

Überblick

1 - Allgemeine Grundsätze

Es gibt zwei große Maschinengruppen, die ein Fluid transportieren oder eine Drehbewegung auslösen sollen:

- Kolbenmaschinen,
- die allgemein als "Turbinen" bezeichneten Maschinen.

Die Funktionsweise der Kolbenmaschinen basiert auf der Veränderung des Volumens während die Kolben ihre Position von ganz unten nach ganz oben verlagern und umgekehrt. So ist es möglich, ein Fluid zu komprimieren oder einem komprimierten Fluid die Ausdehnung zu ermöglichen, besonders wenn es sich um ein gasförmiges Fluid handelt.

Diese Kolbenmaschinen sind mit Mechanismen ausgestattet, die eine Wechselbewegung in eine Drehbewegung umwandeln und umgekehrt.

Diese meist komplizierten Mechanismen sind meistens mit Kurbelwellen verbundene Pleuelstangen, aber man findet ebenfalls Nockenwellen, Platten etc.

In diesen Maschinen besteht immer eine Reibung zwischen Kolben und Zylinder.

Um den Druck zu halten, müssen sie mit Dichtsegmenten ausgerüstet sein.

In der Mehrheit der Fälle, dazu gehören die mit Verdichtern und Verbrennungsmotoren mit interner Verbrennung, muss die Einheit Kolben-Segment-Zylinder abgekühlt werden, um die Qualität des Schmieröls zu gewährleisten, damit mindestens eine halbtrockene Reibung zwischen den diversen Komponenten sichergestellt ist.

Die Funktionsweise der Maschinen Typ Turbine basiert auf der Rotation eines mit Blättern ausgestatteten Rotors in einem Stator. Sie benötigen keinen Bewegungswandler.

Die Turbinen funktionieren nicht bei hohen Drücken, denn sie besitzen keine Vorrichtung zum Variieren des Volumens zwischen den Blättern. Per Definition ist eine Turbine nicht volumetrisch.

Sie haben jedoch einen Vorteil: Zwischen Blättern und Stator besteht keine Reibung.

In der Rubrik «Technologien» wird erklärt, wie es möglich ist, die Vorteile der Kolbenmaschine mit denen der Turbine zu verbinden, schlechtes bis sehr schlechtes maximaler Druckverhältnis, das heißt durch den Bau einer einzigen Maschine:

- ohne Bewegungswandler;
- deren den Arbeitsraum bestimmende Komponenten ohne Reibung funktionieren;
- in der Volumen und Drücke verändert werden können;
- in der die Dichtheit durch kontrollierten Druckverlust erreicht wird.

Überblick

2 - Sonderfälle

2.1 - Thermodynamik bei Verbrennungsmotoren

2.11 - Die Grundlagen der Thermodynamik

Die Thermodynamik stützt sich auf folgende Grundlagen:

- Energie kann nicht aus dem Nichts kommen und auch nicht zerstört werden;
- Die Formen der Energie können nur umgewandelt werden: Brennstoff in Wärme und Wärme in mechanische Energie;
- Wärme lässt sich niemals vollständig in mechanische Arbeit umwandeln, allein schon wegen der in den Lagern der sich in Bewegung befindlichen Teile entstehenden Reibung;
- Alle natürlichen und technischen Energieumwandlungsprozesse sind unumkehrbar und gehen in die wahrscheinlichste Richtung, von sich aus geht Wärme nur von einem wärmeren Körper in einen kälteren Körper über;
- Der umgekehrte Fall, also der Übergang von kalt zu warm, kann nur durch das Einbringen von Energie erreicht werden.

2.12 - Umwandlungsarten

Die thermodynamische Umwandlung wird nach den Umständen, unter denen sie stattfindet, bezeichnet. Somit wird eine Umwandlung:

- bei konstantem Druck als isobar bezeichnet;
- bei konstantem Volumen als isochor bezeichnet;
- bei konstanter Temperatur als isotherm bezeichnet;
- ohne Wärmeaustausch als adiabatisch bezeichnet;
- ohne Wärmeaustausch und ohne Reibung als isentropisch bezeichnet;
- mit Änderung des allgemeinen Zustands als polytropisch bezeichnet.

