

Technologie Portrait  
Kraft-Wärme-Kopplung

Cogeneration (CHP)  
a Technology Portrait

Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics  
Graz University of Technology

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**34/2010**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Technologie Portrait  
Kraft-Wärme-Kopplung

Cogeneration (CHP)  
a Technology Portrait

Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics  
Graz University of Technology

Wien, Mai 2002

Dieses Projekt wurde für Energytech.at unter Koordination der Energieverwertungsagentur (E.V.A) im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.



## Vorbemerkung

Das vorliegende Technologieportrait wurde im Rahmen von [www.energytech.at](http://www.energytech.at) – eine Internetplattform für innovative Energietechnologien in den Bereichen Erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz publiziert.

Die Technologieportraits wurden in den Jahren 2000 bis 2002 für die Bereiche feste Biomasse, Biogas, Photovoltaik, Solarthermie, Kraft-Wärme-Kopplung und Energieeffiziente Gebäude erstellt. Der vorliegende Bericht umfasst eines von sechs Technologieportraits in deutscher bzw. englischer Sprache. Die Technologieportraits beinhalten u.a. allgemeine Grundlagen, eine Beschreibung der unterschiedlichen Technologien, Komponenten und Systeme, Planungsgrundlagen, eine Darstellung des Status der Forschungs- und Technologieentwicklung und der Marktentwicklungen.

Um die Technologieportraits weiterhin einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden sie in die Publikationsreihe aufgenommen und auf der Homepage [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at) veröffentlicht.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung

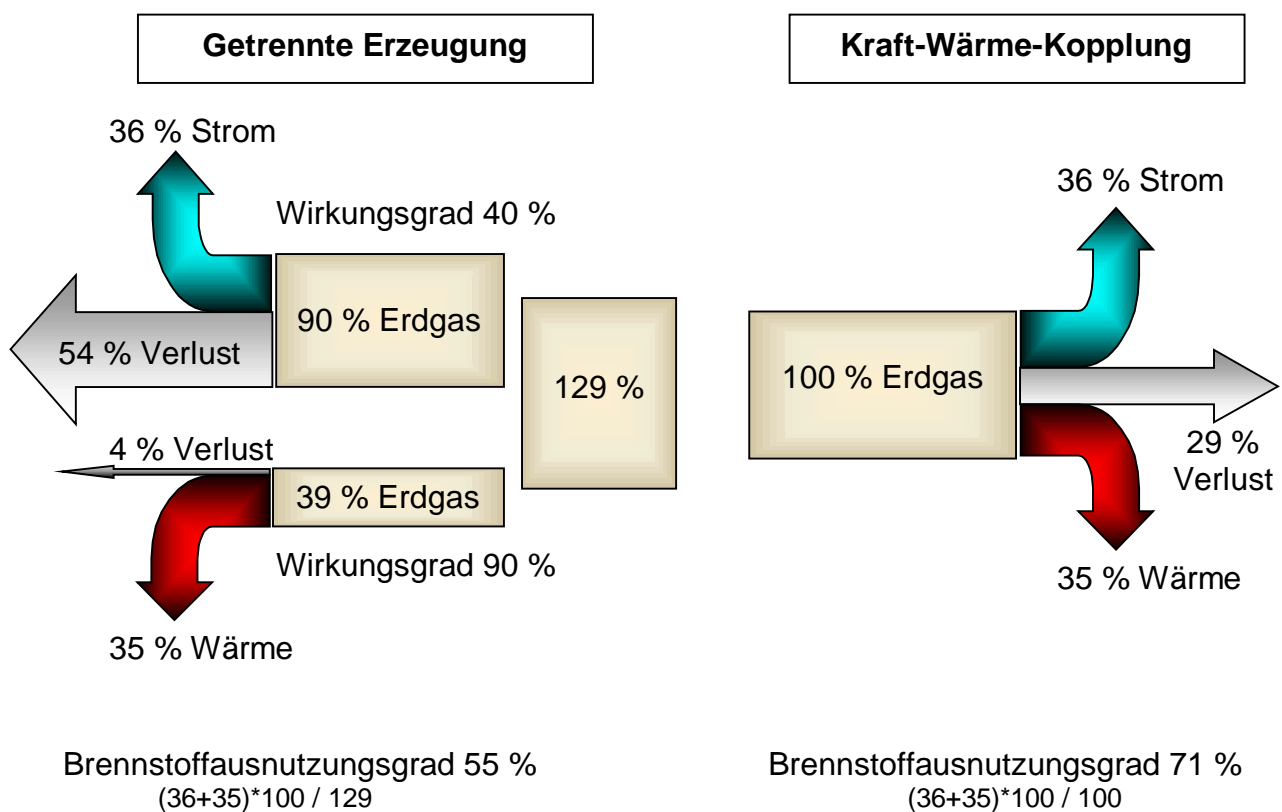
## Inhaltsverzeichnis

1. Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
2. Konzepte der KWK
  - 2.1 Dampfturbinenprozess
  - 2.2 Gasturbinenprozess
  - 2.3 Gas- und Dampfturbinenprozess (GuD)
  - 2.4 Diesel- oder Gasmotor als Blockheizkraftwerk (BHKW)
  - 2.5 Alternative Prozesse
  - 2.6 Innovative Prozesse
3. Welcher Brennstoff kann für welchen Prozess verwendet werden?
4. Wirtschaftliche Gesichtspunkte
5. Literatur

# 1 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

KWK-Anlagen versorgen den Verbraucher mit den beiden wichtigsten Energiearten, Strom und Wärme. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme wird hierbei sinnvoll zur Bereitstellung von z.B. Heizwasser, Dampf oder Trocknungswärme verwendet. Durch die Nutzung dieser Abwärme werden die Verluste geringer gehalten und somit der Verbrauch an Primärenergie vermindert. Die folgende Abbildung soll nun diesen Zusammenhang am Beispiel einer Gas- und Dampfturbinenanlage noch einmal verdeutlichen.

Abbildung 1: Einsparpotential der KWK am Beispiel der Gas- und Dampfturbinenanlage in der Papierfabrik SCA-Laakirchen (Quelle OKA)





Anmerkungen zu Abbildung 1:

Ausgangspunkt ist ein Vergleich des Brennstoffaufwandes für die Strom- und Wärmeerzeugung mit und ohne Kraft-Wärme-Kopplung.

Bei der Ausführung z.B. als Gas- und Dampfturbinenprozess (GuD-Prozess) mit Abwärmenutzung ist bei gleicher Wärme- und Stromproduktion der Primärenergieaufwand deutlich geringer ist als bei der getrennten Produktion von Strom und Wärme. In dem gezeigten Beispiel beträgt der Brennstoffausnutzungsgrad bei der KWK-Anlage 71 %, während er bei getrennter Produktion nur bei 55 % liegt. Dies bedeutet eine nachhaltigere Verwendung der Primärenergie und somit eine Reduktion der Schadstoffe, die in die Umwelt gelangen.

Auslegungsvarianten

Grundsätzlich können KWK-Anlagen nach folgenden Punkten ausgelegt werden

- Wärmeorientierte Auslegung und Fahrweise
- Stromorientierte Auslegung und Fahrweise
- Kostenorientierte Auslegung und Fahrweise

**Wärmeorientierte Auslegung und Fahrweise:**

Beim wärmegeführten Einsatz einer KWK-Anlage wird der benötigte Wärmebedarf ermittelt und die gesamte Anlage auf diesen ausgerichtet. Erzeugte Stromüberschüsse werden in das öffentliche Netz eingespeist.

**Stromorientierte Auslegung und Fahrweise:**

Beim stromgeführten Einsatz einer KWK-Anlage wird primär auf den benötigten Strombedarf geachtet, die ebenfalls genutzte Wärme variiert in Abhängigkeit von der Stromerzeugung.

**Kostenorientierte Auslegung und Fahrweise:**

Die geringsten Betriebskosten einer KWK-Anlage werden durch die kostengeführte Auslegung und Betriebsweise erreicht. Die Jahresgesamtkosten (Investitionskosten und Betriebskosten) für verschiedene Auslegungsvarianten werden ermittelt, die Variante mit den geringsten Gesamtkosten wird realisiert. Mögliche Überschüsse bzw. Minderproduktionen an Strom und Wärme können über das öffentliche Strom- bzw. Wärmenetz, falls vorhanden, erfolgen.

Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die Anlage im Volllastbereich betrieben wird. Daher werden die meisten Anlagen zur Deckung der Grundlast dimensioniert.

Anfallenden Spitzenlasten hinsichtlich des Wärmebedarfes werden meist durch einen Spitzenkessel, der die nötige Wärme bereitstellt, gedeckt. Sie können aber auch durch den Anschluss an das öffentliche Netz gedeckt werden.

Anfallende Spitzenlasten hinsichtlich des Strombedarfes können dann z.B. durch das öffentliche Stromnetz gedeckt werden.

Die dadurch zusätzlich entstehenden Kosten müssen bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden. (4 Wirtschaftliche Gesichtspunkte:)

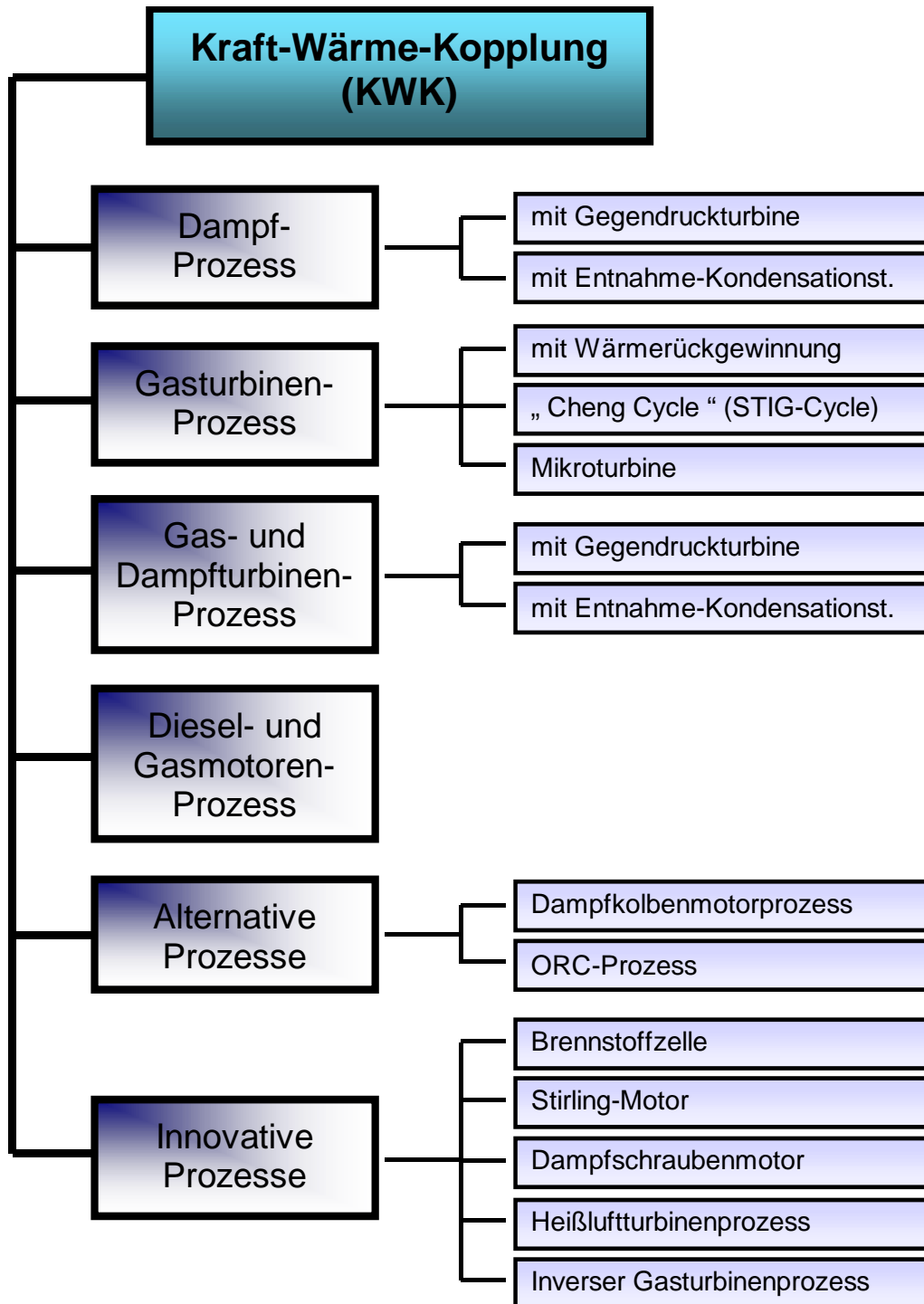
Eine andere Möglichkeit besteht darin die Anlage für die reine Spitzenlastabdeckung zu verwenden. Da vor allem die Spitzenlast sehr teuer ist, bietet diese Möglichkeit eine Alternative zu den bisher besprochenen Auslegungen bzw. Fahrweisen.

Durch die Primärenergieeinsparung aber auch durch andere Gesichtspunkte, die noch später detaillierter behandelt werden, sind KWK-Anlagen für Strom- und Wärmeerzeugungsunternehmen (größere Leistungen) von großer Bedeutung, sie bieten aber auch attraktive Alternativen für die Bereitstellung geringerer Leistungen von Strom und Wärme, wie sie in Industriebetrieben, Wäschereien, Wohnsiedlungen, usw. benötigt werden. In dieser Zusammenstellung soll vor allem die dezentrale Anwendung der KWK beschrieben und nicht näher auf die speziellen Bedürfnisse der öffentlichen Energieversorgungsunternehmen eingegangen werden.

## 2 Verschiedene Konzepte von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Es gibt eine Reihe von Konzepten, die es ermöglichen einen Prozess auf Basis einer Kraft-Wärme-Kopplung durchzuführen.

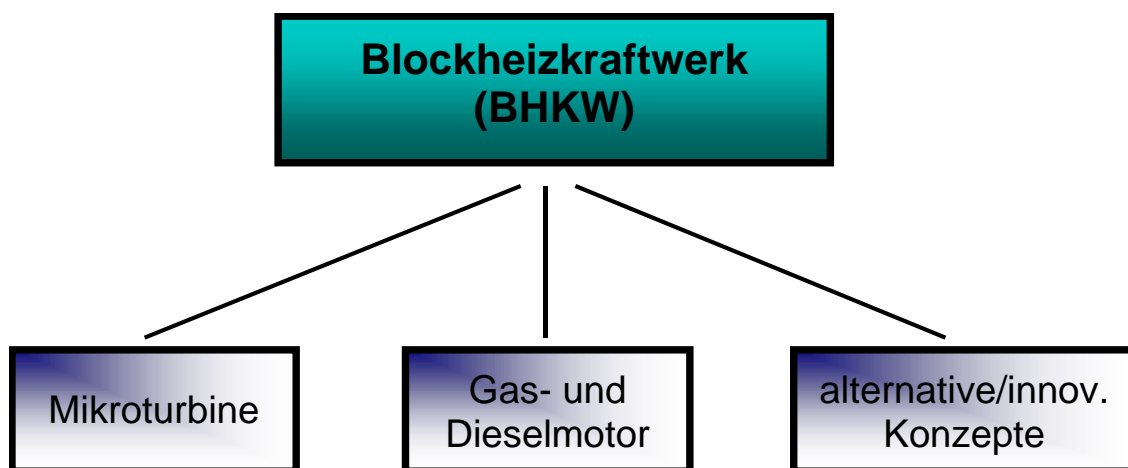
Die wichtigsten Arten von Anlagen sind in Abbildung 2 zusammengefasst.



**Abbildung 2: KWK-Konzepte**

Der Mikroturbinenprozess, die Brennstoffzelle, sowie auch der Gas- und Dieselmotorprozess sind typische Vertreter dezentraler Anlagen, die als Blockheizkraftwerk (BHKW) ausgeführt werden können.

Als BHKW wird eine Anlage für Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet, die als „Block“ fertig montiert, geliefert und betrieben wird.

Ausführungsvarianten für ein BHKW**Abbildung 3: BHKW - Prozesse**

## 2.1 KWK mit Dampfturbinenprozess

### Grundprinzip

- Umwandlung von mechanischer Energie (Turbine) in elektrische Energie durch den Generator.
- Verwendung der Wärmeenergie des Turbinenaustrittsdampfes zur Bereitstellung von Wärme.

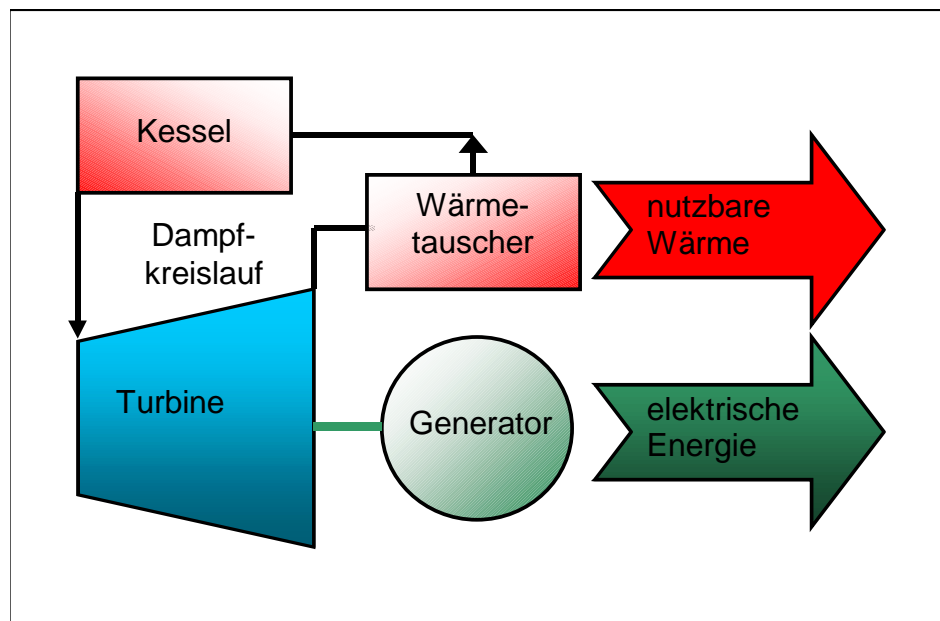


Abbildung 4: Prinzip der KWK mit Dampfturbinenprozess

Grundlage für diese Art der KWK ist der Dampfturbinenprozess, welcher im folgenden näher beschrieben werden soll.

### Dampfturbinenprozess

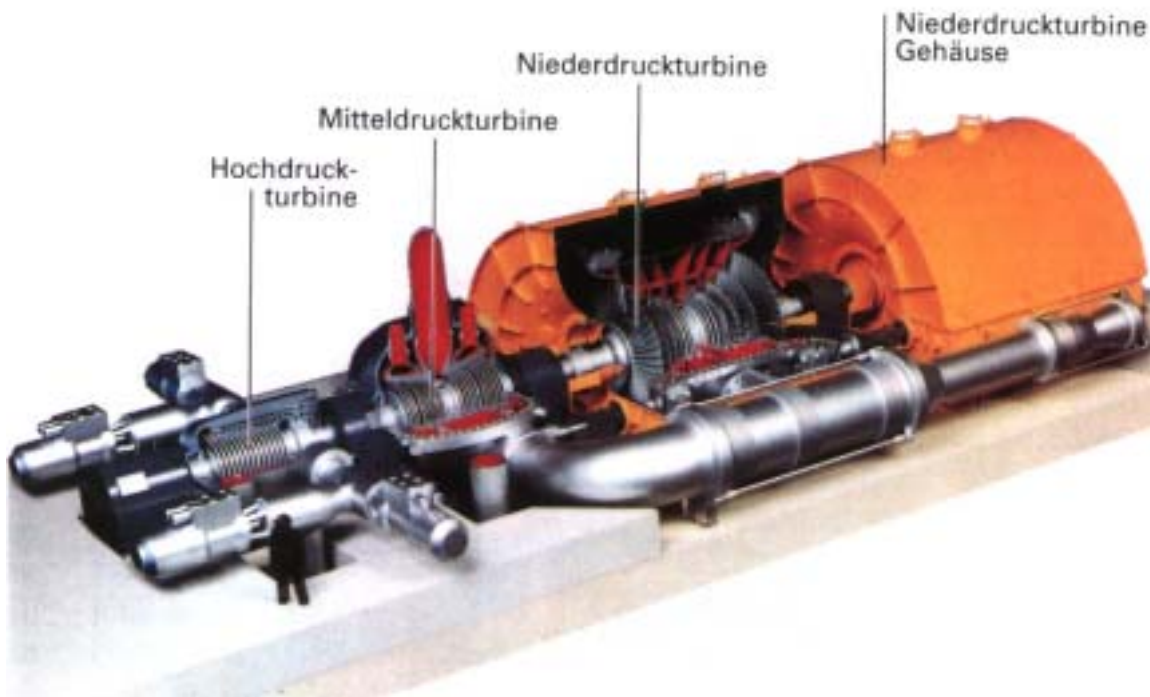
Die Hauptkomponenten eines Dampfturbinenprozesses sind: Kessel mit Überhitzer, Turbine, Kondensator und Speisewasserpumpe.

Wasser wird im Kessel verdampft und anschließend im Überhitzer auf die gewünschte Temperatur gebracht. Dieser Frischdampf strömt dann durch die Turbine, welche den Generator zur Stromerzeugung antreibt. Der aus der Turbine austretende Dampf kondensiert im Kondensator und wird durch die Speisewasserpumpe auf den Prozessdruck gebracht und dem Kessel zugeführt, wodurch der Kreislauf geschlossen ist.

Als Kühlmedium im Kondensator wird meistens Flusswasser oder Umgebungsluft verwendet, wodurch die freiwerdende Kondensationswärme ungenützt bleibt.

