

# Gasturbinen

Die Gasturbine gehört wie der Kolbenmotor zu den Gaskraftanlagen. Die Zustandsänderungen in einer Gasturbine finden nur im Gasgebiet statt. Dies unterscheidet sie von den Dampfturbinen, bei denen das Arbeitsmedium einen Kreisprozess mit Dampf- und Flüssigphase durchläuft. Die Gasturbine dient zur:

- Stromerzeugung
- Kraft-Wärme-Kopplung
- Antriebseinheit für Fahrzeuge und Flugzeuge
- Antriebseinheit für Generatoren, Verdichter und Pumpen

Die Brennstoffe sind in der Regel **Erdgas** oder **Heizöl**. Durch die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten wurden unterschiedliche Bauarten entwickelt

## Leichte Gasturbine (Flugzeugtriebwerke)

- Anforderung: geringes Gewicht
- Leistung: 500 – 40.000 kW (heute auch **Mikro-GT** im Leistungsbereich 20 bis 100 kW in der Entwicklung)

## Gasturbine in Schwerbauweise (Industriegasturbine)

- Anforderung: Dauerbelastung
- Leistung: 500 – 340.000 kW

## Geschlossene Gasturbinen (Wärme kraftmaschine)

Vom Verbrennungsmotor getrenntes Arbeitsmedium (Kreisprozess mit Wärmeaufnahme und Arbeitsabgabe)  
Vorteile: Wahl des Arbeitsmittels und des Druckniveaus (war für den Einsatz mit HT-Reaktor geplant)

## Offene Gasturbinen (Verbrennungskraftmaschine)

Arbeitsmedium ist das Verbrennungsgas (kein Kreisprozess)

## Hersteller von Gasturbinen

**Große Industrieturbinen:** einwellig, gemeinsame Welle und Drehzahl von Verdichter und Turbine, niedriger spez. Preis, lange Lebensdauer, Spitzenlast und GuD  
Siemens Power Generation, Alstom Power, General Electric, Mitsubishi

**Mittelgroße Industrieturbinen:**

Siemens Power Generation, Alstom Power, General Electric, Rolls Royce, Pratt & Whitney, Hitachi, MAN Turbo, Solar Turbines (Caterpillar-Tochter), Kawasaki

**Fugzeugturbinen:** mehrwellig, Verdichter hat eigene Turbine, Strahltriebwerk ohne Nutzleistung (außer Schub)  
General Electric, Rolls Royce, Pratt&Whitney, Japanese Aero Engines, MTU

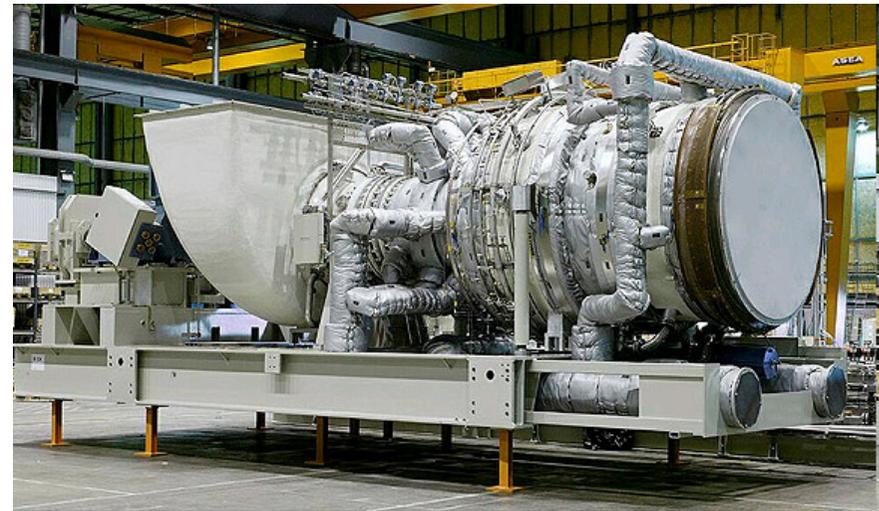
**Mikrogasturbinen:** 25-100 kW

Capstone, Turbec, Elliot, Ingersoll-Rand

## Gasturbinen, ein Beispiel

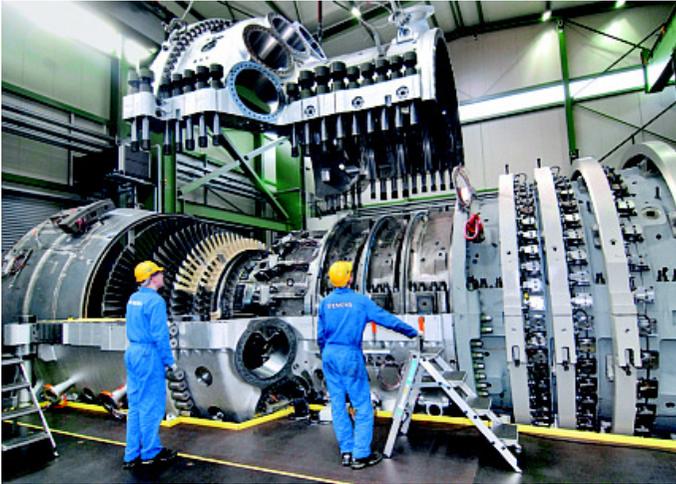
### Siemens 47 MW Turbine, Technische Daten:

- ⇒ Brennstoff: Erdgas / Flüssigbrennstoff
- ⇒ Frequenz: 50 / 60 Hz
- ⇒ Elektrischer Wirkungsgrad: 37,5 %
- ⇒ Wärmeverbrauch: 9.597 kJ/kWh
- ⇒ Turbinendrehzahl: 6.608 U/min
- ⇒ Verdichter-Druckverhältnis: 19:1
- ⇒ Abgasmassenstrom / -temperatur: 131,5 kg/s / 544 °C  
NOx-Emissionen:  $\leq 15$  ppmV



Quelle: <http://www.powergeneration.siemens.de>

## Gasturbinen, ein zweites Beispiel



Quellen: Siemens Power Generation: <http://www.energy.siemens.com>

- ⇒ Die größte Gasturbine der Welt: 340 (375) MW gebaut im Siemens Gasturbinenwerk Berlin, SGT5 8000H
- ⇒ Länge: 13 m
- ⇒ Höhe: 5 m
- ⇒ Gewicht: 444 t
- ⇒ Luft: 800 kg /Sekunde
- ⇒ Abgas: 820 kg/Sekunde
- ⇒ Druckverhältnis: 19,2
- ⇒ Wirkungsgrad: 40%
- ⇒ 2009 Testbetrieb der Turbine war erfolgreich
- ⇒ Ab 2011 Betrieb im E.ON Kraftwerk in Irsching

# Turbinenschaufeln

Wichtige Aspekte:

- ⇒ Strömungsmechanik
- ⇒ Kristallinität der Metallegierung
- ⇒ Material, z.B. ODS-Legierungen\*, Festigkeit trotz hoher Temperaturen > 1000 °C und gewaltiger mechanischer Belastung, ggf. keramische Beschichtung
- ⇒ Kühlung durch Luft oder Wasserdampf
- ⇒ Gute Abdichtung zwischen den rotierenden Schaufeln und dem Turbinengehäuse, ggf. hydraulische Verstellung des Radialspaltes durch Axialverschiebung des gesamten Läufers

\*ODS = Oxid-dispersionsgehärtet

Quellen: 3Sat Hitec Magazin und <http://www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/waerme/>



(© Kitware, Inc.)