Wenn wir die theoretischen Zyklen der idealen Gase untersuchen, können wir die Gesetze dieser Umwandlungen ausdrücken, indem wir uns der Konstante bedienen, die wir L.J. Gay Lussac (1778 - 1850) verdanken: $PV = RT$. Er hat die Konstante $PV = R (267 + t)$ formuliert. Dies kommt nahe an $PV = R (273,15 + t)$ heran.

Das Gesetz von Gay-Lussac, gekoppelt an das von Boyle-Mariotte, ermöglicht einige Jahre später die Aufstellung des Gesetzes der "idealen Gase". Deren Gleichung lautet $PV = nRT$ oder $PV = NkT$, auf der Basis einfacher Modellierung der Gase in den thermodynamischen Systemen.

2.13 - Funktionsprinzip

Die in dem Brennstoff vorhandene chemische Energie wird umgewandelt in Wärme durch eine Verbrennung, für die Sauerstoff benötigt wird und diese Wärmeenergie wird mit Hilfe der mechanischen Komponenten, die eine Verbrennungsmotor genannte Einheit bilden.

2.14 - Einteilung der Verbrennungsmotoren

Wenn die Verbrennung innerhalb des Motors erfolgt, sprechen wir von interner Verbrennung. Es gibt zwei Möglichkeiten und in beiden Fällen handelt es sich um einen offenen Kreislauf:

- entweder ist der Arbeitsprozess zyklisch und Brennstoff wird abwechselnd eingeführt und eine bestimmte Menge verbranntes Gas ausgestoßen, wie bei Hubkolbenmotoren;

Überblick

- oder der Arbeitsprozess ist kontinuierlich und der Austausch des Brennstoffs erfolgt ohne Unterbrechung, wie bei den Gasturbinen.

Wenn die Verbrennung außerhalb des Motors erfolgt, sprechen wir von externer Verbrennung. In diesem Fall kann der Arbeitsprozess kontinuierlich und der Kreislauf geschlossen sein, denn die Motorflüssigkeit kann chemisch unverändert bleiben und ihren Zustand ändern, ohne dass man sie austauschen müsste.

Die Bereitstellung des Gemischs Luft-Brennstoff außerhalb der Brennkammer begünstigt die homogene Mischung. Wir sprechen dann von einer externen oder homogenen Mischung.

Eine Mischung im Inneren der Brennkammer erfolgt unter weniger guten Bedingungen. Sie wird heterogen. Wir sprechen dann von einer internen oder heterogenen Mischung.

Wenn die Verbrennung durch einen elektrischen Funken ausgelöst wird, sprechen wir von einer gesteuerten Entzündung, aber wenn das Gemisch sich spontan entzündet, weil die Selbstentzündungstemperatur erreicht wurde, sprechen wir von Selbstzündung.

2.15 - Thermodynamische Kreisläufe

Die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie ist nur möglich, wenn die Motorflüssigkeit ihren Zustand ändert.

Diese Zustandsänderungen werden allgemein dargestellt durch Diagramme, die zwei Zustandsgrößen ausdrücken:

- Erhöhung oder Senkung der Temperatur;
- Erhöhung oder Senkung des Drucks;
- Steigerung oder Verringerung des Volumens.

Allgemein drücken die Koordinaten eines Diagramms folgende Verhältnisse aus:

- Druck-Volumen in einem p-V Diagramm;
- Temperatur-Entropie in einem T-S Diagramm;
- Enthalpie-Entropie in einem H-S Diagramm.

Das Studium der Thermodynamik hat mehrere Wissenschaftler dazu veranlasst, Funktionszyklen vorzuschlagen. Wir werden nur die aufführen, die heute noch Anwendung finden:

- A. Beau de Rochas im Jahre 1862 (1815 - 1893) - er hat die Kompression und den Viertaktzyklus erfunden. Das ist der Referenzzyklus für die Viertakt-Benzinmotoren von heute.
- N.A. Otto konstruierte 1867 einen Motor mit diesem Zyklus, aber er musste seine Arbeiten nach einem Prozess abbrechen, weil er nicht der Patentinhaber war.
- J. Joule (1818 - 1889) hat 18.. den Kreisprozess bei konstantem Druck erfunden. Das ist der Referenzzyklus für die Motoren Typ Gasturbine.
- Sabathé, dessen Vorname nicht bekannt ist, war der erste, der einen gemischten Zyklus aus den Zyklen von A. Beau de Rochas und R. Diesel befürwortet hat. Dies ist der Referenzzyklus für Motoren mit Gasöl, von vielen irrtümlich immer noch "Dieselmotoren" genannt.

