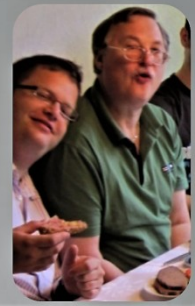


# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen



Mit Anregungen von Hans-Peter und Florian Bellm  
- Mechanici & Hinterfragende -

CAD-Modell / Lektor: Sebastian Bellm / H.-P. Segelke  
- Expertici für Kältetechnik / Gas- und Dampfturbinen -

Formulierung & Formeln : Hubert Bellm - Theoreticus -  
2011 - 2024



Copyright 2013, Sebastian Bellm

Änderungsdatum	Seitennummer	Jeweilige Textzeile(n) bzw. Objekt(e)
10.11.2016	3	13, 18, 22, 23 und Anmerkung 1)
15.11.2016	7	Beschriftung linke Grafik
18.11.2016	9, 10, 11, 12	15, Anmerkung 1), 4-16
24.02.2017	3	Anmerkung 2)
04.06.2017	3 neu eingefügt   4   7   10   11 neu   Seite danach entfernt	Prolog neu   Formulierung Aufzählpunkte 7 & 8   Formulierung Anmerkung 3)   Formulierung Anmerkung 3)   S. 11 (alte S. 10) neu   Folgeseite (alte S. 11) entf.
14.06.2017	4   8 entfernt   12 neu	Formulierungen gekürzt   Epilog neu
20.06.2017	1   2   9   10	Widmung   Disclaimer   Formulierung Hypothesen   Grafik aktualisiert
20.08.2017	10	Update der rechten Grafik   Anmerkung 5)
20.11.2017	7   10	Formulierung 1. Absatz, Anmerkung 1) entfernt   Anmerkung 5) entfernt bzw. neu, Update der rechten Grafik
06.04.2024	Alle Seiten   9	Prolog+Epilog entfernt, Text gestrafft, Funktionsprinzip auf der Seite 9 aktualisiert

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen



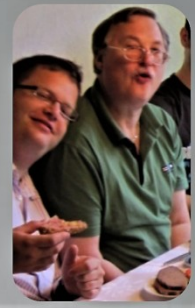
## Inhalt <sup>1)</sup>

Grundprinzip und Anwendungen	3
Häufigste Bauform heutiger Druckluftmotore	4
Grafiken zur Beschreibung des Expansionsvorgangs	5
Versuch einer anschaulichen Erklärung ohne Formeln	6
Formeln des Expansionsvorgangs auf einem Blatt	7
Gedanken-Experiment von Hans-Peter Segelke	8
„Extern beheizter“ Rotationskolben-Motor	9

1) Autor und Lektoren haften in keinem denkbaren Fall für eventuelle Verletzungen von Personen, Sachschäden oder wirtschaftliche Verluste, die auf die Anwendung der Formeln und Zahlenwerte dieses Dokuments zurückgeführt werden können. Alle Links auf externe Seiten wurden bei Erstellung der Seite sorgfältig geprüft. Mögliche Rechtsverstöße waren zum Zeitpunkt der Verlinkung nicht erkennbar. Allerdings haben wir keinen Einfluss auf die Inhalte verlinkter Seiten, hierfür ist der jeweilige Dienstleister verantwortlich. Sollten rechtswidrige Seiten über die Hyperlinks abrufbar sein, bitten wir um eine Mitteilung an das Autoren/Lektoren-Team.

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## Grundprinzip und Anwendungen



- *Ein unter Druck stehendes Gas aus einem Arbeitsvolumen, einer Gasleitung oder aus einem Druckbehälter expandiert und verrichtet dabei mechanische Arbeit. Dabei kühlt sich das Gas ab.*
- Neben der auf der folgenden Seite gezeigten heute üblichen Bauform finden sich in der Patentliteratur mehrfach Druckluftmotore mit mechanisch oder elektrisch angesteuerten Ventilen zur Injektion von Gasen unter hohem Druck.
- Handelsübliche (einstufige) Druckluftmotore für 6 - 8bar verschiedener Bauarten haben ein „Verdichtungsverhältnis“ von 1:2 bis 1:5 und verbrauchen für Leistungen von 1 Kilowatt und große Mengen an Druckluft (Quelle: Datenblätter verschiedener Hersteller).
- Druckluftwerkzeuge sind ein heute weit verbreiteter Anwendungsfall von Druckgas- (Gasexpansions-) motoren. Dabei wird mittels Kompressor ein nahezu konstanter Luftstrom erzeugt.
- Andere Anwendungen erfordern einen „Pausenzustand“, d. h. einen Vorratsbehälter (Drucktank oder Salzkaverne) für das Gas.
- Künftige Druckgasmotore mit „Hypothermischer Expansion Technology *H\*ET*®“<sup>1)</sup> können theoretisch die Effizienz der Gewinnung mechanischer Energie aus komprimiertem Druckgas verbessern. Dabei mischt sich die mit Umgebungstemperatur eingeblasene Druckluft mit der vorgewärmten Ansaugluft der Expansionsmaschine. Der Vorteil dabei ist ein niedrigeres Temperaturniveau ohne dass Vereisung eintritt.

1) **Vorteil:** Direkte Umsetzung der zugeführten Wärme in mechanische Arbeit mit hohem Wirkungsgrad => hohe Brennstoffeffizienz. **Nachteil:** Nur rentabel, wenn die vorverdichtete Druckluft aus „überschüssigem“ Strom erzeugt wird. - zum Beispiel bei negativem Strompreis an der Strombörse.

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## Bauform heute üblicher Druckluftmotore



Die heute am meisten verbreitete Bauform eines Druckgasmotors (Gasexpansionsmotors) ist der *Flügelzellen*, *Schleuderscheiben* oder *Lamellenmotor* :



Bei dieser Bauform ist das erreichbare Expansionsverhältnis auf ca. 1:2 bis 1:10 begrenzt!

Dieses Werk wurde (oder wird hiermit) durch den Autor, Grikalmis auf Wikipedia auf Deutsch, in die **Gemeinfreiheit** übergeben. Dies gilt weltweit.



Falls dies rechtlich nicht möglich ist:

Grikalmis erlaubt jedermann die Verwendung des Werks zu **jedem Zweck** ohne jegliche Bedingungen, außer solchen Bedingungen, die gesetzlich vorgeschrieben sind.

- In der Thermodynamik wird die Verdichtung und spätere Expansion idealer Gase in erster Näherung als „*reversibler Prozess*“ aufgefasst. Somit sollte das *Expandieren eines Gases als der gegenteilige Vorgang zu dessen Verdichten beschreibbar sein*.
- Jeder, der einmal mit einem Druckluftwerkzeug gearbeitet hat, weiß, dass dieses im Betrieb kalt wird, d. h. während der Expansion *kühlt das Gas ab => das Verdichten und Expandieren von angenähert idealen Gasen hat Ähnlichkeit zum Wirkungsprinzip einer Kältemaschine*, jedoch ohne die bei diesen stattfindende Verdampfung bzw. Kondensation.



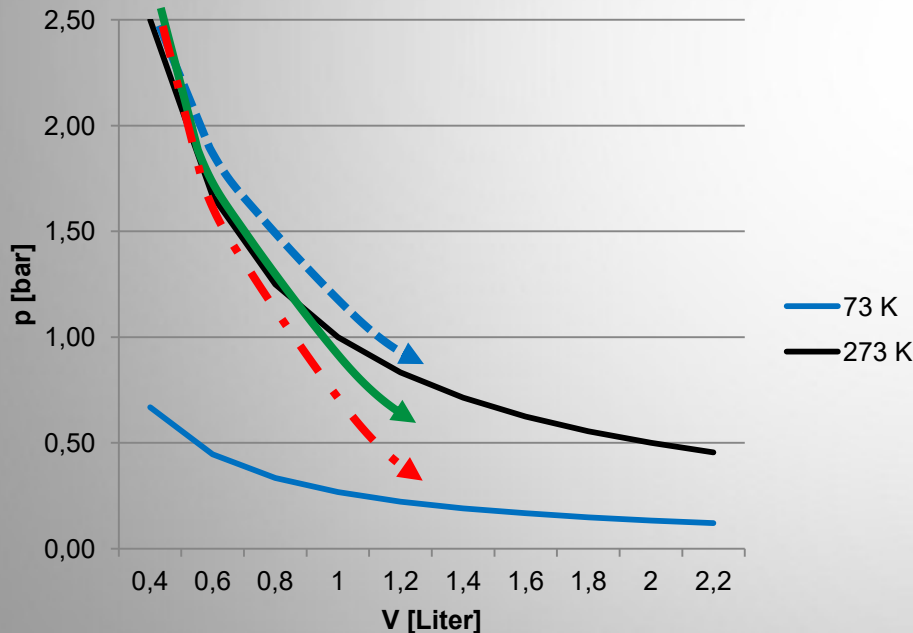
# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## Grafiken zur Beschreibung des Expansionsvorgangs

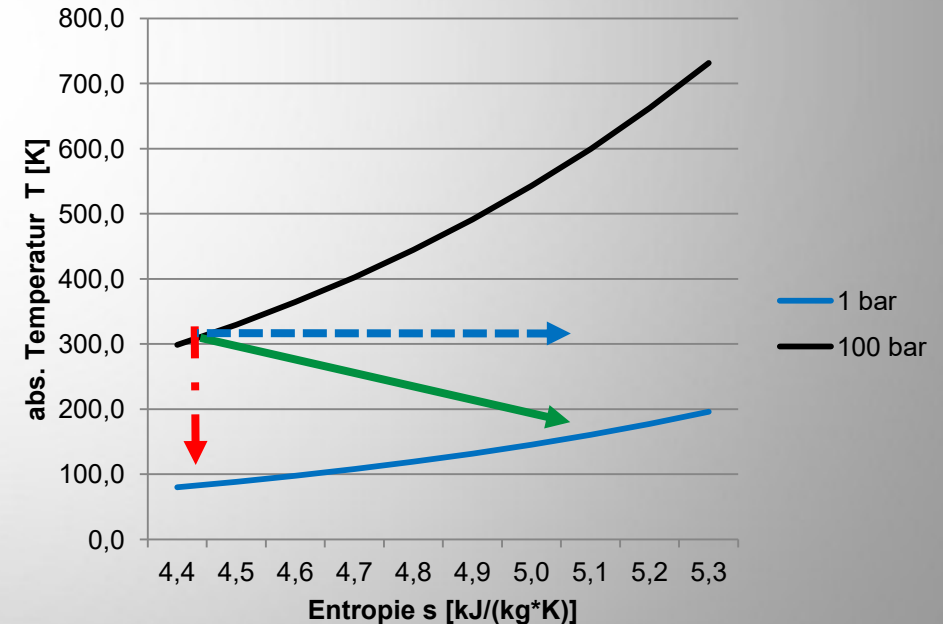


Wenn während der Expansion kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, wird dieser Vorgang als „**adiabatisch**“ ( $\equiv$  „**isentrop**“ bei einem **idealen Gas**) bezeichnet. Findet ein bestimmter Wärmeaustausch<sup>1)</sup> (= beispielsweise eine Zufuhr von Wärme) statt, heißt der Vorgang „**polytrop**“. Wenn soviel Wärme zugeführt wird, dass das Gas während der Expansion auf konstanter Temperatur bleibt, nennt sich dieser Vorgang „**isotherm**“.

### p-V-Diagramm für Luft als ideales Gas



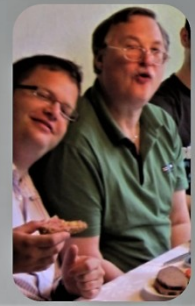
### T-s-Diagramm für Luft als ideales Gas



1) Siehe z.B.: <http://www.peter-junglas.de/fh/vorlesungen/thermodynamik1/html/kap3-4-6.html>

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## Versuch einer anschaulichen Erklärung ohne Formeln



- Der *ideale* (**isentrop**e) Expansionsvorgang wird als der effizienteste bezeichnet, weil bei ihm im Verhältnis zum Masseneingangstrom die größte Abgabe von technischer Arbeit beobachtet wird. In diesem Kontext bedeutet „*ideal*“, **dass** bei maximaler Druck- bzw. Temperaturreduktion **ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung sich die Absenkung der inneren Energie oder Enthalpie vollständig in technische Arbeit umsetzt**.
- Im Vergleich zum isentropen ist der **polytropic** Expansionsvorgang mit einer geringeren Abkühlung des Gases verknüpft. Damit rückt er näher an den isothermen Vorgang und *sollte eine größere technische Arbeit liefern* <sup>1)</sup>. **Dieses Postulat kann mit realen (Wärme-)-Maschinen (Motoren/Turbinen) nicht bestätigt werden** <sup>2)</sup>.
- “Weil sich beim isothermen Prozess die innere Energie oder Enthalpie nicht ändert, muss der gesamte Wärmeaustausch mit der technischen Arbeit identisch sein.“ <sup>3)</sup>
- Mit Erstaunen ziehen wir den Schluss, dass im Gegensatz zur gespannten Feder im komprimierten Gas bei Umgebungstemperatur keine Energie im physikalischen Sinn gespeichert ist. Vielmehr *befindet es sich vorteilhaft in einem Zustand niedriger Entropie*. Die später beim Entspannen des Gases gewonnene mechanische Energie wird über die Arbeitsmaschine aus zugeführter Wärme (z. B. aus der Umgebung) und/oder der Wärmekapazität des Gases konvertiert, wobei es sich bekanntermaßen abkühlt (übersetzt nach Simons, Theodore, “Compressed Air”, McGraw-Hill Book Company Inc., New York and London, 1921, p. 113 – 120) <sup>4)</sup>.
- => Wir können Expansionsmaschinen zwischen **isothermen** über den **polytropen** bis zum **isentropen** Betrieb anschaulich als eine Kombination aus Klimagerät und “*Entropie-Motor*” auffassen. In diesem Zusammenhang ist die *Entropie* als *eine Systemeigenschaft* zu verstehen, die (im inversen Sinn) dessen *Fähigkeit zur Abgabe mechanischer Energie als Arbeitsmaschine* beschreibt. Hierbei verwenden manche Experten auch die Begriffe „Exergie“ oder „reversible Arbeit“.

1) Diese Erkenntnis ergibt sich aus der Auswertung der Gleichungen auf der nächsten Seite 8.

2) Wir vermuten den Grund dafür im II. Gesetz der Thermodynamik: Aufgrund von Wärmeverlusten oder aktiver Kühlung des **Maschinengehäuses** ist dessen **Temperatur immer niedriger als die Prozesstemperatur** – damit ist keine Wärmezufuhr von außen zum Prozess möglich.

3) Borgnakke, Claus | Sonntag, Richard E. | „Fundamentals of Thermodynamics“, John Wiley&Sons Inc., NY, 2009, chapter 8, page. 273.

4) Es wird hier ein Teilabschnitt eines “**Kreisprozesses mit Pausenzuständen**” betrachtet, **weil sich das Gas nach dem Verdichten abkühlen kann**.

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen



## Formeln des Expansionsvorgangs auf einem Blatt

### Formeln für den Expansionsvorgang (Annahme von Reversibilität):

Isentrope ( $s_{\text{konst}}$ ) Expansion ( $\equiv$  adiabate Expansion bei idealen Gasen):

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad 1) = T_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon - 1}\right)^{k-1} \quad 2) \quad \text{mit } p_2 < p_1, V_2 > V_1 \text{ und } \varepsilon > 1 \quad (1)$$

$\Rightarrow$  Temperatur- und Druckänderungen bzw. Temperatur- und Volumenänderungen sind beim idealen Gas gegenseitig fest gekoppelt.

Technische Arbeit **isentrop** und **isotherm** (ideales Gas):

$$\begin{aligned} W_{\text{isentr}} &= m \cdot R \cdot \frac{k}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot R \cdot \frac{k}{k-1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] = m \cdot R \cdot \frac{k}{k-1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} - 1\right] \quad 3) \\ &= m \cdot R \cdot \frac{k}{k-1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{1}{\varepsilon - 1}\right)^{k-1} - 1\right] \quad 2) \quad \text{mit } T_2, p_2, V_1 < T_1, p_1, V_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_{\text{isoth}} = m \cdot R \cdot T_{\text{konst}} \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = m \cdot R \cdot T_{\text{konst}} \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad \text{mit } p_2, V_1 < p_1, V_2 \quad 4) \quad (3)$$

1) Borgnakke, Claus | Sonntag, Richard E. | „Fundamentals of Thermodynamics“, John Wiley&Sons Inc., NY, 2009, chapter 8, p. 271, isentropic process, n substituted by k

2) Bei Expansionsmaschinen der Verdrängerbauart:  $\varepsilon$  = Verdichtungsverhältnis

3) Ibidem, chapter 9, p. 325, isentropen Process, n ersetzt durch k

4) Ibidem, chapter 9, p. 325, isothermer Process, n bzw.  $k = 1$

# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## Gedanken-Experiment von Hans-Peter Segelke

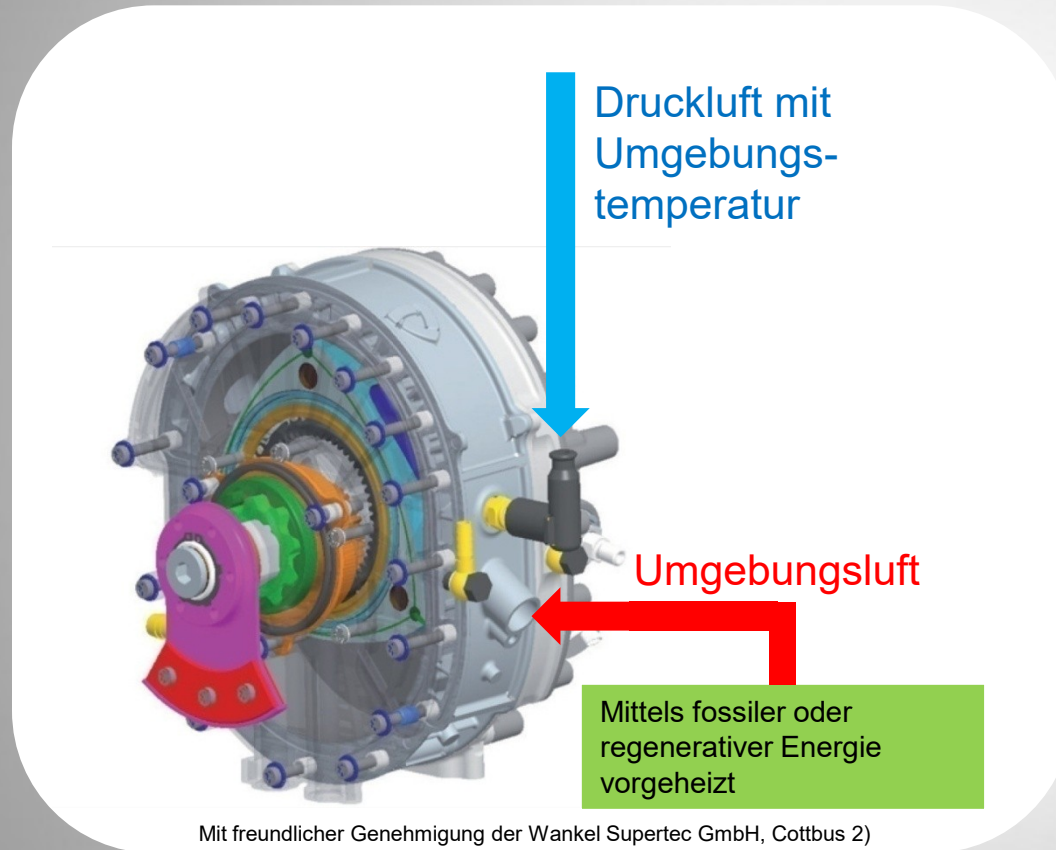


- Ein **Gedankenexperiment** zum Expansionsvorgang: Ausgehend von **adiabatischer Expansion** => keine Wärmezufuhr, die geleistete technische Arbeit  $W_{t12}$  führt vollständig zur Abnahme der inneren Energie allein - **die Temperatur T sinkt kräftig**. Wird nun (*während der Expansion*) ein wenig geheizt = Wärme zugeführt =>  $W_{t12}$  entspricht der Summe aus Wärmezufuhr + Abnahme der inneren Energie, die aber geringer ist = **polytrope Expansion** - **T sinkt weniger stark**. Wenn wir dann die Heizung = Wärmezufuhr immer weiter steigern <sup>1)</sup>, entspricht  $W_{t12}$  vollständig der Wärmezufuhr => die innere Energie ändert sich nicht - **die Temperatur T bleibt konstant = isotherme Expansion**. (Hans-Peter Segelke) <sup>2)</sup>
  - Das vorstehend beschriebene Verhalten bedeutet für die Gleichungen (1) und (2) auf Seite 7:  $k \rightarrow n \rightarrow 1$  und gleichzeitig  $T_2 - T_1 = \Delta T \rightarrow 0$ . Offensichtlich *ist Gleichung (2) nicht für dieses Gedankenexperiment zum Expansionsvorgang geeignet*. <sup>2)</sup>
  - Eine Auswertung der Formeln (2) und (3) für ein Beispiel (Luft:  $k=1,402$ ;  $V_2/V_1=19$ ) suggeriert, dass, wie bereits auf Seite 6 erwähnt, der **isotherme** (und damit auch der **polytrope**) Expansionsprozess im Vergleich zum **adiabatischen/isentropen** einen *höheren Betrag an technischer Arbeit abgeben sollte*. Leider **kann dieses theoretische Ergebnis an realen Maschinen nicht bestätigt werden!** (Siehe Anmerkung 2 auf der Seite 6)
  - **Zusammenfassung und Schlussfolgerung:** Bekannte oder noch technisch zu verifizierende *Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz von Expansionsmaschinen* bei gleicher Baugröße und *Arbeitsabgabe*  $W_{t12}$  sind:
    - Wie üblich, eine *höhere Temperatur*  $T_1$  am Beginn des Expansionsvorgangs,
    - Wie bekannt, eine konstruktive *Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses*  $\epsilon$ ,
    - Hypothese 1: *Isolierung des Maschinen-Gehäuses und Verbesserung des Wärmeübergangs* <sup>3)</sup> vom Gehäuse zum expandierenden Gas,
    - Hypothese 2: *Die Verwendung vorverdichteter Druckluft als Entropieträger aus erneuerbaren Energiequellen bzw. negativem Strompreis*.
- 1) Dabei wird angenommen, dass diese **Wärmezufuhr "von außen" technisch möglich ist, vergl. Anmerkung 2) auf der Seite 6**.
- 2) Zur Abgrenzung: Es wird hier ein Teilabschnitt eines **"Kreisprozesses mit Pausenzuständen"** betrachtet, d. h. das Gas besitzt zu Beginn der Expansion eine vorgegebene Temperatur.
- 3) Die Abbildung auf der Titelseite zeigt ein mögliches Beispiel. Hinweis: Bei gegebener Oberfläche verringert sich die Kühlwirkung auf das expandierende Gas mit steigendem Massenstrom.



# Zur Effizienz von Expansionsmaschinen

## „Extern beheizter“ Rotationskolben-Motor



Rotationskolbenmotore haben in der Praxis bereits ein ideales **Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon = 20$**  erreicht ! 1).

- Theoretisch muss dieses Funktionsprinzip außer auf *Rotationskolben-Motore* auch auf **Turbinen** anwendbar sein. Wir überlassen dieses Thema jedoch auf diesem Gebiet erfahrenen Experten bzw. Forschern.

- Je nach Menge des eingedüsten und der und Temperatur des angesaugten Gases sind **unterschiedliche Fahrweisen** ein- und derselben Expansionsmaschine vorstellbar:  
*A: Mit hoher Effizienz oder*  
*B: Mit hoher spezifischer Leistung.*

- 1) Tabelle auf der Seite 17 der Doku von Jean Pierre Corbat und Uwe L. Pawlowski, „Kreiskolbenmotore des Systems NSU-Wankel – Ihre Berechnung und Auslegung“, <technika> Reihe Nr.18, Birkhäuserverlag.
- 2) Verfasser und Lektor bitten um Nachsicht für die „Umdeutung“ der Zündkerze in ein Einblasventil.