Zur Nutzung dieser Abwärme gibt es eine Reihe von verschiedenen Schaltungen, die es ermöglichen die anfallende Wärme zu nutzen. Entscheidend ist jedoch, dass für die Wärmenutzung ein höheres Druck- bzw. Temperaturniveau des Abdampfes notwendig ist.

Abbildung 5 stellt einen Schnitt durch eine Dampfturbine sehr großer Leistung dar, bestehend aus Hochdruck-, Mitteldruck- und einem Niederdruckteil. Bei einer Maschine dieser Art wird etwa 70 % des Frischdampfes aus den Niederdruckstufen in den Kondensator geleitet, 30 % werden zur Vorwärmung des Speisewassers genützt und somit dem Dampfkreislauf zurückgeführt.



**Abbildung 5: Schnitt durch eine Dampfturbine (Quelle: Siemens)**

Abbildung 6 zeigt den Rotor einer Dampfturbine mit einer Leistung von 8 MW<sub>el</sub>.



**Abbildung 6: Rotor einer Dampfturbine mit 8 MW<sub>el</sub> (Quelle: Peter Brotherhood Ltd)**

In Abbildung 7 ist eine Anlage mit Kondensationsdampfturbine dargestellt. Die Anlage hat eine elektrische Leistung von ca. 10MW.

**Abbildung 7: Kondensationsdampfturbine mit 10 MW<sub>el</sub> (Quelle: Peter Brotherhood Ltd)**

Bei KWK-Anlagen basierend auf dem Dampfturbinenprozess werden zwei grundlegende Typen unterschieden:

- Dampfprozess mit einer Gegendruckturbine
- Dampfprozess mit Entnahme-Kondensationsturbine

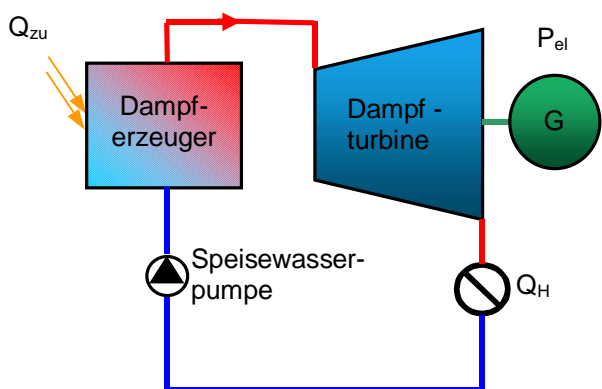
Für geringe Wärmeleistungen wird Dampf aus einer Anzapfung der Dampfturbine entnommen, die technische Ausführung ist daher einfacher als bei der Entnahme-Kondensationsturbine. Druck und Temperatur in der Anzapfung können aber nur bei Vollastbetrieb eingehalten werden.

## 2.1.1 KWK mit Dampfprozess und Gegendruckturbine

### Funktionsweise

Der im Kessel erzeugte Heißdampf wird in einer Turbine bis auf den Gegendruck, der sich durch die gewünschte Temperatur der Prozesswärme ergibt, entspannt (Gegendruckturbine) und verrichtet dabei mechanische Arbeit am Generator. Der Generator wandelt die mechanische Energie in elektrische Energie um. Im Anschluss an die Turbine befinden sich Wärmetauscher, über welche die noch vorhandene Wärmemenge des Dampfes durch Kondensation an ein anderes Medium (z.B. Wasser) übertragen wird. Diese Wärmemenge kann jetzt weiter genützt werden. Der kondensierte Dampf (Wasser als Kondensat bezeichnet) wird dann über die Wasseraufbereitung mittels einer Speisewasserpumpe wieder dem Dampferzeuger zugeführt, der Kreislauf beginnt wieder von neuem. Die Regelung erfolgt durch Ventile vor der Dampfturbine.

Diese Variante wird vor allem dort verwendet, wo ständig ein mehr oder weniger konstanter Wärmebedarf vorhanden ist.



$P_{el}$  elektrische Leistung      — Speisewasser  
 $Q_H$  Wärmeverbraucher        — Dampf  
 $Q_{zu}$  Zugeführte Wärme        — Welle

G Generator

**Abbildung 8: Dampfprozess mit Gegendruckturbine**

Einsatzgebiet	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrie und Energieversorgungsgesellschaften (Strom, Fernwärme), Leistungen (<math>\sim 0,5</math>-<math>30</math> MW<sub>el</sub> und größer)</li> <li>• bei konstantem und ständigem Wärmebedarf (da geringe Möglichkeiten der Regelung)</li> <li>• sehr häufig werden mehrere Dampfturbinen auf einer Schiene angeordnet, sodass je nach Bedarf eine oder mehrere Turbinen im Einsatz sind.</li> </ul>	



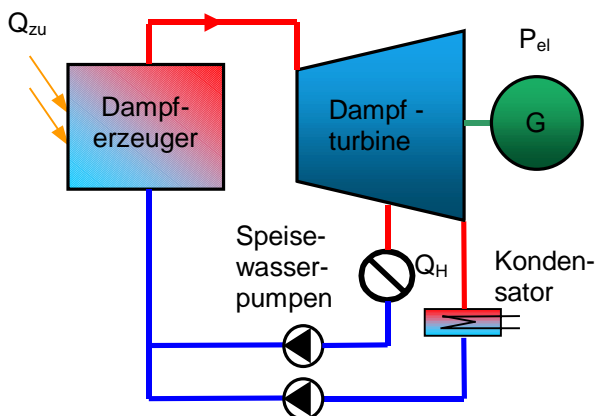
## 2.1.2 KWK mit Dampfprozess und Entnahme-Kondensationsturbine

### Funktionsweise

Die Funktionsweise ist ähnlich dem Prozess mit Gegendruckturbine, jedoch mit dem Unterschied, dass hier der Entnahmedampf für die Wärmeerzeugung nicht am Ende, sondern im Mittelteil der Turbine entnommen wird. Dies hat den Vorteil, dass die Strom- bzw. Wärmeproduktion den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden kann.

Durch Ventile kann an der Entnahmestelle der Entnahmedruck eingestellt werden, sodass auch im Teillastbetrieb die gewünschten Dampfzustände für die Wärmeerzeugung eingehalten werden können. Dies ist der Vorteil gegenüber der Anzapfturbine, bei der die Anzapfzustände mit dem Lastpunkt variieren.

Bei großem Wärmebedarf kann der gesamte Dampf an der Entnahmestelle für die Wärmeerzeugung entnommen werden, bei fehlendem Wärmebedarf kann dieser Turbinentyp wie eine herkömmliche Kondensationsturbine betrieben werden. Dazwischen sind durch die Ventilregelung entsprechende gemischte Betriebsweisen möglich.



$P_{el}$  elektrische Leistung  
 $Q_H$  Wärmeverbraucher  
 $Q_{zu}$  zugeführte Wärme  
— Speisewasser  
— Dampf  
— Welle

G Generator

**Abbildung 9: Dampfprozess mit Entnahmekondensationsturbine**

#### Einsatzgebiet

- mittlere bis größere Leistungen (~0,5-10 MW<sub>el</sub> und größer)
- Variabler Strom- und Wärmebedarf

### 2.1.3 Allgemeines zur KWK mit Dampfturbinenprozess

mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohle</li> <li>• Erdöl</li> <li>• Biomasse, Müll</li> <li>• Grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich, der in einem Kessel verbrannt werden kann</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es kann grundsätzlich jeder Brennstoff verwendet werden</li> <li>• Ausgereifte Technologie</li> <li>• Anlagengröße nach oben hin offen</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechter elektrischer Anlagenwirkungsgrad</li> <li>• schlechtes Teillastverhalten</li> <li>• Betrieb ist teuer</li> </ul>

In Tabelle 1 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~ 1 MW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten (mit Gegendruckturbinen)	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	ca. 20.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	10 - 20
Gesamtwirkungsgrad	[%]	70 - 85
Schadstoffemission (NOx) – kohlegefeuert	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	ca. 450 - 600

**Tabelle 1: Kenngrößen einer Dampfanlage mit Gegendruckturbinen**

#### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt. Sehr häufig sind Dampfturbinen an einer Schiene angeordnet, sodass je nach Strombedarf eine oder mehrere Maschinen in Betrieb sind. Dadurch ist es möglich, die Turbinen nahe dem optimalen Betriebspunkt zu betreiben.

#### Dampfzustand

Dezentrale KWK-Anlagen kleiner bis mittlerer Leistung (Größenordnung ~1 - 10 MW)

Dampfdruck: 30 - 70 bar

Frischdampf Temperatur: ~ 400 – 500 °C

## Regelung

Die Regelung der Dampfturbine kann auf zwei Arten erfolgen:

- Über ein Drosselventil vor der Turbine, welches den Dampfdruck im Zustrom von der Schiene zur einzelnen Turbine und somit deren Leistung regelt.
- In der einzelnen Turbine über eine Düsengruppenregelung, bei der einzelne Düsen vor dem ersten Laufrad (Regelrad) zu- oder weggeschaltet werden können und somit den Massendurchsatz durch die übrigen Stufen und damit die Leistung der Turbine regeln.

## Wartung / Instandhaltung

- Überprüfung der Turbinen und Dampfleitungen auf Unregelmäßigkeiten 1x pro Woche
- Alle 5 Jahre soll eine größere Revision von ca. einer Woche durchgeführt werden
- Regelmäßige Überprüfung der Dampfzustände

## Ökologische Aspekte

Bei der Verdampfung von Wasser bleiben die im Wasser enthaltenen Salze im Kessel zurück. Um einen hohen Salzgehalt zu vermeiden (Kesselsteinbildung !) wird kontinuierlich Wasser entsalzt (1-5 % der umgewälzten Speisewassermenge).

Weiters ist eine Abfuhr des Schlammes, gebildet durch Materialabrieb und den im Wasser noch vorhandenen Korbaten, notwendig (manuell oder automatisch).

Bei der Einleitung der Abwässer in ein Fließgewässer bzw. in die Kanalisation sind entsprechende Richtlinien einzuhalten.

## Schwachstellen

a) Thermodynamisch:

Hohe elektrische Wirkungsgrade können nur durch hohe Frischdampfdrücke und –temperaturen (170 bar, 550°C) bei vorgegebenem Kondensationszustand erreicht werden. Dies erfordert aber sehr teure Hochtemperatur-Werkstoffe, sodass man KWK-Anlagen kleinerer und mittlerer Leistung mit geringeren Frischdampfzuständen auslegt.

b) Betrieb:

Der Betrieb von Dampfanlagen ist relativ teuer, da aufgrund des Dampfkesselgesetzes immer ein Dampfwärter anwesend sein muss.

c) Biomasse Nutzung:

Die Frischdampf Temperatur ist in Biomasseanlagen wegen erhöhter Korrosionsgefahr durch die im Brennstoff enthaltenen Alkalimetalle, Schwefel und Chlor nach oben hin limitiert, wodurch der elektrische Wirkungsgrad relativ gering ist (Ausnahme Wirbelschichtfeuerung). Aufgrund von Schwankungen des Wassergehalts in der Biomasse kann es zu Änderungen von Temperatur und Massenstrom des Dampfes kommen. Um dem entgegenzuwirken, ist dies in der Regelungseinrichtung zu berücksichtigen (ev. Zusatzfeuerung mit Gas oder Öl).

## Entwicklungsstand / Aussichten

Industriedampfturbinen sind technisch sehr ausgereift und darum weltweit in sehr großen Stückzahlen im Einsatz.

Die Tendenzen gehen eindeutig zu immer höheren Temperaturen, wodurch die Leistung gesteigert werden kann. Entscheidend dafür ist die Entwicklung hochtemperaturfester Werkstoffe.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

<b>Entwicklungsstand / Aussichten</b>	<b>Zustand</b>
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.2 KWK mit Gasturbinenprozess

### Grundprinzip

- Umwandlung von mechanischer Energie (Turbine) in elektrische Energie durch den Generator.
- Verwendung der heißen Turbinenaustrittsgase zur Bereitstellung von Wärme.

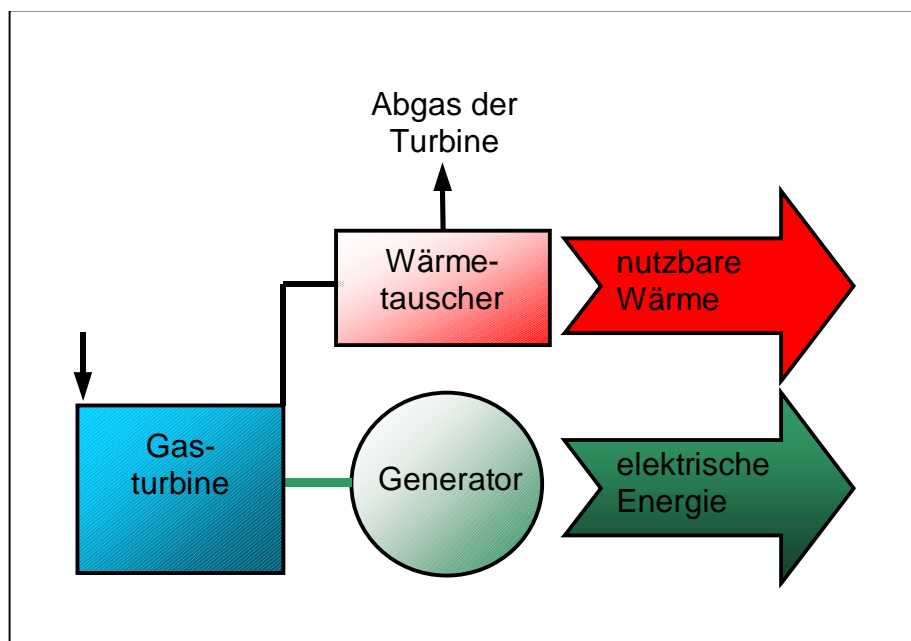


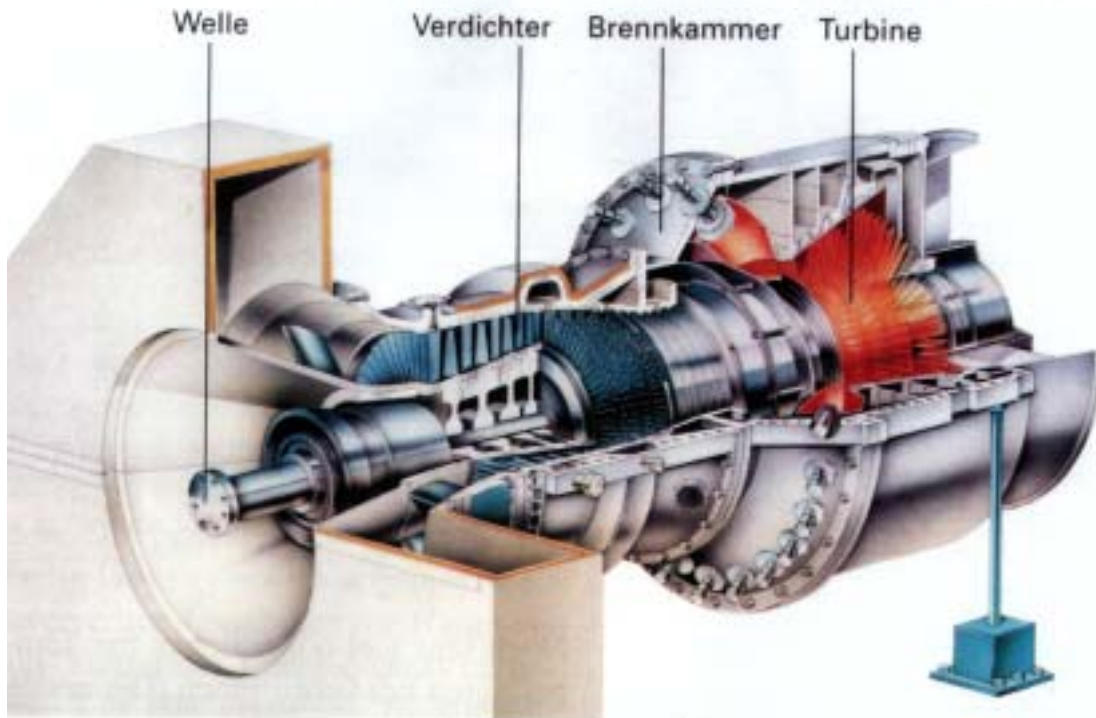
Abbildung 10: Grundprinzip der KWK mit Gasturbinenprozess

Grundlage für diese Art der Kraft-Wärme-Kopplung ist der Gasturbinenprozess, welcher im folgenden näher beschrieben werden soll.

### Gasturbinenprozess

Die Hauptkomponenten des Gasturbinenprozesses sind: Verdichter, Brennkammer und Turbine.

Das Abbildung 11 zeigt eine Gasturbine von Siemens (Siemens V64.3), wie sie für größere Leistungen verwendet wird.



**Abbildung 11: Schnitt durch eine Gasturbine größerer Leistung (Quelle: Siemens)**

Aus der Umgebung angesaugte Luft wird im Verdichter komprimiert und anschließend der Brennkammer zugeführt, wo unter der Zugabe von Brennstoff (Gas, Öl,...) eine Verbrennungsreaktion stattfindet. Das durch die Verbrennung entstehende Rauchgas wird in einer Turbine entspannt. Die Turbine treibt einerseits den Verdichter und andererseits den für die Stromerzeugung notwendigen Generator an. Das Abgas verlässt mit einer Temperatur von ungefähr 400-600 °C die Turbine und tritt beim einfachen Gasturbinenprozess ohne weitere Nutzung ins Freie. Will man diese Wärme noch zusätzlich nutzen so benötigt man im allgemeinen einen Wärmetauscher, welcher die Wärmeenergie auf ein anderes Medium (meist Wasser) überträgt. Es gibt dafür verschiedene Schaltungen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

## 2.2.1 Gasturbinenprozess mit Wärmerückgewinnung

### Funktionsweise

Bei diesem Prozess wird der Wärmehalt der Turbinenabgase vollständig zur Bereitstellung von Wärme verwendet. Diese Wärme steht nun für Heizzwecke, Trocknungsprozesse oder sonstige Prozesse (z.B. Absorptionskälteanlagen), bei denen Wärme benötigt wird, zur Verfügung.

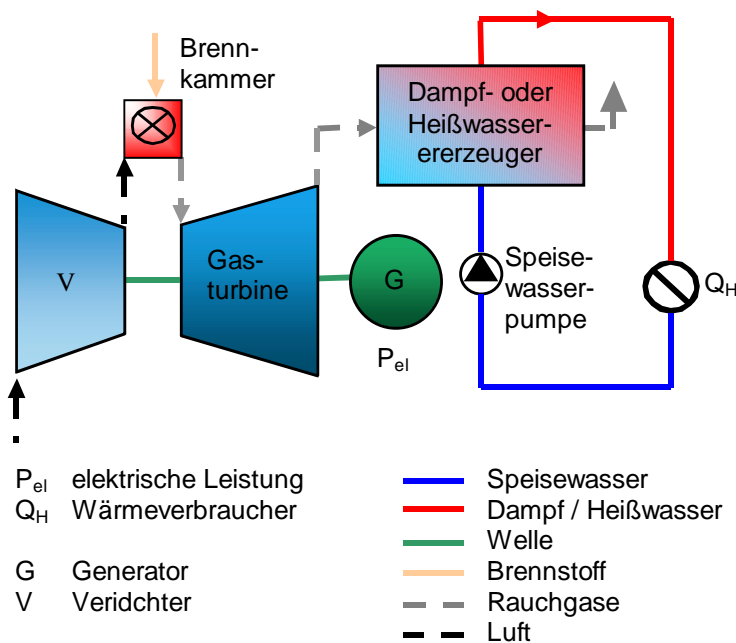


Abbildung 12: Gasturbinenprozess mit Wärmerückgewinnung

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zur Erzeugung elektrischer Leistung und Wärme ab ~ 30 kW<sub>el</sub></li> <li>• Bei relativ konstantem Wärmebedarf</li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas</li> <li>• Erdöl</li> <li>• Vergasung von Kohle</li> <li>• ...</li> </ul>

In Tabelle 2 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

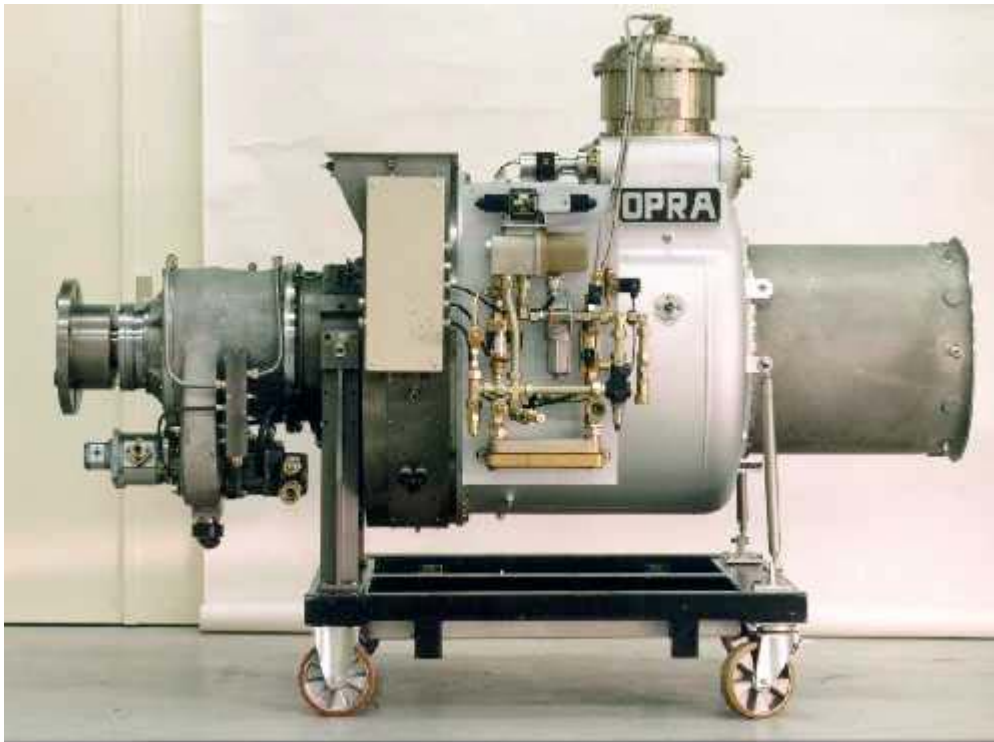
Anlagengröße ~20 MW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
-----------------------------------	---------	------

spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	ca. 17.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	25 - 35
Gesamtwirkungsgrad	[%]	70 - 92
Schadstoffemission (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	ca. 25

**Tabelle 2: Kenngrößen einer Gasturbinenanlage mit Wärmerückgewinnung**

## Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt



**Abbildung 13: Gasturbine des Typs FP-16-G der Fa. OPRA mit einer elektrischen Leistung von ca. 1,6 MW (Quelle: FP Turbomachinery)**

## Betriebszustand

Gasturbinen mittlerer und größerer Leistung (~20 MW<sub>el</sub> und größer)  
Spitztemperatur: ~1200 °C

## Regelung

Die Regelung der Gasturbine erfolgt meist durch die eingespritzte Brennstoffmenge in die Brennkammer der Turbine. Für die Abdeckung von erhöhtem Wärmebedarf ist im allgemeinen eine Zusatzfeuerung im Abhitzeessel vorhanden.



