

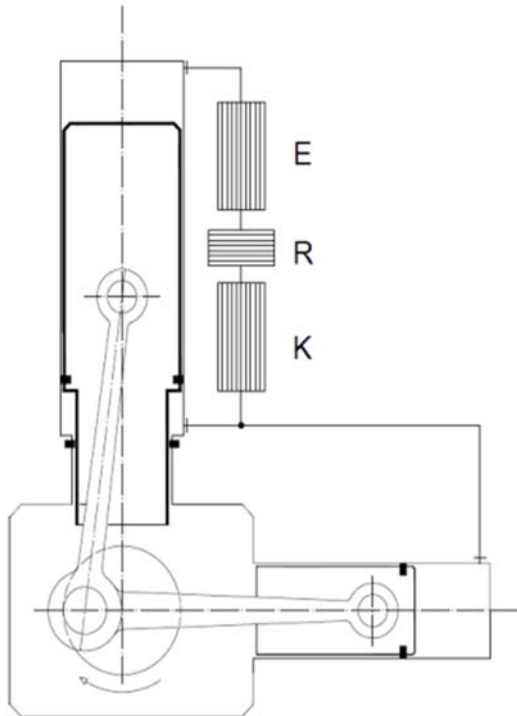
## Gutachten zum Frauscher AlphaGamma-Stirlingmotor

Dr Michael Gschwendtner

Frauscher GmbH hat einen modifizierten alpha-Stirlingmotor entwickelt, der unter dem Markennamen 'AlphaGamma' bekannt ist. Zutreffenderweise kann die Anordnung auch am besten als Hybrid zwischen einer alpha- und einer gamma-Anordnung beschrieben werden. Dies wird mit einem Stufenkolben auf der Expansionsseite erreicht, wobei eine der Kolbenflächen auf der kalten Seite mit dem bedrückten Kurbelgehäuse verbunden ist, die verbleibende ringförmige Kolbenfläche dagegen mit dem Kompressionsraum (Abb. 1). Auf den ersten Blick erzeugt diese Modifizierung nur eine volumetrische Phasenverschiebung auf der Kompressionsseite in Bezug auf die Expansionsseite. Die Konsequenzen sind jedoch viel tiefgreifender, wie im folgenden beschrieben wird.

### Das Simulationsprogramm Sage

Für die folgende Untersuchung des Frauscher AlphaGamma-Stirlingmotors wurden die



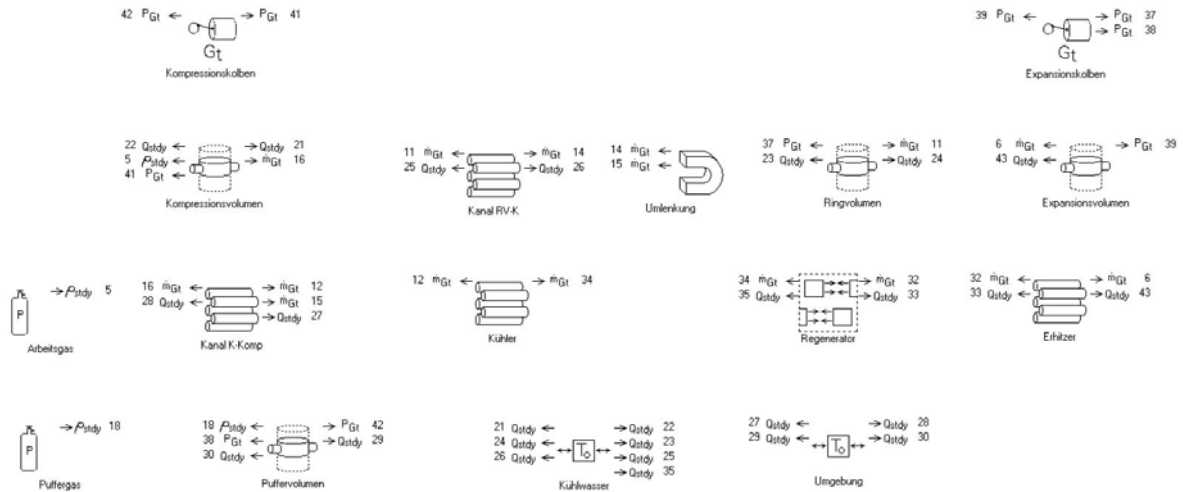
**Abb. 1:** Schemazeichnung des Frauscher AlphaGamma-Stirlingmotors (Quelle: Frauscher GmbH)

