

ATARAXIA – EIN HOCHEFFIZIENTER HUBKOLBENMOTOR FÜR SYNTHETISCHE KRAFTSTOFFE

Herbert FUNKE¹, Karl-H. FUNKE², Max SCHAULE³

Kurzfassung

Synthetische Kraftstoffe werden in Zukunft ein wichtiger Baustein bei der Energiespeicherung über längere Zeiträume und / oder für solche Anwendungen sein, bei denen eine netz- oder batteriegebundene Elektrifizierung nicht umsetzbar ist.

Ein wesentlicher Nachteil ist dabei der sehr schlechte Kettenwirkungsgrad aufgrund der langen und ineffizienten Energiewandlungskette zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe und der erneuten Energiewandlung in Wärmekraftmaschinen. Insbesondere Wärmekraftmaschinen haben in dieser Kette sehr schlechte Einzelwirkungsgrade, die für viele Anwendungen deutlich unter 40%, bestenfalls aber auch nur geringfügig über 50% liegen.

Der hier vorgestellte Verbrennungsmotor hat das Potenzial, über 20% höhere Wirkungsgrade zu erzielen als bisherige Hubkolbenmotoren. Erreicht wird das bei dem vorgestellten Hubkolbenmotor, der nach dem 4-Taktprinzip arbeitet, durch ein sogenanntes asymmetrisches Hubverhältnis. Dadurch, dass der Arbeits- und der Ausschietakt mehr als 400% gegenüber dem Ansaug- und Verdichtungsstakt verlängert ist wird das Abgas nahezu auf Umgebungsdruck sowie auf Temperaturen von ca. 200°C abgekühlt. Das funktioniert allerdings nur, wenn der Motor mit einer hohen Aufladung mit Ladeluftkühlung kombiniert wird. Dadurch kann der Motorblock „wärmedicht“ gestaltet werden. Kreisprozesswärme muss einzig bei der Ladeluftkühlung abgeführt werden. Der bei gewöhnlichen Hubkolbenmotoren vorhandene Wärmefluss zur Kühlung von Zylinder und Zylinderkopf, der zu einem erheblichen Teil der Leistungsverluste beiträgt, entfällt hierbei.

Das Paper erläutert den Aufbau und die Funktionsweise des ATARaXiA-Motors und zeigt Einsparpotenziale im Energieverbrauch wie auch mögliche Anwendungsgebiete auf.

Keywords: Motoren, Hubkolben, Synthetische Kraftstoffe, Kraftstoffeffizienz, Wirkungsgradoptimierung

1. Einleitung

Die Nutzung von fossilen Brennstoffen zur Energieerzeugung waren in der gesamten Menschheitsgeschichte ein wesentlicher Baustein von Fortschritt und Wohlstand. Die Intensivierung der Brennstoffnutzung der letzten 240 Jahre ermöglichte die Industrialisierung der heutigen modernen Gesellschaften. Der mit der Verbrennung einhergehende CO₂-Ausstoß ist dabei aber gleichzeitig die Hauptursache für den menschengemachten Klimawandel, der sich mittelfristig zu einer der größten Bedrohungen in der Menschheitsgeschichte entwickeln kann.

Ein großer Anteil der Brennstoffnutzung der letzten 240 Jahre entfiel auf Wärmekraftmaschinen. Beginnend mit der intensiven Nutzung von Dampfmaschinen waren es zum Ende des 18. Jahrhunderts vornehmlich Hubkolbenmaschinen die 100 Jahre später dann durch Hubkolbengasmotoren ergänzt wurden. Anfang des 20. Jahrhunderts kamen dann Strömungsmaschinen hinzu.

Der Einsatz von Hubkolbenmotoren und Gasturbinen hat im Laufe des 20. Jahrhunderts eine rasante Entwicklung in den Bereichen Mobilität und Energieversorgung ermöglicht. Mit der zunehmenden Verbrennung fossiler Brennstoffe ist aber auch der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre stark angestiegen, was allgemein als Hauptursache für den Klimawandel gesehen wird.

Mit der Entscheidung bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu wirtschaften wird es in 20 Jahren nur noch möglich sein, Brennstoffe einzusetzen die eine klimaneutrale Bilanz haben.

¹ Herbert Funke Hochschule Bielefeld, Interaktion 1, D-33619 Bielefeld, 0049 521 106 7694, herbert.funke@hsbi.de, www.hsbi.de

² Karl-H. Funke, ATARaXiA GmbH, Lucile-Grahn-Straße 43, D-80538 München, karlhfunke@mac.com,

³ Max Schaule, ATARaXiA GmbH, Lucile-Grahn-Straße 43, D-80538 München, m.schaule@gmx.de,

Die Notwendigkeit aus der fossilen Verbrennung auszusteigen erfordert einen enormen technischen Wandel. Während für Bereiche wie Gebäudeheizungen und Individualverkehr bereits Lösungen durch Elektrifizierung bereit stehen, gibt es jedoch Anwendungen die sich aus heutiger Sicht nur unzureichend elektrifizieren lassen. Das sind insbesondere mobile Anwendungen bei denen die hohe Energiedichte flüssiger Brennstoffe ein entscheidendes Kriterium darstellt. Insbesondere in der Luftfahrt, in der Schifffahrt und im Transportwesen ist eine wirtschaftliche Umstellung auf batteriegespeiste Elektroantriebe technisch wie wirtschaftlich kaum absehbar, da modernste Batteriespeicher derzeit noch eine um das 40-fach höhere Masse im Vergleich zu Flüssigbrennstoffen bei gleichem Energieinhalt aufweisen.