ETVT 4

Folie 5

## Turbinenschaufeln, SGT5 8000H

Material:

- ⇒ Nahezu einkristalline Schaufeln, wenig Korngrenzen, daher bruchfest, auch bei Belastungen bis 10 000 g.
- ⇒ Zweilagige Schutzschicht, Haftschicht aus Rhenium (300 µm) und darüber eine wärmeisolierende Keramikschiicht, die sog. MCrAlY-Legierung aus Kobalt, Nickel, Chrom, Aluminium und Yttrium, Aluminiumoxid bildet sich und verhindert weitere Oxidation
- ⇒ Optimierte Luftkühlung

Gastemperatur: 1500 °C

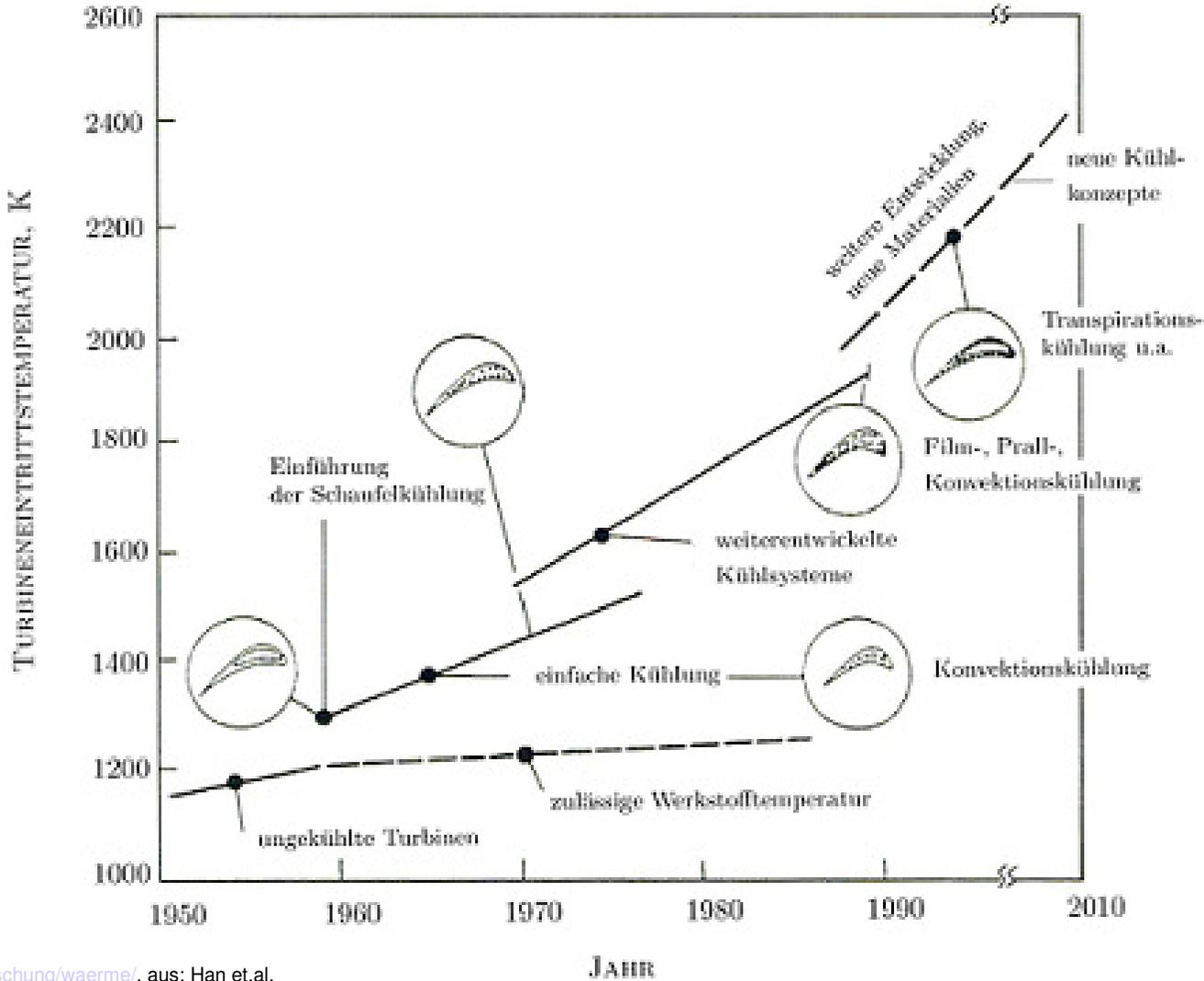
Oberflächentemperatur erste  
Schaufelreihe: 1200 °C

Temperatur Metall: 950 °C  
(Rotglut)

Quellen: Siemens Power Generation: <http://www.energy.siemens.com>



# Entwicklung der Gasturbinen seit 1950



Quelle: [www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/waerme/](http://www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/waerme/), aus: Han et.al.

## Zustandsänderungen idealer Gase

Für den Fall verschwindender Dichte gilt für alle Gase die thermische Zustandsgleichung:

$$\lim_{V \rightarrow \infty} (p \cdot V) = (p \cdot V)^{\text{id}} = n \cdot R \cdot T \quad ,$$

mit  $R$  als der allgemeinen Gaskonstanten in der Einheit Energie pro Substanz und Temperatur.

Es gilt:

$$R = 8,315 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Die Gleichung kann auch geschrieben werden als:

$$\left( p \cdot \frac{V}{n} \right)^{\text{id}} = (p \cdot v)^{\text{id}} = R \cdot T \quad ,$$

wobei  $v$  das molare Volumen ist. Führt man die Molmasse  $M = m/n$  ein, so gilt:

$$\left( p \cdot \frac{V}{m} \right)^{\text{id}} = (p \cdot v)^{\text{id}} = \frac{n}{m} \cdot R \cdot T = \frac{R}{M} \cdot T \quad (v = \text{spezifisches Volumen})$$

Diese Beziehung gilt für fast alle Gase und Gasgemische bei normalem Atmosphärendruck bei ausreichendem Abstand zur Taulinie. Bei sehr niedrigen Drücken gilt sie sogar auch für Dampf.