## Entwicklungsstand / Aussichten

KWK-Anlagen mit Gasturbinen sind technisch sehr ausgereift und darum weltweit in sehr großen Stückzahlen im Einsatz.

Die Tendenzen gehen eindeutig zu immer höheren Temperaturen und Drücken, wodurch die elektrische Leistung und damit der Wirkungsgrad gesteigert werden kann.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

<b>Entwicklungsstand / Aussichten</b>	<b>Zustand</b>
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

1) Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

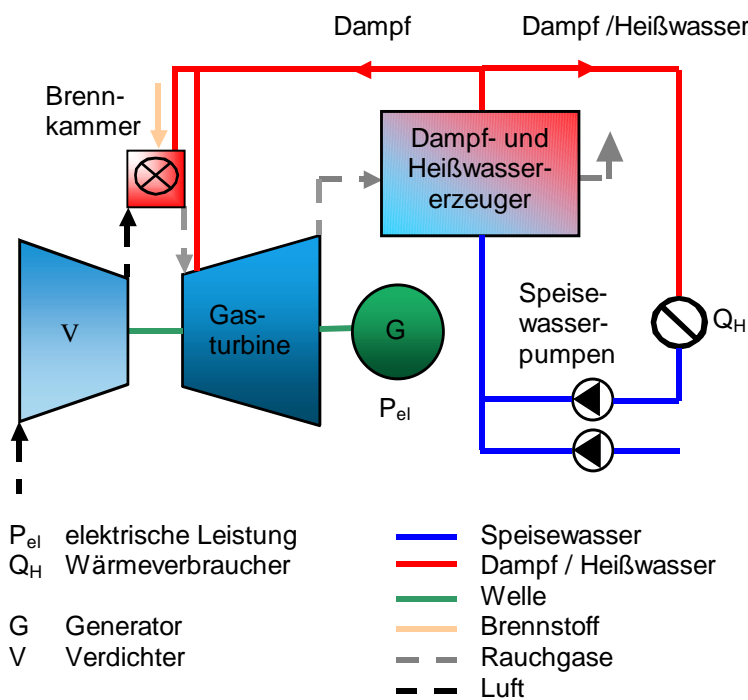
2) 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.2.2 Cheng-Cycle (Steam Injected Gas Turbine, STIG)

### Funktionsweise

Eine weitere Variante des Gasturbinenprozesses mit Abwärmenutzung bietet der sogenannte Cheng-Cycle oder STIG-Cycle (Steam Injected Gas Turbine). Wie der Name sagt, wird ein Teil des erzeugten Dampfes in die Brennkammer und in die Turbine eingespeist, wodurch die Leistung und der elektrische Wirkungsgrad der Gasturbine stark gesteigert wird. Dies erlaubt auch eine Anpassung an den Wärmebedarf der Anlage, da je nach Bedarf mehr oder weniger Dampf in die Gasturbine eingespeist werden kann.

Abbildung 14: Cheng-Cycle



Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabler Strom- und Wärmebedarf</li> <li>• Für größere Leistungen ( ~ 20 MW<sub>el</sub> und größer)</li> </ul>
Mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas</li> <li>• Erdöl</li> <li>• Vergasung von Kohle</li> </ul>
Vorteil
<ul style="list-style-type: none"> <li>• abgegebene Wärme kann variiert werden</li> </ul>

- Steigerung der Gasturbinenleistung und des elektrischen Wirkungsgrades

### Nachteil

- Aufbereitung des in die Gasturbine eingespeisten Dampfes ist aufwendig

In Tabelle 3 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~ 20 MW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	ca. 18.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,1 – 0,15
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{th}$	[%]	~ 40
Gesamtwirkungsgrad	[%]	~ 70 - 85
Schadstoffemission (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	ca. 25

**Tabelle 3: Kenngrößen eines Cheng-Cycles**

## Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Betriebszustand

Gasturbinen mittlerer und größerer Leistung (~20 MW<sub>el</sub> und größer)  
Spitztemperatur: ~1100 °C

## Regelung

Die Regelung der elektrischen Leistung erfolgt durch die Brennstoffzufuhr in die Brennkammer der Gasturbine und durch die Variation der eingespritzten Dampfmenge in die Turbine.

Die Regelung der abgegebenen Wärmemenge erfolgt durch die Variation der eingespritzten Dampfmenge in die Turbine.

## Entwicklungsstand / Aussichten

KWK-Anlagen mit Cheng-Cycle sind technisch sehr ausgereift und darum weltweit in großen Stückzahlen im Einsatz.

Die Tendenzen gehen eindeutig zu immer höheren Temperaturen und Drücken, wodurch die elektrische Leistung und damit der Wirkungsgrad gesteigert werden kann.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	mittel <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.2.3 Mikroturbine

Eine interessante Möglichkeit zur Realisierung kleinerer Leistungen (ca. 30 - 300 kW und weniger) bieten die sogenannten Mikroturbinen.

### Funktionsweise

Der Unterschied zum Gasturbinenprozess mit Wärmerückgewinnung liegt darin, dass durch die Kompaktheit der Anlage eine Blockbauweise möglich ist. Diese Mikroturbinenanlage kann daher ebenfalls als BHKW angesehen werden. Durch die kleine Bauweise ist jedoch der elektrische Wirkungsgrad der Anlage relativ gering (~15-25%).

Um einen guten elektrischen Wirkungsgrad trotz niedriger Spitzentemperaturen zu erzielen, wird in der Regel ein Wärmetauscher zur Verbrennungsluftvorwärmung (Rekuperator) mit Hilfe des heißen Turbinenabgases verwendet. In einem weiteren Wärmetauscher wird dann Prozesswärme gewonnen. Falls der erste Wärmetauscher weggeschaltet werden kann, kann die abgegebene Prozesswärme bei Bedarf auf Kosten des elektrischen Wirkungsgrades erhöht werden. Dies ermöglicht eine sehr gute Anpassung an variablem Wärmebedarf.

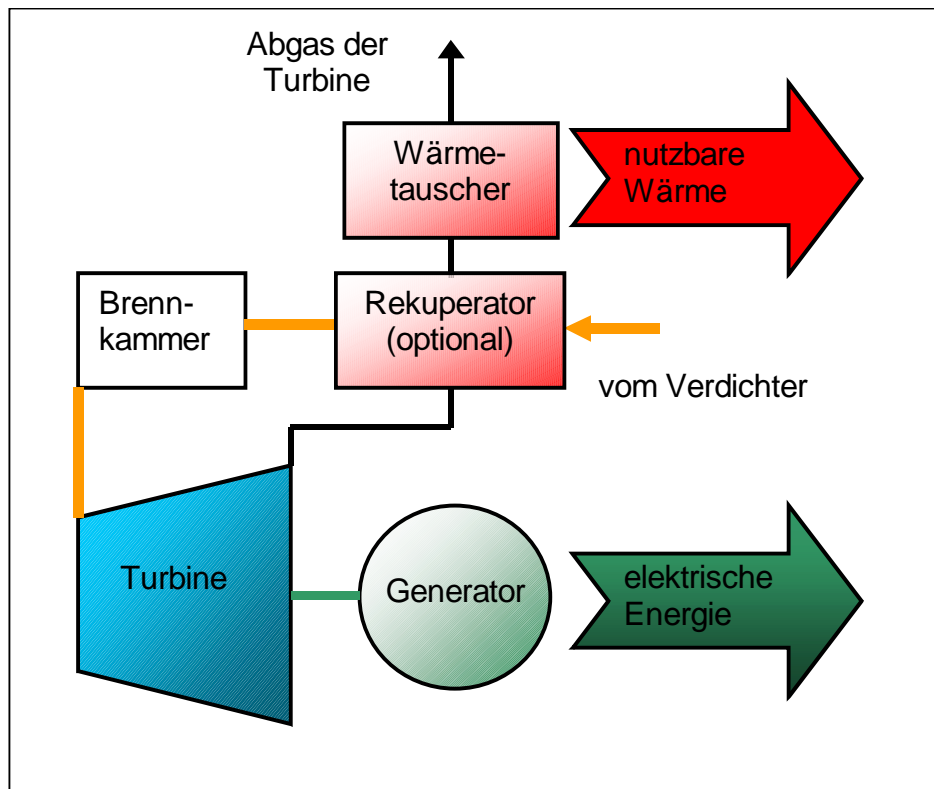
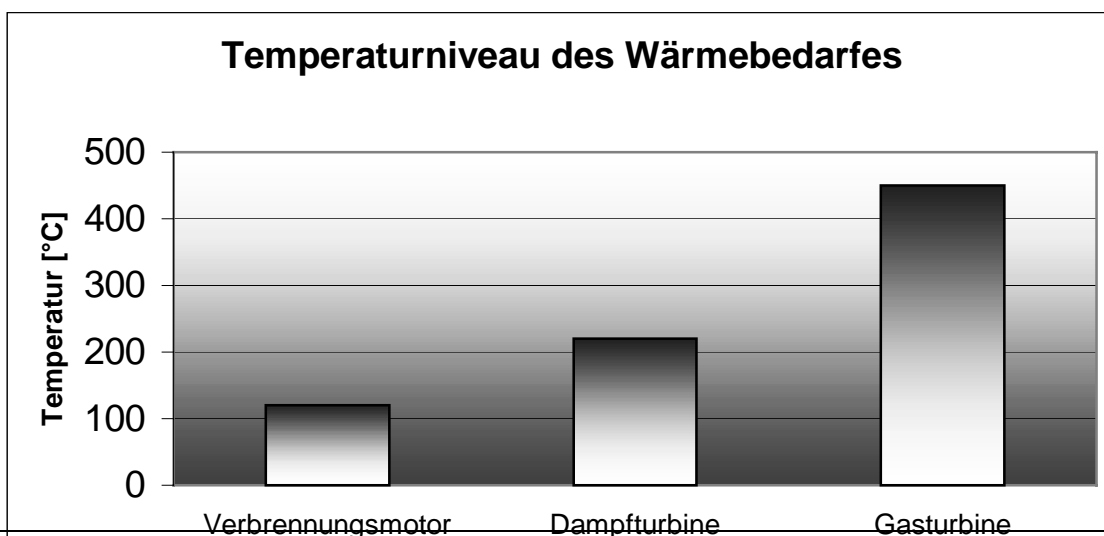


Abbildung 15: Schema einer Mikroturbine

Neben den Blockheizkraftwerken (BHKW), ausgerüstet mit Gas- oder Dieselmotoren, beginnt sich in letzter Zeit die Mikroturbine als weitere Variante eines BHKWs durchzusetzen. Werden aber auf der Abwärmeseite hohe Temperaturen gefordert, so stellt die Mikroturbine die sinnvollere Lösung dar.

Abbildung 16 zeigt das Temperaturniveau, bei dem die Wärme zur Verfügung steht, für verschiedene Konzepte. Ein hohes Temperaturniveau ist im allgemeinen auf schlechtere elektrische Wirkungsgrade zurückzuführen. Bei gleicher elektrischer Leistung von Gasturbine und Verbrennungskraftmaschine fallen daher bei der Gasturbine größere Wärmemengen an, die bei der Auslegung zu berücksichtigen sind.



**Abbildung 16: Temperaturniveau der zur Verfügung gestellten Wärme für verschiedene KWK-Anlagen**

Einsatzgebiet der Mikroturbine
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dampferzeugung in kleinen Kesselanlagen</li> <li>• Heißwassernetze über 100°C</li> <li>• Trockneranlagen</li> <li>• Krankenhäuser</li> <li>• Wäschereien</li> <li>• Nahwärmenetze</li> <li>• ....</li> </ul>
mögliche Brennstoffe der Mikroturbine
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erdgas</li> <li>• Heizöl</li> <li>• Flüssiggas</li> <li>• Klärgas</li> <li>• Grubengas</li> <li>• Erdölbegleitgas</li> <li>• ...</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kompakte Bauweise</li> <li>• geringe Wartungskosten bei Wartungsintervallen von mind. 8000 Betriebsstunden</li> <li>• Einfache Installation  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch kompakte Bauweise und niedriges Anlagengewicht ist es möglich, die Betriebsfläche gering zu halten.</li> </ul> </li> <li>• Anpassung des Strom- und Wärmebedarfes ist möglich</li> <li>• leise, da keine niederfrequenten Schallemissionen</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volle Marktreife der Technologie noch nicht erreicht</li> </ul>

In Tabelle 4 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße 30-75 kW <sub>el</sub>	Einheit	Wert

spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	9.000 – 15.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,07 – 0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	15 - 25
Gesamtwirkungsgrad	[%]	70 - 90
Schadstoffemission (NOx) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	20

<sup>1)</sup> bezogen auf 15% O<sub>2</sub> im Abgas

**Tabelle 4: Kenngrößen einer Mikroturbine**

### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt



**Abbildung 17: Mikroturbine des Typs FP-CS-30 mit einer Wärmeleistung von etwa 69 kW (Quelle: FP Turbomachinery)**

### Betriebszustand

Für Mikroturbine kleiner Leistung ( ~55 kW<sub>el</sub>):

Abgastemperatur: ~600 °C

Druckverhältnis Gasturbine: 3 - 5

Drehzahl: 105.000 U/min

### Regelung

Die Regelung der Gasturbine erfolgt im allgemeinen durch die Brennstoffzufuhr.

### Wartung / Instandhaltung

(Quelle Capston)

Teil	Vorgang	Wartungsintervall
------	---------	-------------------

Luftfilter und Brennstofffilter	Ersetzen	8.000 Std.
Turbinenabg. Thermoelemente	Ersetzen	16.000 Std.
Zündung	Ersetzen	16.000 Std.
Brennstoffeinspritzung	Ersetzen	16.000 Std.
Gasverdichter (in abh. von der durchschnittlichen Betriebstemperatur)	Inspektion < 10°C 10° bis 15,5°C 15,5° bis 26,7°C > 27,7°C	8.000 Std. 7.000 Std. 4.000 Std. 2.000 Std.

## Entwicklungsstand

Der entscheidende Durchbruch der Mikroturbinen ist in Österreich noch nicht gelungen. In den USA sind sie jedoch schon vielfach im Einsatz und haben daher schon eine hohe technologische Reife erreicht.

Aufgrund der einfachen Handhabung und der hohen Gesamtwirkungsgrade werden sie sich auch in Österreich bald durchsetzen und eine alternative Möglichkeit zu den BHKWs mit Verbrennungskraftmaschinen bieten.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Demonstrationsstadium bis Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	groß <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	mittel <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.2.4 Allgemeines zum Gasturbinenprozess

### Ökologische Aspekte

Die Gasturbinen zeichnen sich bei der Verwendung von Erdgas durch sehr niedrige Emissionswerte aus. Der NO<sub>x</sub>-Gehalt liegt bei 25 ppm, der CO-Gehalt kann durch einen nachgeschalteten Katalysator weiter reduziert werden.

### Schwachstellen

Thermodynamisch:

Die hohen Wirkungsgrade der Gasturbinen lassen sich durch hohe Turbinen-eintrittstemperaturen bis zu 1300 °C erzielen. Dies verlangt sehr teure Werkstoffe und komplizierte Technologien zur Schaufelkühlung. Gasturbinen höchstens Wirkungsgrades sind daher sehr wartungsintensiv.





## 2.3 KWK mit kombiniertem Dampf- und Gas-Kreislauf (GuD Prozess)

### Grundprinzip

- Umwandlung von mechanischer Energie (Gasturbine und Dampfturbine) in elektrische Energie durch den Generator.
- Verwendung der heißen Gasturbinaustrittsgase zur Erzeugung von Dampf für die Dampfturbine.
- Verwendung der Wärmeenergie des Turbinenaustrittsdampfes zur Bereitstellung von Wärme.

Der Dampfturbinenprozess kann wiederum im Gegendruckbetrieb oder im Entnahmekondensationsbetrieb betrieben werden.

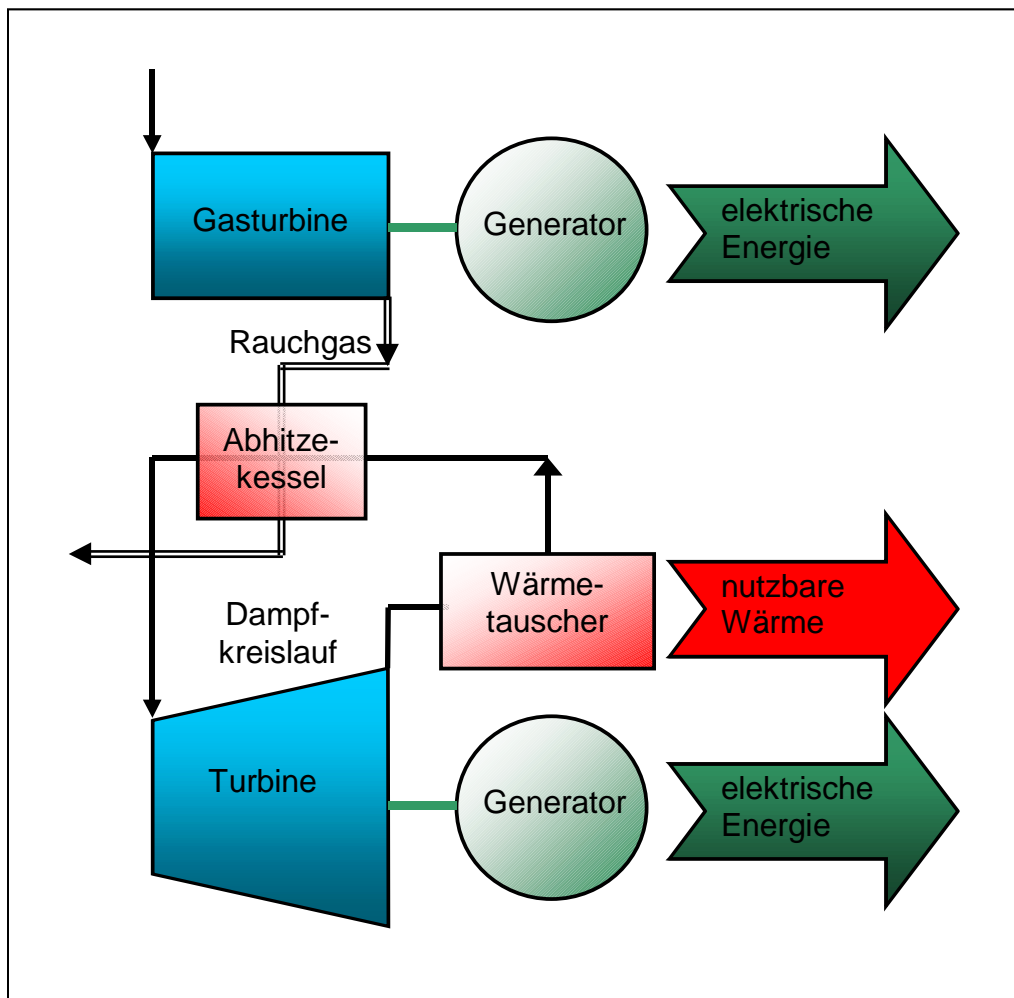


Abbildung 18: Prinzip der KWK mit GuD-Prozess

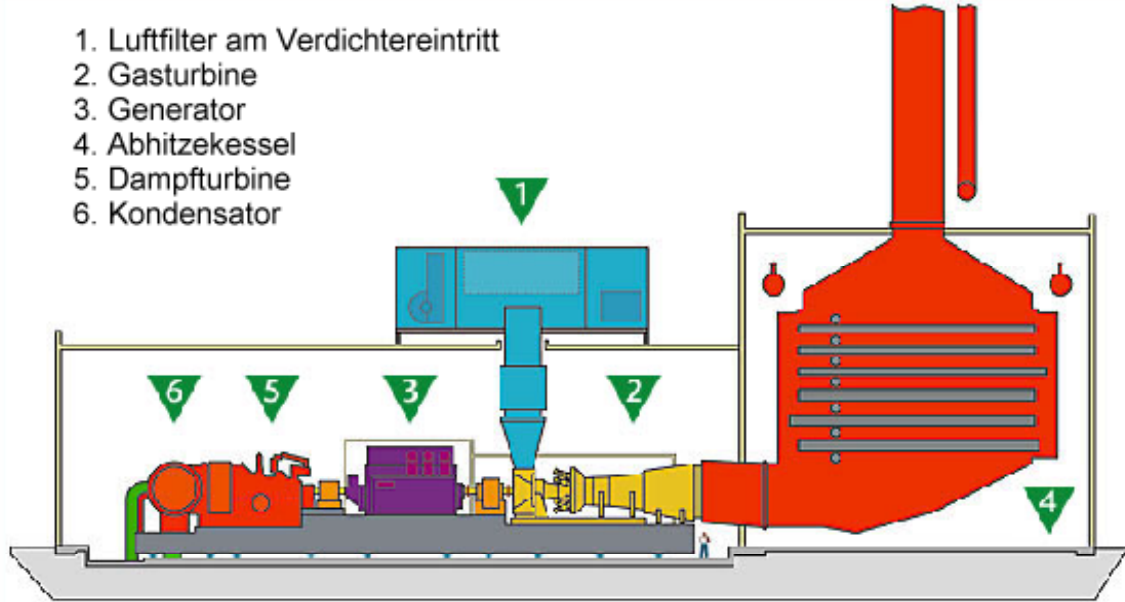


Abbildung 19: Schnitt durch eine GuD-Anlage (Quelle: GEW Köln AG): Gasturbine, Dampfturbine und Generator auf einer gemeinsamen federgelagerten Fundamentplatte angeordnet (Einwellenmaschine)

## 2.3.1 GuD-Prozess mit Gegendruckturbine

### Funktionsweise

Der GuD-Prozess stellt eine Kombination des Dampf- und des Gasturbinenprozesses dar. Die Abgase der Gasturbine dienen der Erzeugung von Hochdruckdampf, welcher dann in einer Dampfturbine entspannt wird. Die elektrische Leistung wird einerseits durch die Gasturbine und andererseits durch die Dampfturbine erzeugt. Der aus der Dampfturbine austretende Dampf kann weiter zur Bereitstellung von Wärme verwendet werden.