Der Ausstieg aus der fossilen Verbrennung wird somit den Umfang der Nutzung von Verbrennungskraftmaschinen erheblich reduzieren. Es werden aber Nischen verbleiben, die weiterhin den Einsatz von Verbrennungskraftmaschinen erfordern. Hierbei wird es eine Verlagerung der Prioritäten im Hinblick auf das Anforderungsprofil an die Verbrennungskraftmaschinen geben.

Zukünftige Verbrennungskraftmaschinen dürfen keine billigen fossilen Brennstoffe mehr verwenden, sondern müssen den CO₂-Ausstoß vollständig kompensieren. Aufgrund der dabei zu erwartenden hohen Kosten wird der Effizienz des Kraftstoffeinsatzes eine entscheidende Rolle zukommen

2. Ein hoher Wirkungsgrad ist entscheidend

Wärme- und Verbrennungskraftmaschinen sind abstrakt betrachtet Energiewandler, die im Brennstoff gespeicherte Energie durch Verbrennung und Umwandlung in mechanische Energie wandeln.

Der Wirkungsgrad beschreibt den Anteil der bezogen auf die eingesetzte Energie in nutzbare mechanische Energie umgewandelt werden kann. Bisherige Wärme- und Verbrennungskraftmaschinen gehen diesbezüglich sehr verschwenderisch mit Brennstoffen um. Der Wirkungsgrad moderner Hubkolbenmotoren in Pkws erreicht zwar theoretische Maximalwerte von 37% bei Otto-Motoren und bis zu 42% bei modernen Dieselmotoren. Betrachtet man allerdings die gesamte Wirkungsgradkette eines konventionellen Pkw-Antriebes in der Gesamtbilanz, so liegt der energetische Gesamtwirkungsgrad vom Kraftstoff bis zu den Antriebsrädern (tank to wheel) je nach Fahrprofil nur um 20%. Bei Elektrofahrzeugen liegt ein vergleichbarer Wert (battery to wheel) bei über 70%.

Auch bei größeren Hubkolbenantriebsmotoren wie Lkw- oder Schiffsmotoren erreichen die Verbrennungskraftmaschinen im günstigsten Fall Wirkungsgrade von nur knapp über 50%. Diese Werte betrachten aber nur die Wärme- und Verbrennungskraftmaschine als den Hauptbestandteil des Antriebsstrangs. Je nach Einsatzprofil reduzieren sich diese maximalen Wirkungsgrade für den gesamten Antriebsstrang dann noch durch weitere Verluste umso stärker, je mehr Wandlungsschritte im Antriebsstrang (z.B. durch Getriebe) vollzogen werden und umso häufiger ineffiziente Betriebszustände im niedrigen Teillastbetrieb genutzt werden.

Der größte „Energieverschwender“ im Antriebsstrang mit Verbrennungsmotoren ist stets die Wärme- und Verbrennungskraftmaschine. Der oft angegebene maximale Wirkungsgrad erreicht auch bei sehr großen Maschinen selten die 50%-Grenze. Den theoretisch maximalen Wirkungsgrad erreichen Verbrennungsmotoren nur in einem schmalen Betriebsbereich. Häufige Last- und Drehzahlwechsel wie bei Fahrmanövern üblich reduzieren den Wirkungsgrad der Wärme- und Verbrennungskraftmaschinen dazu noch einmal erheblich.

Auf Basis vorstehender Erkenntnisse ergeben sich folgende Schlüsse:

- Bei zukünftigen Verbrennungsmotoren ist eine signifikante Wirkungsgradsteigerung entscheidend
- Im Betrieb ist sicher zu stellen, dass die Verbrennungskraftmaschine in Betriebszuständen nahe am besten Wirkungsgrad betrieben wird.
- In Einsatzfällen mit häufiger Teillast und wechselnden Betriebszuständen ist ggf. eine Hybridisierung sinnvoll

2.1. Wirkungsgrad eines Hubkolbenmotors

Der Wirkungsgrad eines Hubkolbenmotors ist die geleistete mechanische Arbeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums bezogen auf die eingesetzte Energie in Form von Kraftstoff. Der Anteil der Kraftstoffenergie der nicht in mechanische Arbeit gewandelt werden kann geht in Form von Wärmeenergie, Reibung und Druckenergie für den Zweck des mechanischen Antriebs verloren. Analysiert man die Verluste eines Hubkolbenmotors so wird deutlich, dass insbesondere thermische Verluste auftreten. Dieses wird an der Wirkungsweise eines 4-Takt-Hubkolbenmotors hier genauer erläutert:

2.1.1. Funktionsprinzip eines 4-Takt-Hubkolbenmotors:

Im 1. Takt (Ansaugtakt) strebt der Kolben abwärts, wodurch sich der Arbeitsraum vergrößert. Durch das geöffnete Einlassventil wird Umgebungsluft angesaugt. Der Ansaugtakt endet, wenn der Kolben den unteren Totpunkt erreicht hat. Das Einlassventil schließt

Im 2. Takt (Verdichtungstakt) strebt der Kolben aufwärts. Im geschlossenen Arbeitsraum wird die Luft stark verdichtet. Je nach Verdichtungsverhältnis steigt der Druck auf 20 bis über 50 bar. Die Temperaturen steigen auf bis zu 500°C.

Am Ende des Verdichtungstaktes unmittelbar bevor der Kolben den oberen Totpunkt erreicht, wird Kraftstoff eingespritzt, der sich mit der Luft im Brennraum vermischt und gezündet wird. Der 3. Takt (Arbeitstakt) beginnt mit der Verbrennung des Luft/Kraftstoff-Gemisches. Die Verbrennung erfolgt insbesondere bei Otto-Motoren sehr schnell, so dass der Kolben auch nach der Verbrennung noch nahe am oberen Totpunkt steht. Durch die explosionsartige Verbrennung entstehen sehr hohe Temperaturen bis über 2.000°C und Drücke bis über 100 bar. Der hohe Druck des Gases treibt den Kolben nach unten. Mit dem sich vergrößernden Arbeitsraum reduzieren sich Druck und Temperatur des Gases. Wenn der Kolben im unteren Totpunkt angekommen ist, beträgt der Restdruck des Abgases je nach Lastzustand des Motors immer noch ca. 4-5 bar. Die Temperatur des Gases beträgt dabei immer noch bis zu 900°C.

Zu Beginn des 4. Taktes (Ausschietakt) befindet sich der Kolben im unteren Totpunkt und das Auslassventil wird geöffnet. Aufgrund des immer noch vorhandenen Überdruckes entweichen die noch sehr heißen Abgase im ersten Moment mit Überschallgeschwindigkeit durch den sich öffnenden Ventilsplatt. Während des Ausschietaktes strebt der Kolben aufwärts und schiebt die noch sehr heißen Abgase durch das geöffnete Auslassventil in die Abgasanlage. Sobald der Kolben wieder den oberen Totpunkt erreicht, ist das Auslassventil geschlossen und es beginnt ein neuer Prozessumlauf mit dem Start des 1. Taktes.

Im p-v-Diagramm wird der Druckverlauf des Arbeitsgases über das Brennraumvolumen dargestellt. In diesem Kreisprozess lassen sich die Zustandsgrößen des Arbeitsgases mit thermodynamischen Zusammenhängen berechnen. Die Größe der sich im rechts drehenden Kreisprozess ergebenden Fläche ist ein Maß für die Arbeit die pro Prozessablauf verrichtet wird. Mit der Information, wie häufig der Kreisprozess pro Zeiteinheit durchlaufen wird lässt sich dann die thermodynamische Leistung des Hubkolbenmotors ausrechnen.

Der Kurbeltrieb wandelt die Bewegung des wechselweise auf- und abwärts laufenden Kolbens in eine Drehbewegung der Kurbelwelle. Bei dem zuvor beschriebenen Motor wird nur im 3. Takt mechanische Arbeit am Kolben verrichtet. In den anderen Takten muss durch den Kolben Arbeit verrichtet werden, damit der Motor durchläuft. Die Energie dazu wird der Schwungmasse entnommen, die im Wesentlichen aus allen fest mit der Kurbelwelle verbundenen und mit Kurbelwellendrehzahl rotierenden Teilen besteht.

2.1.2. Verluste im Hubkolbenmotor

Die wesentlichen Verluste im Hubkolbenmotor sind:

- Druckverluste im Abgas
- Thermische Verluste im Abgas
- Thermische Verluste durch Kühlung des Brennraumes
- Unvollständige Verbrennung
- Blow-by-Effekte durch unvollkommene Kolbenabdichtung

- Mechanische Reibung im Motor
- Energiebedarf von Nebenaggregaten

Druckverluste und thermische Verluste im Abgas sind durch den thermodynamischen Prozess bedingt und werden auch bei der Kreisprozessberechnung mit berücksichtigt. Diese Verluste sind vergleichsweise hoch.

Damit Zylinder, Kolben und Zylinderkopf nicht überhitzen und thermisch beschädigt werden ist eine Kühlung dieser Bauteile erforderlich. Die Kühlung erzeugt einen ständigen Wärmestrom aus dem Brennraum heraus. Damit wird dem Arbeitsgas thermische Energie entzogen. Diese thermischen Verluste machen ebenfalls einen erheblichen Anteil der Verluste des Motors aus. Bei einer einfachen Kreisprozessberechnung werden diese Kühlverluste aber nicht mit berücksichtigt. Das führt dazu, dass die tatsächliche Arbeitsfläche des Kreisprozesses kleiner ausfällt als die im Kreisprozess errechnete Arbeitsfläche. Entsprechend fallen die Wirkungsgrade realer Hubkolbenmotoren deutlich geringer als die im thermodynamischen Kreisprozess errechneten Wirkungsgrade aus. Das gilt insbesondere für kleinere und thermisch hoch belastete Motoren.