# Thermodynamische Grundlagen

Ideal reversibler Gasturbinenprozess (Joule-Prozess):

⇒ Isobare Wärmezufuhr in der Brennkammer und –abfuhr an die Umgebung

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad \text{oder} \quad Q = C_p \Delta T$$

⇒ Adiabate (isentropen) Kompression von Luft im Verdichter und Expansion der Rauchgase in einer Turbine

$$dq = 0 \rightarrow dU = -pdV = C_v dT \quad \text{oder}$$

$$dU = \dot{m} c_v \Delta T$$

$dT = \frac{pdV + Vdp}{R} = \frac{1}{C_p - C_v} (pdV + Vdp)$ $\frac{dp}{p} = -\frac{dV}{V} \frac{C_p}{C_v} \quad \text{und} \quad \text{mit} \quad \frac{C_p}{C_v} = \kappa$ $\ln p = -\kappa \ln V \quad \text{und} \quad \boxed{PV^\kappa = const}$	<p><i>ideales Gas :</i></p> $dQ = dU + pdV$ $dQ = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v dT + pdV = C_v dT + pdV$ $\left( \frac{dQ}{dT} \right)_p = C_v + p \left( \frac{dV}{dT} \right)_p \quad \text{mit } p = const \text{ wird } dQ = dH$ $\boxed{C_p - C_v = R}$
---	--

## Thermodynamische Grundlagen

Zusammenhang zwischen Temperatur und Druck bei adiabater Kompression:

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa \quad \text{oder} \quad \left( \frac{p_1}{p_2} \right) = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^\kappa$$

$$\text{ideale Gase: } \frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{oder} \quad \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\left( \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \right)^\kappa = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\frac{T_2^\kappa}{T_1^\kappa} = \frac{p_1}{p_1^\kappa} \frac{p_2^\kappa}{p_2} = \frac{p_2^{\kappa-1}}{p_1^{\kappa-1}}$$

$$\boxed{\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{p_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = \frac{T_3}{T_4}} \quad \text{für alle Temperaturpaare auf den Isobaren}$$

Isentrope Zustandsänderungen werden oft bei sogenannten idealisierten Vergleichsprozessen zugrunde gelegt. Für ideale Gase lassen sich einfache Beziehungen finden, die häufig auch verwendet werden. Der Isentropenexponent  $\kappa$  ist definiert als:

$$\kappa^{\text{id}} = \left[ -\frac{v}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_{s,n} \right]^{\text{id}} = \frac{c_p^{\text{id}}}{c_p^{\text{id}} - R} = \frac{c_p^{\text{id}}}{c_v^{\text{id}}}$$

Die Wärmekapazitäten idealer Gase sind zwar i.A. temperaturabhängig, ihr Quotient  $\kappa$  jedoch nur so schwach, so dass der Isentropenexponent als konstant angesehen werden kann.

Bei isentroper Zustandsänderung und konstanten Molzahlen gilt also:

$$-\kappa \cdot \frac{dV}{V} = \frac{dp}{p} \quad (s = \text{const}; n_j = \text{const})$$

Integriert man die Definitionsgleichung des Isentropenexponenten erhält man für isentrope Zustandsänderungen idealer Gase

$$-\kappa^{\text{id}} \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{bzw.} \quad \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{-1}{\kappa^{\text{id}}}} \quad \text{und} \quad p_1 \cdot v_1^{\kappa^{\text{id}}} = p_2 \cdot v_2^{\kappa^{\text{id}}}$$

Mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase folgt dann schließlich die Beziehung

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa^{\text{id}}}} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa^{\text{id}}-1}{\kappa^{\text{id}}}}$$

Dies ist eine wichtige Verknüpfung zwischen den **Prozesstemperaturen** und den **Prozessdrücken**.

Wenn man näherungsweise annehmen darf, dass die Werte für die spezifische Wärmekapazität von Luft und Rauchgas im gesamten Temperaturbereich konstant und gleich sind, dann kann man mit Hilfe von

$$dh = c_p dT$$

relativ einfach die Enthalpieänderungen bei den jeweiligen Zustandsänderungen berechnen. Für die Arbeitsprozesse, Kompression im Verdichter und die Entspannung in der Turbine, gilt dann

$$w_{t, \text{Verdichter}} = c_p (T_{\text{Verdichter, aus}} - T_{\text{Verdichter, ein}})$$
$$w_{t, \text{Turbine}} = c_p (T_{\text{Turbine, ein}} - T_{\text{Turbine, aus}})$$

bzw. für die relevanten Strömungsprozesse der Wärmeaufnahme in der Brennkammer bzw. der Wärmeabgabe nach der Turbine (Abgabe der Rauchgase an die Umgebung)

$$q_{\text{Brennkammer}} = c_p (T_{\text{Brennkammer, aus}} - T_{\text{Brennkammer, ein}})$$
$$q_{\text{Wärmeabgabe}} = c_p (T_{\text{Turbine, aus}} - T_{\text{Umgebung}})$$

Gasturbinenprozesse können also näherungsweise mit den beschriebenen einfachen Mitteln, der Beziehung zwischen den Systemdrücken und den Systemtemperaturen sowie der Korrelation zwischen der Enthalpie und den Temperaturdifferenzen, bilanziert werden. Der oben beschriebene lineare Zusammenhang zwischen Enthalpie und Temperaturdifferenz führt desweiteren bei der Darstellung der Gasturbinenprozesse dazu, dass  $T,s$ -Diagramme und  $h,s$ -Diagramme qualitativ gleich aussehen, da sie sich lediglich durch den Proportionalitätsfaktor  $c_p$  unterscheiden.

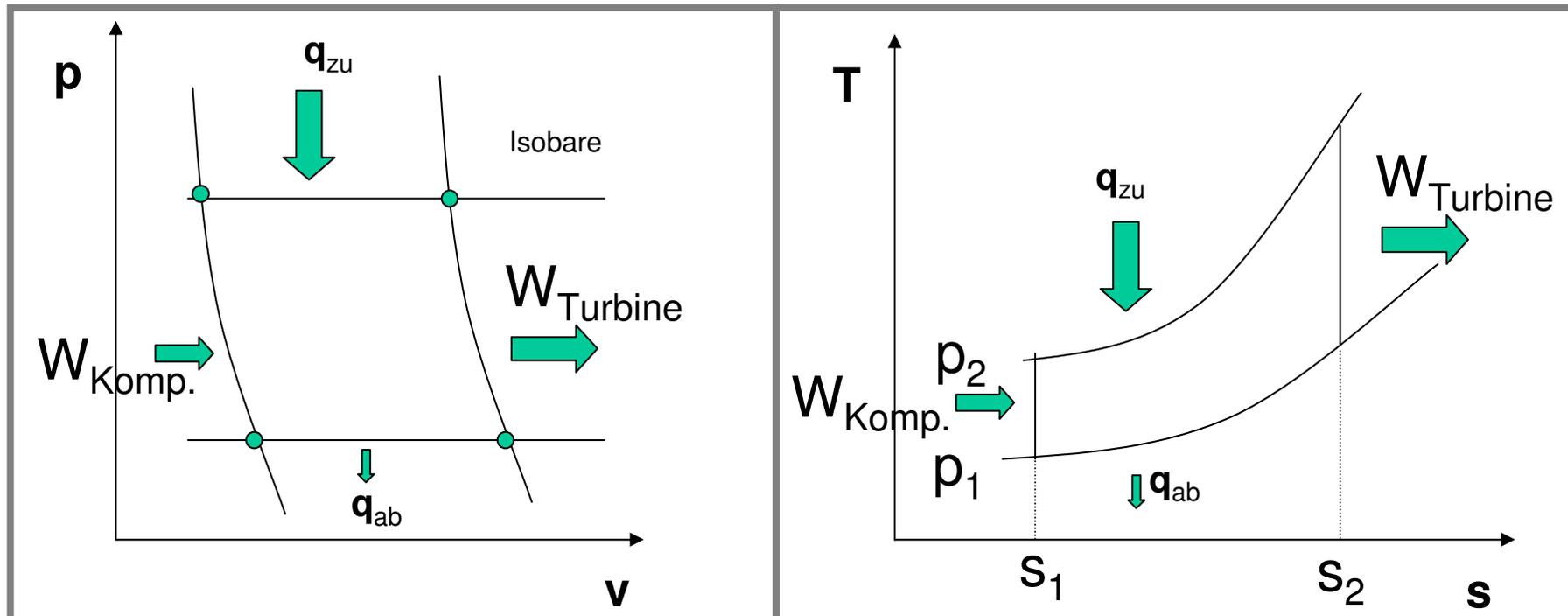
## Stoffdaten: Molwärmen $C_v$ und $C_p$ in J/K Mol für 298 und 600 K