Dimensionen sämtlicher Bauteile von Frauscher GmbH zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltet die Kolbenhöhe sowie den mittleren Druck, bei dem der Motor betrieben wird. Anhand dieser Information wurde ein Modell in dem kommerziellen Stirling-Simulationsprogramm Sage erstellt, das von David Gedeon<sup>1</sup> entwickelt wurde.

In seiner Fähigkeit, Wärmeübertragungsprozesse und Strömungsverluste in oszillierender Strömung – sogar durch poröse Medien wie die Regeneratormatrix – zu modellieren, kann Sage als ein sehr leistungsfähiges Simulationsprogramm dritter Ordnung betrachtet werden.

Jede Komponente des Systems wird in eindimensionaler Form analysiert, unterteilt in eine vom Benutzer gewählte Anzahl an räumlichen Segmenten. Obwohl Sage in erster Linie das thermodynamische Verhalten des Arbeitsgases berechnet, wird auch die Wechselwirkung des Arbeitsgases mit den

<sup>1</sup> Gedeon, D., Sage User's Guide. Gedeon Associates, Athens, OH, 2013



**Abb. 2:** Sage Simulationsmodell des Frauscher AlphaGamma-Stirlingmotors

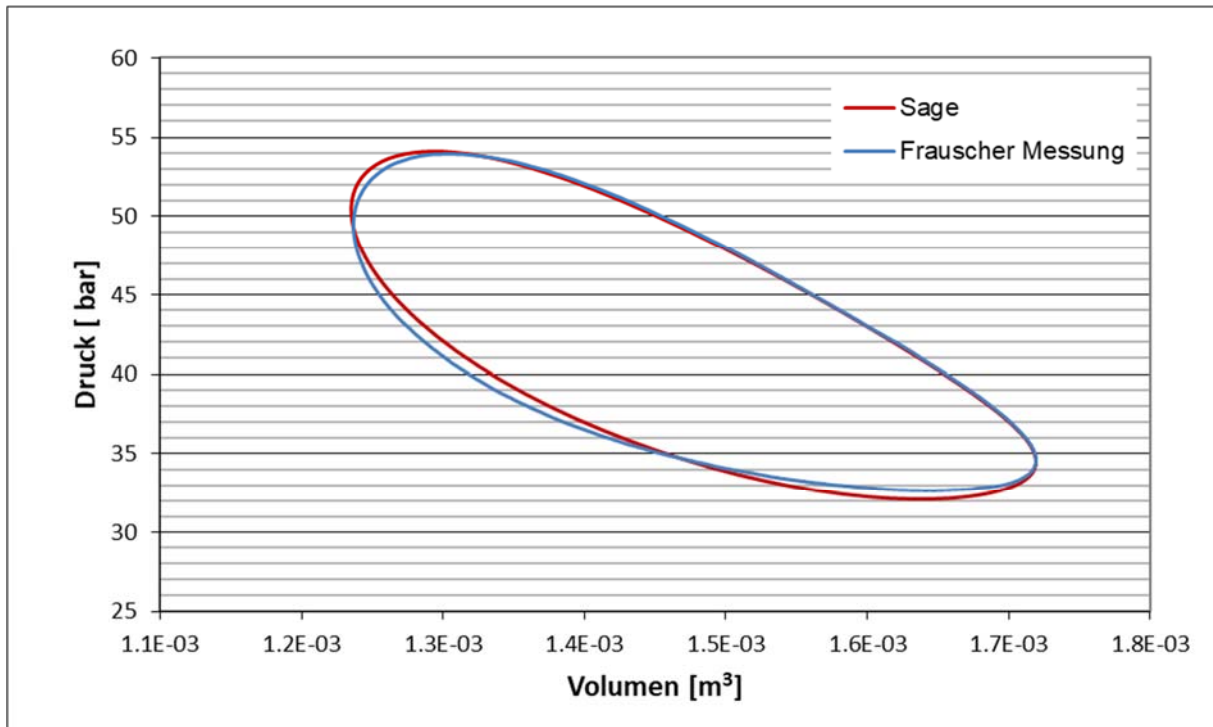
angrenzenden Wänden berücksichtigt, ebenso wie Wärmeleitung in den Behälterwänden sowohl in axialer als auch radialer Richtung. In dieser Hinsicht kann Sage irgendwo zwischen einem ein- und einem zweidimensionalen Simulationsprogramm angesiedelt werden. Sage rechnet in der Frequenzdomäne und löst sämtliche Erhaltungssätze für jedes Segment bis es zu einer Lösung konvergiert. Abb. 2 zeigt, wie die modellierte AlphaGamma-Anordnung in Sage aussieht.