3. Der ATARaXiA-Motor

Der ATARaXiA-Motor ist ein Hubkolbenmotor nach dem 4-Takt-Prinzip. Ziel des Motors ist es, einen deutlich höheren Wirkungsgrad gegenüber konventionellen Hubkolbenmotoren zu erreichen.

3.1. Funktionsprinzip des ATARaXiA-Motors

Der Kerngedanke des ATARaXiA-Motors ist eine signifikante Verlängerung des Arbeitshubes. Anders als beim Atkinson-Motor, der eine Verlängerung des Arbeitshubes um bis zu 30% erreicht, wird der Arbeitshub beim ATARaXiA-Motor auf 400-500% gegenüber dem Verdichtungshub vergrößert. Der Fokus des ATARaXiA-Motors liegt damit auf einer nahezu vollständigen Entspannung der Arbeitsgase.

Mit dem hohen Entspannungsgrad der Arbeitsgase werden drei Maßnahmen verfolgt:

- Reduzierung des Abgasenddruckes auf knapp über Umgebungsdruck (1,2 – 1,5 bar)
- Reduzierung der Abgastemperaturen auf ca. 200°C
- Vollständiger Verzicht auf äußere Brennraumkühlung

Durch diese Maßnahmen können wesentliche Verluste des Hubkolbenmotors deutlich reduziert werden. Denn größten Effekt erzielt dabei ein vollständiger Verzicht auf äußere Brennraumkühlung. Dieses ist nur möglich, wenn das Arbeitsgas zum Ende des Arbeitstaktes so weit abkühlt, dass eine Überhitzung aller am Brennraum angrenzenden Teile sicher vermieden wird. Eine untere Temperaturgrenze stellt dabei die Kondensationsgrenze von Wasser, das sich im Abgas befindet, dar.

Um derart niedrige Temperaturen im Abgas zu erreichen, müsste der Abgasenddruck eines Saugmotors auf deutlich unter Umgebungsdruck entspannt werden. Daher ist der Aufbau eines entsprechenden Motors nur mit kombinierter Aufladung sinnvoll. Da für einen Abgasturbolader kein entsprechender Ladedruck zur Verfügung steht muss die Aufladung mit einem mechanisch angetriebenen Verdichter erfolgen. Dieses kann mit entsprechenden Schraubenverdichtern o.ä. ggf. auch mehrstufig erfolgen. Die Ladestufe muss mit einer effizienten Ladeluftkühlung kombiniert werden. Auf diese Weise wird die Wärmeabfuhr mit Ausnahme der geringen Abgasrestwärme nahezu vollständig auf die Vorverdichterstufe ausgelagert. Der Motorblock selbst ist wärmedicht

3.2. Mechanischer Aufbau des ATARaXiA-Motors

Wesentliches Merkmal des ATARaXiA-Motors ist der gegenüber dem Ansaughub deutlich verlängerte Arbeitshub. Dieses erfordert eine erhebliche Modifizierung des Kurbeltriebes. Der ATARaXiA-Motor erreicht das stark asymmetrische Hubverhältnis durch die Anordnung einer Doppelkurbelwelle. Die Hauptkurbelwelle trägt an ihrem Exzenter eine Sekundärkurbel deren Exzenter das untere Pleuellauge antreibt. Im Zentrum der Hauptkurbelwelle ist ein Primärzahnrad gelagert, das zunächst als feststehend betrachtet wird. Ein Sekundärzahnrad ist drehfest mit der Sekundärkurbel befestigt und kämmt mit dem Primärzahnrad. Beide Zahnräder haben die gleiche Zähnezahlszahl sind aber als Unrundsatz so optimiert, dass Lastspitzen die sich im oberen Totpunkt zu Beginn des Arbeitstaktes ergeben eine optimale Lastverteilung im Kurbeltrieb ermöglichen. Aufgrund der Langhubigkeit des Arbeitstaktes ist der Motor

als Kreuzkopfmotor aufgebaut. Der Kreuzkopf ist zur Kurbelwelle hin mit dem Pleuel verbunden und treibt über die Pleuelstange den Pleuelbolzen an. Ein Vorteil dieser Anordnung ist auch die Vermeidung von Querkraften am Pleuelbolzen. Ein nicht zu vernachlässigender Nachteil ist die große Bauhöhe des Motors

Wenn die Hauptkurbel und die Sekundärkurbel nahe der Strecklagenposition nach unten stehen befinden sich der Pleuelbolzen im absoluten unteren Totpunkt am Ende des Arbeitstaktes. Bei weiterer Drehung der Hauptkurbel strebt der Pleuelbolzen nach oben und erreicht einen ersten oberen Totpunkt zum Ende des Ausschubtaktes.