Überblick

2.16 - Anforderungen an die Brennstoffe

Die in den Motoren verwendeten Brennstoffe werden nach den an sie gestellten Anforderungen in drei Kategorien eingeteilt:

- Brennstoffe für Motoren mit homogenem Gemisch und gesteuerter Zündung;
- Brennstoffe für Motoren mit heterogenem Gemisch und Selbstzündung;
- Brennstoffe für Motoren des Typs Gasturbine mit kontinuierlicher Flamme.

Zu den homogenen Gemischen zählen verbleites Benzin, bleifreies Benzin, Autogas, usw.

Diese Brennstoffe müssen sehr flüchtig sein, damit die homogene Beschaffenheit des Luft-Brennstoff-Gemischs begünstigt wird. Indessen ist es erforderlich, erhöhte Ansprüche an die Flüchtigkeit zu stellen. Dazu gehören:

- die Siedekurve - sie gibt den Prozentsatz verdampften Brennstoffs im Verhältnis zur Temperatur an;
- der Dampfdruck;
- das Verhältnis Dampf-Flüssigkeit - so kann die Neigung des Brennstoffs zur Bildung von Dampfblasen bestimmt werden;
- die Dichte - anhand der Dichte können bestimmte Typen oder Bestandteile von Brennstoffen bestimmt werden;
- der nicht zu überschreitende Bleigehalt;
- die Oktanzahl - eine Kennzahl für die Klopfestigkeit des Benzins.

Dies sind genormte Anforderungen!

Zu den heterogenen Gemischen zählt ein Name: Gasöl.

Dies ist ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, deren Siedepunkt etwa zwischen 180° und 360° Celsius liegt.

Die wichtigsten Anforderungen an Gasöl sind:

- die Dichte;
- die Siedekurve;
- die kinematische Viskosität;
- der Flammpunkt;
- die Cetanzahl.

Dies sind ebenfalls genormte Anforderungen!

Die wichtigsten Anforderungen an Brennstoffe für Gasturbinen beschränken sich auf:

- die Viskosität;
- den Verunreinigungsgrad jeglicher Art, darunter insbesondere Schwefel, Natrium, Vanadium und Blei.

Die Motoren mit externer Verbrennung stellen die geringsten Anforderungen an ihren Brennstoff. Tatsächlich sind Motorfluid und Verbrennungsgas oft nicht identisch. Es ist ausreichend, wenn der Brennstoff schnell genug verbrennt, ohne Rückstände zu hinterlassen.

Überblick

2.17 - Die Verbrennung

Die Verbrennung läuft auf zwei verschiedene Arten ab:

- zyklisch in den Motoren mit Hubkolben nach jedem Austausch des Brennstoffs;
- kontinuierlich in den Motoren Typ Gasturbine.

Die zyklische Verbrennung bringt die meisten Probleme mit sich. Außerdem muss sie sich in Rekordzeit abspielen. Das heißt in einem Viertaktmotor mit 6000 Umdrehungen pro Minute läuft ein Zyklus in: $1/(6000/2/60) = 1/50 = 0,02$ Sek.

Da der Zyklus ja Ansaugen, Verdichten, Expandieren und Auslassen umfasst und die Verbrennung nur während Arbeitsphase stattfinden kann, kann sie nur: $0,02/4 = 0,005$ Sek. andauern.

Diese Zeiten werden bei einem Zweitaktmotor ungefähr gedrittelt.

In den Motoren mit homogenem Gemisch und gesteuerter Zündung ist die Entzündungsphase praktisch konstant in der Zeit und nicht abhängig von der Zusammensetzung des Gemischs, wogegen die Freisetzung von Wärme vor allem bestimmt wird durch die Form der Brennkammer und der Position des Zündpunkts.

Die Verbrennungsgeschwindigkeit selbst wird bestimmt durch den Prozess der Ausbreitung an der Flammenfront, die Intensität der Turbulenzen und die Entwicklung der Temperatur in dem Teil des noch nicht brennenden Gemischs.