### Validierung der Sage-Simulation

Um die Simulation in Sage zu validieren, wurde ein Vergleich angestellt zwischen den experimentellen  $pV$ -Daten, die von Frauscher GmbH zur Verfügung gestellt wurden, sowie den Ergebnissen der Sage-Simulation (Abb. 3). Für die Simulation mussten dazu einige Annahmen getroffen werden:

- Nachdem das minimale und maximale Volumen kinematische Randbedingungen unabhängig von jeglicher Simulation sind, und nachdem die Bestimmung des tatsächlichen Gasvolumens in einer realen Maschine unweigerlich mit Fehlern behaftet ist, wurde das Gesamtvolumen in Sage durch Hinzufügen einer kleinen Menge an Totvolumen im Regeneratorgehäuse angepasst.
- Eine weitere geringfügige Anpassung war für den mittleren Gasdruck erforderlich. Während Sage den vom Benutzer bestimmten mittleren Gasdruck durch die Anpassung der Gasmasse konstant hält, steigt der mittlere Gasdruck in einem realen Motor beim Hochfahren.
- Das Gasvolumen im Kurbelgehäuse wurde so gewählt, dass die Druckamplitude mit der in diesem Raum gemessenen übereinstimmt.
- Ansonsten wurden nur die Temperaturen der Wärmequelle sowie der Wärmesenke wie im Experiment gewählt.

Wie man in Abb.3 erkennen kann, stimmen die gemessenen  $pV$ -Werte mit denen der Sage-Simulation sehr gut überein. Laut Sage hat die  $pV$ -Fläche jedoch einen um ca. 6% kleineren Wert. Wie gross dabei allerdings der experimentelle Messfehler ist, ist jedoch nicht bekannt. Es fällt auf, dass die Übereinstimmung zwischen Simulation und tatsächlichem Motor während



**Abb. 3:** *pV-Diagramm der Sage-Simulation und der gemessenen Werte des Frauscher AlphGamma-Motors*

der Expansionsphase (oberer Teil der Prozesslinie) fast vollständig ist, während die Abweichung während der Kompressionsphase (unterer Teil der Prozesslinie) etwas grösser ist. Eine Erklärung für diese Beobachtung kann jedoch im Augenblick nicht gegeben werden.

Laut Sage beträgt die abgegebene Leistung bei einer Drehzahl von 1007 1/min, bei der der Prototyp getestet wurde, 8864 W. Die gemessene elektrische Leistung am Generator war bei Frauscher GmbH 6674 W, was darauf hindeutet, dass ca. 25% der indizierten Leistung durch mechanische Reibung sowie bei der mechanisch-elektrischen Umwandlung verloren gehen.