Der nachfolgende Ansaughub beträgt nur ca. 20-25% des Ausschubhubs und ist erreicht, wenn die Hauptkurbel nach oben und die Sekundärkurbel nach unten zeigt. Der anschließende Verdichtungshub ist ähnlich lang wie der Ansaughub und endet, wenn der Pleuelbolzen den OT erreicht hat. Am Ende des Verdichtungshubes stehen Primär- und Sekundärkurbel näherungsweise in Strecklage schräg nach oben, damit der Hauptteil der Spitzenlast über die Pleuelgelenke übertragen und einer Überlastung der Pleuelbolzen vermieden wird. Der Arbeitshub ist dann 4-5 mal länger gegenüber dem Verdichtungshub.

Nachfolgende Bildzusammenstellung zeigt den inneren Aufbau des Pleueltriebes mit den unterschiedlichen Pleuelpositionen während der 4 Takte.

1. Takt: Ansaugen:

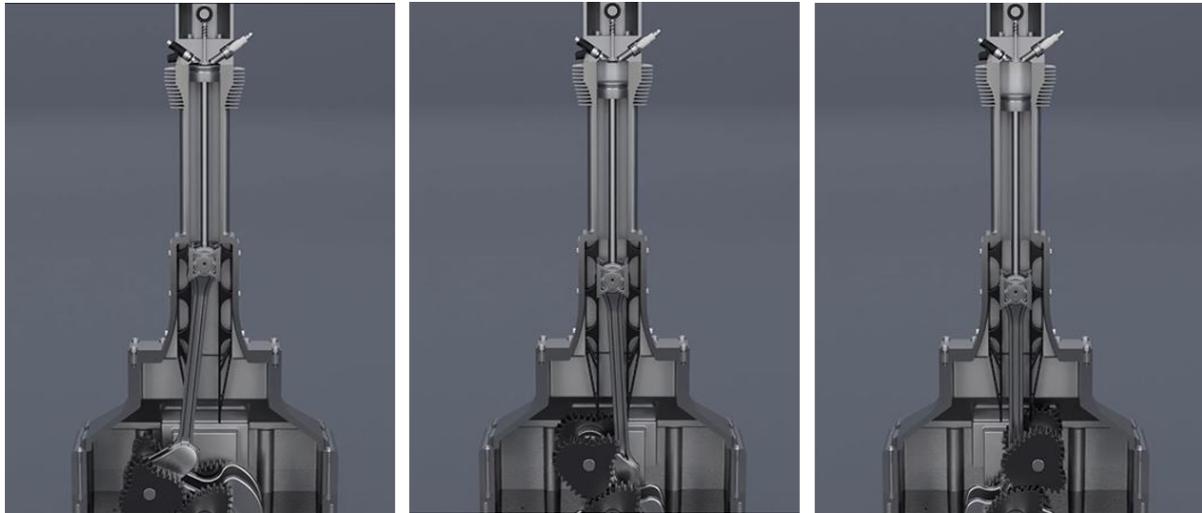


Abbildung 1: Im Ansaugtakt nutzt der Pleuelbolzen des ATARaXiA-Motors nur einen geringen Anteil der Pleuelstange.

2. Takt: Verdichten

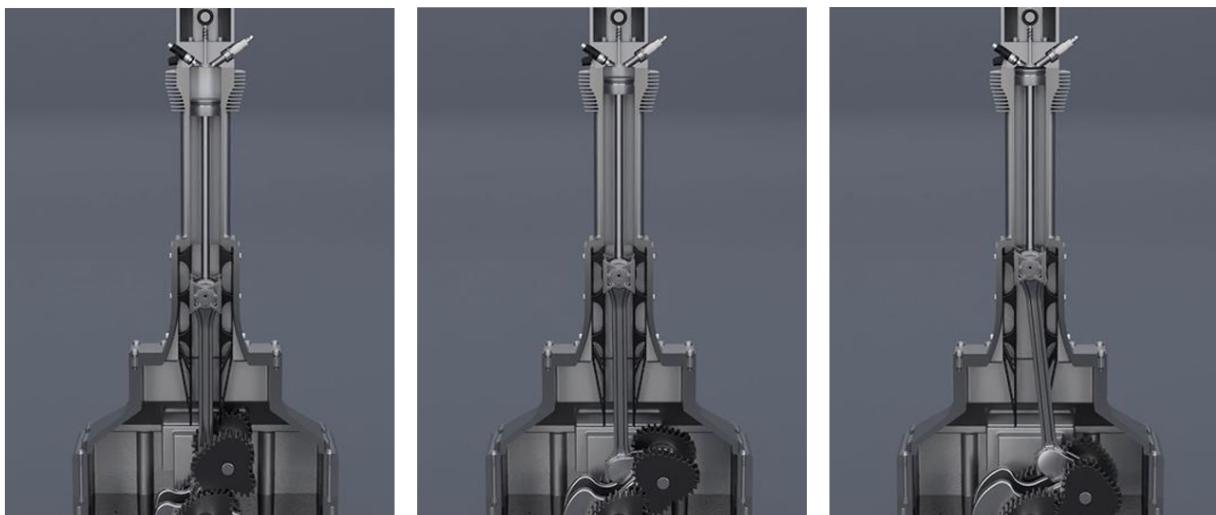


Abbildung 2: Der Verdichtungstakt ist ebenso kurz wie der Ansaugtakt.