Stoff	$C_v$ (298K)	$C_p$ (298 K)	$\kappa$ (298 K)
N <sub>2</sub>	20,81	29,12	1,399
O <sub>2</sub>	21,05	29,39	1,396
H <sub>2</sub> O	25,25	33,5	1,326
CO <sub>2</sub>	28,81	37,5	1,302
Stoff	$C_v$ (600K)	$C_p$ (600 K)	$\kappa$ (600 K)
N <sub>2</sub>	21,8	30,1	1,350
O <sub>2</sub>	23,78	32,1	1,381
H <sub>2</sub> O	27,98	36,3	1,211
CO <sub>2</sub>	39,00	47,3	1,213

## Joule-Prozess im p,v und im T,s-Diagramm

$$|W| = \oint V dp$$

$$|q| = \oint T ds$$

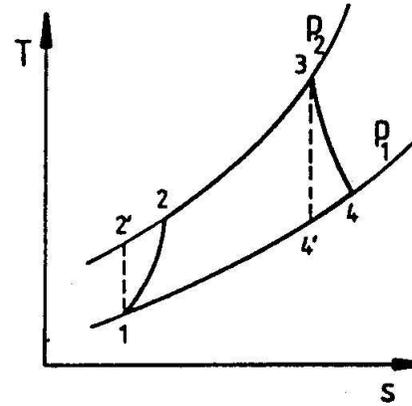
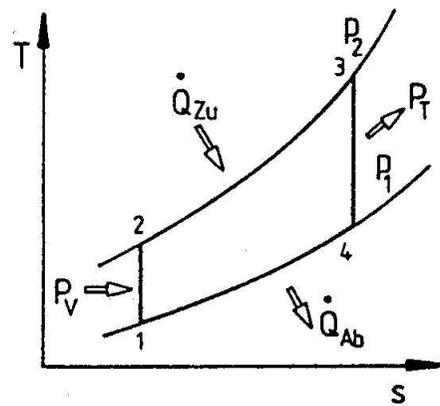
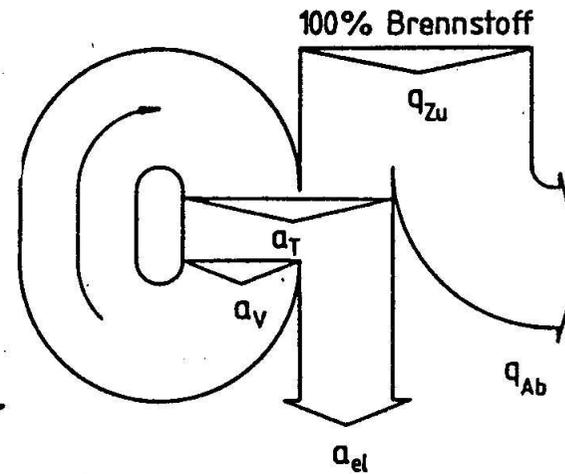
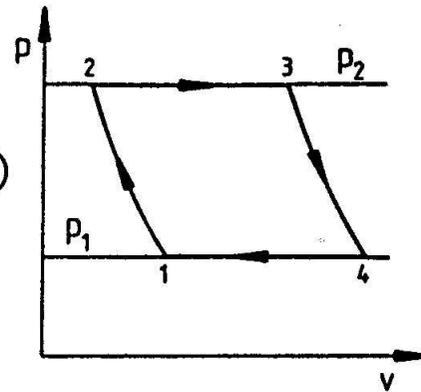
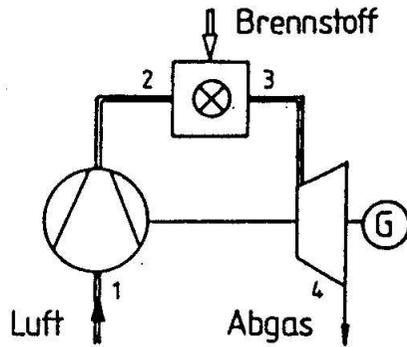


- 1 → 2 Isentrope Kompression (der Verbrennungsluft) unter Zufuhr von Arbeit
- 2 → 3 Isobare Expansion unter Wärmezufuhr
- 3 → 4 Isentrope Expansion unter Abgabe von Arbeit
- 4 → 1 Isobare Kompression unter Abfuhr von Wärme (i. d. R nicht in der Gasturbine)