Eine weitere ermutigende Validierung der Sage-Simulation liegt im Vergleich mit einigen Temperaturmessstellen. Tabelle 1 zeigt die gemessenen Temperaturen an drei Stellen sowie die entsprechenden Temperaturen aus der Sage-Simulation. Mit Ausnahme der heißen Gastemperatur am Einlass zum Expansionszylinder, wo die Differenz ca. 15 K beträgt, sind die verbleibenden Gastemperaturen fast identisch.

**Tabelle 1:** *Vergleich gemessener Gastemperaturen mit Sage*

Messtelle	Experiment	Sage
Heisse Gastemperatur am Einlass zum Expansionszylinder	700.1°C	684.8°C
Heisse Gastemperatur am Einlass zum Regenerator	724.4°C	724.3°C
Kalte Gastemperatur am Einlass zum Kompressionszylinder	50.5°C	50.7°C

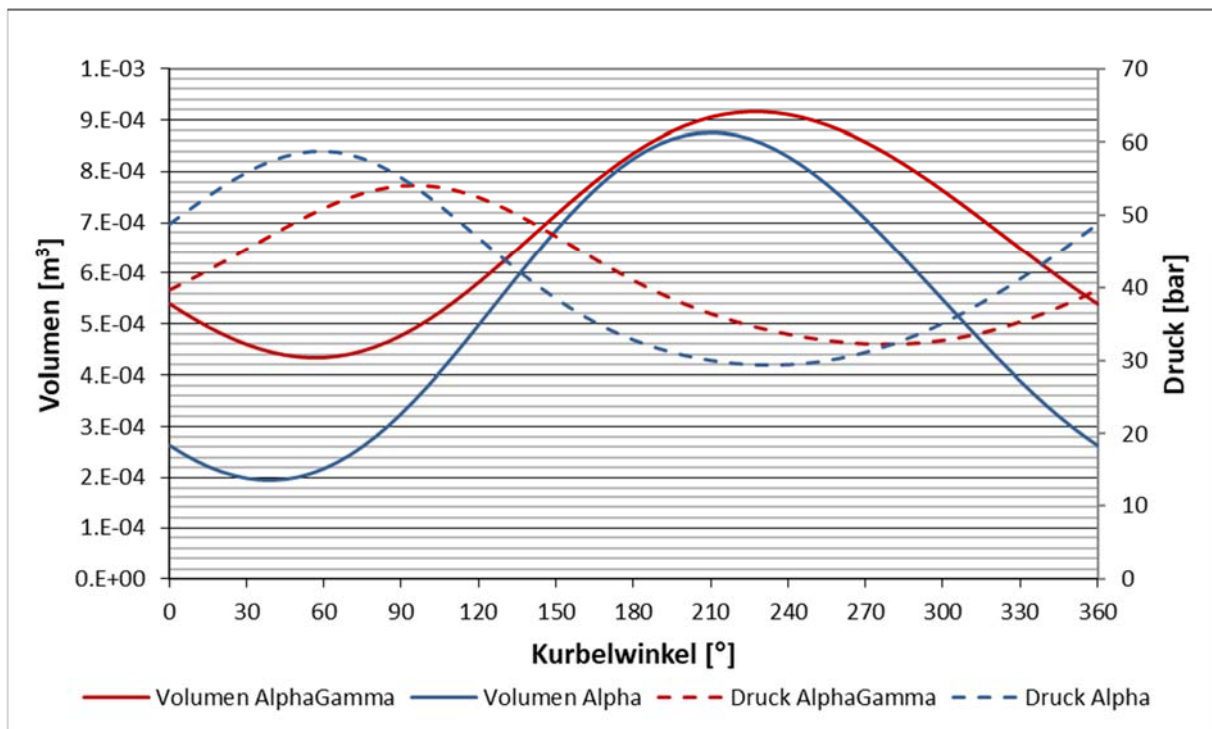
## Volumetrische Phasenbeziehung

Der vermutlich offensichtlichste Effekt, den die vorgeschlagene Anordnung auf das thermodynamische Verhalten verglichen mit einer reinen alpha-Anordnung hat, ist die volumetrische Phasenbeziehung zwischen Expansions- und