Da die Zündungsdauer zeitlich konstant ist und sie vor der Arbeitsphase stattfinden muss, wird eine Vorrichtung benötigt, mit der der Zündzeitpunkt eingestellt werden kann, in Form einer Frühzündung, damit die in dem Brennstoff enthaltene Wärmeenergie so hoch wie möglich ist, wenn sie in der Arbeitsphase in mechanische Energie umgewandelt wird.

In den Motoren mit heterogenem Gemisch findet die Selbstzündung vor dem Ende der Verdichtung statt. Der Brennstoff wird dann in die stark verdichtete Luft eingespritzt und auf eine Temperatur zwischen 700° und 900° Celsius aufgeheizt.

Die Verbrennung spielt sich in zwei Phasen ab, woran man sieht, dass es sich um eine Verbrennung gemäß dem Zyklus von Sabathé handelt:

- eine Phase, während der der vor Beginn der Entzündung eingespritzte Brennstoff sich entzündet: die Einbringung isochorer Wärme, wie nach dem Zyklus von A. Beau de Rochas;
- eine Phase, während der der nach Beginn der Verbrennung eingespritzte Brennstoff brennt: die Einbringung isobarer Wärme, wie nach dem Zyklus von R. Diesel.s

Die kontinuierliche Verbrennung in den Motoren Typ Gasturbine oder mit externer Verbrennung muss stabil und gleichmäßig sein. Dies ist die Hauptanforderung.

2.18 - Thermodynamischer Wirkungsgrad

Der thermodynamische Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors ist abhängig von der abgegebenen, also verlorenen, Wärme. Er entspricht:

$$\eta = (\theta' - \theta'') / \theta''$$

Überblick

wobei η der Wirkungsgrad ist,
 θ' die eingebrachte Wärmemenge und
 θ'' die abgegebene Wärmemenge.

2.2 - Mechanische Konfiguration der Verbrennungsmotoren

2.21 - Viertakt- und Zweitakt-Benzin-Kolbenmotoren

Der Benzin-Kolbenmotor ist ein Motor mit homogenem Luft-Brennstoff-Gemisch und gesteuerter Zündung.

Der Brennstoff ist hauptsächlich Benzin, kann aber auch ein Ersatzprodukt sein wie Autogas.

Die Mischung erfolgt im Vergaser oder indirekt im Saugrohr oder direkt im Zylinder, in den der Brennstoff zyklisch eingespritzt wird.

Das Gemisch wird regelmäßig in einem Arbeitszylinder bis auf einen Druck zwischen 15 und 25 bar komprimiert.

Die dabei entstehende Verdichtungstemperatur variiert zwischen 400° und 600° Celsius und liegt noch unter der Schwelle zur Selbstzündung, sodass das Gemisch entzündet werden muss, um die Umwandlung von Brennstoff in Wärmeenergie zu erreichen.

Die durch einen Funken ausgelöste Entzündung erfolgt unter sehr hoher Geschwindigkeit. Sie erzeugt eine Erhöhung des Drucks, bis er etwa siebenmal so hoch liegt wie der am Ende der Verdichtung, während der mittlere wirksame Druck ungefähr dem am Ende der Verdichtung erreichten Druck entspricht.

Diese Werte können aufgrund der gleichzeitig auftretenden Variablen nicht exakt berechnet werden. Dies ist einer der Gründe dafür, dass ein Benzinmotor weitestgehend auf der Basis empirischer Daten gebaut wird.

Der Austausch des Brennstoffs erfolgt in einem Viertaktmotor mit Hilfe einer Ventilvorrichtung oder in einem Zweitaktmotor über Öffnungen in der Nähe des unteren Totpunkts.

Die erzeugte Nutzarbeit wird mittels einer mit einer Pleuelstange verbundenen Pleuelstange in ein am Ende der Pleuelstange zur Verfügung stehendes Drehmoment verwandelt. Diese Pleuelstangen-Einheit ist komplex und es ist erforderlich, dass der Motor im Leerlauf mit zwischen 800 und 1200 Umdrehungen pro Minute dreht, um nicht abgewürgt zu werden. Dies bedeutet einen hohen Brennstoffverbrauch, besonders bei nicht fließendem Verkehr.