3. Takt: Arbeitstakt (Expansion):

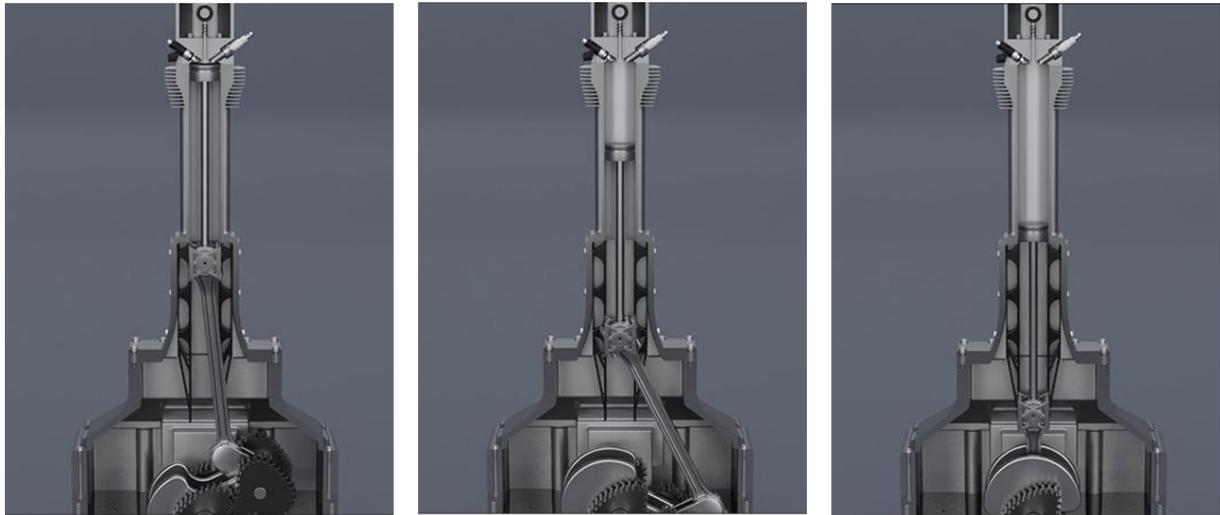


Abbildung 3: *Der Arbeitstakt im ATARaXiA-Motor ist um das 4-5-fache gegenüber dem Verdichtungstakt verlängert. Das Arbeitsgas kann auf geringe Abgastemperaturen und einen Druck nahe dem Umgebungsdruck expandieren.*

4. Takt: Ausschieben:



Abbildung 4: *Wenn das Auslassventil zu Beginn des Ausschiebetaktes öffnet, ist das Arbeitsgas soweit entspannt, dass kein wesentlicher Abgasknall mehr wahrnehmbar ist. Die Abgase sind mit ca. 200°C relativ kühl.*

3.3. Weitere Besonderheiten des ATARaXiA-Prinzips

Mit dem vorgestellten Mechanismus ergibt sich eine weitere Besonderheit des ATARaXiA-Motors: Bei geringer Schwenkbewegung des ansonsten feststehenden Zentralzahnrades wird der kinematische Mechanismus derart beeinflusst, dass sich die oberen Totpunktlagen am Ende des Verdichtungshubes und am Ende des Ausschiebetaktes beeinflussen lassen. Da sich die entsprechende Schwenkbewegung des Zentralzahnrades einfach im laufenden Betrieb umsetzen lässt, wird damit eine Verstellung der Verdichtung möglich.

Motor erzeugte Nettoarbeit ergibt sich unter Einbeziehung weiterer Verluste, die im nächsten Abschnitt genauer erläutert werden.

Bei aufgeladenen Motoren kann die Gaswechselarbeit auch positiv sein, wenn der Ladedruck höher ist als der Abgasgedrückt im Ausschubtakt. Bei Motoren mit Abgasturbolader wird die Arbeit für die Vorverdichtung durch die Abgasturbine aufgebracht, die Abgasenergie nutzt, die ansonsten ungenutzt durch das Abgassystem entweichen würde. Hier muss ggf. nur ein geringfügig höherer Abgasgedrückt gegenüber reinen Saugmotoren berücksichtigt werden.

Werden mechanische Lader für die Aufladung eingesetzt muss die Energiemenge zum Antrieb des Laders die in der Regel von der Kurbelwelle abgezweigt wird als Verdichtungsarbeit in die Energiebilanz eines Umlaufes mit einbezogen werden.