Kompressionsraum. Nachdem der Kompressionsraum im AlphaGamma-Motor mit zwei Kolbenflächen in Kontakt ist, die sich um  $90^\circ$  phasenverschoben bewegen, bewirkt der Gesamteffekt eine Veränderung der Phasenbeziehung zwischen Gesamtvolumen und Druck, was entscheidend für die  $pV$ -Arbeit ist in Bezug auf die Integration von  $pdV$  über einen kompletten Umlauf.

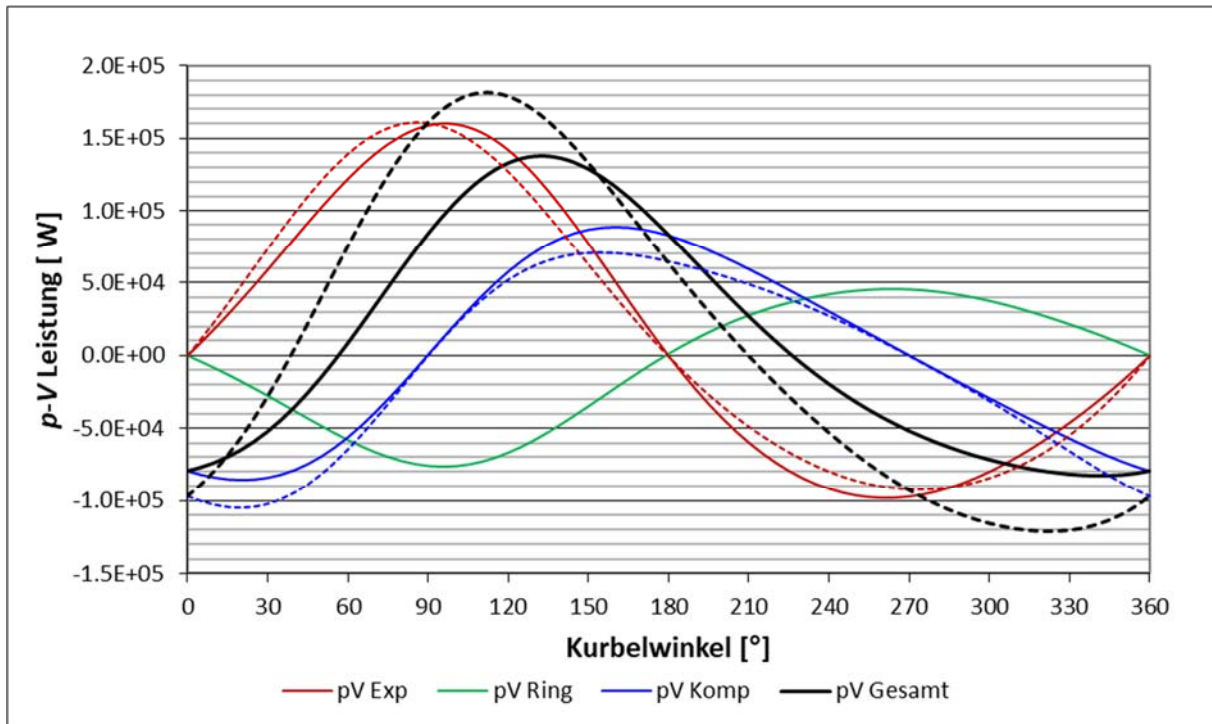
In Abb. 4 ist die zyklische Veränderung des Gesamtvolumens und des Druckes über einen kompletten Umlauf für sowohl die alpha-Anordnung (blau) als auch den AlphaGamma-Motor (rot) zu sehen. In beiden Fällen hinkt der Druck dem minimalen Volumen geringfügig hinterher. Ein Blick auf die numerischen Werte in Excel zeigt, dass der Druck in der alpha-Anordnung um nur  $20^\circ$  hinterher hinkt, während es fast  $40^\circ$  im AlphaGamma-Motor sind. Welchen Effekt das auf die vom bzw. am Gas geleistete Arbeit hat, kann in den folgenden  $pV$ -Leistungsdiagrammen gezeigt werden.