Wir können jetzt sagen, dass:

- das Verhältnis zwischen maximaler Ermüdung der dem Spitzendruck unterliegenden mechanischen Teile und der mittleren Ermüdung eben dieser Teile gleich dem Spitzendruck zum wirksamen mittleren Druck ist;
- die Abmessungen dieser Teile bestimmt wird durch den Spitzendruck, zu dem ein Sicherheitsbereich hinzukommt und nicht durch den wirksamen mittleren Druck, was bedeutet, dass die Teile weit über Maß konzipiert werden.

Überblick

Vorteile des Benzinmotors:

- Konzipierung seit Jahrzehnten im Griff;
- ökonomische Strukturen auf Basis dieses Motors;
- die Konfiguration Kolben/Zylinder begünstigt hohe Drücke.

Nachteile des Benzinmotors:

- hoch entwickelte Brennstoffe sind erforderlich;
- schlechtes Verhältnis Spitzendruck zu Mindestdruck;
- schlechter Ertrag: nur etwa 30% der im Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie wird in mechanische Energie umgewandelt;
- relativ hohe toxische Emissionen: NO, HC, CO;
- laut;
- Getriebe erforderlich.

2.22 - Viertakt- und Zweitakt-Gasöl-Kolbenmotoren

Der Gasöl-Kolbenmotor ist ein Motor mit heterogenem Luft-Brennstoff-Gemisch.

Die Mischung erfolgt im Zylinder oder in einer Kammer im Zylinderkopf, die in den Zylinder führt. Die Ricardo-Kammer ist ein Beispiel dafür.

Der Ablauf ist vergleichbar dem bei Benzinmotoren, außer, dass:

- die Luft bis auf 30 bis 55 bar verdichtet wird;
- die Verdichtungstemperatur zwischen 700° und 900° Celsius variiert, damit die Schwelle der Selbstentzündung überschritten wird;
- die Einspritzung vor dem oberen Totpunkt erfolgt;
- der Spitzendruck manchmal bis auf 200 bar ansteigt, allgemein aber um die 150 bar liegt; bei manchen Motoren im Labor ist der Druck auf über 240 bar angestiegen;
- der mittlere wirksame Druck 30% des am Ende der Verdichtung in atmosphärischen Dieselmotoren erreichten Drucks nicht überschreitet und sich auf den in Motoren mit Kühlung der Ladeluft erreichten Druck begrenzt

Die Sicherheitsmarge in den Motoren mit Dieseleinspritzung muss sehr viel größer sein als in Benzinmotoren, denn es müssen fehlgeschlagene Selbstzündungen, die den Spitzendruck beim nächsten Hub erhöhen, berücksichtigt werden.

Daraus ergibt sich, unter Berücksichtigung der erhöhten Verdichtungsdrücke in Dieselmotoren, dass die hohen durch die Spontanzündung erzeugten Spitzendrücke eine relativ schwere Motorgruppe erforderlich machen.

Und da die Motoren mit heterogenem Gemisch mit bedeutendem Luftüberschuss laufen, selbst bei Vollast, haben Dieselmotoren eine geringe Leistungsdichte.

Vorteile des Gasölmotors:

- Konzipierung seit langer Zeit im Griff;
- kommerzielle Strukturen auf Basis dieses Motors;
- die Konfiguration Kolben/Zylinder begünstigt hohe Drücke.

Nachteile des Gasölmotors:

- hohe Fertigungskosten;

Überblick

- schlechtes bis sehr schlechtes Verhältnis Spitzendruck zu Mindestdruck;
- geringe Leistungsdichte, bei gleicher Leistung ist der Hubraum eines Dieselmotors generell 1,5 mal so hoch wie bei Benzinmotoren;
- schlechter Ertrag: nur etwa 30% der im Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie wird in mechanische Energie umgewandelt;
- ungünstiger Emissionswert: Ruß und unverbrannte Partikel;
- laut bis sehr laut;
- leistungsfähiges Getriebe erforderlich.

2.23 - Die Gasturbine

Die Gasturbine ist ein Motor für heterogene Luft-Brennstoff-Gemische mit kontinuierlicher Flamme.

Es ist ein Motor für mehrere Brennstoffarten, der flüssige, gasförmige oder emulgierte Brennstoffe annimmt.

Die Mischung erfolgt in einer separaten Brennkammer, in der eine Einspritzdüse den Brennstoff fein in der Verbrennungsluft verteilt, damit durch die Mischung ein hoher Ausbrand erreicht wird.