ETVT 4

Folie 14

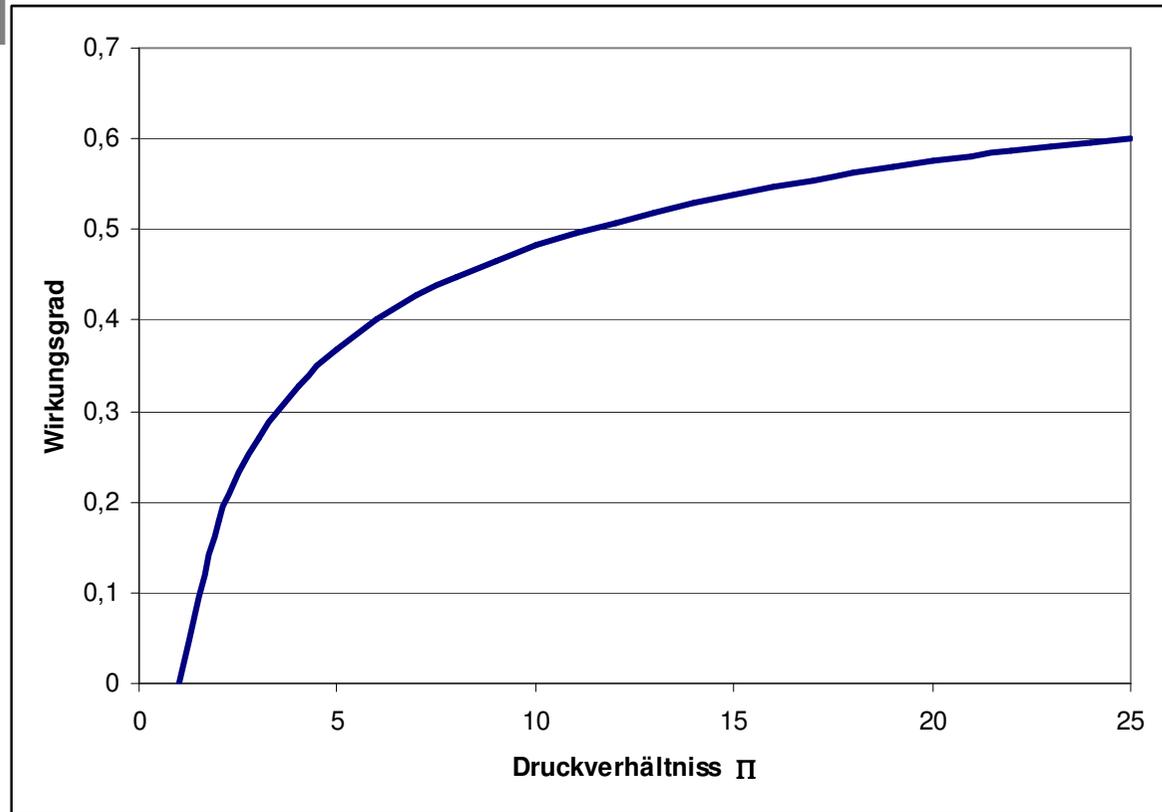
# Gasturbinenprozesse

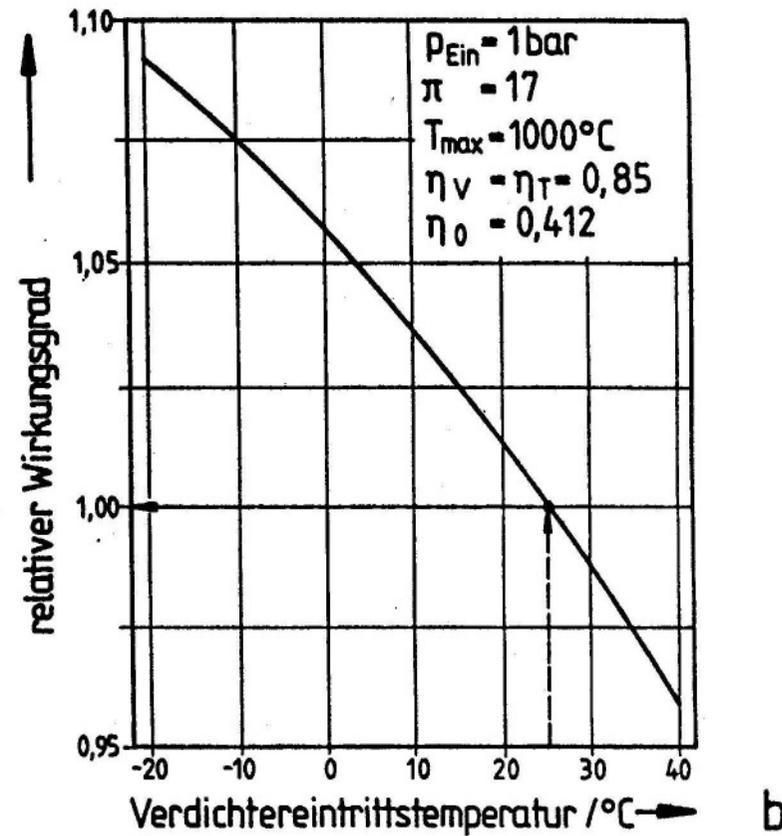
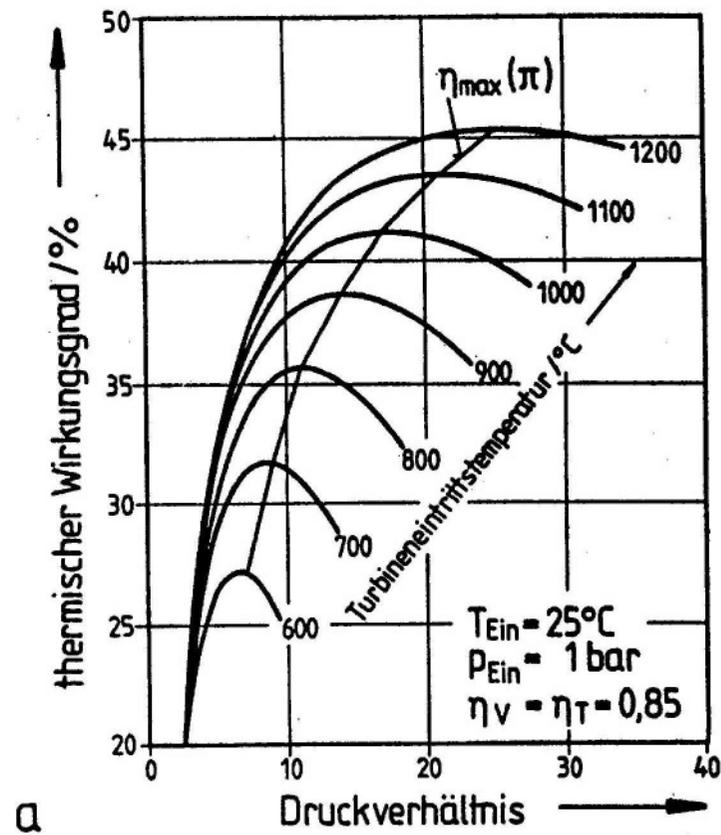