## $pV$ -Leistung

Abb. 5 zeigt die zyklische  $pV$ -Leistung des Arbeitsgases im Expansionsraum (rot), im vom Stufenkolben erzeugten Ringraum (grün), im Kompressionsraum (blau), sowie die Netto- $pV$ -Leistung des gesamten Gasraumes. Das Diagramm zeigt einen Vergleich zwischen der alpha-Anordnung (gestrichelt) und dem AlphaGamma-Motor (durchgezogen). An dieser Stelle sollte bemerkt werden, dass das Sage-Modell der alpha-Anordnung aus dem der AlphaGamma-Anordnung durch Entfernung des Ringvolumens (durch Entfernung der Stufe am Kolben)



**Abb. 4:** Zyklischer Verlauf des Gesamtvolumens und des Druckes im AlphaGamma-Motor (rot) und der alpha-Anordnung (blau) laut Sage



**Abb. 5:** Zyklische  $pV$ -Leistung des Arbeitsgases in verschiedenen Gasräumen in der alpha-Anordnung (gestrichelt) und dem AlphaGamma-Motor (durchgezogen)

sowie des Verbindungskanals zwischen Ringraum und Kompressionsraum entstanden ist. Mit dem Ergebnis, dass der reine alpha-Motor etwa 8% weniger Totvolumen hat und eine um ca. 40% höhere Druckamplitude. Dennoch erzeugt der alpha-Motor nur eine Netto-Leistung von 8592 W, während der AlphaGamma-Motor 8868 W erzeugt.

Entsprechend der Vorzeichenkonvention in Sage bedeutet ein positiver Wert in Abb. 5, dass das Gas Arbeit an seiner Umgebung verrichtet. Nachdem der Expansionskolben bei einem Kurbelwinkel von  $0^\circ$  am oberen Totpunkt ist, hat die  $pV$ -Leistung gerade den Nullpunkt passiert und steigt weiter in positiver Richtung, während der Kolben sich nach unten bewegt und der Expansionsraum grösser wird (rote Linien). Das Gegenteil ist der Fall für den ringförmigen Gasraum im AlphaGamma-Motor (grüne Linie), nachdem die beiden Kolbenflächen um  $180^\circ$  phasenverschoben sind.

Der Verlauf der zyklischen  $pV$ -Leistung des Expansionsraumes ist sehr ähnlich für die alpha-Konfiguration wie für den AlphaGamma-Motor. Die  $pV$ -Leistung im Kompressionsraum des AlphaGamma-Motors ist jedoch ganz klar in positive (d.h. arbeitproduzierende) Richtung verschoben, was sich darin äussert, dass der Kompressionskolben so gut wie keine Arbeit benötigt, ja sogar einen kleinen Betrag an Arbeit abgibt, wie in Tabelle 2 zu sehen ist (fett hervorgehoben). Damit wird der Kompressionskolben zum Verdränger wie in einem gamma-Motor.

Die Werte in Tabelle 2 veranschaulichen, wie der Expansionskolben im AlphaGamma-Motor sowohl die Kompression als auch Expansion am Arbeitsgas übernimmt, was in nur der halben Netto-Leistung verglichen mit der alpha-Anordnung resultiert. Was weiter zur Folge hat, dass die am Kolben wirkenden Kräfte, und damit auch die Lagerkräfte, viel kleiner sind, wie im folgenden gezeigt wird.