Verdichtung und Arbeit erfolgen mit Hilfe von Schaufelturbinen, die reibungslos in ihrem jeweiligen Gehäuse drehen.

Die so erhaltene Konfiguration ermöglicht erhöhte Drehzahlen, wobei der Gasfluss Schallgeschwindigkeit erreicht und an manchen Stellen des Systems überschreitet, obwohl die Berechnungen auf einer Höchstgeschwindigkeit des Gases in der Größenordnung von 0,8 bis 0,9 Mach basieren.

Die angesaugte Luft wird zuerst verdichtet bis auf einen Wert von etwa 4 bis 6 bar, läuft dann eventuell durch einen Wärmetauscher, in dem ihre Temperatur steigt, erreicht die Brennkammer, wo sie sich mit dem Brennstoff vermischt und ein Gas bildet, dessen Temperatur bei der Verbrennung ansteigt und das sich so ausdehnt. Die Gase geben einen Teil ihrer Energie an eine Arbeitsturbine ab, gegebenenfalls einen weiteren Teil in den Wärmetauscher und verteilen den Rest in der Atmosphäre

Da die Arbeitsdrücke nicht sehr hoch sind, kann die Leistung nur durch hohe Drehzahlen erreicht werden, die logischerweise von der Größe der Turbine abhängen. Somit würde eine Gasturbine, die für ein Auto bestimmt ist, in einem Drehzahlbereich von zwischen 8000 und 70 000 Drehungen pro Minute laufen.

Vorteile der Gasturbine:

- funktioniert mit mehreren Brennstoffen;
- gleichmäßiger Lauf;
- gutes Verhältnis Spitzendruck zu Mindestdruck;
- günstige Emissionswerte ohne Ausrüstung.

Nachteile der Gasturbine:

- schlechter Ertrag: weniger als 30% der im Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie wird in mechanische Energie umgewandelt;

Überblick

- geringe Arbeitsdrücke;
- häufig viel zu hohe Drehzahlen;
- hohe Fertigungskosten;
- bedeutender Brennstoffverbrauch;
- schlechte Anpassung an geringe Leistungen;
- laut durch die Geschwindigkeit des Gases;
- teure Untersetzungsgetriebe erforderlich.

2.24 - Die Schmierung

Der am meisten genutzte Motor hat auch die komplexeste Schmierung. Tatsächlich gibt es an einem Kolbenmotor viele Punkte, die geschmiert werden müssen, darunter insbesondere die Einheit Kolben-Segmente-Zylinder oder Mantel - vom Gesichtspunkt der Schmierung aus die sensibelste Konfiguration:

- einerseits muss eine möglichst vollständige Verbrennung bei Temperaturen von über 2000 K erfolgen;
- andererseits darf die Funktionstemperatur des für die Schmierung der Kolbenführungen in ihrem Zylinder verwendeten Öls 125° Celsius nicht überschreiten, damit der Film nicht reißt.

An dieser Stelle ist die Gasturbine praktischer, da die Schaufeln mit ihrem jeweiligen Gehäuse nicht in Berührung kommen.

2.25 - Die Kühlung

Öl, das verbrennt, verliert seine Schmierfähigkeit. Deshalb müssen in Anbetracht der Konfiguration des Kolbenmotors die der Verbrennungshitze ausgesetzten Bereiche intensiv gekühlt werden, damit das Öl seine Schmierfähigkeit behält.

Für diese Kühlung müssen mehr als 30 % der in dem Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie abgeführt werden: an der einen Seite wird etwas weggenommen, das an der anderen Seite zugeführt wird.

2.25 - Abgase

In Kolbenmotoren entweicht über 30 % der in dem Brennstoff enthaltenen Energie über die Abgase:

- in Form von Wärme, denn da das Arbeitsvolumen dem Verdichtungs-volumen entspricht, ist das besagte Arbeitsvolumen nicht höher als das Verdichtungs-volumen in einem Verhältnis proportionalen zur während der Verbrennung zugeführten Wärme;
- in Form von teilweise oder vollständig unverbrannten Kohlenwasserstoffen, denn die Zeit, die der Brennstoff für die Änderung seines Zustands hat, ist zu kurz, nämlich 0,002 bis 0,01 Sek. Das reicht nicht aus und das Verhältnis Luft-Brennstoff ist nicht immer günstig für eine gute Sauerstoffzufuhr.