4.1. Kreisprozess eines ATARaXiA-Dieselmotors

Abbildung 7 zeigt den gerechneten thermodynamischen Kreisprozess eines ATARaXiA-Dieselmotors mit einem Expansionsverhältnis von 4,6. Der Kreisprozess wurde auch hier nach dem Seiligerprozess mit 25% Anteil isochorer und 75% isobarer Verbrennung berechnet. Der hohe Ladedruck von 3,5 bar muss von einem mechanischen Lader aufgebracht werden, was als Aufladearbeit zu berücksichtigen ist. Das Expansionsvolumen ist um das 4,6-fache gegenüber dem Saugvolumen vergrößert.

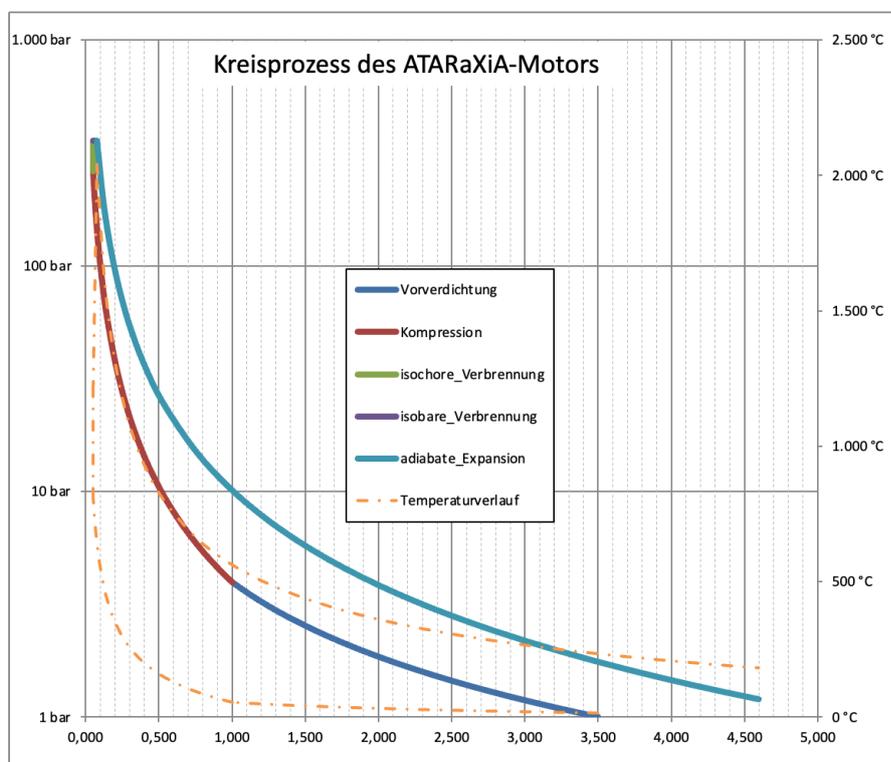


Abbildung 7: Kreisprozess des ATARaXiA-Motors (Darstellung ohne Ladewechsel)

Der Kreisprozess zeigt folgende charakteristische Punkte:

Tabelle 1: charakteristische Punkte im Kreisprozess des ATARaXiA-Motors

| | |
|-------------------------|---------|
| Ladedruck: | 3,8 bar |
| Verdichtung: | 20 |
| Verdichtungsdruck: | 263 bar |
| Verdichtungstemperatur: | 809 °C |
| Maximaldruck: | 395 bar |

| | |
|---------------------------------|----------|
| Max. Temperatur: | 2.040 °C |
| Abgasenddruck: | 1,2 bar |
| Abgasendtemperatur: | 181 °C |
| Thermodynamischer Wirkungsgrad: | 71,3 % |

Durch den hohen Ladedruck hat der ATARaXiA-Motor einen deutlich größeren Massendurchsatz im Bezug auf das Saugvolumen. Allerdings sind die Motorgrößen mit konventionellen Motoren gleichen Hubraums nicht miteinander vergleichbar, da der extrem langhubige Expansionstakt und die Kreuzkopfbauweise des ATARaXiA-Motors sehr viel Bauraum benötigen.

Durch den hohen Ladedruck in Kombination mit hoher Verdichtung ergeben sich sehr hohe Maximaldrücke. Die Temperaturen bei Verdichtung und Verbrennung liegen auf vergleichbarem Niveau zum Dieselmotor. Abgasenddruck und Abgastemperatur sind typbedingt sehr niedrig. Die hohen Maximaldrücke die bei einem solchen Motor erreicht werden sind bei einem konventionellen Motor aufgrund der Druck-Temperatur-Konstellationen nicht erreichbar. Beim ATARaXiA-Motor werden solch hohe Maximaldrücke umsetzbar, da durch die extrem hohe Expansion Druck und Temperatur so weit entspannt werden, dass eine Überhitzung der mechanischen Motorkomponenten vermieden wird.