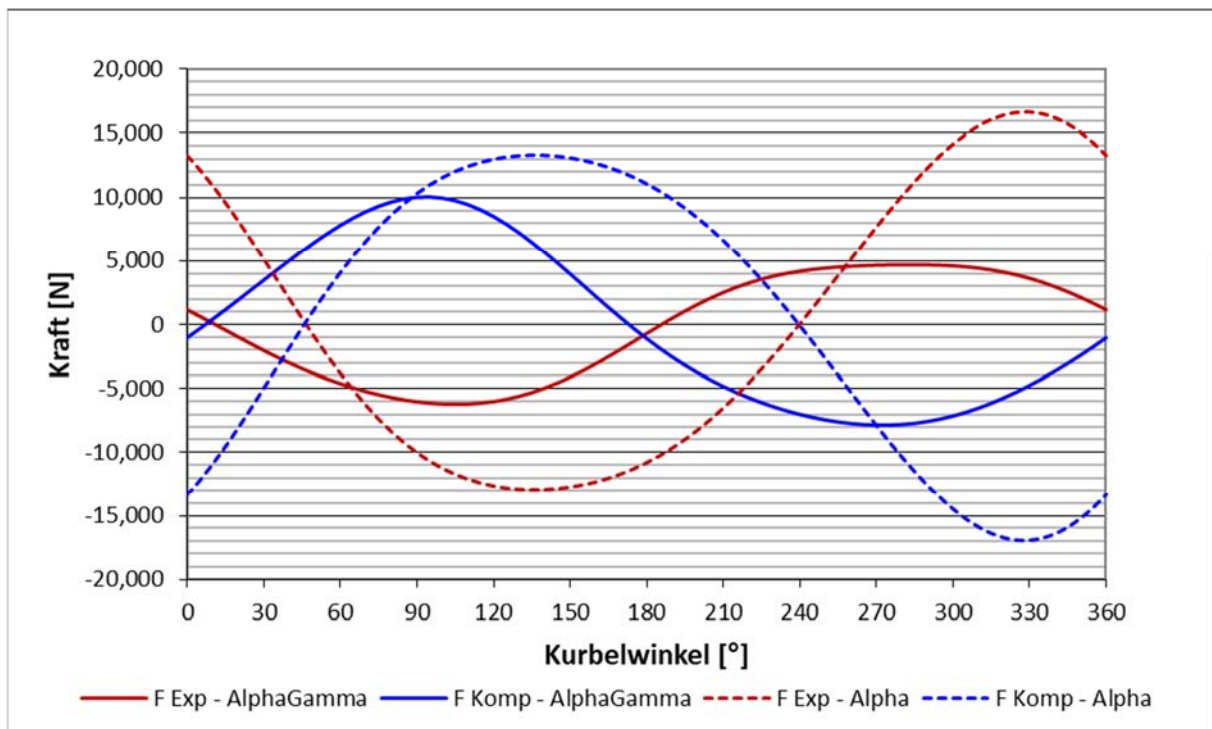
**Tabelle 2:** Netto-Leistung des Kompressions- und Expansionskolben in der alpha- und AlphaGamma-Anordnung

	Alpha	AlphaGamma
Netto-Leistung Kompressionskolben	-9649 W	<b>138 W</b>
Netto-Leistung Expansionskolben	18240 W	8730 W
Netto-Leistung des Motors	8591 W	8868 W

### Kolbenkräfte

In Abb. 6 ist die 'required forcing function' des Kompressions- und Expansionskolben für sowohl die alpha-Anordnung als auch den AlphaGamma-Motor dargestellt. Die 'required forcing function' in Sage ist die Kraft, die für die vorgeschriebene Bewegung notwendig ist, wobei sowohl Trägheitskräfte infolge von Beschleunigung als auch momentane Gaskräfte berücksichtigt werden. Aufgrund der vorhergehenden Diskussion zur  $pV$ -Leistung in den jeweiligen Gasräumen beider Anordnungen ist es nun nicht mehr überraschend, dass die auftretenden Kraftamplituden im AlphaGamma-Motor viel kleiner sind.