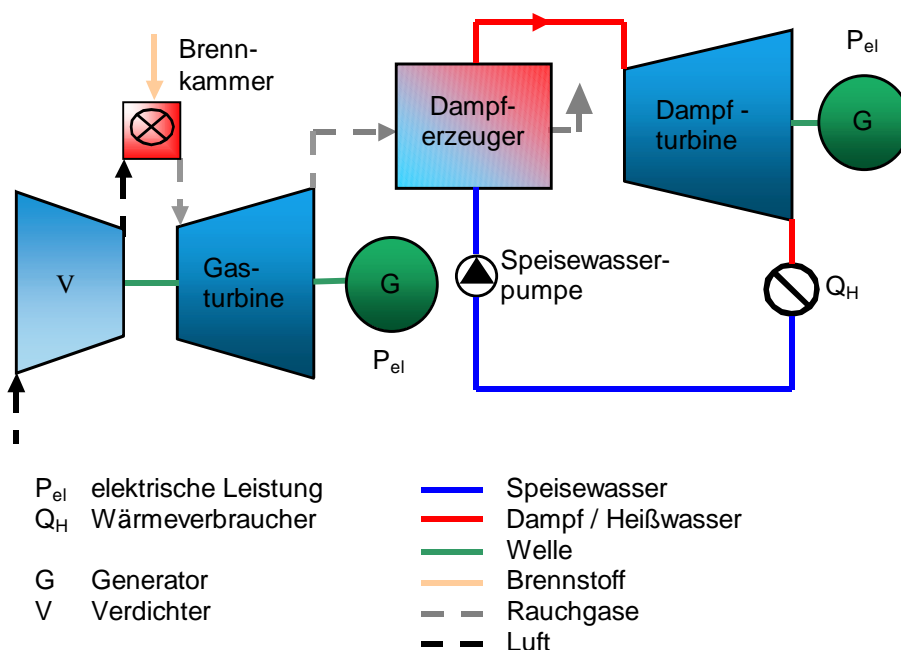


Abbildung 20: GuD-Prozess mit Gegendruckturbine

#### Einsatzgebiet

- Für Wärme- und Strombedarf größerer Leistungen (> 10 MW elektrisch)
- Wenn konstante Prozesswärme benötigt wird (z.B.: Papierfabrik)
- Wenn hoher elektrischer Wirkungsgrad gefordert ist

## 2.3.2 GuD-Prozess mit Entnahme-Kondensationsturbine

## Funktionsweise

Die Funktionsweise basiert auf dem selben Prinzip wie der GuD-Prozess mit Gegendruckturbine mit dem Unterschied, dass hier der Entnahmedampf für die Wärmeerzeugung nicht am Ende der Turbine, sondern im Mittelteil der Turbine entnommen wird. Dies hat den Vorteil, dass die Strom- bzw. Wärmeproduktion den jeweiligen Erfordernissen besser angepasst werden kann.

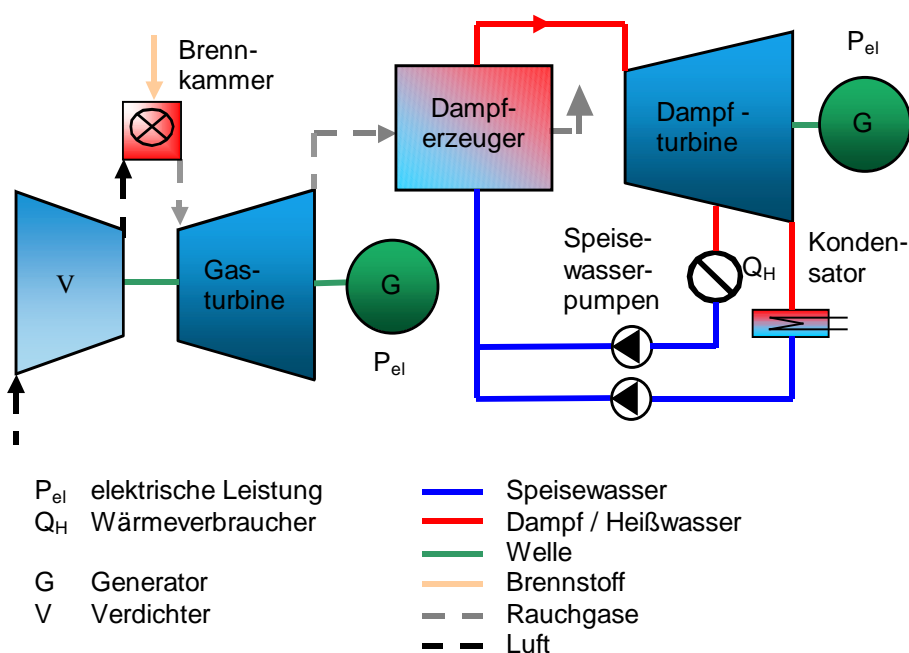


Abbildung 21: GuD-Prozess mit Entnahme-Kondensationsturbine

### Einsatzgebiet

- Für Wärme- und Strombedarf größerer Leistungen ( $> 10 \text{ MW}_{el}$ )
- Unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Strom- und Wärmebedarf
- Wenn hoher elektrischer Wirkungsgrad gefordert ist

### 2.3.3 Allgemeines zum GuD-Prozess

#### mögliche Brennstoffe

- Gas

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erdöl</li> <li>• Brennstoffe durch die Vergasung von Biomasse oder Kohle</li> </ul>
<b>Vorteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe elektrische Wirkungsgrade</li> <li>• Ausgereifte Technologie</li> </ul>
<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betrieb ist teuer</li> <li>• Nur für größere Leistungen geeignet (elektrisch)</li> </ul>

In Tabelle 5 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~40 MW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	11.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	bis 50 (55)
Gesamtwirkungsgrad	[%]	bis 85 (90)
Schadstoffemission (NOx) Gasturbine	- [mg/Nm <sup>3</sup> ]	ca. 25

**Tabelle 5: Kenngrößen eines GuD-Prozesses**

## Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Betriebszustand

Dezentrale KWK-Anlagen mittlerer Leistung

- Gasturbine:
  - Spitztemperatur: ~1150 °C
  - Druck: ~ 12 bar
- Dampfturbinenprozess (häufig auch als Zweidruckprozess ausgeführt):
  - Dampfdruck: ~50 bar
  - Frischdampf Temperatur: ~ 400 °C

## Regelung

Die Regelung der Gasturbine erfolgt im allgemeinen durch die Brennstoffzufuhr.

Die Regelung der Dampfturbine erfolgt einerseits durch den in Abhängigkeit von der Gasturbinenleistung erzeugten Dampfzustand im Abhitzeessel.

Andererseits kann die Dampfturbine auch wie folgt geregelt werden:

- Über ein Drosselventil vor der Turbine welches den Dampfdruck und somit die Leistung regelt.
- Über eine Düsengruppenregelung bei der einzelne Düsen vor dem Laufrad zu oder weggeschaltet werden können und somit den Massendurchsatz und damit die Leistung der Turbine regeln.

## Wartung / Instandhaltung

Gasturbinenkreislauf:

- Überprüfung der Brennstoffleitungen, des Turbinengehäuses etc.: 1x pro Woche

Dampfkreislauf:

- Überprüfung der Dampfleitungen: 1x pro Woche
- Regelmäßige Überprüfung der Dampfzustände
- Alle 5 Jahre soll eine größere Revision von ca. einer Woche durchgeführt werden

## Ökologische Aspekte

Gasturbinenkreislauf:

Die Gasturbinen zeichnen sich bei der Verwendung von Erdgas durch sehr niedrige Emissionswerte aus. Der NO<sub>x</sub>-Gehalt liegt bei 25 ppm, der CO-Gehalt durch einen nachgeschalteten Katalysator weiter reduziert werden.

Dampfkreislauf:

Bei der Verdampfung von Wasser bleiben die im Wasser enthaltenen Salze im Kessel zurück. Um einen hohen Salzgehalt zu vermeiden (Kesselsteinbildung !) wird kontinuierlich Wasser entsalzt (1-5 % der umgewälzten Speisewassermenge).

Weiters ist eine Abfuhr des Schlammes, gebildet durch Materialabrieb und den im Wasser noch vorhandenen Korbaten, notwendig (manuell oder automatisch).

Bei der Einleitung der Abwässer in ein Fließgewässer bzw. in die Kanalisation sind entsprechende Richtlinien einzuhalten.

## Schwachstellen

Thermodynamisch:

Die höchsten Verluste treten im Abhitzekessel auf, da die Verläufe der Abkühlkurve des Abgases und der Aufwärmkurve des Dampfes mit der Verdampfung zu großen Temperaturdifferenzen führen. Deshalb werden häufig Zweidruck- und auch Dreidruckdampfprozesse verwendet, um eine bessere Anpassung der Dampfkurve an die Abgaskurve zu ermöglichen.

Kosten:

Der Betrieb von GuD-Anlagen ist sehr teuer. Sie kennzeichnen sich jedoch durch höchste elektrische Wirkungsgrade aus. In der KWK werden sie sinnvoll dann eingesetzt, wenn ein hoher Anteil an Strom erwünscht ist.

## Entwicklungsstand

KWK-Anlagen mit GuD-Prozess sind technisch sehr ausgereift und darum weltweit in sehr großen Stückzahlen im Einsatz.

Die Tendenzen gehen zu Gasturbinen mit hohen Austrittstemperaturen, um einen Dampfprozess mit hohem Wirkungsgrad nachschalten zu können.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering



## 2.4 BHKW mit Diesel- und Gasmotoren

Diesel- und Gasmotoren werden häufig als Blockheizkraftwerke (BHKW) ausgeführt. (siehe auch Konzepte der KWK)

**Definition BHKW:** Als BHKW (Blockheizkraftwerk) wird eine Anlage für Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet, die als „Block“ fertig montiert, geliefert und betrieben wird.

### Grundprinzip

- Umwandlung von mechanischer Energie (Gas- oder Dieselmotor) in elektrische Energie durch den Generator.
- Verwendung der heißen Motorabgase zur Bereitstellung von Wärme.

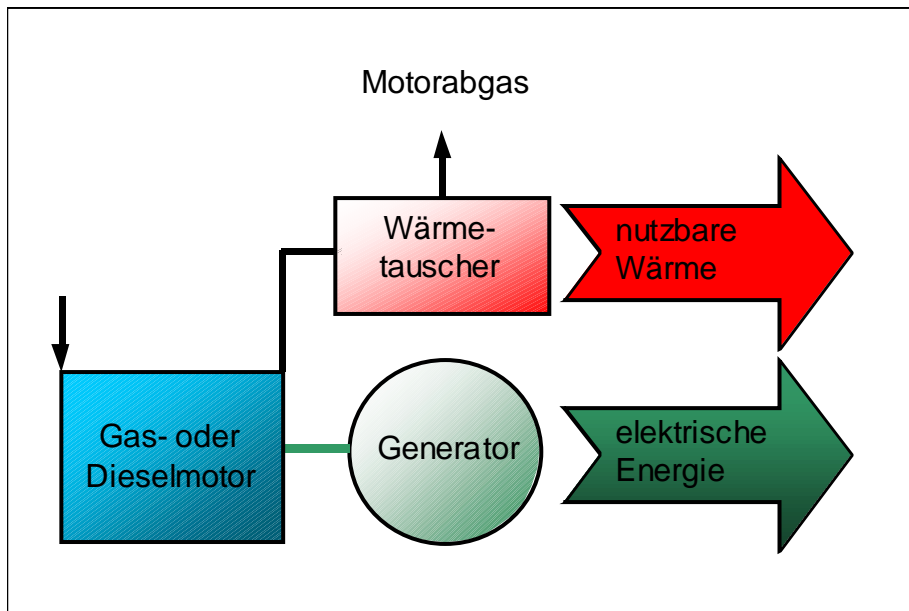


Abbildung 22: Grundprinzip eines BHKWs

### Funktionsweise

Der Generator wandelt die an der Motorwelle erzeugte mechanische Arbeit in elektrische Energie um. Die bei der Stromerzeugung durch Verbrennung entstehende Wärme wird für die Bereitstellung von Prozesswärme oder zu Heizzwecken genutzt. Als Wärmequellen dienen die Verbrennungsabgase und das Motorkühlwasser, dessen Wärmeinhalt aufgrund der tieferen Temperatur nicht immer nutzbar gemacht werden kann.

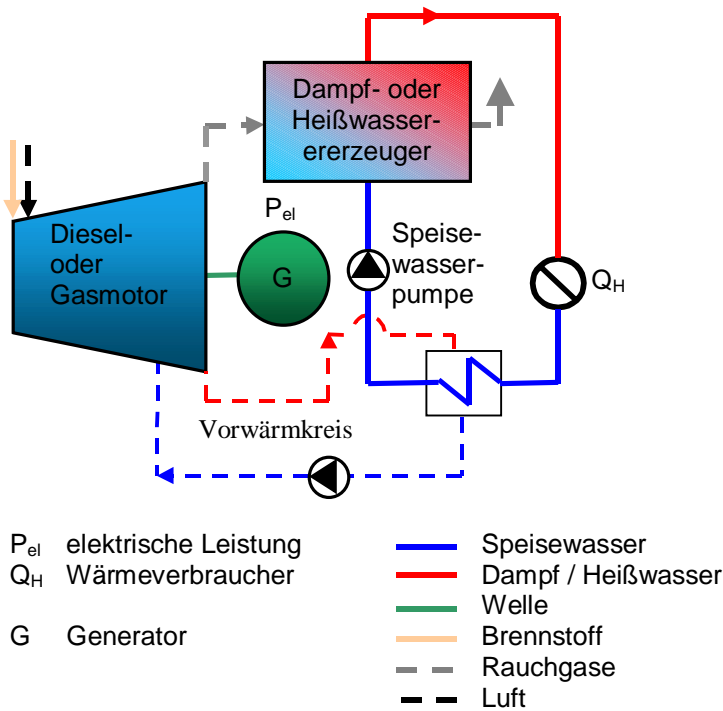


Abbildung 23: Diesel- und Gasmotoren BHKW

## Allgemeines zu den Diesel- und Gasmotoren BHKWs

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung kleinerer bis mittlerer Leistungen (ab ~15 kW<sub>el</sub>)</li> <li>• Beispiele sind: Wohnsiedlungen, Industrie (Trocknungsprozesse), Krankenhäuser, Kläranlagen (Klärgasnutzung)</li> </ul>
Mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas</li> <li>• Biogas (Klärgas, Deponiegas),</li> <li>• Diesel</li> <li>• Gas aus Biomassevergasung, Methanol, Rapsöl</li> <li>• Vergasungsprodukte</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strom und Wärme werden am Ort des Bedarfs erzeugt, wodurch die</li> </ul>

hohen Investitionskosten und die großen Übertragungsverluste der Fernwärmeleitungen entfallen.

- Der Gesamtnutzungsgrad solcher BHKW liegt, bezogen auf den Endverbraucher, bei bis zu 85 % und darüber. Er ist damit um bis zu 10 % höher als bei herkömmlichen Fernheizkraftwerken.
- Reduktion des Verbrauches an Primärenergie durch den hohen Nutzungsgrad
  - durch die Abwärmenutzung des Rauchgases
  - durch die Abwärmenutzung der Motorkühlung und damit eine
- Reduktion der Umweltbelastung durch Abwärme und Schadstoffe.
- Modulbauweise möglich
  - Anpassung an den variablen Strombedarf möglich
  - Wartungsarbeiten an einem Modul möglich bei gleichzeitigem Betrieb der restlichen Module
- Geringer Wartungsaufwand
- Viele Anbieter vorhanden

#### Nachteile

- Bereitstellung von Hochtemperaturwärme nicht möglich (Temperaturniveau der Abwärme ist zu niedrig)

In Tabelle 6 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße 30-75 kW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	17.500 – 24.500
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,2 – 0,3
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	28 - 31
thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th}$	[%]	52 - 57
Gesamtwirkungsgrad	[%]	80 - 88
Schadstoffemission (NOx) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	100 - 250

<sup>1)</sup> bezogen auf 5% O<sub>2</sub> im Abgas

**Tabelle 6: Kenngrößen eines BHKWs**

Hohe Wirkungsgrade werden bei normaler Vorlauftemperatur bis zu ca. 90°C erreicht. Durch den Einsatz von heißgekühlten Motoren können Temperaturen von rund 120°C im Wasservorlauf erreicht werden.

### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Ausführung

Meist werden mehrere Module, die jeweils aus einem Gas- oder Dieselmotor, einem Generator und einem Wärmetauscher bestehen, parallelgeschaltet. Je nach Bedarf kann man ein oder mehrere Module betreiben, sodass die einzelnen Einheiten in günstigen Wirkungsgradbereich nahe Volllast betrieben werden können. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass sich die Wartungsarbeiten und Reparaturen an mehrmoduligen Anlagen leichter durchführen lassen.

Abbildung 24 zeigt ein Beispiel für eine Modulbauweise.



**Abbildung 24: BHKW-Anlage in Modulbauweise (Quelle Jenbacher)**

Weitere Ausbaumöglichkeiten für ein BHKW bestehen in der Kombination mit einer Absorptionskältemaschine, welche die Abwärme des Rauchgases zur Erzeugung von Kälte verwendet. Diese Kombination bietet sich insbesondere dann an, wenn neben der Wärme auch Kälte, z.B. für Klimaanlage, benötigt wird.

## Regelung

Die Regelung kann über die zugeführte Kraftstoffmenge erfolgen.

## Wartung / Instandhaltung

Die Wartungsintervalle betragen 2000 Stunden.

## Ökologische Aspekte

Das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas wird über einen Katalysator gereinigt. Die maximal zulässigen Abgaswerte werden dabei meist unterschritten. Anfallende Altölmengen müssen getrennt entsorgt werden.

## Entwicklungsstand

BHKW mit Gas- und Dieselmotoren sind technisch sehr ausgereift und darum weltweit in sehr großen Stückzahlen im Einsatz.

In Zukunft soll die Bedienerfreundlichkeit der Anlagen soweit gesteigert werden, dass eine automatische Kontrolle der Anlagenzustände über Internet den Anlagenbetreuern übermittelt werden, wodurch diese bei einer auftretenden Störung schneller handeln können.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.5 KWK mit alternativen Prozessen

Jene Prozesse werden als alternativ bezeichnet, deren Technologie soweit ausgereift ist, dass sie in der Praxis einsetzbar, aber noch nicht in größerer Anzahl realisiert sind. Die folgende Abbildung zeigt verschiedene Möglichkeiten der KWK mit alternativen Prozessen.

