

Der Wirkungsgrad

Über den Wirkungsgrad von Stirlingmotoren geistert auf Konferenzen und in der Literatur sehr unterschiedliches Datenmaterial herum. Einmal heißt es, der Stirlingmotor hätte den weitaus besten Wirkungsgrad aller thermodynamischen Kraftmaschinen – und es gibt Zahlen bis zu 48%¹ - andere wenden empört ein, sie wären mit ihrer Maschine nie über 20% gekommen. Wie kommen diese Diskrepanzen zustande?

Von der Autoindustrie sind wir das ja leider gewohnt. Während in vollmundigen Reden und auf Hochglanzpapier der Wirkungsgrad des Automotors mit 30% angepriesen wird, sieht der Motor mit innerer Verbrennung auf dem Teststand ganz verschiedene Wirkungsgrade. Das verrückte daran ist vor allem, dass die 30% in einem Kennfeldbereich auftauchen, das von einem Auto fast vollkommen gemieden wird. Nur wenn man mal einen leichten Berg hinauffährt oder sanft beschleunigt, werden 30% erreicht. Ansonsten umfahren wir dieses Wirkungsgrad-Maximum mit unseren 5 Gängen ständig. Im Mittel (incl. Leerlauf an der Ampel und im Stau) setzt ein Automotor gerade mal 4 % der Energie im Kraftstoff in Fahrleistung um. Auch bei hohen Drehzahlen sind große Wirkungsgrade nicht mehr zu erreichen. Der Kunde liest in den Prospekten: Motorleistung 90 kW und 30% Wirkungsgrad. Aber in Wirklichkeit werden bei 90 kW nur noch 17% erreicht, während im Wirkungsgrad-Maximum von 30% nur 25 kW Leistung erzeugt werden können. Das Ganze grenzt schon fast an bewußte Täuschung. Es geht bei den Hochglanzprospekten um Prestige und Ansehen und um viel Geld!

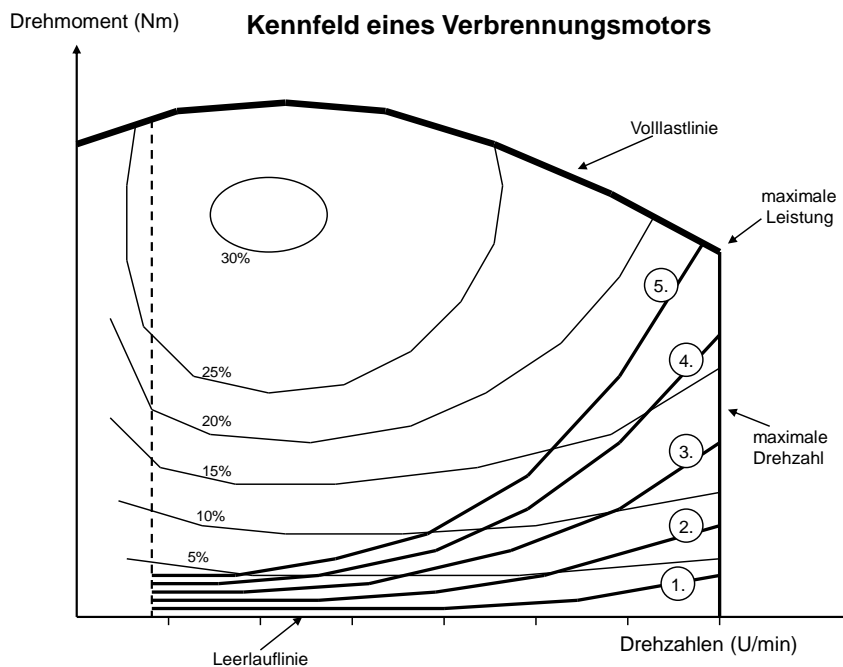
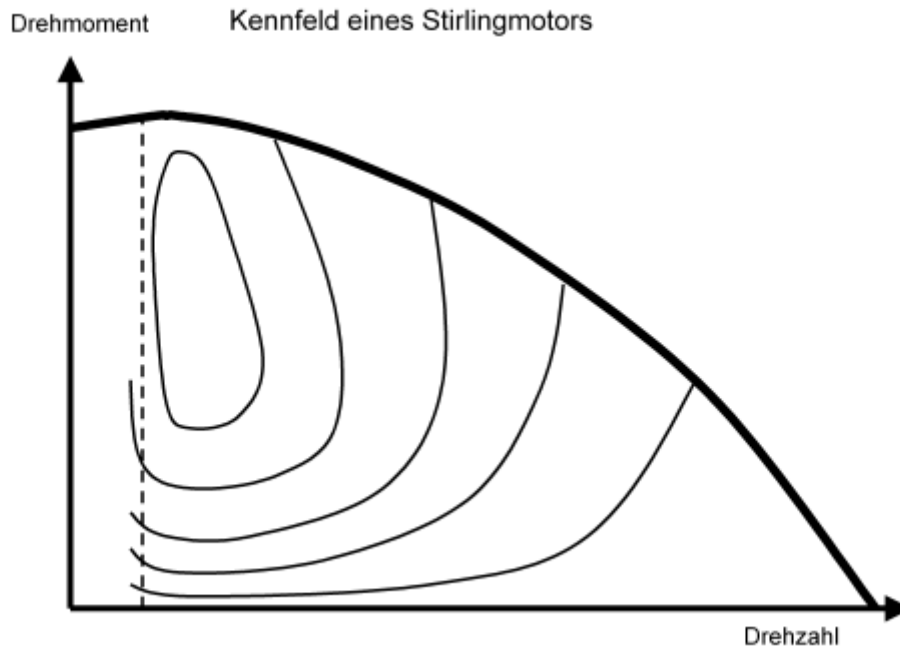


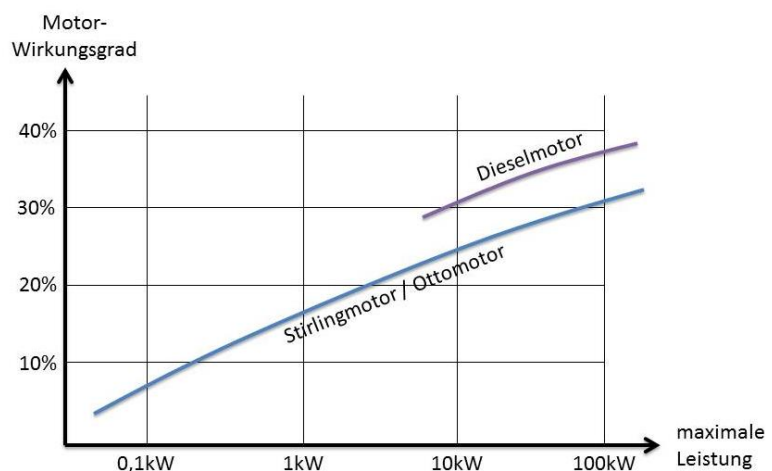
Abb.1

Um so erstaunlicher ist es, wie sehr man bereits schon in Stirlingkreisen mit genau diesem Problem konfrontiert wird und aneinander vorbeiredet. Auch ein Stirlingmotor besitzt bei hoher Leistung und hoher Drehzahl kleinere Wirkungsgrade und bei kleiner Leistung und kleiner Drehzahl große Wirkungsgrade. Wenn also bei einem

Stirlingmotor wirklich mal ein Wirkungsgrad gemessen wurde, dann sollte unbedingt die dazugehörige Leistung und die dazugehörige Drehzahl genannt werden. Wurde ein zweiter Messpunkt aufgenommen, so gilt für ihn dasselbe. Am besten ist es natürlich, man fährt ein ganzes Kennfeld ab und präsentiert das gesamte Muscheldiagramm. Hier als zweites ein solches Muscheldiagramm eines Stirlingmotors. Man sieht an diesem Kennfeld sehr schön, dass die besten Wirkungsgrade bei den kleineren Drehzahlen auftauchen, noch viel extremer wie bei Otto- und Dieselmotoren.



Im Prinzip sehen sich die Muscheldiagramme zwischen großen und kleinen Stirlingmotoren alle ähnlich, jedenfalls von der Form her. Nur dass die maximalen Wirkungsgrade bei großen Maschinen höher liegen. Einige Zahlen: 35% bei Motoren über 150 kW, 30% bei Motoren über 30 kW, 25% bei Stirlingmotoren über 5 kW und 20% bei Motoren über 1 kW (alles Motor-Wirkungsgrade). Das heißt, es gibt die Chance, ein zweites Mal aneinander vorbeizureden, wenn nämlich bei einem Gespräch der eine Stirlingfreund nur mit 2 kW-Motoren vertraut ist, aber der andere in Kategorien von mehreren hundert kW denkt. Dieses Problem gibt es auch bei den Otto- und Dieselmotoren. Auch hier gibt es je nach Größe verschiedene Wirkungsgrade.



Und dann gibt es beim Stirlingmotor noch eine dritte Möglichkeit, aneinander vorbeizureden. Wo wird die zugeführte Leistung gemessen? Direkt am Erhitzer oder wird die in der Verbrennung entstehende Wärme-Leistung zu Grunde gelegt? Und wie sieht es auf der anderen Seite aus? Geht man bei der Wirkungsgrad-Berechnung

von der mechanischen Abtriebsleistung an der Welle aus oder geht man von der elektrischen Generatorleistung aus? Das Problem ist also vielschichtig. Sollten wir es angehen? – Ja, wir müssen es angehen. Unbedingt.

Dabei möchte ich ausgehend von der typischen Wirkungsgradkette eines Stirlingmotors folgende Wirkungsgrad-Namen definieren:

Aggregat-Wirkungsgrad = elektrische Nettoleistung / Brennstoffleistung,
sie umfasst in der untenstehenden Wirkungsgradkette alle Glieder (1-5)

Elektrischer Wirkungsgrad = elektrische Bruttoleistung / Brennstoffleistung, (1-4)

Motor-Wirkungsgrad = Wellenleistung / Brennstoffleistung, (1-3)

Stirling-Wirkungsgrad = Wellenleistung / Wärmeleistung am Erhitzer, (1+2)

Prozess-Wirkungsgrad = Arbeitskolben-Leistung / Wärme am Erhitzer, (nur2)

Wirkungsgradketten:

1. Verbrennung, (Verluste sind im Abgas und an Isolation) 0,2 – 0,8
2. Stirlingprozess, (thermodynamische Verluste) + größenabhängig 0,2 – 0,45
3. Mechanisches Getriebe, (Querkräfte, Rollreibung, usw.) 0,7 – 0,9
4. Generator (elektr. Widerstände) stark größen- und materialabhängig 0,65 – 0,95
5. Nebenaggregate (Pumpen, Ventilatoren, Förderschnecken usw.) 0,7 – 0,95

Die jeweils erste der beiden Faktoren stehe hier für einen kleinen Bastler-Motor und die zweite für einen professionellen Großmotor.

Multipliziert man alle Faktoren für einen professionellen Großmotor, dann kommen 0,29, also knapp 30% heraus. Das entspricht dem Niveau eines Ottomotors. Für einen gut geratenen Bastlermotor mit einem kW kann man sich 12% Aggregat-Wirkungsgrad durchaus vorstellen.

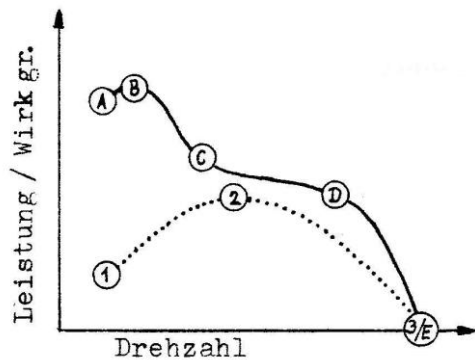
An Motoren, die im Inneren des Gehäuses einen Generator beinhalten, kann man die Wellenleistung übrigens oft gar nicht messen. Abhilfe würde hier ein Kennfeld des Generators bringen, wenn dieses Kennfeld Wirkungsgrad-Kurven enthalten würde. Aber ich habe noch keinen Hersteller von Generatoren erlebt, der solch eine Graphik seiner Lieferung beilegt.

Aber noch einmal zum Wirkungsgrad – und zwar speziell zum Stirling-Wirkungsgrad: Was passiert „wirkungsgradmäßig“ im Einzelnen, wenn ein Stirlingmotor zum Beispiel mit gleichbleibend starker Beheizung des Heißteiles erhitzt wird und verschiedene Drehzahlen gefahren werden?

Bei sehr langsamen Drehzahlen (A) gibt es noch zu große Kolbenring-Undichtigkeiten. Bei steigender Drehzahl ist dieser Störeffekt schließlich zu vernachlässigen, da das Gas gewissermaßen keine Zeit mehr hat, am Kolben vorbei zu kommen.

Die Strecke B-C stellt den Einfluss der Isothermie dar. Bei Punkt C sind die Isothermen bereits durch Adiabate ersetzt.

Dann gibt es zwischen Punkt C und D eine Plateau. Hier klappt die laminare Strömung nach und nach in allen Teilen des Motors in turbulente Strömung um, wodurch die Wärmeübergänge verbessert und der Wirkungsgrad zunächst noch einmal fast gehalten werden kann.



Nach Punkt D nimmt der Einfluß der Strömungswiderstände immer mehr zu, bis schließlich der Leerlauf erreicht ist.ⁱⁱ

(Leistungskurve, gepunktet: Punkt 1: Leistung bei Anwurfdrehzahl, Punkt 2: Leistungsoptimum, Punkt 3: Leerlauf (keine Leistung, nur wilde Rotation)).

Zu der Graphik sei noch angemerkt, dass sie nur für Stirlingmotoren gilt, die ein bestimmtes Bastlerniveau bereits verlassen haben. Wenn

die Kolbenring-Undichtigkeiten zum Beispiel zu groß sind, kann man sich das Plateau von C-D einfach nach links erweitert denken. Die hohen Wirkungsgrade von A und B kann man in diesem Fall nicht erreichen. Wenn es andererseits große innere Strömungsverluste gibt, dann muss man Punkt D niedriger ansetzen, so dass es kein ausgeprägtes Plateau mehr gibt.

Kann man mit Helium oder Wasserstoff bessere Wirkungsgrade erreichen? Diese Frage wird oft gestellt. Generell ist sie mit ja zu beantworten, aber es sollte keiner auf die Idee kommen, seinen Stirlingmotor, der für Luft oder Stickstoff konzipiert ist, mit Helium oder gar Wasserstoff zu befüllen. Schon beim Anwerfen dürfte es größere Probleme geben, weil man bei Helium viel dichtere Kolbenringe benötigt. Auch hohe Wirkungsgrade wären nie erreichbar, jedenfalls nicht höhere als bei Luft, weil die winzigen Heliumatome nur noch selten an die wärmeleitenden Wandungen gelangen. Trotzdem gab es in den 70-er Jahren einen Vergleichstest, meines Erachtens der einzige, der ernst genommen werden kann. Allerdings wurde hier ein Helium-Stirlingmotor alternativ mit Luft gefüllt, was bedeutet, dass für die großen Luftmoleküle die engen Röhrchen auch nicht geeignet waren. Hierbei zeigte es sich, dass Luft den leichteren Gasen gar nicht so haushoch unterlegen war.ⁱⁱⁱ Der Wirkungsgrad wurde bei diesem Test übrigens zwischen Wellenleistung und Wärmeleistung an den Erhitzerrohren gemessen und ist deshalb so hoch.

Fazit: Die Kurven und Diagramme ergeben für mich eine klare Konsequenz. Da die Maximalwerte von Wirkungsgrad und Leistung wie beim Explosionsmotor weit auseinander liegen, sollten im Grundlastbetrieb kleinere Drehzahlen und nur bei Spitzen höhere Drehzahlen gefahren werden. Dazu wären stufenlose Getriebe oder raffinierte elektronische Leistungsregelungen nötig. Hier stehen wir vor neuen Herausforderungen in der Stirlingtechnik.

Dieser Artikel stammt aus: www.stirling-und-mehr.de

ⁱ Oft wird angenommen, dass man den Carnot-Wirkungsgrad wegen des Regenerators bemühen kann. Aber erstens regeneriert der nur 60 bis 95 % der Wärme und die meisten vergessen die Temperaturverluste an Erhitzer und Kühler völlig, die bei einem sehr guten Stirlingmotor immer noch 200K am Erhitzer und 50K am Kühler betragen können. Wer sich trotzdem am Carnot-Wirkungsgrad orientieren will, dem sei gesagt, dass ein realer Wirkungsgrad zwischen Welle und den Brenngastemperaturen ungefähr 0,5 mal dem Carnot-Wirkungsgrades entspricht, wenn der Motor professionell gebaut wurde.

ⁱⁱ Vorsicht - bei den meisten Stirlingmotoren liegt die Selbstzerstörungs-Drehzahl zwischen D und E.

ⁱⁱⁱ Helium 47% bei 250 U/min; Luft 39% bei 250 U/min; aber Luft 44% bei 125 U/min