In Abb. 6 ist zu sehen, dass die maximale Kolbenkraft im Kompressionskolben der alpha-Anordnung ca. 1,7 mal höher ist als im AlphaGamma-Motor. Der Unterschied ist im Expansionskolben sogar noch grösser, wo die Kolbenkraft im Expansionskolben der alpha-Anordnung sogar um den Faktor 3 höher ist als im AlphaGamma-Motor. Dies hat zur Folge,



**Abb. 6:** 'Required forcing function' am Kompressions- und Expansionskolben in der alpha-Anordnung und dem AlphaGamma-Motor

dass die Lager in der vorgeschlagenen AlphaGamma-Anordnung deutlich weniger belastet werden. Die kleineren Kolbenkräfte bedeuten weiterhin, dass die Seitenkräfte auf die Kolbendichtungen reduziert sind, was geringere Reibung und geringeren Verschleiss zur Folge hat.

## **Diskussion und Fazit**

Die Simulation des vorgeschlagenen AlphaGamma-Motors mit Sage hat ergeben, dass die Kolbenkräfte ganz erheblich reduziert werden können, wenn in einer alpha-Anordnung ein Stufenkolben auf der Expansionsseite verwendet und der dabei entstandene Ringraum mit dem Kompressionsraum verbunden wird. Indem der Stirlingprozess zwischen drei Kolben durchgeführt wird, die alle ausser Phase sind, wird eine Phasenverschiebung zwischen dem Gesamtvolumen und dem Druck erzielt. Im vorliegenden Fall führt das dazu, dass der Kompressionskolben so gut wie keine Arbeit benötigt (ihn damit zum Verdränger macht) und dass die entgegengesetzten Gaskräfte zu einer viel kleineren resultierenden Kraft am Expansionskolben führen.

Obgleich diese Studie ganz klar den Unterschied zwischen einer traditionellen alpha-Anordnung und dem vorgeschlagenen AlphaGamma-Motor herausstellen konnte, so sollte erwähnt werden, dass ein absoluter Vergleich zwischen beiden Anordnungen schwer möglich ist. Wenn man alles andere konstant hält und nur den Verbindungskanal und den Ringraum vom AlphaGamma-Motor entfernt, um ihn in einen reinen alpha-Motor zu verwandeln, verändert sich das gesamte Gasvolumen. Dies führt zu einer höheren Druckamplitude in der alpha-Anordnung, mit der weiteren Konsequenz, dass der Wirkungsgrad geringfügig schlechter wird.

Will man jedoch einen Vergleich basierend auf gleicher Netto-Leistung ziehen, muss man jedoch den mittleren Druck in der alpha-Anordnung geringfügig erhöhen, um die bereits geringere Leistung auszugleichen. Dies hätte wiederum eine Auswirkung auf die Druckamplitude. Will man jedoch einen Vergleich bei gleicher Druckamplitude ziehen, müsste entweder der Kolbenhub verkleinert oder weiteres Totvolumen hinzugefügt werden, was die Leistung nur noch weiter vermindern würde. Aus diesem Grund wurde entschieden, so wenig wie möglich zu verändern, d.h. lediglich den Verbindungskanal zu entfernen und den mittleren Druck gleich zu halten. Auf diesem Weg ist die produzierte Leistung der alpha-Anordnung um nur 3% geringer, was dennoch einen angemessenen Vergleich ermöglicht.

Abschliessend kann gesagt werden, dass der vorgeschlagene AlphaGamma-Motor eine sehr clevere Abänderung der traditionellen alpha-Anordnung ist, bei der die auftretenden Kräfte im Kompressions- und Expansionskolben ganz erheblich reduziert werden können. Es wäre nun interessant, eine Studie der auf diese Weise neu hinzugekommenen Parameter, wie z.B. das Durchmesser Verhältnis am Stufenkolben oder anderer Phasenbeziehungen, durchzuführen, um zu sehen, welche Auswirkung sie auf die produzierte Leistung und den Wirkungsgrad haben.



Dr.-Ing. Michael Gschwendtner

Auckland, Mai 2020