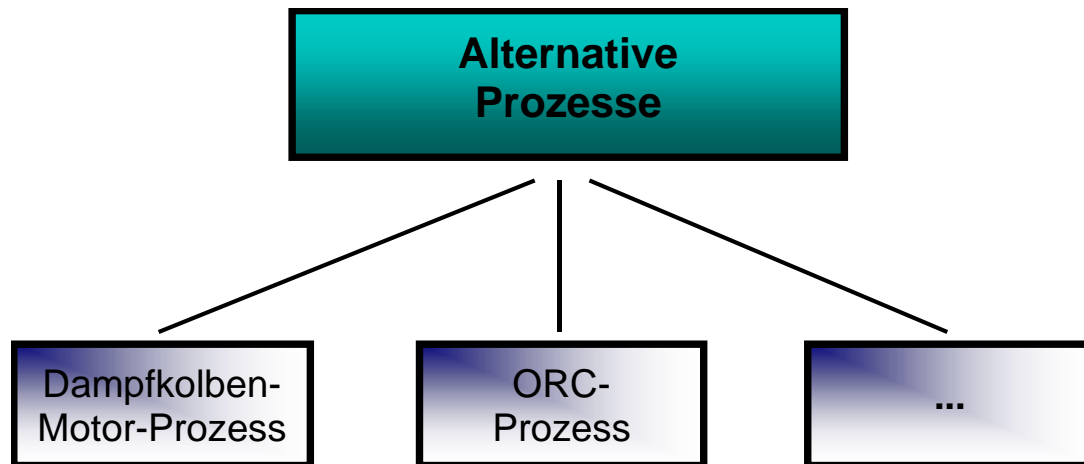


Abbildung 25: KWK mit alternativen Prozessen

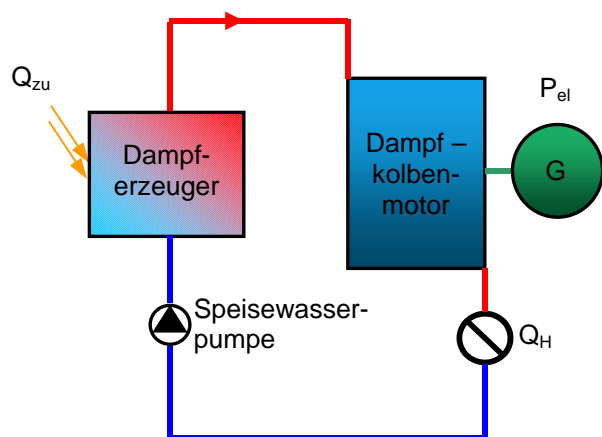
Im folgenden werden der Dampfkolbenmotorprozess und der ORC-Prozess näher beschrieben.

## 2.5.1 Dampfkolbenmotorprozess

### Funktionsweise

Das durch die Verbrennung entstehende Rauchgas durchströmt einen Kessel, in dem Dampf erzeugt wird. Der Dampf strömt in den Dampfkolbenmotor, wo er durch Entspannung mechanische Arbeit leistet, die im Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Der Dampf gelangt in den Kondensator, wo die anfallende Kondensationswärme als Fern- oder Prozesswärme genutzt werden kann. Das Wasser wird mit einer Speisewasserpumpe auf Betriebsdruck gebracht und dem Kessel zugeführt, womit der Kreislauf wieder geschlossen ist. Der Prozess entspricht somit einem Dampfturbinenprozess, bei dem die Turbine durch einen Kolbenmotor ersetzt ist. Im Unterschied zum Dampfturbinenprozess sind aber beim Kolbenmotor Leistungen ab ca. 20 kW<sub>el</sub> möglich, wodurch eine Anwendung im dezentralen Bereich kleinerer Leistung möglich ist.

### Aufbau einer KWK-Anlage mit Dampfkolbenmotor



- |                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| $P_{el}$ elektrische Leistung | — Speisewasser |
| $Q_H$ Wärmeverbraucher        | — Dampf        |
| $Q_{zu}$ zugeführte Wärme     | — Welle        |
| G Generator                   |                |

Abbildung 26: Schema einer KWK-Anlage mit Dampfkolbenmotor

### Prinzip des Dampfkolbenmotors

Der Dampf strömt in den Zylinder ein (Bild a) bis durch Regelkolben der Einlassvorgang beendet wird. Der Dampf entspannt sich und leistet am Kolben Arbeit (Bild b). Da sich dadurch das Volumen vergrößert nimmt der Druck kontinuierlich ab. Bewegt sich nun der Kolben nach Erreichen des Totpunktes wieder nach rechts, so gibt der Regelkolben das Auslassventil frei

und der Dampf strömt aus dem Zylinder heraus (Bild c). Damit beginnt der Vorgang wieder von neuem.

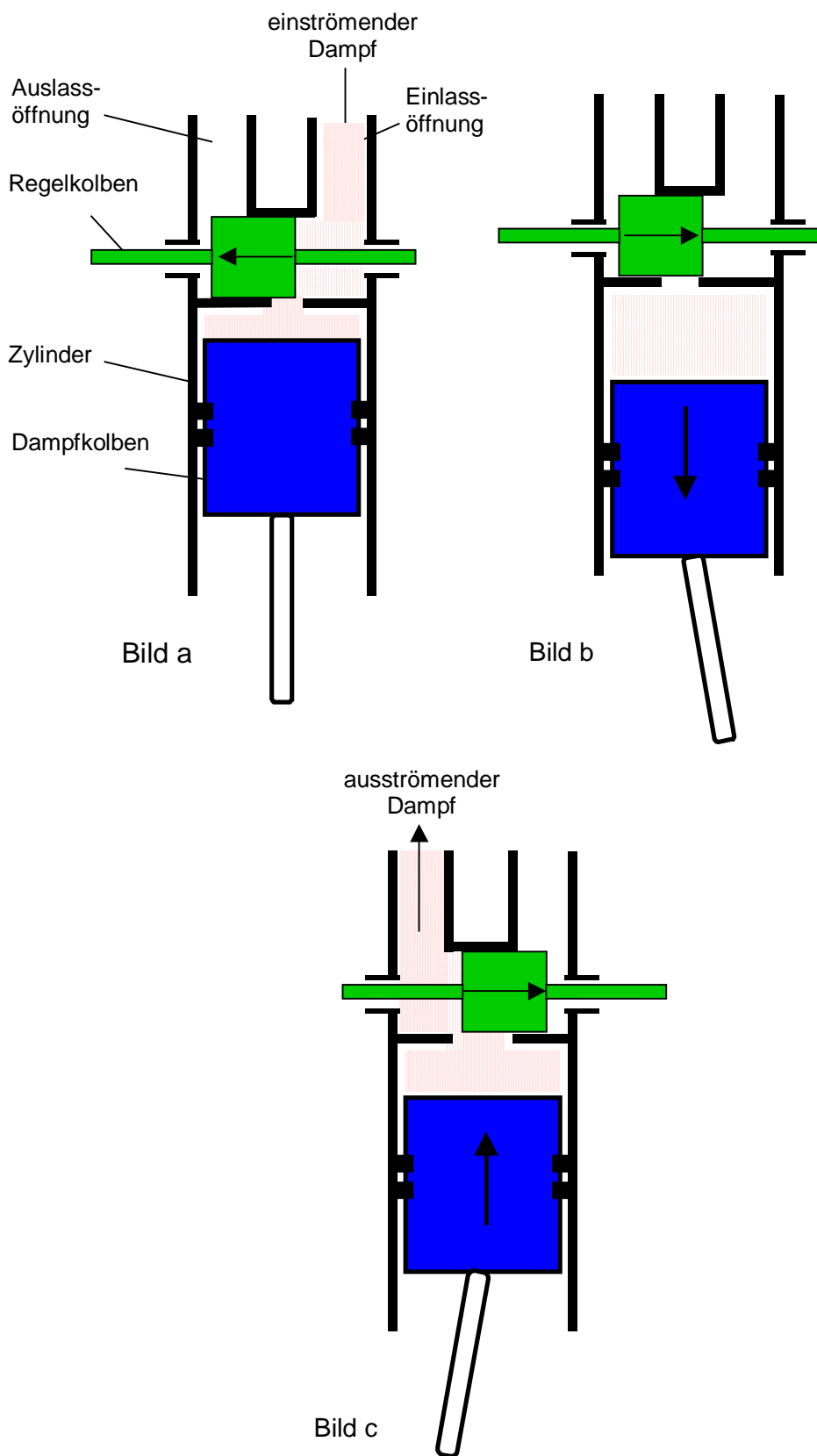


Abbildung 27: Prinzipschaubild eines Dampfkolbenmotors



## Allgemeines zur KWK mit Dampfkolbenmotor

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung kleinerer bis mittlerer Leistungen (ab <math>\sim 20 \text{ kW}_{\text{el}}</math> - <math>\sim 2000 \text{ kW}_{\text{el}}</math>)</li> <li>Beispiele sind: Wohnsiedlungen, Industrie (Trocknungsprozesse), Krankenhäuser</li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kohle</li> <li>Erdöl</li> <li>Biomasse, Müll</li> <li>Grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>sehr gutes Teillastverhalten</li> <li>Technologiereife</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>geringer elektrischer Anlagenwirkungsgrad</li> <li>viel Wartungsarbeiten</li> <li>lärmintensiv (Schalldämmung!!)</li> </ul>

In Tabelle 7 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße $\sim 500 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Biomasse gefeuert)	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	$\sim 20.000$
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,1 – 0,15
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{el}}$	[%]	6 – 20
Gesamtwirkungsgrad	[%]	$\sim 80 - 90$
Schadstoffemission (NOx)	-	brennstoffabhängig <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> liegen in der Größenordnung der Gasmotoren (ca. 50-500 mg/Nm<sup>3</sup>, je nach Leistung)

**Tabelle 7: Kenngrößen eines Prozesses mit Dampfkolbenmotor**

### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Ausführung

Der Dampfkolbenmotor kann zwischen einem und sechs Arbeitszylinder enthalten. Zu jedem Zylinder gehört auch ein Regelkolben, somit besitzt der Motor zwei Wellen, eine Regelwelle und eine Arbeitswelle. Im folgenden sollen nun wichtige Zusammenhänge in bezug auf den Dampfkolbenmotor beschrieben werden.

## Regelung

Die eintretende Dampfmenge kann über den Hub des Regelkolbens geregelt werden. An der Regelwelle wird über einen Exzenter mit Fliehkraftregler der Hub des Regelkolbens eingestellt. Die Reglerwelle kann geteilt sein, sodass bei Mehrkolbenmotoren die Möglichkeit besteht verschiedene Zylinder mit unterschiedlichen Dampflein- und Austrittszuständen zu betreiben.

## Dampfzustand

Der Dampfmotor kann sowohl mit Sattedampf als auch mit überhitztem Dampf arbeiten. Verwendet man jedoch überhitzten Dampf, so kann beim gleichen Motor um bis zu 60 % mehr elektrische Leistung gewonnen werden. Der Grund dafür liegt in der Nutzung des höheren Enthalpiegefälles des überhitzten Dampfes gegenüber Sattedampf.

Die Eintrittsdrücke des Dampfes können 6 bis 60 bar betragen.

Die Dampfmenge liegen je nach Bedarf zwischen 0,2 bis 20 t/h.

## Speisewasseraufbereitung

Gegenüber der Dampfturbine hat der Dampfkolbenmotor eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen. Dadurch ist eine einfachere Speisewasseraufbereitungsanlage möglich (Kosten !!).

## Betriebsverhalten

Bei Teillastbetrieb sinkt die produzierte Dampfmenge bei gleichbleibender Temperatur und gleichem Druck. Die abgegebene mechanische Energie und damit auch die elektrische Energie nimmt damit ab. Ein entscheidender Punkt ist jedoch, dass der größtmögliche Wirkungsgrad der Anlage nicht bei höchster elektrischer Leistung erreicht wird, sondern etwas darunter. Dies bringt einen Vorteil des Dampfkolbenmotors, wenn dieser im Teillastbetrieb arbeitet. Der elektrische Teillastwirkungsgrad beträgt immerhin bei Halblast 90 % des höchsten elektrischen Wirkungsgrades.

## Wartung / Instandhaltung

- tägliche Kontrolle des Zylinderöls ( Dauer ~1/2 Stunde)
- Kondensatproben in unregelmäßigen Abständen zur Überprüfung des Ölgehaltes (Dauer ~1/2 Stunde)
- Nach etwa 8000 Stunden: - Ölwechsel im Kurbelgehäuse des Motors  
- Komponenten des Dampfmotors müssen überprüft werden

- Austausch von Kolben- und Dichtungsringen je nach Zustand
- Austausch des Kolbens alle 3-5 Jahre
- regelmäßige Überprüfung der Filteranlagen

Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass ein Dampfkolbenmotor, bei ausreichender und richtig durchgeführter Wartung und Instandhaltung eine Lebensdauer von mehr als 200.000 Betriebsstunden erreicht.

## Ökologische Aspekte

Das im Dampfkolbenmotor anfallende Öl kann in der Feuerung mitverbrannt oder muss getrennt entsorgt werden.

Bei der Verdampfung von Wasser bleiben die im Wasser enthaltenen Salze im Kessel zurück. Um einen hohen Salzgehalt zu vermeiden (Kesselsteinbildung !) wird kontinuierlich Wasser entsalzt (1-5 % der umgewälzten Speisewassermenge).

Weiters ist eine Abfuhr des Schlammes, gebildet durch Materialabrieb und den im Wasser noch vorhandenen Korbaten, notwendig (manuell oder automatisch).

Bei der Einleitung der Abwässer in ein Fließgewässer bzw. in die Kanalisation sind entsprechende Richtlinien einzuhalten.

## Schwachstellen

Durch den hohen Lärmpegel (bis 95 dBA) ist eine Anwendung dieser Technik ohne entsprechende Schallschutzmaßnahmen in Wohnhäusern etc. nicht möglich.

## Entwicklungsstand

Da die Lebensdauer einer solchen Anlage stark von den Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten des Personals abhängt, versucht man in Zukunft diese Arbeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

Ein entscheidender Ansatz dazu ist die Entwicklung von Kolbenmaterialien, die keine Schmierung benötigen. Damit würde die Anlage einerseits bedienerfreundlicher werden und andererseits könnte die Lebensdauer generell gehoben werden. Weiters würden auch weniger Schmiermittelabfälle anfallen, wodurch auch die Umwelt entlastet wird.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Marktreife <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	gering <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	mittel <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.5.2 KWK auf Basis eines ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) mit Biomasse

### Unterschied zum Dampfturbinenprozess

Der Unterschied zum Dampfturbinenprozess liegt darin, dass anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsfluid (Kohlenwasserstoffe wie Iso-Pentan, Iso Oktan, Toluol oder Silikonöl) eingesetzt wird. Da dieses Arbeitsfluid bei geringeren Temperaturen als Wasser verdampft, kann der Prozess besser dem Brennstoff Biomasse mit seinen niedrigen Verbrennungstemperaturen angepasst werden.

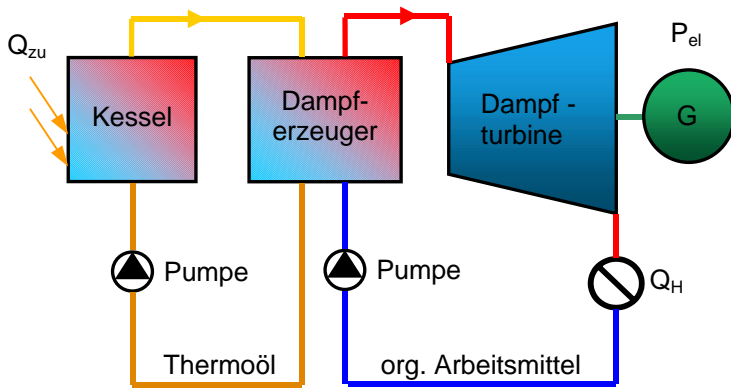
Damit der Alterungsprozess des Arbeitsmediums verzögert wird, dürfen die zulässigen Wandfilm Temperaturen nicht überschritten werden. Aus diesem Grund ist ein Zwischenkreislauf mit Thermoöl, der eine bessere Temperaturregelung ermöglicht, nötig.

Der Thermoölkreislauf ermöglicht weiters einen drucklosen Betrieb bei hohen Temperaturen, wodurch kein Dampfkesselwärter erforderlich ist.

### Funktionsweise

Das durch die Verbrennung im Biomasse-Heizkessel erzeugte Rauchgas gibt die Wärme an einen Thermoöl-Kreislauf ab. Über diesen wird die Wärme einem organischen Arbeitsmittel, das dadurch verdampft, zugeführt. Der Dampf wird in einer Turbine entspannt und die so erhaltene mechanische Arbeit wird an einen Generator abgegeben, wo sie in elektrische Energie umgewandelt wird. Der entspannte Dampf gelangt in einen Kondensator, wo die abgeführte Wärme auf einem Temperaturniveau zur Verfügung steht, welches den Betrieb eines Heißwassernetzes zu Fern- bzw. Prozesswärmebereitstellung ermöglicht. Danach wird das Kondensat durch die Pumpe auf Betriebsdruck gebracht und wiederum dem Verdampfer zugeführt.

Zur Erhöhung der elektrischen Leistung kann der aus der Turbine austretende Dampf auch zuerst einen Rekuperator (nicht eingezeichnet) durchströmen, bevor er in den Kondensator gelangt.



- $P_{el}$  elektrische Leistung
- $Q_H$  Wärmeverbraucher
- $Q_{zu}$  zugeführte Wärmemenge
- org. Arbeitsfluid
- Dampf
- Welle
- G Generator

Abbildung 28: ORC Prozess

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung mittlerer Leistungen (~300 kW<sub>el</sub> und größer)</li> <li>Beispiele sind: Holzindustrie, Industrie (Trocknungsprozesse), Wohnsiedlungen</li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse</li> <li>Grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>sehr gutes Teillastverhalten</li> <li>Technologiereife</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zwischenkreis mit Thermoöl erforderlich (Kosten !)</li> <li>noch wenig Erfahrung von ORC Anlagen mit Biomassefeuerungen</li> <li>relativ hohe Investitionskosten</li> </ul>

In Tabelle 8 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~500 kW <sub>el</sub> (Biomasse gefeuert)	Einheit	Wert

spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	~ 32.000
Silikonöl	[ATS/L]	~ 300
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	10 – 20
Gesamtwirkungsgrad	[%]	bis 85
Schadstoffemission (NO <sub>x</sub> )	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	brennstoffabhängig ca. 250-400

**Tabelle 8: Kenngrößen eines ORC-Prozesses**

## Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Ausführung

ORC-Anlagen werden als komplette Module angeboten. Die elektrische Leistung eines ORC-Modules beträgt zwischen 200 und 1500 kW<sub>el</sub>. Durch eine Parallelschaltung von Modulen lassen sich höhere Anlagenleistungen realisieren.

Der Hauptteil der Wärmezufuhr erfolgt in der Brennkammer, die weitere Nutzung der Wärme des Abgases kann genutzt werden, indem es in einem Economiser Wärme abgibt. Die so rückgewonnene Wärme kann ebenfalls für Fern- bzw. Prozesswärme verwendet werden, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht. Weiters erlaubt die Rauchgasnutzung eine niedrigere Betriebstemperatur des Kondensators, wenn im Economiser die Wärmezufuhr auf die gewünschte Endtemperatur für die Prozesswärme erfolgt, sodass auch der elektrische Wirkungsgrad verbessert wird.

Als organisches Arbeitsmittel wird meist Silikonöl in einem geschlossenen Kreislauf eingesetzt, welches nicht toxisch und auch kein Treibhausgas ist.



**Abbildung 29: ORC-Anlage in Admont (Quelle Bios Bioenergiesysteme)**

## Regelung

Die Regelung des ORC-Prozesses kann über die Brennstoffzufuhr im Kessel erfolgen.

## Betriebszustand

Verdampfungsdruck des Arbeitsmittels: 10 bar  
Rauchgastemperatur aus dem Kessel: 300 °C

## Wartung / Instandhaltung

Grundsätzlich zeichnen sich ORC-Anlagen durch geringe Wartungsarbeiten aus. Die Wartungsarbeiten belaufen sich auf ca. 4 Stunden pro Woche.

Das Arbeitsmittel (meist Silikonöl) ist nach etwa 20 Jahren zu wechseln.

## Ökologische Aspekte

Das häufig eingesetzte Silikonöl besitzt kein Ozonabbaupotential, ist leicht entflammbar, aber nicht explosiv. Durch den niedrigen Flammpunkt (34°C) müssen Leckverluste des Arbeitsmediums weitgehend vermieden werden.

Durch die hohe Lebensdauer des Fluids (bis 20 Jahre) ist kein Austausch erforderlich.

## Voraussetzung für eine wirtschaftliche Betreibung auf Biomassebasis

- Hohe Anzahl an Jahresvollastbetriebsstunden (> 4000 h)
  - Durch richtige Anlagenauslegung erreichbar
- Hoher erreichbarer Gesamtwirkungsgrad
  - Durch wärmeorientierte Auslegung erreichbar
- Nutzung günstiger Bennisstoffsportimente
  - z. B. Sägenebenprodukte, Produktionsabfälle

## Schwachstellen

Der niedrige Prozesstemperatur, die sich durch die Biomassenutzung ergibt und auch durch die thermische Stabilität des Arbeitsmittels und des Thermoöls nach oben begrenzt ist, erlaubt nur relativ niedrige Wirkungsgrade.

## Entwicklungsstand

Im Bereich der Geothermie sind schon viele ORC-Anlagen im Einsatz. Daher stellt der Prozess eine reife Technologie dar.