In den Gasturbinen sind die Zeiten für den Übergang des Gases in die Verbrennung zu kurz für das Erreichen einer Arbeits- und einer Abkühlphase, die die Verluste durch Entweichen reduzieren würden. Daraus ergibt sich, dass 70 bis 80 % der in dem Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie in Form von Wärme verloren geht, außer wenn diese Wärme teilweise über einen Wärmetauscher in die Druckluft gegeben wird.

Überblick

2.3 - Bilanz und Schlussfolgerung

2.31 - Bilanz

Für diese Bilanz haben wir die folgende Vergleichstabelle aufgestellt:

Aspekt des Vergleichs	Benzin-Kolbenmotor	Gasöl-Kolbenmotor	Gasturbine
Verhältnis Expansionsvolumen / Arbeitsraum	gleich 1	gleich 1	größer als 1
Wärmeaustausch	nicht möglich	nicht möglich	möglich
Brennstoffauswahl	standardisiert	standardisiert	frei
Verbrennungsart	zyklisch	zyklisch	kontinuierlich
Druckbeständigkeit	erhöht	erhöht	gering
Verhältnis Spitzen- druck / mittlerer wirksamer Druck	schlecht	schlecht	günstig
In mechanische Ener- gie umgewandelte Wärmeenergie	30 bis 35 % je nach Situation	30 bis 35 % je nach Situation	20 bis 30 % je nach Situation
Verluste durch das Kühlsystem	30 bis 35 % je nach Situation	30 bis 35 % je nach Situation	keine
Verluste durch das Abgasystem	30 bis 35 % je nach Situation	30 bis 35 % je nach Situation	70 bis 80 % je nach Situation
Gasemissionen	toxisch	toxisch	akzeptabel
Geräuschpegel	erhöht	erhöht	erhöht
Reibung im Arbeitsraum	ja	ja	nein
Schmierung im Arbeitsraum	gefährlich	gefährlich	nicht nötig
Kühlung	erforderlich	erforderlich	nicht nötig
Getriebe	erforderlich	erforderlich	
Drehzahlminderer			erforderlich

2.32 - Schlussfolgerung

Für den Bau eines Verbrennungsmotors müssen nur die folgenden Argumente berücksichtigt werden, die wir aus den vorhergehenden Absätzen aufnehmen:

- Die Motoren mit externer Verbrennung stellen die geringsten Anforderungen an ihren Brennstoff. Tatsächlich sind Motorfluid und Verbrennungsgas oft nicht identisch. Es ist ausreichend, wenn der Brennstoff schnell genug verbrennt, ohne Rückstände zu hinterlassen.

Überblick

- Die kontinuierliche Verbrennung in den Motoren Typ Gasturbine oder mit externer Verbrennung muss stabil und gleichmäßig sein. Dies ist die Hauptanforderung.
- Vorteile des Benzinmotors: Der Aufbau Kolben/Zylinder ist günstig für hohe Drücke.
- Vorteile des Gasölmotors: Der Aufbau Kolben/Zylinder ist günstig für hohe Drücke.
- Vorteile der Gasturbine: läuft mit mehreren Brennstoffen, gleichmäßiger Lauf, gutes Verhältnis Spitzendruck/mittlerer wirksamer Druck, günstige Emissionswerte ohne Ausrüstung.

Da wir sozusagen vor einem leeren Blatt Papier stehen, müssen die folgenden Punkte in unser Lastenheft aufgenommen werden:

- Motor mit externer Verbrennung;
- Funktion mit mehreren Brennstoffen;
- Konfiguration günstig für hohe Drücke;
- Konfiguration günstig für hohe Temperaturen;
- gleichmäßiger und ruhiger Lauf;
- gutes Verhältnis Spitzendruck /mittlerer wirksamer Druck;
- günstige Emissionswerte ohne Ausrüstung, also kein Abgassystem;
- keine Schmierung im Arbeitsraum;
- keine Kühlung im Arbeitsraum;
- kein Getriebe;
- kein Bewegungswandler.

In den Rubriken «Technologien» und « Anwendungen» wird gezeigt, wie dieses Lastenheft geschrieben werden kann.