Von konventionellen Motoren ist bekannt, dass der Kolbenboden maximalen Durchschnittstemperaturen von ca. 310°C ertragen kann ohne dass eine Überhitzung des Motors auftritt. Aufgrund der geringen Abgastemperaturen von unter 200°C zum Ende des Arbeitstaktes werden insbesondere der Kolbenboden und der Zylinderkopf, die bei der Verbrennung für einen kurzen Moment extrem hohen Temperaturen ausgesetzt waren während des Ausschietaktes gekühlt. Die durchschnittliche Wärmebelastung des Brennraumes ist bei entsprechender Abstimmung des ATARaXiA-Motors so gering, dass auf eine Brennraumkühlung gänzlich verzichtet werden kann. Der ATARaXiA-Motor selbst ist somit wärmedicht. Wärmeabgabe erfolgt allerdings im Ladeluftkühler und im Abgas, dessen Temperaturen die Umgebungstemperaturen ja immer noch deutlich übersteigt.

Der thermodynamische Wirkungsgrad des Kreisprozesses ist mit 71,3% sehr hoch, liegt aber immer noch deutlich unter dem carnot'schen Wirkungsgrad. Betrachtet man den vollständigen Kreisprozess mit Einbeziehung der Vorverdichtung, so fällt auf, dass sich der Verlauf der Zustandsgrößen im ATARaXiA-Prozess dem des carnot'schen Kreisprozesses annähert.

4.1.1. Wirkungsgrad des ATARaXiA-Motors

Die Beurteilung des Gesamtwirkungsgrades eines realen ATARaXiA-Motors ist zum jetzigen Zeitpunkt nur überschlägig möglich. Hierzu sind zunächst detaillierte Simulationen und Vorversuche erforderlich.

Entscheidenden Einfluss haben dabei insbesondere die Effizienz der Vorverdichtung wie auch die Minimierung der Reibleistung. Es wurde eine Vielzahl von Parameterstudien durchgeführt, bei denen Ladedrücke, Verdichtungen, Luftüberschuss und das Expansionsverhältnis systematisch variiert wurden. Extrem hohe Wirkungsgrade von über 80% Kreisprozesswirkungsgrad treten in Kombination mit sehr hohen Maximaltemperaturen und Maximaldrücken über 500 bar auf. Solche Extremwerte sind in einer realen Maschine vermutlich nicht zu realisieren. Realistisch erscheinen thermodynamische Wirkungsgrade bis maximal 75%, wobei sich dann Wirkungsgrade eines realen Motors von immer noch über 60% ergeben sollten.

5. Einsatzgebiete des ATARaXiA-Motors

Der ATARaXiA-Motor verspricht eine besonders hohe Kraftstoffeffizienz, da er aufgrund seiner besonderen thermodynamischen Auslegung als wärmedichter Motor keine aktive Kühlung des Motorblocks benötigt und damit deutlich geringere Verluste als konventionelle Motoren hat.

Ein wesentliches Merkmal des Motors ist aber auch seine außergewöhnliche, extrem langhubige Bauform. Daher ist der Motor nur bedingt für mobile Anwendungen geeignet. Nur dort, wo Größe und Bauform nachrangig sind und extreme Effizienz entscheidend ist, wird dieser Motor Einsatzmöglichkeiten finden können.

Zukünftige Anwendungen von Verbrennungsmotoren werden sich ohnehin auf Nischenanwendungen beschränken, da solche Motoren zukünftig mit synthetischen Kraftstoffen klimaneutral zu betreiben sind.

Solche Anwendungen sind insbesondere:

- Schiffsantriebe
- Hybridanwendungen (Range-Extender) im Schwerlastverkehr
- Kraftwerksmotoren zur Erzeugung von Regelenergie
- Blockheizkraftwerke

Gerade bei letzterer Anwendung ist neben einer hohen Effizienz die Geräuscharmheit des Motors hervorzuheben.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Motor vorgestellt, der aufgrund seiner besonderen Auslegung verspricht, einen signifikant höheren Wirkungsgrad als andere Verbrennungsmotoren aufzuweisen. Der Motor arbeitet als Hubkolbenmotor nach dem Viertaktprinzip. Die Besonderheit liegt in dem extrem verlängerten Arbeitstakt, der ein Entspannen der Arbeitsgase auf nahezu Umgebungsdruck und so geringe Abgastemperaturen ermöglicht, dass eine Kühlung der Motorblocks nicht mehr erforderlich ist. Es konnte gezeigt werden, dass eine entsprechende Motorauslegung nur mit zusätzlicher externer Aufladung sinnvoll ist, die mit einer effizienten Ladeluftkühlung versehen werden muss. Die im Kreisprozess abzuführende Prozesswärme wird dann fast vollständig im Ladeluftkühler abgegeben. Für zukünftige Verbrennungsmotoren, die mit knappen und teuren synthetischen Kraftstoffen betrieben werden müssen kann ein solcher Motor aufgrund seiner deutlich effizienteren Wirkungsweise sinnvoll sein. Wir suchen nach Partnern, die im Rahmen gemeinsamer Forschungsprojekte den Prototypen eines solchen Motors mit uns entwickeln wollen, um die besonderen Merkmale dieses Motors praktisch nachzuweisen.

7. Referenzen

- [1] Patentschrift DE 10 2018 118 322: Kurbeltrieb für eine Viertakt-Hubkolben-Brennkraftmaschine; ATARaXiA GmbH, Lucile-Grahn-Straße 43, D-80538 München