In der Holzindustrie ist in Admont (Steiermark) 1999 die erste biomassegefeuerte ORC-Anlage Österreichs in Betrieb gegangen. Weitere Anlagen sollen gebaut werden.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst. (Quelle: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien)

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Demonstrationsstadium (bis Marktreife) <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

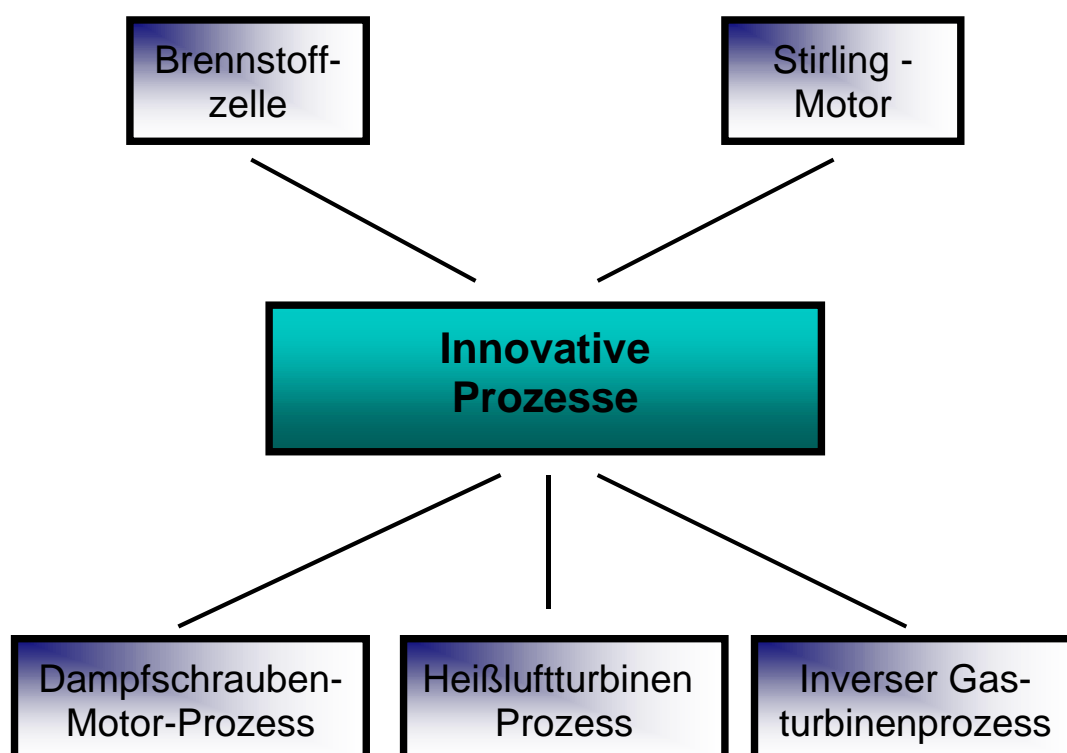
<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering



## 2.6 Innovative Prozesse

Jene Prozesse werden als innovativ bezeichnet, deren Technologie noch nicht soweit ausgereift ist, dass sie in der Praxis einsetzbar sind.

Diese Prozesse befinden sich noch größtenteils im Entwicklungsstadium. Die folgende Abbildung zeigt verschiedene Möglichkeiten der KWK mit innovativen Prozessen.



**Abbildung 30: KWK mit alternativen Prozessen**

Diese Technologien befinden sich noch größtenteils im Entwicklungsstadium bzw. sind noch nicht genügend erprobt.

Im folgenden werden nun die Brennstoffzellentechnologie, der Stirlingmotor, der inverse Gasturbinenprozess, der Heißluftturbinenprozess, sowie der Prozess mittels Dampfschraubenmotor in Verbindung mit KWK näher beschrieben.

## 2.6.1 KWK mit Brennstoffzellentechnologie

Die Brennstoffzelle ist eine der Möglichkeiten zur dezentralen Strom- und Wärmeproduktion mit sehr hohem Wirkungsgrad und sehr niedrigen Emissionen.

### Funktionsweise

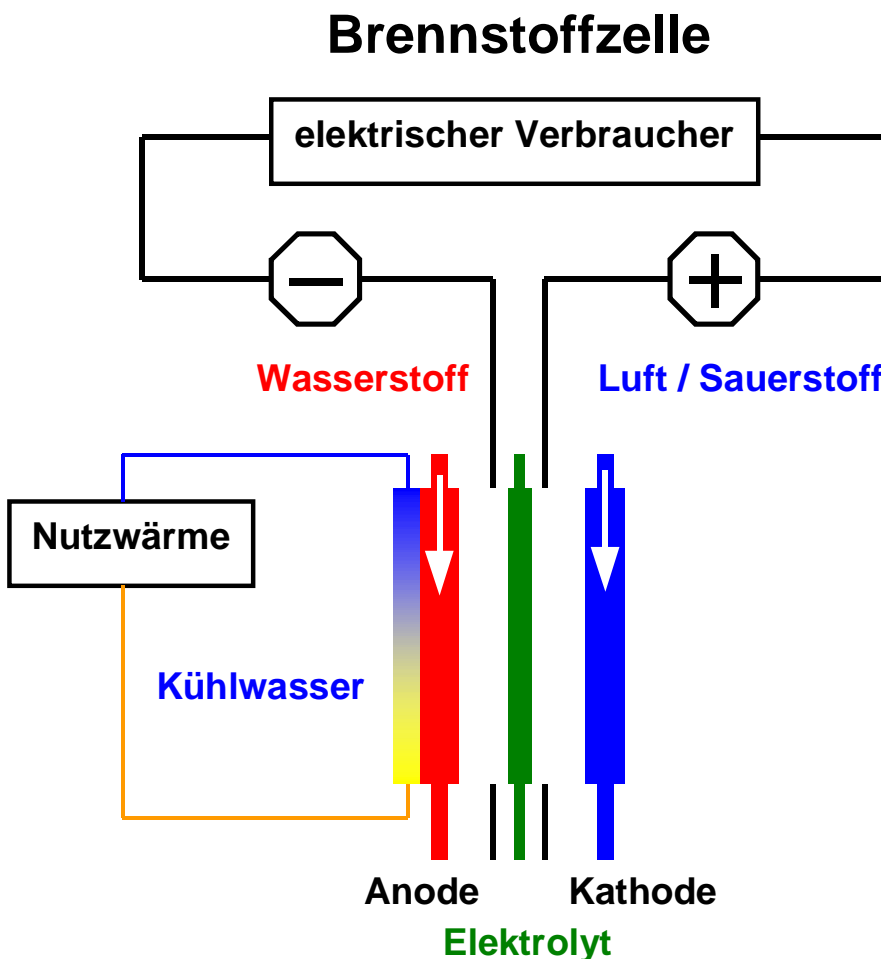
Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle entspricht der Umkehrung der Elektrolyse von Wasser. Bei der Wasserelektrolyse wird durch Anlegen einer Spannung an zwei Elektroden das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten.

Werden umgekehrt die Elektroden mit Wasserstoff (bzw. wasserstoffreichem Gas) und mit Sauerstoff (bzw. Luft) umspült, so wird durch die stark exotherme Knallgasreaktion (Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser) eine Gleichspannung messbar und Wärme frei. Für ein kontinuierliches Aufrechterhalten des Prozesses muss eine gleichmäßige Zufuhr der Prozessgase gewährleistet sein.

Klassische Schadstoffe wie beispielsweise CO und NO<sub>x</sub> werden dabei nicht gebildet.

Wenn mit Erdgas (Methan, CH<sub>4</sub>) ist die Vorschaltung einer Zwischenstufe zur Aufspaltung des Methan in Wasserstoff und Kohlendioxid notwendig (Steam Reforming).

### Aufbau einer Brennstoffzelle



**Abbildung 31: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle**

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Einsatz der Brennstoffzellen in der dezentralen KWK-Versorgung entspricht dem von Verbrennungsmotoren in Blockheizkraftwerken. Brennstoffzellen decken die Grundlast, während Öl- oder Gaskessel die nur zeitlich beschränkt auftretende Spitzenlast übernehmen.</li> </ul>
erforderliche Betriebsstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserstoff</li> <li>• Sauerstoff / Luft</li> <li>• Elektrolyt</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrem niedrige Schadstoffemissionen, die ohne jegliche Sekundärmaßnahmen erreicht werden.</li> <li>• Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Prozess nicht den Grenzen des theoretischen Idealprozesses von Carnot unterliegt. Somit besteht für Brennstoffzellen ein großes Potential, Strom und Wärme mit hohem Wirkungsgrad zu produzieren.</li> <li>• Die Effizienz des Prozesses ist nahezu unabhängig von der Systemgröße.</li> <li>• Hohe Teillastwirkungsgrade</li> <li>• Einfacher, modularer Aufbau</li> <li>• Geringer Wartungsaufwand</li> <li>• Geringe Geräusche</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr hohe Anschaffungskosten (BHKW-Anlage ca. 4000 US-\$/kW, Quelle Fa. ONSI).</li> <li>• Noch keine ausgereifte Technologie</li> <li>• Ein weiteres Problem, das aber nicht so gravierend ist, stellt die Startzeit der Anlagen dar, die noch bei einigen Stunden aus dem „kalten Zustand“ liegt.</li> </ul>

In Tabelle 9 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~100 kW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	~ 42.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	niedrig
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	25 - 40
Gesamtwirkungsgrad	[%]	bis 90
Schadstoffemission (NOx) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 5

<sup>1)</sup> bezogen auf 5% O<sub>2</sub> im Abgas

### Tabelle 9: Kenngrößen einer Brennstoffzellenanlage

## Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

## Ausführung / Einsatz

Anhand der Betriebstemperaturen in Tabelle 10 kann man erkennen, dass der SOFC-Typ mehr für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme dient, während hingegen der PEM-Typ durchaus zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (Heizvorlauftemperatur ~90 °C) eingesetzt werden kann.

Weiters sollen in Zukunft Brennstoffzellensysteme zum Einsatz kommen, die einen flexiblen Einsatz zwischen 100 % Strom und 100 % Wärme ermöglichen. Die Installation eines Spitzenkessels wird dadurch überflüssig.

Typ	Betriebstemperatur	Elektrolyt
<b>PEM</b> (Polymer Elektrolyt Membrane)	ca. 80-100 °C	fest
<b>PAFC</b> (Phosphoric Acid Fuel Cell)	ca. 200°C	wässrig
<b>MCFC</b> (Molten Carbonate Fuel Cell)	ca. 650°C	flüssig
<b>SOFC</b> (Solid Oxid Fuel Cell)	ca. 1000°C	fest

Tabelle 10: Typen von Brennstoffzellen

## Bild einer Brennstoffzellenanlage

Es handelt sich hier um eine Brennstoffzellenanlage mit einer elektrischen Leistung von ca. 250 kW.

Dieser Anlagentyp wird auch als „direct fuel cell power plant“ bezeichnet.



**Abbildung 32: Brennstoffzellenanlage (Energy Research Corporation) mit einer elektrischen Leistung von 250 kW (Quelle: Fuel Cell 2000)**

### Wartung / Instandhaltung :

Derzeit sind noch keine Angaben über die Wartung möglich da sich der Großteil der Anlagen noch im Pilotstadium befindet.

### Ökologische Aspekte

Da Wasserstoff und teilweise reiner Sauerstoff verwendet wird, ist auf die Dichtheit der Leitungen vor allem wegen der Brandgefahr zu achten. Grundsätzlich stellen die beiden Komponenten keine Umweltbelastung dar.

Ein weiterer entscheidender Vorteil liegt in der geringen Emission von Schadstoffen.

Bei der Verwendung von stark säurehaltigen Elektrolyten sind entsprechende Materialien einzusetzen, die gegen die Säure beständig sind, und somit ein Austreten verhindern. Ein weiterer entscheidender Punkt sind die Dichtungen, die ein Austreten der Säure zur Gänze verhindern sollen.

### Entwicklungsstand

Derzeit befinden sich die Brennstoffzellen noch im Pilotstadium. Der entscheidende Grund, warum sich diese Technologie noch nicht durchgesetzt hat liegt in den hohen Investitionskosten, die zum Teil durch die sehr großen spezifischen Baugrößen bestimmt sind. Ausgehend von den USA haben sich die F&E-Aktivitäten auch in Europa verstärkt. Die drei führenden Firmen (Sulzer Hexis AG, HGC, und Vaillant) kündigen kommerzielle Kleinserien bis zu den Jahren 2002/2003 an.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Pilotstadium bis Demonstrationsstadium <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel bis hoch <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	mittel <sup>2)</sup>

1) Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

2) 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## laufende Projekte

(Quelle Austria Ferngas Gesellschaft m.b.H., EVA)

**Tabelle 11: Projekte mit Brennstoffzellen**

<b>PAFC</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldversuche mit 200 Anlagen von 50 KW bis 11 MW</li> <li>• über 2 Mio. Betriebsstunden</li> <li>• zuverlässiges Konzept</li> </ul>
<b>MCFC / SOFC</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• einige Anlagen in Feldversuchen (bis 2MW)</li> <li>• Werkstoffprobleme</li> <li>• höchstes Entwicklungspotential</li> </ul>
<b>PEM</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• beginnende Feldversuche stationärer Anlagen</li> <li>• besondere Eignung für mobile Zwecke</li> <li>• erhebliches Kostenreduktionspotential</li> </ul>

## 2.6.2 Stirlingmotor-Prozess

### Funktionsweise

Das durch die Verbrennung erzeugte Rauchgas strömt durch einen Erhitzer-Wärmetauscher und gibt dabei Wärme an das Arbeitsgas im Motor ab. Als Arbeitsmedium kommen Luft, Stickstoff, Helium oder Wasserstoff in Frage. Durch einen zusätzlichen Wärmetauscher kann die Restwärme des Abgases für die Bereitstellung von Wärme genutzt werden. Die Kühlung im Kühler-Wärmetauscher erfolgt durch den Rücklauf des Wärmebereitstellungsnetzes. Die im Motor abgeführte Wärme kann damit weiter genutzt werden (Heizzwecke, ...).

Die Arbeitsweise des Stirling-Motors wird anschließend genauer erklärt.

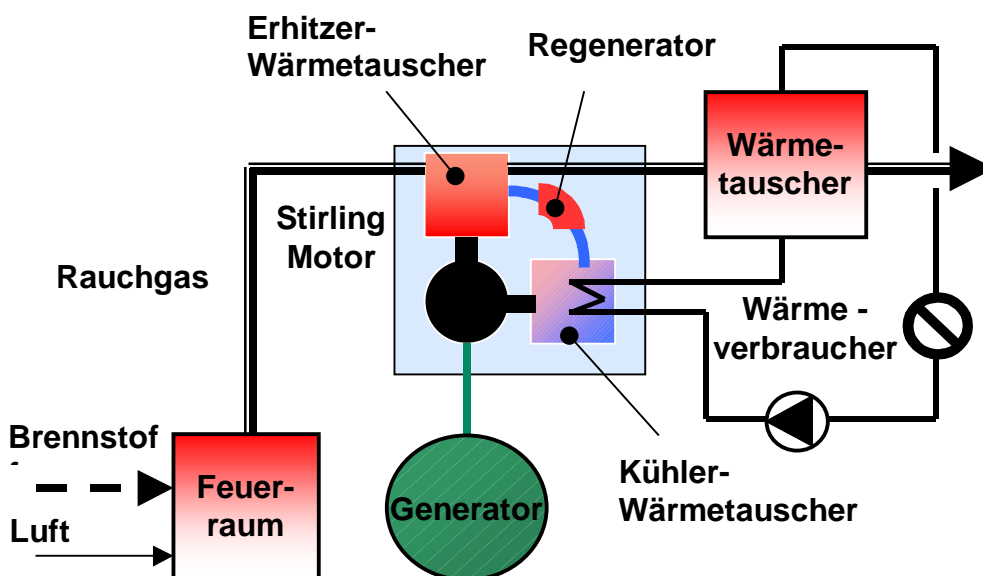


Abbildung 33: Aufbau einer KWK-Anlage mit Stirlingmotor

## Arbeitsweise des Stirlingmotors

Beim Stirling – Motor bewegt sich das Arbeitsmedium in einem geschlossenen System zwischen zwei Zylindern. Im Arbeitszylinder wird Wärme zur Arbeitsleistung zugeführt, im Kompressionszylinder wird Wärme abgeführt, um die Kompressionsarbeit zu verringern. Beim Verschieben des Arbeitsmediums vom Arbeits- zum Kompressionszylinder wird die Restwärme im Regenerator gespeichert, beim Rücktransport des verdichteten Mediums in den Arbeitszylinder kann diese gespeicherte Wärme wieder genutzt werden.

Im einzelnen besteht ein Arbeitstakt aus folgenden Einzelvorgängen:

### 1-2: Isochorer Heiztakt:

Durch die Abwärtsbewegung des Kompressionskolben wird das Gas isochor durch den Regenerator in den überhitzten Arbeitszylinder gedrückt, dessen Kolben sich nach rechts bewegt. Gleichzeitig wird die im Regenerator gespeicherte Wärme (siehe isochorer Kühlтакт) an das Arbeitsmedium abgegeben. Durch die Erhitzung im Arbeitszylinder steigt die Temperatur und der Druck an. Es erfolgt eine Verschiebung des Arbeitsgases vom kalten in den heißen Zylinder.

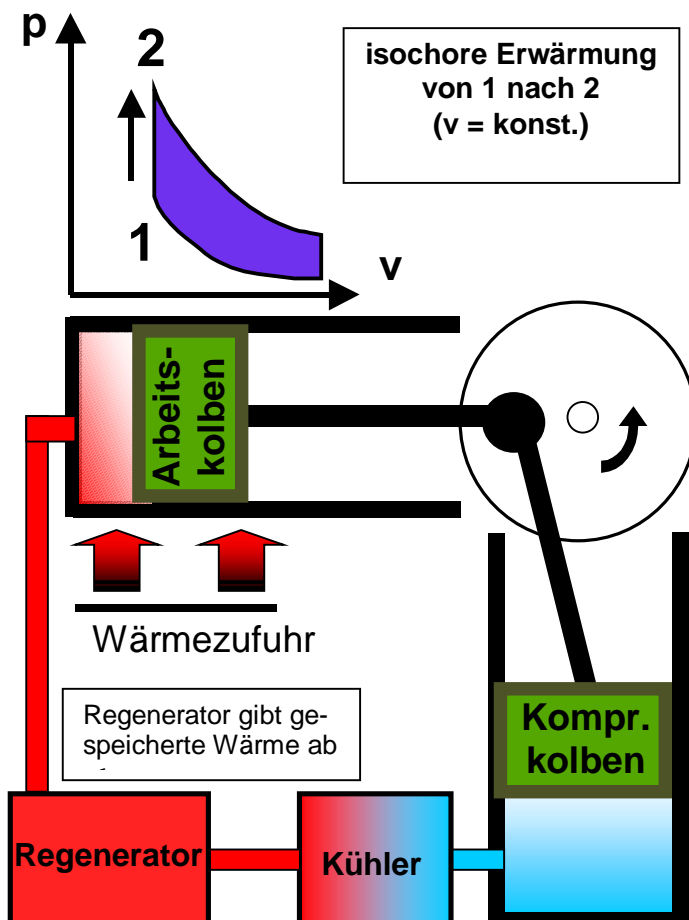


Abbildung 34: Funktionsweise des Stirlingmotors: isochore Wärmezufuhr



**2-3: Isothermer Expansionstakt:**

Durch die weitere Wärmezufuhr dehnt sich das Arbeitsgas aus und drückt den Arbeitskolben nach rechts. Mechanische Leistung wird auf die Kolbenstange übertragen. Der Kompressionskolben bewegt sich etwas zeitversetzt nach oben.

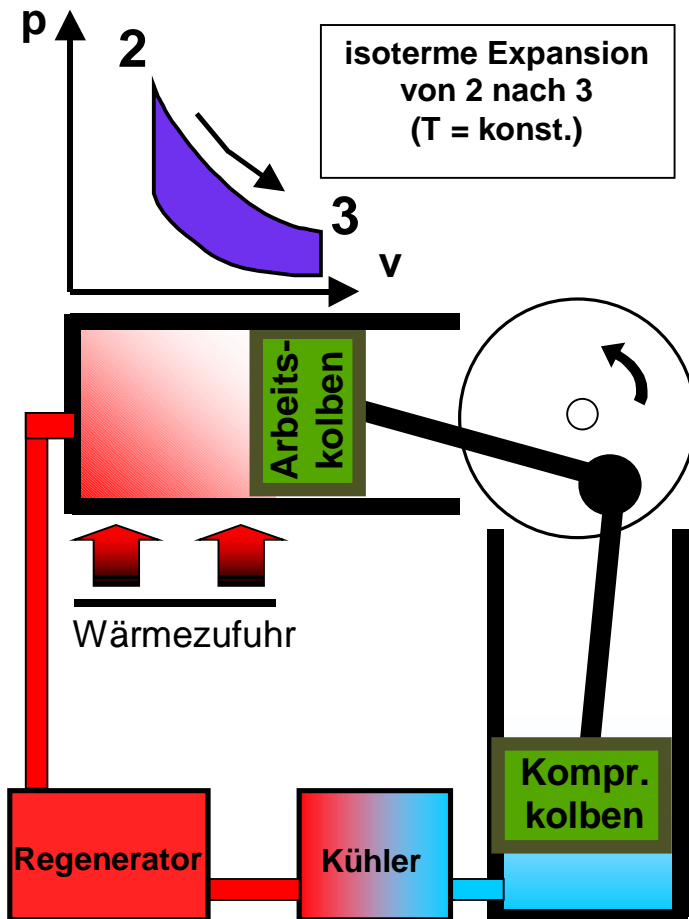


Abbildung 35: Funktionsweise des Stirlingmotors: Isotherme Expansion

**3-4: Isochorer Kühlтакт:**

Nach Erreichen des unteren Totpunktes bewegt sich der Arbeitskolben nach links und drückt somit das Arbeitsmedium isochor durch den Regenerator, der Wärme aufnimmt, und durch den Kühler in den Kompressionszylinder, der sich nach oben bewegt.

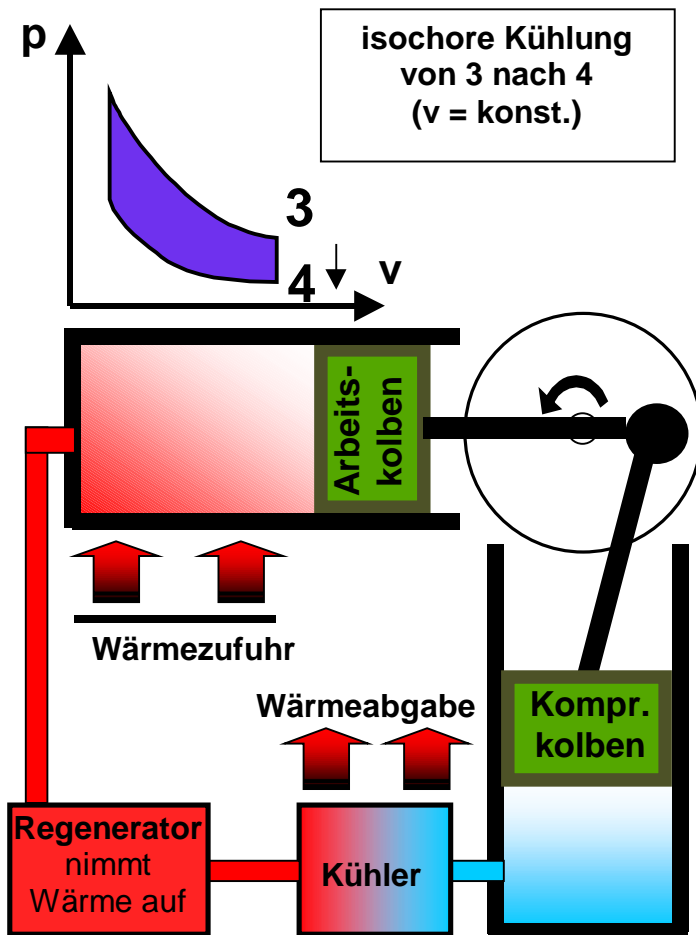


Abbildung 36: Funktionsweise des Stirlingmotors: Isochorer Kühlтакт

**4-1: Isotherme Kompression (ohne Bild) :**

Das Arbeitsmedium wird im Kompressionszylinder gekühlt, sein Volumen nimmt ab, der Kompressionskolben bewegt sich nach unten. Der Arbeitskolben bewegt sich nach links und verdichtet dadurch das Arbeitsmedium.

Erreicht der Arbeitskolben seinen oberen Totpunkt beginnt der Vorgang wieder von neuem.

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung geringerer Leistungen (10 - 45 kW<sub>el</sub>)</li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kohle</li> <li>Erdöl</li> <li>Biomasse</li> <li>Grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>wartungsarm</li> <li>geräuscharm</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhitzer-Wärmetauscher ist aufgrund der hohen Temperatur eine Problemstelle</li> <li>Dichtungsproblematik</li> <li>schlechtes Teillastverhalten</li> <li>geringe Anlagengröße (nur bis ~ 50 kW<sub>el</sub> [in Zukunft bis 150 kW<sub>el</sub>] möglich)</li> </ul>

In Tabelle 12 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße 10 - 40 kW <sub>el</sub> (Biomasse gefeuert)	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	~ 33.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,05 – 0,15
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	21 - 28
Gesamtwirkungsgrad	[%]	63 - 86
Schadstoffemission (NO <sub>x</sub> )	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	ca. 10-15

**Tabelle 12: Kenngrößen eines Stirlingmotorprozesses**

## Beste Betriebsweise

Wärmegeführt

## Ausführung

Aufgrund der Anordnung der Kolben unterscheidet man zwei wichtige Bauarten.

- $\alpha$ -Typ: Die Kolben stehen in einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander
- $\beta$ -Typ: Die beiden Kolben (Arbeits- und Kompressionskolben) sind im selben Zylinder übereinander angeordnet. Die notwendige Phasenverschiebung der beiden Kolben wird dabei durch ein besonderes Gestänge erreicht.

## Bild eines Stirlingmotors

Die folgende Abbildung zeigt einen Stirlingmotor mit einfach wirkender  $90^\circ$ -V2-Maschine mit einer Wellenleistung zwischen 3 kW und 10 kW.



Abbildung 37: Stirlingmotor (Quelle: zsw)

## Regelung

Die Regelung des Stirlingmotors erfolgt durch die Anpassung der Temperatur im Erhitzer-Wärmetauscher.

## Betriebszustand

Arbeitsdruck: zwischen 33 bar und 150 bar

Rauchgastemperatur am Erhitzer-Wärmetauscher: zwischen 600 °C und 1400 °C

## Wartung / Instandhaltung

Als Wartungsintervalle werden zwischen 5.000 und 7.000 Betriebsstunden erwartet.

Nach 25.000 Betriebsstunden sollte eine größere Revision durchgeführt werden.

## Ökologische Aspekte

Stirlingmotoren weisen eine um 90% günstigere Lärmentwicklung auf als vergleichbare Dieselmotoren.

Hinsichtlich des eingesetzten Mediums stellen Luft und Helium keine Umweltbelastung dar.

Bei der Verwendung von Wasserstoff müssen spezielle Vorkehrungen getroffen werden.

## Schwachstellen

Die Temperatur kann aufgrund der Werkstoffeigenschaften des Erhitzerwärmetauschers nicht beliebig gesteigert werden.

Ein weiteres Problem stellt die Abdichtung des unter Druck stehenden Schadraumes (Raum zwischen den beiden Kolben) dar.

## Entwicklungsstand

Die Stirlingmotoren gewinnen immer mehr an Bedeutung in der Anwendung als BHKW. Grundlage dafür ist eine intensive Weiterentwicklung der Aggregate.

Durch die Erhöhung des Arbeitsdruckes sowie durch Reduzierung der Massen der bewegten Teile kann die Leistung erheblich gesteigert werden.

Die KWK mit einem Stirlingmotor steht kurz vor der Marktreife.

Intensive Forschung wird unter anderem im Forschungsinstitut Joanneum Research in Graz betrieben. Hier werden vor allem Untersuchungen mit einer Biomassefeuerung durchgeführt.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst. (Quelle: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien)

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Pilotstadium <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	hoch <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.6.3 Inverser Gasturbinenprozess

### Funktionsweise

Beim konventionellen Gasturbinenprozess wird Luft verdichtet, Brennstoff zugeführt und verbrannt, und das Rauchgas anschließend in der Turbine von hohem Druck auf Umgebungsdruck entspannt.

Beim inversen Gasturbinenprozess findet eine atmosphärische Verbrennung statt, das Rauchgas wird in der Turbine von Umgebungsdruck in den Unterdruckbereich entspannt und anschließend in einem Verdichter auf Umgebungsdruck wieder verdichtet. Der Vorteil dieses Prozesses liegt in der atmosphärischen Verbrennung, die bei Verwendung von Biomasse die aufwendige Brennstoffzufuhr in einen Druckkessel vermeidet.

Die im Rauchgas nach der Turbine vorhandene Wärme wird zur Erzeugung von Dampf oder Heißwasser genutzt und steht damit anderen Wärmeverbraucher zur Verfügung. Gleichzeitig erspart man sich durch Kühlen des Rauchgases Kompressionsarbeit. Durch die notwendige Verdichtung auf Atmosphärendruck wird das Rauchgas erwärmt, diese Wärme kann zusätzlich zur Luftvorwärmung vor der Brennkammer (nicht eingezeichnet) verwendet werden.

Zur elektrischen Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung ist es möglich, mit Hilfe des Turbinenabgases Dampf zu erzeugen, der wieder in die Turbine eingespritzt wird. Dies geht natürlich auf Kosten der Wärmeleistung, erhöht aber die elektrische Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad.

Als weitere Variante wurde ein GuD-Prozess in der Form eines der inversen Gasturbine nachgeschalteten Dampfturbinenprozess untersucht. Dies führt zur Steigerung der elektrischen Leistung und des elektrischen Wirkungsgrades.

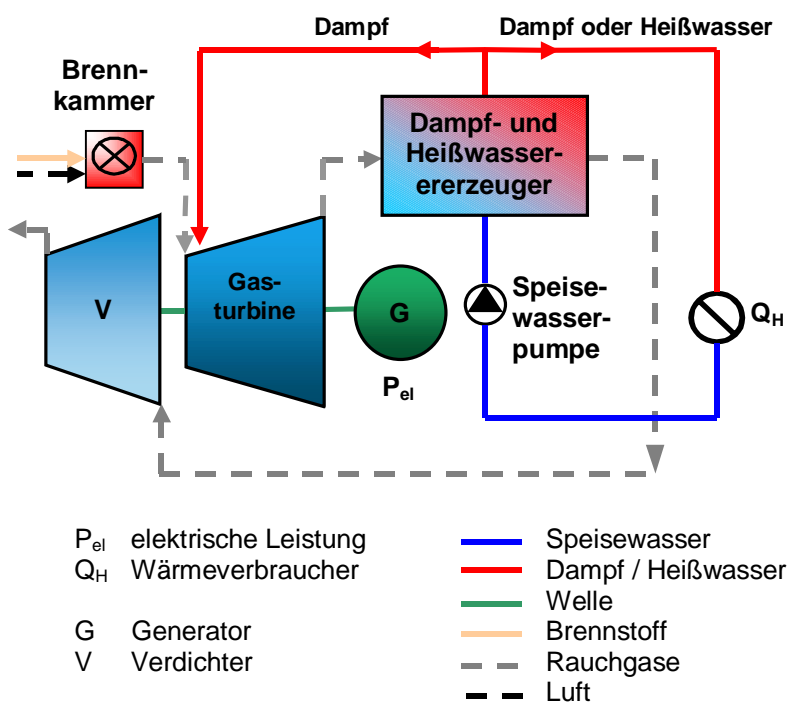


Abbildung 38: Inverser Gasturbinenprozess mit Wärmerückgewinnung

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zur Erzeugung elektrischer Leistung und Wärme mit Biomasse ab ca. 1 MW<sub>el</sub></li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>gedacht für Biomasse</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>guter elektrischer Wirkungsgrad</li> <li>keine Überdrücke vorhanden</li> <li>Standardkomponenten können verwendet werden</li> <li>Auch feuchte Biomasse kann verwendet werden.</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>noch keine Technologiereife</li> <li>Anlagenkomplexität</li> <li>hohe spez. Investitionskosten, da die Turbomaschinen durch den Vakuum-Betrieb sehr groß sind.</li> <li>Rauchgasreinigung mit Zyklon vor der Gasturbine ist notwendig</li> </ul>

In Tabelle 13 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~500 - 1500 kW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	ca. 50.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	nicht bekannt
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	bis 22
Gesamtwirkungsgrad	[%]	bis 75
Schadstoffemission (NOx)	-	Noch keine Daten

**Tabelle 13: Kenngrößen eines inversen Gasturbinenprozesses**

### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

### Betriebszustand

Mittlerer Leistung (~1 MW<sub>el</sub> und größer)

Turbineneintrittstemperatur: 600 – 800°C  
 Unterdruckbereich: 0,30 bar – 0,39 bar

## Regelung

Durch die Möglichkeit der Dampfeinspritzung in die Turbine ist eine Verschiebung zwischen Wärme- und Stromleistung möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist die Variation der Brennstoffmenge, die in der Brennkammer verbrannt wird.

## Wartung / Instandhaltung

Es liegen hier noch keine Erfahrungen vor. Bei der Verwendung von Standardkomponenten dürften jedoch keine all zu großen Probleme auftreten.

## Ökologische Aspekte

Da dieser Prozess für Biomasse gedacht ist, treten die mit der Biomasse-Verbrennung verbundenen geringen Emissionen auf. Biomasse ist CO<sub>2</sub>-neutral und trägt damit nicht zum Treibhauseffekt bei.

## Entwicklungsstand / Aussichten

Das Konzept der KWK mit inversem Gasturbinenprozess wurde an der Technischen Universität Graz am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik entwickelt. In einer vom Land Steiermark geförderten Studie wurden die Kosten einer solchen Anlage untersucht und Möglichkeiten zum Bau einer Pilotanlage gesucht.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Konzeptstadium <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	gering <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering



### 2.6.4 Heißluftturbinenprozess (indirekter Gasturbinenprozess)

Anlagen dieser Art wurden früher als Heißluftturbinenprozess in der Schweiz (Ackeret-Keller) und Deutschland (Karl Bammert). Sie konnten sich aber auf die Dauer als Großanlage in den Betriebskosten gegenüber der Dampfanlage nicht durchsetzen. Für kleinere Gegendruckanlagen ist das Konzept als Variante wohl interessant.

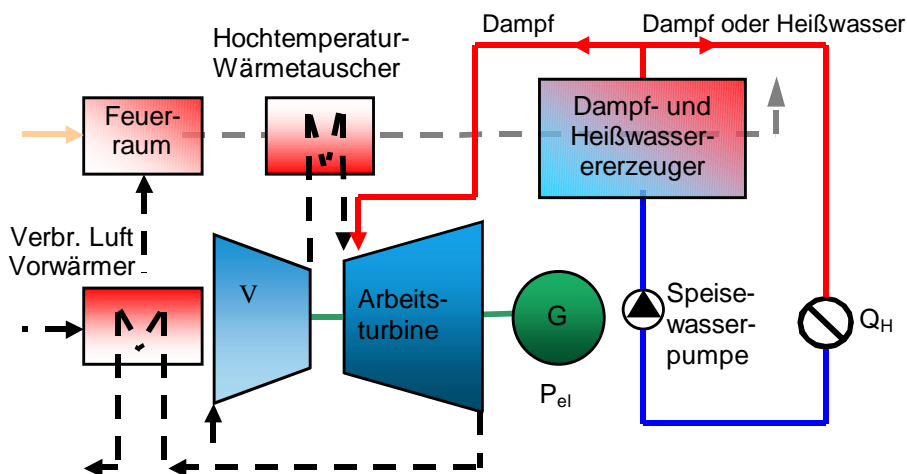
#### Funktionsweise

Beim konventionellen Gasturbinenprozess wird das Rauchgas in der Turbine entspannt. Beim indirekten Gasturbinenprozess wird in der Turbine Luft anstelle von Rauchgas entspannt, die Wärme wird in einem Wärmetauscher vom Rauchgas auf die Prozessluft übertragen.

Jede Art von Brennstoff kann in einem Kessel atmosphärisch verbrannt werden. In einem Hochtemperatur Wärmetauscher gibt das Rauchgas die Wärme an die vom Verdichter komprimierte Arbeitsluft ab. Die erwärmte Arbeitsluft durchströmt die Turbine und verrichtet dabei mechanische Arbeit. Die austretende entspannte Luft durchströmt einen Luftvorwärmer, der die Verbrennungsluft vorwärmt. Die im Rauchgas nach dem Wärmetauscher verbleibende Restwärme kann noch zur Erzeugung von Dampf oder Heißwasser genutzt werden und steht anderen Wärmeverbrauchern zur Verfügung.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Dampfeinspritzung in die Turbine. Hierbei wird ein Teil des erzeugten Dampfes zur Erhöhung der elektrischen Leistung, und Verminderung der Wärmeleistung in die Arbeitsturbine eingespritzt.

#### Aufbau einer KWK-Anlage mit indirektem Gasturbinenprozess



- |                                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| P <sub>el</sub> elektrische Leistung | — Speisewasser       |
| Q <sub>H</sub> Wärmeverbraucher      | — Dampf / Heißwasser |
|                                      | — Welle              |
| G Generator                          | — Brennstoff         |
| V Verdichter                         | — Rauchgase          |
|                                      | — Luft               |

**Abbildung 39: KWK-Anlage mit Heißluftturbinenprozess**

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zur Erzeugung elektrischer Leistung und Wärme ab 400 kW<sub>el</sub></li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasse</li> <li>• Kohle</li> <li>• Erdöl</li> <li>• grundsätzlich kann jeder Brennstoff verwendet werden</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlagen mit großer elektrischer Leistung möglich</li> <li>• guter elektrischer Anlagenwirkungsgrad mit Dampfeinspritzung möglich</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Technologiereife</li> <li>• Anlagenkomplexität</li> <li>• hohe Temperaturspannungen im Wärmetauscher</li> <li>• teurer Wärmetauscher</li> </ul>

In Tabelle 14 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße ~250 – 500 kW <sub>el</sub>	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	ca. 40.000
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	noch nicht bekannt
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	bis 30 (mit Dampfeinspritzung !)
Gesamtwirkungsgrad	[%]	~ 80
Schadstoffemission (Nox)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	brennstoffabhängig <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> liegt in der Größenordnung von ca. 200-500 mg/Nm<sup>3</sup>, je nach Leistung

**Tabelle 14: Kenngrößen eines indirekten Gasturbinenprozesses**

### Beste Betriebsweise

Stromgeführt

## Betriebszustand

Mittlerer Leistung ( $\sim 1 \text{ MW}_{\text{el}}$  und größer)  
 Turbineneintrittstemperatur:  $\sim 800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Unterdruckbereich:  $\sim 10 \text{ bar}$

## Regelung

Durch die Möglichkeit der Dampfeinspritzung in die Turbine kann die elektrische Leistung unter Reduktion der abgegebene Nutzwärme erhöht werden.

Eine weitere Regelung ist die Variation der Brennstoffmenge, die in der Feuerung verbrannt wird. Wichtig ist jedoch, dass die zulässigen Temperaturgrenzwerte der Wärmetauscher nicht überschritten werden.

## Wartung / Instandhaltung

Die Wärmetauscher müssen rauchgasseitig kontinuierlich gereinigt werden, was größtenteils automatisch geschieht.

Weiter sind die thermisch hoch belasteten Teile regelmäßig auf Spannungsrisse zu untersuchen.

Genauere Angaben über Wartungs- bzw. Instandhaltungsaktivitäten können erst aus Pilotanlagen gewonnen werden.

## Ökologische Aspekte

Entscheidend für die ökologischen Auswirkungen ist die Wahl des eingesetzten Brennstoffes.

## Entwicklungsstand / Aussichten

Derzeit gibt es eine Versuchsanlage an der Freien Universität Brüssel, die mit Biomasse als Brennstoff betrieben wird. Um die Probleme durch den schwankenden Feuchtegehalt der Biomasse zu vermeiden, wird die Biomasse nur als Grundbrennstoff eingesetzt. Die gewünschte Endtemperatur wird durch eine Zusatzfeuerung mit Gas eingestellt.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst.

<b>Entwicklungsstand / Aussichten</b>	<b>Zustand</b>
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Demonstrationsstadium <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	gering <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	gering <sup>2)</sup>

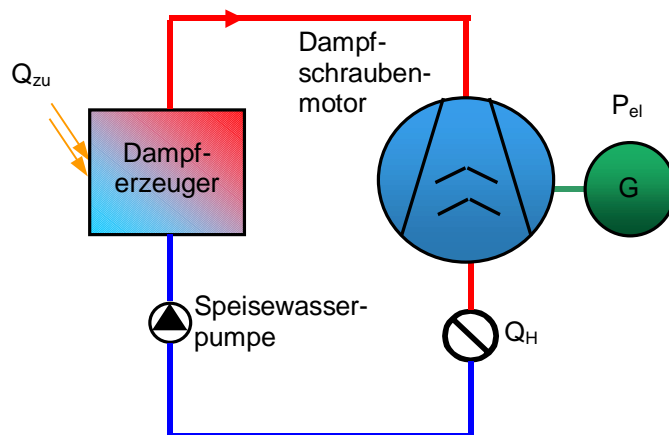
<sup>1)</sup> Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife

<sup>2)</sup> 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering

## 2.6.5 Dampfschraubenmotorprozess

### Funktionsweise

Der Dampfschraubenmotorprozess unterscheidet sich vom konventionellen Dampfturbinenprozess oder dem Dampfkolbenmotorprozess durch den Einsatz eines Schraubenmotors für die Dampfexpansion. Das durch die Verbrennung entstehende Rauchgas erzeugt im Kessel Dampf. Der Dampf strömt in den Dampfschraubenmotor, wo er durch Entspannung mechanische Arbeit leistet, die im Generator in Strom umgewandelt wird. Im anschließendem Kondensator wird die anfallende Kondensationswärme als Fern- oder Prozesswärme genutzt. Das Wasser wird dann mit einer Speisewasserpumpe auf Betriebsdruck gebracht und dem Kessel zugeführt, womit der Kreislauf wieder geschlossen ist.



$P_{el}$ elektrische Leistung	— Speisewasser
$Q_H$ Wärmeverbraucher	— Dampf
$Q_{zu}$ Zugeführte Wärme	— Welle

G Generator

**Abbildung 40: Schema einer KWK-Anlage mit Dampfschraubenmotor**

### Prinzip des Dampfschraubenmotors

Ein Schraubenmotor besteht aus zwei schraubenförmigen Rotoren, die ineinander eingreifen. Der Arbeitsraum zwischen den beiden schraubenförmigen Rotoren ändert sich dabei periodisch.

Die Einlassöffnung ist geöffnet. Der Dampf strömt in den Arbeitsraum hinein, die Einlassöffnung schließt sich durch die fortschreitende Bewegung des Rotors und der Dampf beginnt zu expandieren. Durch diesen Expansionsvorgang werden die beiden Rotoren angetrieben. Diese mechanische Arbeit wird im Generator in Strom umgewandelt.

## Allgemeines zum Dampfschraubenmotor

Einsatzgebiet
<ul style="list-style-type: none"> <li>zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung kleinerer bis mittlerer Leistungen (ab <math>\sim 20 \text{ kW}_{el}</math> - <math>\sim 2000 \text{ kW}_{el}</math>)</li> </ul>
mögliche Brennstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse</li> <li>Erdöl</li> <li>Kohle</li> <li>Grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich</li> </ul>
Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>gutes Teillastverhalten</li> <li>Einsatz von Nassdampf ist möglich</li> <li>geringer Instandhaltungsaufwand</li> </ul>
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>wenig Betriebserfahrung</li> <li>Dampfdrücke sind begrenzt</li> </ul>

In Tabelle 15 sind einige Daten von einer Anlage in einem bestimmten Leistungsbereich zusammengefasst.

Anlagengröße $\sim 500 - 700 \text{ kW}_{el}$ (Biomasse gefeuert)	Einheit	Wert
spezifische Investitionskosten	[ATS/kW <sub>el</sub> ]	$\sim 22.000$
spezifische Wartungskosten	[ATS/kWh <sub>el</sub> ]	0,05 – 0,1
elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el}$	[%]	10 – 15 (20)
Gesamtwirkungsgrad	[%]	bis 90
Schadstoffemission (Nox)	-	brennstoffabhängig <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> liegen in der Größenordnung der Gasmotoren (ca. 50-500 mg/Nm<sup>3</sup>, je nach Leistung)

**Tabelle 15: Kenngrößen eines Dampfschraubenmotorprozesses**

### Beste Betriebsweise

Strom- oder wärmegeführt

### Ausführung

Es gibt zwei Arten von Dampfschraubenmotoren, die nasslaufenden und die trockenlaufenden Motoren.

