsam, da der Arbeitskolben über seinen Querschnitt erheblich größere Kräfte auf das Getriebe überträgt als der Verdrängerkolben. Im Endeffekt gelingt es somit, die Maximalkräfte, die von diesem Kolben auf das Getriebe ausgeübt werden, zu senken.

Bild 2 zeigt die entsprechend konfigurierte Stirlingmaschine mit einem (senkrechten) Verdrängerkolben mit erheblich vergrößertem Stangenquerschnitt und einem (waagerechten) Arbeitskolben. Der Verdrängerkolben gleicht damit mehr einem gestuften Arbeitskolben als einem klassischen Verdrängerkolben, dessen Kolbenstange allein die Aufgabe der Anlenkung des Kolbens durch das Getriebe hat. Die Variante, den Verdrängerkolben mit größerem Stangenquerschnitt und damit als Stufenkolben auszu-

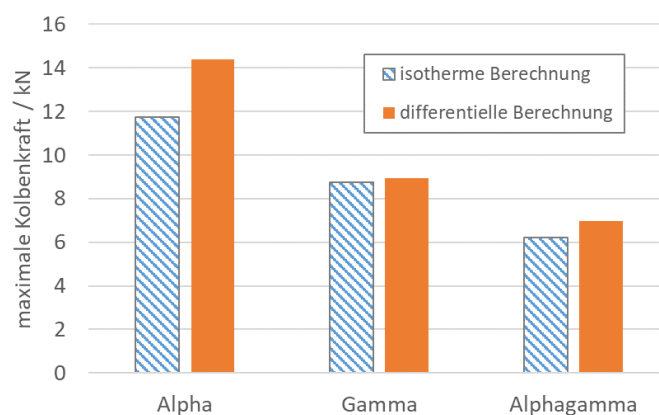


*Bild 2: Stirlingmaschine in Alphagamma-Konfiguration*

führen, ist für sich nicht neu, sondern Sie wurde bereits an anderer Stelle vorgeschlagen (z.B. Budliger 2000<sup>2</sup>). Die Zielsetzung war mit der Umverteilung der geleisteten mechanischen Arbeit vom Arbeits- auf den Verdrängerkolben zur Vergleichmäßigung der einzelnen Beiträge dabei jeweils ähnlich. Die technische Entwicklung der Fa. Frauscher Thermal Motors geht jedoch einen Schritt weiter, in dem sie die Umsetzung in einer kompakten Bauweise ermöglicht, die patentiert ist.

Da diese Anordnung zwischen der Gamma- und der Alpha-Konfiguration einzuordnen ist - es ist aus Bild 2 zu erkennen, dass die Alpha-Konfiguration erreicht wird, wenn der Stangenquerschnitt den Kolbenquerschnitt annimmt, wird sie als Alphagamma-Konfiguration (oder auch Alphagamma-Anordnung) betitelt.

Um einen quantitativen Eindruck des erzielten Effektes zu vermitteln, eignen sich bereits einfache thermodynamische Modelle, wie die isotherme Berechnung der Stirlingmaschine. In Bild 3 sind Ergebnisse derartiger Rechnungen in Bezug auf die maximale Kolbenkraft dargestellt.



*Bild 3: Maximale Kolbenkraft für eine Stirlingmaschine in Alpha-, Gamma- und Alphagamma-Konfiguration bei jeweils gleicher mechanischer Abgabeleistung*

Es ist zu deutlich zu erkennen, dass die maximale Kolbenkraft, die jeweils am Arbeitskolben bzw. am Kompressionskolben in der Alpha-Konfiguration auftritt, in der Alphagamma-Konfiguration am geringsten ausfällt. Zu den Rechnungen ist anzumerken, dass die jeweiligen Stirlingmaschinen über den mittleren Druck im Prozessraum auf die gleiche mechanische Abgabeleistung eingestellt wurden, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. Nach der isothermen Rechnung ergibt sich mittels der Alphagamma-Konfiguration konkret eine Verringerung der maximalen Kolbenkraft von 47,1% gegenüber der Alpha- und von 29,1% gegenüber der Gamma-Konfiguration, was als erhebliche Verbesserung einzustufen ist. Eine im Rahmen des Gutachtens durchgeführte Überprüfung dieser Berechnungen mit einem differentiellen Modell kommt zu ähnlichen Ergebnissen, wie Bild 3 zeigt.


Thermodynamisch ist der Effekt dadurch zu erklären, dass es mit der Alphagamma-Konfiguration über den vergrößerten Stangenquerschnitt möglich ist, die Phasenlage der Druckschwingung im Stirlingprozess so zu verschieben, dass sich im Zusammenspiel mit der Druckschwingung im Getrieberaum und den Massenkräften eine Vergleichmäßigung der Kräfte an den beiden Kolben bei gleichbleibendem Gesamtmoment an der Kurbelwelle ergibt. Dazu ist es wichtig zu wissen, dass die Druckschwingung im Prozessraum nicht nur durch die mechanische, sondern aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen in den Zylinderräumen auch durch eine thermische Kompression hervorgerufen wird. Ohne an dieser Stelle weiter ins Detail zu gehen, lässt sich aus dieser Betrachtung ableiten, dass sich über die Optimierung des Stangenquerschnitts am Verdrängerkolben für jede

<sup>2</sup> Budliger, J.P.: „Einfacher Stirling-Motor für die Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) in kleinen Wohngebäuden“, Tagungsband Europäisches Stirling Forum 2000, Osnabrück, 22.-24.2.2000, S. 201-211

Stirlingmaschinenauslegung in Alphagamma-Konfiguration eine Variante mit minimalen Kolbenkräften finden lässt. Insofern ist das erzielte Ergebnis verallgemeinerbar und nicht nur auf die bei der Fa. Frauscher Thermal Motors untersuchte Auslegung beschränkt. Dies macht die Entwicklung umso wertvoller, da sie auf jede Stirlingmaschine angewendet werden kann.

Auf diese Weise stellt die von der Fa. Frauscher Thermal Motors ausgearbeitete Alphagamma-Konfiguration einen wichtigen Schritt in Richtung einer geeigneten Getriebeauslegung dar, um die eingangs skizzierte Problematik bei der Entwicklung und Markteinführung von Stirlingmotoren zur Verstromung von Biomasse im kleineren Leistungsbereich aufzulösen. Neben diesem aus klimapolitischer Sicht sehr wünschenswertem Effekt, kann es mit Hilfe dieser Motorenkonfiguration aber auch gelingen, die Stirlingmaschine in anderen Anwendungen zu etablieren, was nicht als Selbstzweck zu verstehen ist, sondern im Sinne der Verbesserung gegenüber bestehender Technologie dem allgemeinen Fortschritt dient.

Reutlingen, 14.3.2020



Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas