

# Wirkungsgrad

## A.) Definition:

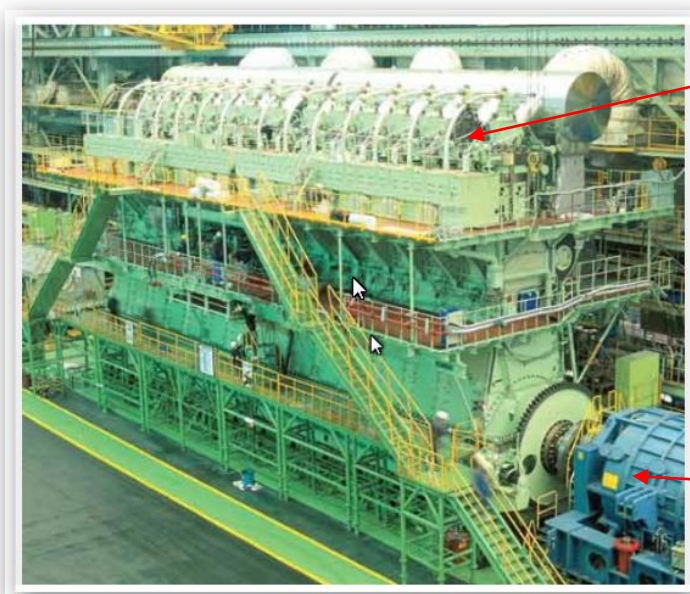
Wirkungsgrade sind stets als Verhältnisse von zugeführten zu nutzbaren Energien oder Leistungen definiert.

Beispiel 1, dazu ein naheliegender Ansatz: Verbrennungsmotor.

**Die zugeführte Leistung ( $P_i$ )** errechnet sich aus dem Produkt:

Brennstoffverbrauch pro Zeiteinheit \* unterer Heizwert des Brennstoffs

wobei wichtig ist, beide Werte können gemessen werden.



Brennstoff Zuführung (Einspritzung):  
Thermische Leistung=  $h_u$  pro Zeiteinheit.  
( $h_u$ : Unterer Heizwert des Brennstoffs  
(in Joule pro Kilogramm))

Leistungsmessung am Schwungrad  
mittels Hydro- Bremse.  
Gemessen wird Drehfrequenz (Hz) und  
Drehmoment (Nm).  
(hier Nennleistung:  
80'100 kW bei 80 rpm)

14 Zyl. Marine 2- Takt Dieselmotor  
(Zyl. Durchmesser 96 cm)

**Die Nutzleistung ( $P_N$ , z. B. am Schwungrad)** errechnet sich aus:

Drehmoment \* Drehfrequenz

Auch hier, beides ist messbar, Drehmoment beispielsweise mittels einer hydro- Bremse, Drehfrequenz mittels Stroboskop (oder klassischer mechanischer Drehzahlmesser).

Mathematisch geschrieben:  $\eta_{\text{mot}} = P_N/P_i$  (1)

Der Wirkungsgrad ist eine dimensionslose Grösse und wird üblicherweise mit dem Symbol  $\eta$  gekennzeichnet.

Für weitere Apparate / Anlagen / Maschinen, welche Energie resp. Leistung in irgendeiner Form umwandeln, gilt der definierte Ansatz entsprechend.

## B.) Systembetrachtung:

Im obigen Beispiel ist es so, dass auf dem Weg vom Leistungsinput  $P_i$  bis zur gemessenen Leistung am Schwungrad  $P_n$  eine Reihe von unterschiedlichen Verlustquellen vorhanden sind:

- thermische Verluste im Verbrennungsprozess ( $P_{th}$ ).
- Strömungsverluste der Gase (Luft / Abgas) durch das System "Motor" ( $P_{str}$ ).
- Kühlverluste (Öl; Wasser; Luft) ( $P_k$ ).
- Reibungsverluste (Lager; Nockenwellenantrieb; Kolbenringe) ( $P_{mech}$ ).

Für jede der Verlustquellen kann ein individueller Wirkungsgradanteil bestimmt werden:

$$\eta_n = P_n/P_{in} \quad (2)$$

Also

$$\eta_{th} = (P_i - P_{th})/P_i$$

$$\eta_{str} = (P_i - P_{th} - P_{str})/(P_i - P_{th})$$

usw.

*Anmerkung:* Die Messung und Abgrenzung der einzelnen Parameter zur Bestimmung individueller Wirkungsgradanteile ist sehr komplex und kann eigentlich nur im Labor durchgeführt werden. So gehen beispielsweise die Reibungsverluste in Wärme über und werden vom System als solche abgeführt.

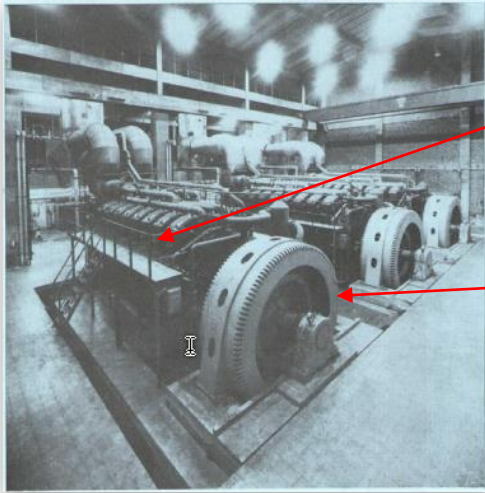
Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{mot}$  errechnet sich aus dem Produkt der einzelnen Wirkungsgrade:

$$\eta_{mot} = \eta_{th} * \eta_{str} * \eta_k * \eta_{mech} \quad (3)$$

Ebenso für Gesamtsysteme: Angenommen der Motor von obigen Beispiel treibt einen Generator, so errechnet sich der Gesamtwirkungsgrad des Systems Motor - Generator unter Berücksichtigung der mechanischen und elektrischen Verluste des Generators folgendermassen.

$$\eta_{system} = \eta_{mot} * \eta_{Gen} \quad (4)$$

wobei



Brennstoff Zufuhr

Generator:  
Leistungsmessung =  
Spannung (V) \* Stromstärke (A).  
(hier Nennleistung des Generators  
12'000 kW bei 600

Dieselizeentrale mit 3\* 16 Zyl. Dieselmotoren

$$\eta_{\text{Gen}} = \eta_{\text{Gmech}} * \eta_{\text{Gel}}$$

Die Nutzleistung am Generator kann durch Messung der Spannung (U, in Volt) und der Stromstärke (I, in Ampère) einfach ermittelt werden. Die Leistung errechnet sich aus dem Produkt

$$P_{\text{el}} = U * I \text{ [kW]}$$

### C.) Komplexe Systeme:

Für die meisten kombinierten Anlagentypen ist die Bestimmung des Anlage- Wirkungsgrades nicht eine "straight forward" Angelegenheit, sondern es müssen einige Überlegungen die Plausibilität betreffend, angestellt werden.

#### a) Gas Kombi Kraftwerke (Combined Cycle Gas Turbine - CCGT):

Sieh dazu auch den CCN - Wiki Beitrag "Gas Kombi Kraftwerk - wie funktioniert das" vom 23. Januar 2021.

Ein Gas Kombi Kraftwerk besteht aus zwei Kernkomponenten, nämlich einer Gasturbine welche einen Generator antreibt, sowie eine nachgeschaltete Dampfturbine, welche ebenfalls einen zweiten Generator antreibt. Zwischengeschaltet ist ein Abhitzeessel, welcher die Abgase aus der Gasturbine, welche neben einem hohen Massenstrom auch noch eine hohe Temperatur hat verarbeitet und die Dampfturbine mit überhitzten Dampf speist.

Jetzt kann man die beiden Systemkomponenten bezüglich Wirkungsgrad gesondert betrachten und käme betreffend individuellen Wirkungsgrad auf (realistisch angenommen) folgende Werte:

Wirkungsgrad Gasturbine inkl. Generator:  $\eta_{\text{GG}} = 32 \%$

Wirkungsgrad Dampfturbine inkl. Generator:  $\eta_{\text{DG}} = 50 \%$

Gemäss Gleichung (3) resultiert der Gesamtwirkungsgrad einer Anlage durch Multiplikation der einzelnen Wirkungsgrade der Komponenten. Bei CCGT Anlagen haben wir es jedoch mit völlig getrennten Anlagekomponenten zu tun.

Aus plausiblen Gründen kann nicht  $\eta_{GG}$  mit  $\eta_{DG}$  multipliziert werden, das gäbe einen Gesamtwirkungsgrad der Anlage von 16 %, was selbstverständlich unsinnig ist, man kam schliesslich auf die Idee der CCGT Anlagen um den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern. Wirkungsgrade zu addieren ist ebenfalls alles andere als plausibel, im vorliegenden Beispiel wären das physikalisch unmögliche 82%, was über dem angenommenen Carnot Wirkungsgrad von etwa 75 % <sup>(1)</sup> liegt (dieser stellt die erzielbare Asymptote des unter den gegebenen Bedingungen reversiblen idealen Kreisprozesses dar).

Gemäss Gleichung (1) errechnet sich ein Wirkungsgrad als Verhältnis der erzeugten Leistung (resp. Energie) zum Leistungsinput. Für eine CCGT Anlage also:

$$\eta_{CCGT} = P_{CCGT (total)} / P_{iCCGT}$$

Der effektiv für derartige Anlagen erzielbare Wirkungsgrad - bei Nennleistung - liegt bei rund 52% bis 53%. Dazu ist auch anzumerken, dass auf Grund der Kombination der beiden Wärmekraftmaschinen (Gasturbine und Dampfzyklus) der Wirkungsgradverlauf als Funktion der Leistung sehr "flach" ist, d.h. die Anlage erzielt auch bei Teillast noch hohe Wirkungsgrade.

Letzteres wie auch die Standardisierung vieler der Kernkomponenten solcher Anlagen, was einen positiven Impact auf Preis, Qualität und Zuverlässigkeit mit sich bringt, sorgen für die Popularität solcher Anlagen. Aus der Standardisierung folgt auch eine relativ kurze Bauzeit, weniger als 4 Jahre für ein 800 MW Kraftwerk sind realistisch.

*<sup>(1)</sup> Speziell bei einem derart komplexen Systemaufbau, wie eine CCGT-Anlage zeigt es sich, dass die saubere Berechnung des Carnot- Wirkungsgrades eine trickreiche Angelegenheit ist. Die Wärme- Abführung aus dem Prozess (mit der entsprechenden "unteren" Temperatur  $T_u$ ) erfolgt einerseits durch den Kondensator des Dampfprozesses bei konstanter Temperatur (abhängig von der Umgebungstemperatur, etwa 10 deg C höher als diese) sowie durch die Abgase aus dem Kessel bei etwa 150 deg C. So muss zur Berechnung des Carnot- Wirkungsgrades eine mittlere gewichtete Temperatur  $T_{u\text{eff}}$  abgeschätzt werden.*

#### **b) Wärme Kraft Kopplung (WKK):**

Unter dem Begriff WKK versteht man Anlagen, bei welchen das Kernelement ein Verbrennungsmotor ist, welcher einerseits einen Generator antreibt und andererseits dessen Abwärme (Abgase, Motorkühlung) für die Wärmeversorgung genutzt wird.

Derartige Systeme können als Kleinanlagen für einzelne Häuser resp. Gewerbegebäude gebaut werden, üblich jedoch ist /war <sup>(2)</sup> die Anwendung als zentrale Quartier-Versorgungseinheit.

Anders als im Fall der CCGT Konfiguration, produziert eine WKK Anlage zweierlei Qualitäten von (Nutz-) Energie: Strom und Wärme. So steht die Frage im Raum, wie kann man sinnvollerweise den Wirkungsgrad einer solchen Anlage bestimmen.

Gehen wir davon aus, dass die Motor- Generator Gruppe einen Wirkungsgrad von 46% hat (gilt für grössere Anlagen, Kleinanlagen erreichen solche Werte nicht). Dann fallen 54% der zugeführten Energie als Abwärme an. Allerdings, die rund 4% Verluste im Generator,

davon anteilmässig rund 2% mechanische und 2% elektrische, können nicht sinnvoll rekuperiert werden. So bleiben etwa 50% als nutzbare Abwärme, einerseits in den Abgasen (bei etwa 150 degC) und andererseits im Kühlwasser und Ölkühler (bei etwa 50 degC). Realistisch angenommen können allenfalls 50% dieser Abwärme zu Heizzwecken nutzbar gemacht werden kann. Damit könnte mit dieser Anlage

71.0%

der zugeführten Energie kommerziell nutzbar gemacht werden. Dabei handelt es sich bei diesem Wert keinesfalls um einen Anlagewirkungsgrad, sondern um eine **Energiennutzungsziffer**, welche durch Addition der beiden unterschiedlichen Energiequalitäten nach folgender Rechnung entsteht:

Energiennutzungsziffer:  $0.46 + (0.5 \cdot 0.5) = 0.71$  oder 71%

Man beachte, dass die einzelnen Elemente **additiv überlagert werden, was für eine Wirkungsgradberechnung gemäss Definition nicht zulässig ist.**

Für derartige Anlagen stellt sich noch eine grundsätzliche Frage. Der produzierte Strom ist kommerziell wie auch physikalisch höherwertig als die Wärme.

Aus kommerziellen Gründen sollte eine derartige Anlage deshalb nicht nur im Winter, wenn Heizwärme produziert werden soll, betrieben werden, sondern das ganze Jahr durch. Ausgenommen dabei wären die Zeitintervalle für die notwendigen regulären Revisionen. Da die Anlage Wärme produziert, sobald diese in Betrieb ist, muss parallel zum Anlagenteil für die kommerzielle Wärmenutzung ein Kühlsystem installiert sein, welches die Motorkühlung auch dann sicherstellt, wenn die Abwärme nicht anderweitig genutzt werden kann. Diese notwendige Redundanz des Kühlsystems macht WKK Anlagen teuer in der Anschaffung.

### c) Alternative WKK Variante:

Denkbar wäre auch eine WKK Variante, wo der Motor eine Wärmepumpe antreibt. Sinnvollerweise wäre die Wärmepumpe als Vorwärmer- Stufe zur Motorabwärmenutzung auszulegen. Dies deshalb, weil das Temperaturniveau der Motorabwärmenutzung deutlich höher liegt als die sinnvolle maximale Temperatur aus einer Wärmepumpe.

Der technische und kommerzielle Vorteil einer solchen Anlagekonfiguration ist jedoch hochgradig fragwürdig. Die Anlage wäre sehr teuer in der Anschaffung, und gleiches kann erreicht werden mittels einer modernen und einfachen Direktfeuerung.

*(<sup>2</sup>) WKK Anlagen sind nichts neues. Besonders in der Zeit der beiden "Öl- Krisen" (1973 und 1979) waren und wurden solche Anlagen besonders populär, nicht nur für die Energieversorgung von kommunalen Distrikten sondern auch als "Captive"- Anlagen zur Stromerzeugung und als Prozesswärmeversorger von Industrieanlagen, besonders Chemieanlagen.*

*Solche WKK Anlagen wurden damals gebaut mit Motoren bis ca. 35'000 MW Leistung. Die Anlagen erreichten Energienutzungsziffern von etwas über 80%, allerdings war wegen deren Komplexität der Betrieb und Unterhalt derart aufwendig, dass man später auf deutlich einfachere Anlagen zurückging.*

*Auch ist es so, dass mit jedem Prozentpunkt an Erhöhung der Energienutzung die Anlage*

*Kosten exponentiell ansteigen (notabene eine generelle Regel).*