Benennung	Idealer Prozess	Realer Prozess
Isentroper Wirkungsgrad für Verdichter	$\eta_V = 1$	$\eta_V = \frac{T_{2'} - T_1}{T_2 - T_1}$
Isentroper Wirkungsgrad für Expansion	$\eta_T = 1$	$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4'}}$
Temperatur nach der Verdichtung	$T_{2'} = T_1 \cdot \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$	$T_2 = \frac{T_{2'}}{\eta_V} + T_1 \left(1 - \frac{1}{\eta_V}\right)$
Temperatur nach der Expansion	$T_{4'} = T_3 \cdot \pi^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}}$	$T_4 = T_{4'} \cdot \eta_T + T_3(1 - \eta_T)$
Verdichterarbeit	$P_{V'} = \dot{m}_L \cdot c_{pL} (T_{2'} - T_1)$ $= \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot T_1 (x - 1)$ , mit $x = \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$	$P_V = \frac{P_{V'}}{\eta_V}$
Turbinenarbeit $\alpha = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_L} \approx 0 : c_{pR} \approx c_{pL}$	$P_{T'} = (\dot{m}_L + \dot{m}_B) \cdot c_{pR} (T_3 - T_{4'})$ $= \dot{m}_L \cdot (1 + \alpha) \cdot c_{pL} (T_3 - T_{4'})$ $\approx \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot T_3 \left(1 - \frac{1}{x}\right)$	$P_T = \eta_T \cdot P_{T'}$
Zugeführte Wärme	$\dot{Q}_{zu'} = \dot{m}_L \cdot c_{pL} (T_3 - T_{2'}) = \dot{m}_B \cdot H_u'$	$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_L \cdot c_{pL} (T_3 - T_2) = \dot{m}_B \cdot H_u$
Thermischer Wirkungsgrad	$\eta' = \frac{P_{T'} - P_{V'}}{\dot{Q}_{zu'}} = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$	$\eta = \frac{P_T - P_V}{\dot{Q}_{zu}}$

# Wirkungsgrad des einfachen Gasturbinenprozesses

$$\eta' = \frac{P_T - P_V}{\dot{Q}_{zu'}} = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$





Abhängigkeit des thermischen Wirkungsgrades beim realen Gasturbinenprozess

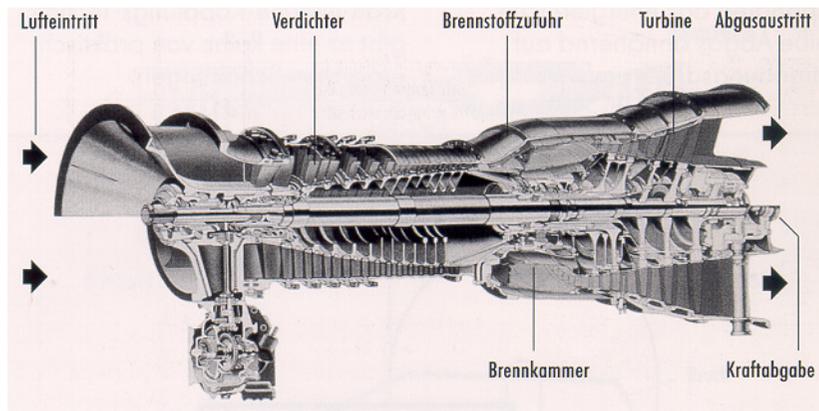
a: vom Druckverhältnis und von der Turbineneintrittstemperatur

b: von der Verdichtereintrittstemperatur

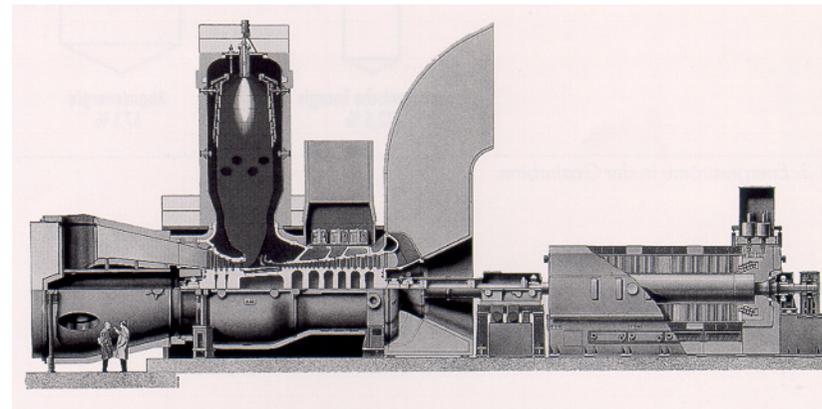
## Gasturbinenbauarten

Entsprechend den Anwendungsgebieten wurden unterschiedliche Gasturbinenbauarten entwickelt. Je nach Einsatzgebiet unterscheiden sich die Gasturbinenanlagen hinsichtlich Leistung, Größe und Anforderung.

Antrieb	Fahrzeuge	Flugzeuge	Generatoren Verdichter
Leistung [kW]	50 - 200	500 - 40.000	500 - 230.000
typische Anforderungen	kompakte Bauweise	geringes Gewicht	Dauerbelastung
Prozeß-optimierung	Wärmetauscher Abgas/Luft	hohes Druckverhältnis hohe Turbinenaustrittstemperatur	
gemeinsame Anforderungen	hoher Wirkungsgrad, niedrige Abgasemissionen		



Leichte und kompakte Bauart

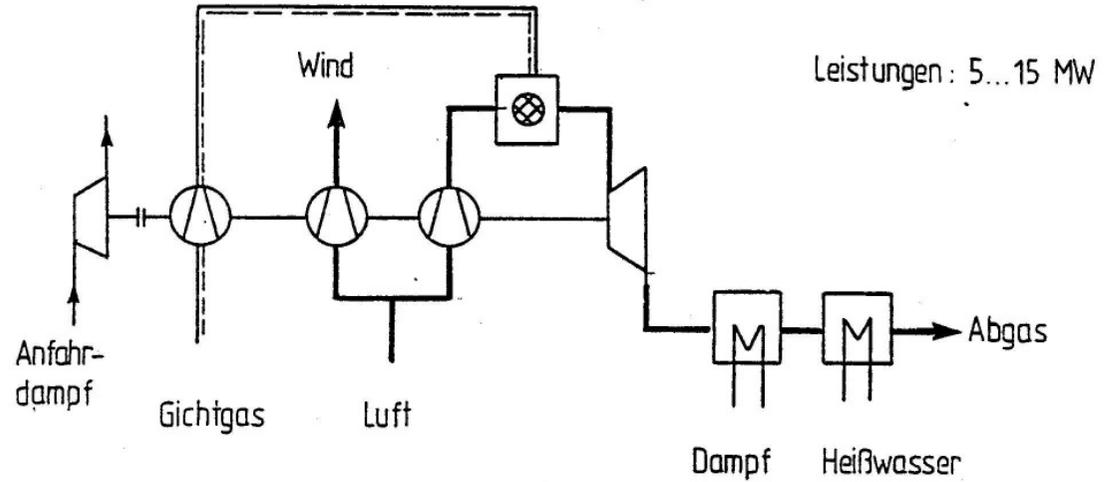


Schwerbauweise

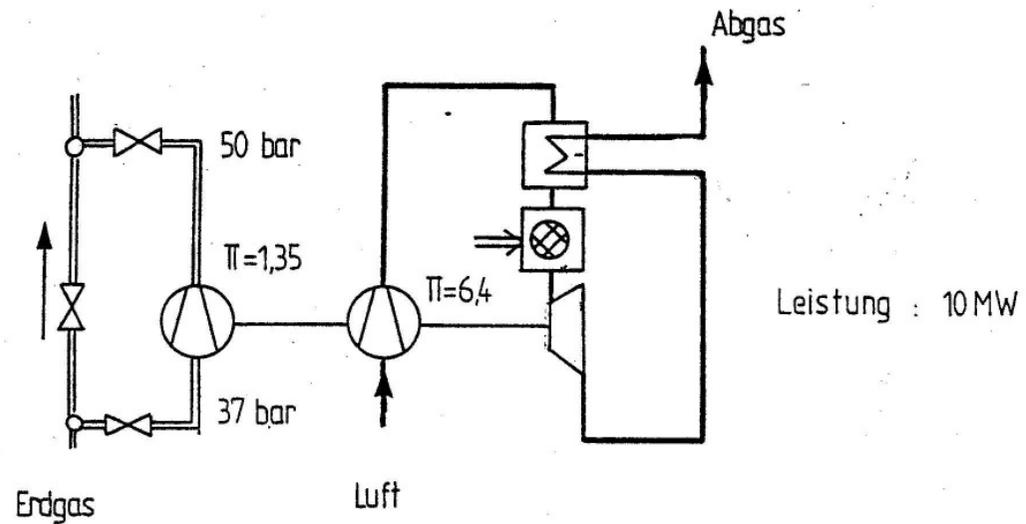


# Einsatzmöglichkeiten von Gasturbinen

Erzeugung von  
Hochofenwind

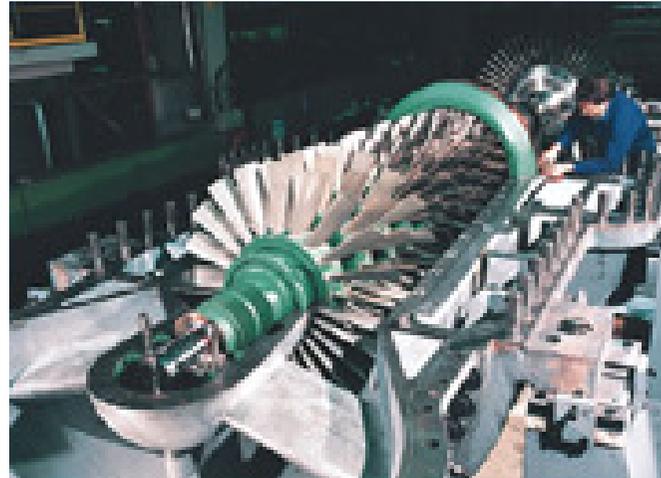


Erdgasverdichtung



# Einsatzmöglichkeiten von Gasturbinen

Erzeugung von  
Hochofenwind



MAN Turboverdichter, 70 000 – 1 400 000 m³/h, 20 bar

- Air separation plants
- Ammonia plants
- Blast furnace blower**
- Wind tunnels
- Coking plants
- Nitric acid plants
- Fluid Catalytic Cracking (FCC) plants
- Gas liquefaction plants

Erdgasverdichtung



Wingas, Haiming und Eisleben, Erdgasverdichterstationen

ETVT 4

Folie 22

# Anwendung Gasturbinen: Erdgasverdichterstationen



Anzahl der Verdichter: 4

Verdichterleistung: ca. 95 MW (3 x 25 MW, 1 x 20 MW)

max. zul. Betriebsdruck: 100 bar

Kapazität: 3,34 Mio. m<sup>3</sup>/h (im Normzustand)

Antriebsart: 3 Gasturbinen, 1 Dampfturbine

# Anwendungen Gasturbinen: Flugzeugturbinen

## PW4000Growth

Das PW4000Growth ist im Schubereich 84 600 bis 98 000 Pfund Schub angesiedelt und gehört damit zu den schubstärksten Triebwerken der Welt. Es treibt die Boeing 777-200/-300 an und war das erste Triebwerk mit 180-Minuten-ETOPS-Zulassung von Anfang an. Der Erstflug des Triebwerks fand im November 1993 statt, die Indienststellung folgte 1995.

Im Flugbetrieb befinden sich zwei Versionen der "Growth" - das PW4084 und das PW4090. Bei allen diesen Versionen ist die MTU für die Entwicklung der siebenstufigen Niederdruckturbine verantwortlich und produziert sie auch zum großen Teil.

**Technische Daten** Max. Schub 408 kN Luftdurchsatz 1248 kg/s Nebenstromverhältnis 6,3:1  
Druckverhältnis 38,6:1 Länge 4867 mm Fan-Durchmesser 2840 mm Gewicht 7069 kg

### Fakten:

- Zweiwellen-Zweistromtriebwerk
- Monokristallschaufeln HDT
- Pulvermetallscheiben für Verdichter und Turbinen
- Aktive Spaltkontrolle NDT
- Digitale Regelung
- Modulbauweise
- Zustandsabhängige Wartung



## Gasturbinen (Zusammenfassung)

- Antriebsmaschinen für **Generatoren** in Kraftwerken für alle Betriebsbereiche und Klimazonen (praktische Bedeutung haben nur die offenen Gasturbinen)
- Offene Gasturbine mit der **höchsten Leistungskonzentration** aller Wärmekraftmaschinen nach Flächenbedarf und Bauvolumen (Anlagenkosten nur 50 - 65 % der Kosten von Dampfturbinen)
- Gasturbinen werden als **Typ entwickelt** (nicht für den jeweiligen Anwendungsfall wie DT-Turbinen), thermodynamische Daten, Abmessungen und Konstruktion liegen fest, nur Anpassung an Brennstoffe nötig, Fertigung auf Vorrat möglich, daher auch kurze Lieferzeiten möglich (6 - 12 Monate)
- **Industriegasturbinen** in Schwerbauweise (meist von Herstellern von Dampfturbinen), als Generatorantrieb überwiegend einwellig und als Einfachprozess mit  $\Pi = 10 - 16$  (gerade noch erreichbar mit einstufiger Verdichtung), 10 - 15 % unter dem Wirkungsgradmaximum
- **Flugzeugtriebwerke** in Leichtbauweise (als Turbogasgenerator) mit nachgeschalteter Turbine (in der Regel Hersteller von Flugzeugtriebwerken), allerdings werden fast alle Teile auf unbeschränkte Lebensdauer ausgelegt (im Gegensatz zum Einsatz als Flugzeugtriebwerk) außer bei Verschleißteilen (z.B. wird bei Turbinenschaufeln eine Vollaststundenzahl von  $> 50.000$  h angenommen), Wartung und Inspektion möglichst vor Ort, oft auch in Spezialwerkstätten, hohe Verfügbarkeit, hoher Wirkungsgrad, geringe Masse, relativ kleine Abmessungen,  $\Pi = 18 - 30$ , Verdichtung häufig in 2 Stufen, komplizierter Aufbau
- Erreichbare **Leistung** einwelliger Gasturbinen ca. 282 MW (685 kg/s) von GE (Modell MS 9001G), Turbogasgeneratoren erreichen 40 - 45 MW (stärkste Flugtriebwerke)
- **Wirkungsgrade**: Industriegasturbine 32 - 36 %, Fluggasturbine 36 - 41 %, Kombi-Anlagen mit Abhitzedampferzeuger 45 - 58 %

## Gasturbinen (Zusammenfassung)

- Spitzenlastgeeignet,  $P_{max}$  nach 3 - 8 min, einfache Bedienung, fernsteuerbar, wenig Personal
- Im Normalbetrieb kein Wasserverbrauch (Kühlwasser), nur Lagerverluste von etwa 0,5 - 4 % (je nach Typ und Getriebe) über Schmierölkühler abzuführen, Standort unabhängig
- Flüssige und gasförmige **Brennstoffe**, Kohle und Koks in der Entwicklung, destillierte Brennstoffe ohne Zusatzeinrichtung einsetzbar, Filterung dennoch empfehlenswert, aschebildende Brennstoffe wie Rohöl und Heizöl erfordern periodisches Abreinigen, mehr Wartungsaufwand, hoher Verschleiß, geringere Verfügbarkeit, daher häufigster Brennstoff Erdgas
- Ansaug- und Abgasleitungen sind größer als der Turbosatz und bestimmen im Wesentlichen die Abmessungen und das Aussehen einer **Gasturbinenanlage**, meist wird die Luftansaugleitung zur Staubminderung hochgelegt, dadurch radiale Zuströmung, Abgasleitung oft axial zum Kamin oder zum Abgaswärmetauscher, alternativ steht der Kamin auch neben der Anlage (Gasumlenkung erforderlich, mit hoher Geschwindigkeit und hohen Druck- und somit auch Leistungsverlusten)
- **Gasturbinenbrenner** haben den gleichen prinzipiellen Aufbau wie Brenner von Dampferzeugern, jedoch dient das Arbeitsmedium auch als Brennluft, dadurch wirken sich alle Vorgänge bei der Verbrennung auch auf die nachfolgende Turbine aus
- Kompakte Flammen, intensive Mischung erforderlich mit hoher Geschwindigkeit, enge Fertigungstoleranzen, derzeit noch kein Abschalten einzelner Brenner wegen Temperaturstrahlenbildung üblich, daher Brennermodulation in weitem Bereich notwendig (Spitzenlast, Leerlauf)

## Gasturbinen (Zusammenfassung)

- **Schadstoffarme Brenner** emittieren wenig  $\text{NO}_x$ , Ruß, CO und KW's, insbesondere für  $\text{NO}_x$  verschärfen sich die Anforderungen (Dynamisierungsklausel), Stickoxidbildung steigt mit der Flammentemperatur, dem Druck und der Verweilzeit bei hohen Temperaturen
- Absenkung der **Stickoxidemissionen** durch **nasse Verfahren** (Vormischung des Brennstoffs mit Wasser oder Wasserdampf, relativ geringer Entwicklungsaufwand, ein übliches Verfahren (wenn überhaupt erforderlich), bei flüssigen Brennstoffen ausschließliche Vorgehensweise, Umrüstung laufender Anlagen einfach, allerdings aufbereitetes Wasser mit geringem Salzgehalt notwendig, hoher Wasserverbrauch von ca. 25 m<sup>3</sup>/h bei 100 MW, Anlagenwirkungsgrad sinkt um 5 % außer bei Dampferzeugung mit Abhitze, Absenkung der Lebensdauer durch Druckschwingungen) oder **trockene Verfahren** (hoher Luftüberschuss, Luft und Brennstoff zum Teil oder ganz vorgemischt, Entwicklung von Vormischbrennern und Vormischbrennkammern, über die kurze Verweilzeit wirkt eine zweistufige Verbrennung stickoxidmindernd), also ohne großen apparativen oder logistischen Aufwand einsetzbar oder mit **SCR** (selective catalytic reduction) mit Ammoniakzudosierung (Probleme: Entsorgung der Katalysatoren mit Schwermetallen und die Handhabung des Ammoniaks)
- **Gasturbinenkraftwerke** bestehen aus einer oder mehreren Gasturbinen, Brennstofflager und Netzanschluss, Hilfseinrichtungen, zentrale Warte zur Steuerung und Regelung, Gebäude zum Schutz vor Witterung und zum Schutz der Umgebung vor Lärm
- **Leichte Bauweise** der Gebäude aus demontierbaren, schalldämmenden Blechen, Krananlage oft außen (outdoor-package), **schwere Bauweise** bei schwierigen Klimaverhältnissen, in Wohngebieten, bei Grundlastbetrieb und möglichst kurzen Stillstandszeiten

## Gasturbinen (Zusammenfassung)

- **Zuluftfilter** zur Vermeidung von Erosion, Materialabtrag durch abrasive Wirkung von Partikeln  $> 3 \mu\text{m}$  (Aerodynamik, Schadensvermeidung durch Tiefenfilter und Oberflächenfilter) und Fouling (d.h. Belagbildung durch Partikel von  $2 - 5 \mu\text{m}$ , Geometrieänderung der Schaufeln, Strömungsabriss bei Verdichtern nahe der Pumpgrenze möglich), Korrosion durch luftgetragene Salze wie z.B. Ammoniumverbindungen, interkristalline Korrosion und Spannungsrisskorrosion (Nasskorrosion), Beschichtung der Schaufeln als Gegenmaßnahme, Kühlluftkanäle können durch Partikel zugesetzt werden
- Anti-Icing-Systeme
- Ansaugschalldämpfer, Absenkung der Zulufttemperatur durch Verdunstungskühler (Wirkungsgrad)
- Abgasdiffusor (Absenkung der Gasgeschwindigkeit), Abgasschalldämpfer

### Hilfsaggregate

- Brennstoffpumpe (flüssige Brennstoffe), Brenngasverdichter (2 -3 % der elektrische Leistung), Ölpumpe, Anlasser (hydraulisch, elektrisch oder pneumatisch)
- Schaufelverstelleinrichtung des Verdichters
- Verdichterwaschanlage, Ölnebelabscheider
- Regelventile, Flammenwächter, Temperaturfühler, Schwingungswächter

## **Gasturbinen** (Zusammenfassung)

### **Werkstoffe**

- Beanspruchung durch hohe Temperaturen, Biege- und Temperaturwechsel
- geforderte Werkstoffeigenschaften (Zeitstandfestigkeit, Zähigkeit, Ermüdungsverhalten)
- HT-Legierungen auf Chrom- (gegen Korrosion) und Nickelbasis (für höhere Beanspruchung)
- Entwicklung keramischer Werkstoffe (hohe Temperaturen) derzeit im Gange

### **Betrieb**

- Regelung durch Brennstoffmassenstrom (Temperatur und Energieinhalt des heißen Gases vor der Turbine sinken, Veränderung des Druckes und des Durchflussverhaltens führt zur Wirkungsgradabsenkung) und Leitschaufelverstellung des Verdichters (Zudrehen reduziert Luftdurchsatz und wirkt auf das Kennfeld des mit konstanter Drehzahl laufenden Verdichters, Teillastverhalten)
- Wichtige Einflussgröße ist der Umgebungszustand, z.T. Leistungsbegrenzer für Winterbetrieb erforderlich