Bei den nasslaufenden Motoren wird zwecks Schmierung Öl in den Arbeitsraum eingespritzt, welches anschließend wieder aus dem Kreislauf herausgefiltert werden muss.

Die trockenlaufenden Motoren erreichen durch ein spezielles Synchrongetriebe einen berührungslosen Bewegungsvorgang, wodurch eine Schmierung nicht notwendig ist. Das Spiel zwischen den Schrauben und dem Gehäuse ist aber größer als bei der geschmierten Variante und deshalb sind hier auch die Leckverluste größer.

## Bild eines Dampfschraubenmotors

Die folgende Abbildung zeigt eine Prototypanlage für einen Dampfschraubenmotor-Prozess an der Universität Dortmund.

Die Anlage hat eine elektrische Leistung von ca. 250 kW.



**Abbildung 41: Prototypanlage für Dampfschraubenmotor an der Universität Dortmund  
(Quelle: UNI Dortmund)**

## Regelung

Eine Möglichkeit der Regelung bildet die Drosselung des in den Arbeitsraum eintretenden Dampfes. Dadurch sinkt der Druck und damit die abgegebene elektrische Leistung.

## Dampfzustand

Der Dampfschraubenmotor kann mit überhitztem Dampf, mit Sattdampf, und mit Nassdampf betrieben werden.

## Wartung / Instandhaltung

Die Dampfschraubenmotoren sind sehr wartungsarm. Bei der ölgeschmierten Variante muss das Öl regelmäßig überprüft werden um eventuell auftretende Schäden zu vermeiden.

Der Wartungsaufwand beläuft sich auf etwa 3 Stunden pro Woche.

Eine größere Revision sollte nach etwa 5 Jahren durchgeführt werden.

## Ökologische Aspekte

Das im nassgeführten Dampfschraubenmotor anfallende Öl kann in der Feuerung mitverbrannt oder muss getrennt entsorgt werden.

Bei der Verdampfung von Wasser bleiben die im Wasser enthaltenen Salze im Kessel zurück.

Um einen hohen Salzgehalt zu vermeiden (Kesselsteinbildung !) wird kontinuierlich Wasser entsalzt (1-5 % der umgewälzten Speisewassermenge).

Weiters ist eine Abfuhr des Schlammes, gebildet durch Materialabrieb und den im Wasser noch vorhandenen Korbaten, notwendig (manuell oder automatisch).

Bei der Einleitung der Abwässer in ein Fließgewässer bzw. in die Kanalisation sind entsprechende Richtlinien einzuhalten.

## Sonstiges

- Im Vergleich zum Dampfkolbenmotor benötigt der Dampfschraubenmotor kein so starkes Fundament, da die rotatorischen Bewegungen keine so großen Schwingungen hervorrufen wie die translatorischen.
- Da die Dampfkolbenmotoren mit 90 dBA recht laut sind, benötigt man eine ausreichende Schalldämmung bei der Nutzung in Wohngebieten.

## Schwachstellen

Durch den hohen Lärmpegel (bis 90 dBA) ist eine Anwendung dieser Technik ohne entsprechende Schallschutzmaßnahmen in Wohnhäusern etc. nicht möglich.

## Entwicklungsstand

Schraubenmaschinen werden heute großteils als Kompressoren eingesetzt. Bei der Ausführung als Motor greift man darum auf die schon bewährte Technologie zurück.

Die Tendenzen gehen eindeutig in die Ausführung der trockenlaufenden Motoren, wodurch die Ölproblematik verhindert wird und somit auch die Wartungs- und Instandhaltungsaufwände geringer werden.

In der folgenden Tabelle sind wichtige Parameter hinsichtlich Entwicklungsstand und Aussichten zusammengefasst. (Quelle: UNI Dortmund)

Entwicklungsstand / Aussichten	Zustand
Derzeitiges Entwicklungsstadium	Demonstrationsstadium <sup>1)</sup>
Kurzfristiges Kostensenkungspotential	mittel <sup>2)</sup>
Kurzfristiges Entwicklungspotential	mittel <sup>2)</sup>

- 1) Entwicklungsstadien: Konzept-Stadium, Laborstadium, Pilotstadium, Demonstrationsstadium, Marktreife
- 2) 1 Jahr...hoch, 2 Jahre...mittel, 3 Jahre...gering



### 3 Welcher Brennstoff kann für welchen Prozess verwendet werden?

KWK-Anlagen können mit sehr vielen verschiedenen Brennstoffen betrieben werden, jeder Brennstoff ist aber nicht für jedes Verfahren geeignet. Deshalb soll ein Überblick über die möglichen Brennstoffe und deren Einsatzgebiete in der KWK gegeben werden.

#### 3.1 Gas

In Verbindung mit dem emissionsarmen Brennstoff Erdgas tragen BHKWs zusätzlich zur Reduzierung der Umweltbelastung bei, weil schadstoffbildende Bestandteile im Erdgas praktisch nicht enthalten sind. Die bei der Verbrennung des Erdgases in Blockheizkraftwerken entstehenden Abgase sind daher nahezu frei von Schwefeldioxid wie auch von Staub, Schwermetallen und Halogenverbindungen. Daneben trägt das kohlenstoffarme Erdgas im Vergleich zu anderen fossilen Energieträgern am wenigsten zum Treibhauseffekt bei, denn bei der Verbrennung des Erdgases werden bezogen auf den gleichen Energieinhalt 40-50% weniger CO<sub>2</sub> als bei der Verbrennung von Kohle und 25% weniger CO<sub>2</sub> als bei der Verbrennung von Heizöl produziert.

Folgende Abbildung zeigt Möglichkeiten der Nutzung von Gas in der KWK.

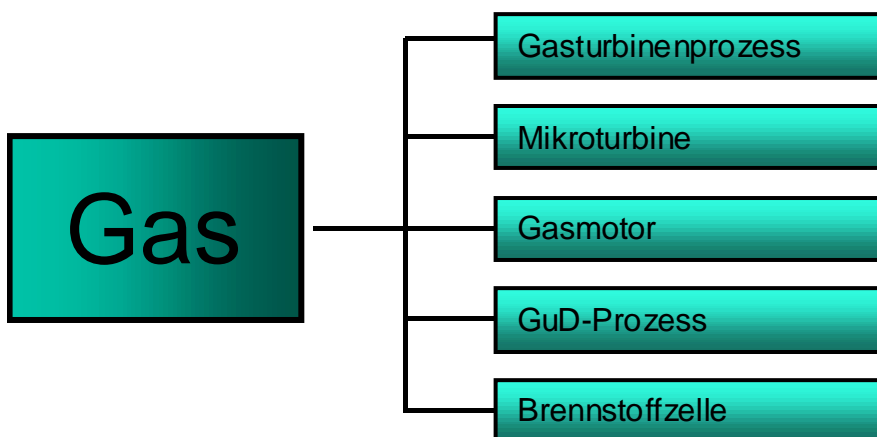


Abbildung 42: Einsatzmöglichkeiten von Gas

#### 3.2 Biomasse

Die dezentrale thermische Biomassenutzung gewinnt in Österreich immer mehr an Bedeutung. Der Grund dafür ist einerseits der dezentrale Anfall von Biomasse und andererseits die hohen Transportkosten gegenüber den fossilen Energieträgern infolge der geringen Energiedichte der Biomasse.

In einer Zielvorgabe der EU heißt es sogar, dass der Einsatz der Biomasse bis 2010 verdreifacht werden soll. Folgende Abbildung zeigt Anwendungsbeispiele für Biomasse in der KWK.

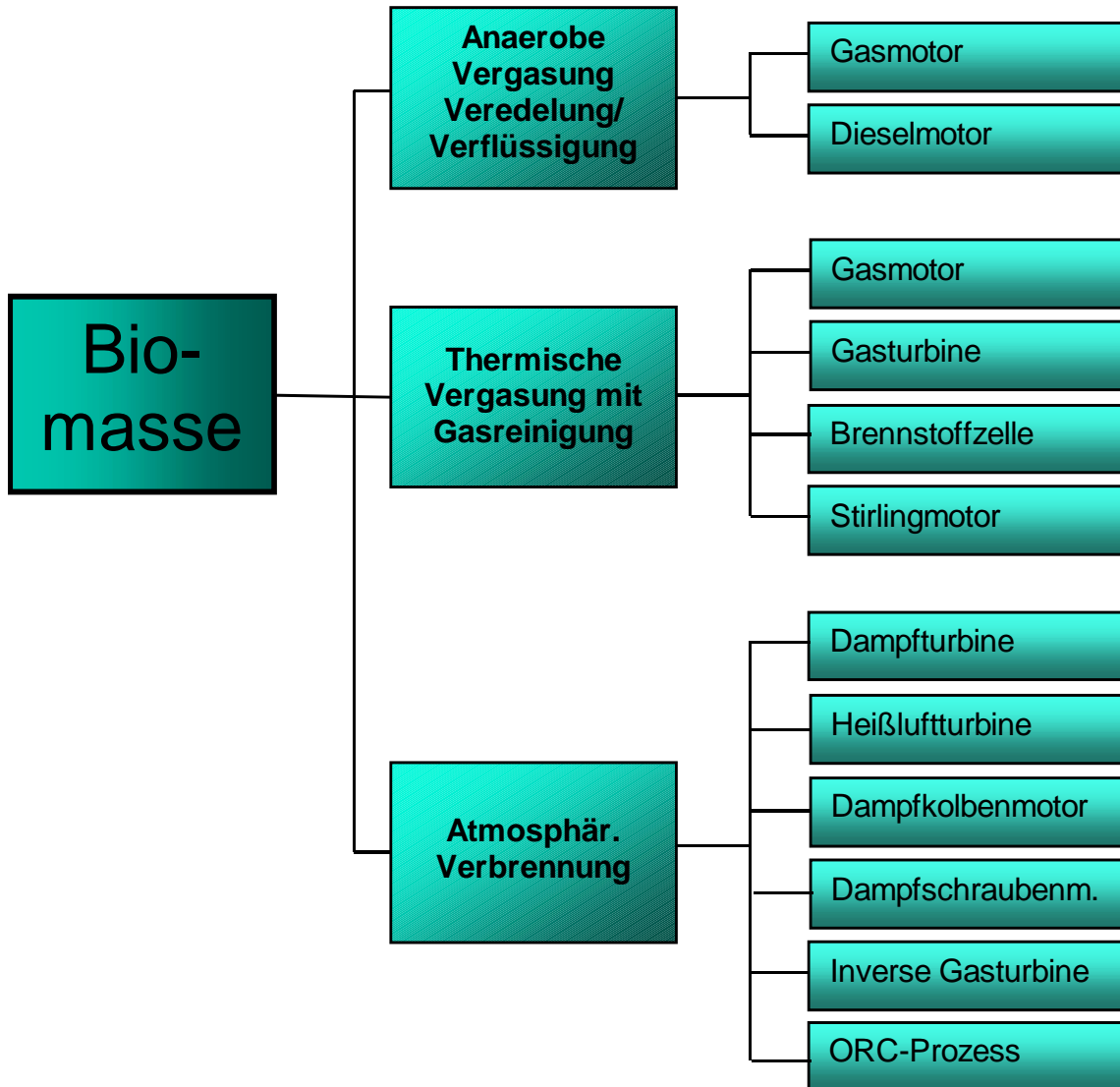


Abbildung 43: Einsatzmöglichkeiten von Biomasse

### 3.3 Kohle, Erdölprodukte

Grundsätzlich können die Brennstoffe überall dort verwendet werden, wo ein Kessel befeuert werden muss. Erdölprodukte können jedoch auch in Prozessen ohne Kessel wie z.B. dem Dieselmotoren- oder dem Gasturbinenprozess eingesetzt werden.

Folgende Abbildung zeigt Anwendungsbeispiele für Kohle und Erdöl in der KWK.

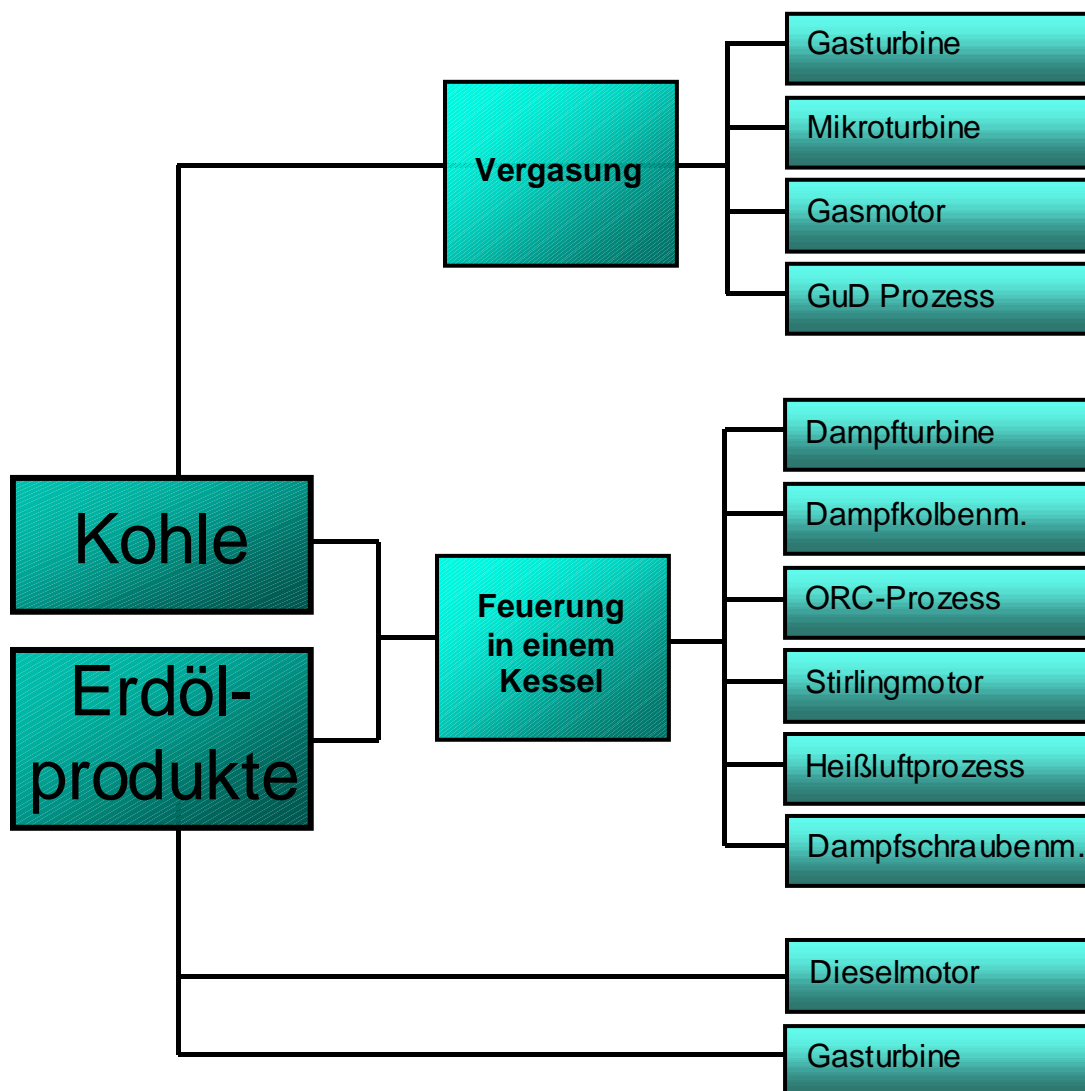


Abbildung 44: Einsatzmöglichkeiten von Kohle und Erdölprodukten in der KWK

## 4 Wirtschaftliche Gesichtspunkte:

Grundsätzlich haben KWK-Anlagen einen höheren Investitionsaufwand als Heiz- oder Kraftwerke. Andererseits benötigen sie aber einen geringeren Anteil an Primärenergie. Eine Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage ist dann erreicht, wenn die Energiekosteneinsparung den Mehraufwand an Kosten in einem akzeptablen Zeitraum ausgleichen.

Von entscheidender Bedeutung für die Energiekosteneinsparung ist die Höhe der Brennstoff- und Strompreise, wobei bei einer Kalkulation auf die zu erwartende Energiepreisentwicklung eingegangen werden muss.

Es ist auch zu beachten, dass die Amortisationsdauer wenig Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Anlage gibt, sondern nur zur Abschätzung des Risikos dient.

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit werden in der Praxis die Kapitalwert-, Endwert-, Barwert- oder die Annuitätenmethode eingesetzt. Neben den statischen Rechenmethoden werden für längerfristige Vergleiche dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungen herangezogen, die auch die zu erwartenden Preisänderungen berücksichtigen.

Im folgenden werden die Erlöse den anfallenden Kosten gegenübergestellt.

Die Erlöse einer KWK-Anlage setzen sich wie folgt zusammen:

Erlöse
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stromtarif und Leistungspreis (Kosten der Leistungsbereitstellung )</b></li> <li>• <b>Wärmetarif bei Versorgung über Fernwärmenetz bzw. Eigene Wärmeproduktionskosten über Kessel</b></li> <li>• <b>Einspeisung des überschüssigen Stroms in das öffentliche Netz</b></li> <li>• <b>Vermiedene Stromausfallkosten durch Notstrombetrieb</b></li> </ul>

Die Jahreskosten einer KWK-Anlage setzen sich wie folgt zusammen:

Kosten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kapitalgebundene Kosten</b></li> <li>• <b>Verbrauchsgebundene Kosten</b></li> <li>• <b>Betriebsgebundene Kosten</b></li> </ul>

Im folgenden sollen die einzelnen Kostenarten näher betrachtet werden.

### Kapitalgebundene Kosten

Zur Berechnung der kapitalgebundenen Kosten ist die Ermittlung der Investitionskosten der einzelnen Anlagenteile notwendig.

Einen wesentlichen Einfluss auf diese Kostenart stellt die Wahl des zugrunde gelegten Zinssatzes und die Dauer der Abschreibung dar.

Deckt die KWK-Anlage nur den Grundbedarf ab (z.B. BHKW), so müssen auch die Investitionskosten für den Spitzenkessel miteinbezogen werden.

Kosten entstehen durch:

- Benötigte Module
- Elektrische Ausstattung
- Anpassung des Heizsystems
- Anlagensteuerung
- Gebäude, Fundament,...
- Treibstoffversorgung
- Nebenkosten wie Planung, Genehmigung,...
- Inbetriebnahme
- ...

### Verbrauchsgebundene Kosten

Verbrauchsgebundene Kosten sind die Kosten für die Brennstoffe und für die Hilfsenergie, meist elektrische Energie, für Pumpen und ähnliches.

Deckt die KWK-Anlage nur den Grundbedarf ab (z.B. BHKW), so müssen auch die Brennstoffe und die Hilfsenergie für den Spitzenkessel miteinbezogen werden.

### Betriebsgebundene Kosten

Unter diese Kostenart fallen die Instandhaltungs-, Wartungs-, und Personalkosten, die für den Betrieb der Anlage notwendig sind.

Weiters können auch Reserveleistungskosten anfallen, wie z.B. Versicherungen bei größeren Anlagen.

Die Wartungskosten sind schwierig zu kalkulieren und werden daher meist prozentuell von den Investitionskosten berechnet.

Mit den Kosten und den Erlösen können nun die jährlichen Jahresüberschüsse berechnet werden.

Mit diesen Überschüssen kann man die Amortisationszeit der Anlage, und damit eine Sinnhaftigkeit der Investition überprüfen.

Bei der Finanzierung solcher Anlagen ist auch noch zu beachten, dass die Möglichkeit besteht eine Förderung zu bekommen. Dadurch sinken die Investitionskosten und die Anlage kann schneller abgeschrieben werden.

Der folgende Link bietet eine Übersicht über verschiedenen Förderungsmöglichkeiten:

<http://www.energytech.at/foerderung/index.html>

## 5 Literaturverzeichnis

### 5.1 Grundlagen

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1153>
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate, O.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1154>
- **Unterlagen ZSW** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
Baden-Württemberg)  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Unterlagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Unterlagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
Kontakt:  
e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>

### 5.2 Konzepte der KWK

#### Dampfturbinenprozess

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz

Nähere Information:

Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)

Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)

<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1153>

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate, O.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1154>
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>

### Gasturbinenprozess

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1153>
- **Thermische Turbomaschinen I, 3.Auflage 1982**  
Autor: W.Traupel  
Verlag: Springer
- **Thermische Turbomaschinen II, 3.Auflage 1982**  
Autor: W.Traupel  
Verlag: Springer
- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate, O.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1154>
- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publikation von Arthur D. Little  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1118>

- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>

#### Mikrogasturbine

- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>
- **Unterlagen von G.Simader (EVA)**  
Kontakt: [simader@eva.ac.at](mailto:simader@eva.ac.at)
- **Unterlagen von Bowman, Hersteller**  
Kontakt: [sales@bowmanpower.co.uk](mailto:sales@bowmanpower.co.uk)
- **Unterlagen von Capstone, Hersteller**  
Internet: <http://www.capstoneturbine.com>
- **Unterlagen von Allied Signal Power Systems, Hersteller**  
Internet: <http://www.alliedsignal.com>
- **Mikroturbine, Neue Chancen der KWK im Leistungsbereich 30-200 kW<sub>eI</sub>**  
Publikation, DI Reinhard Ihle, VDI, Krefeld
- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publikation von Arthur D. Little  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1118>

#### BHKW

- **Jenbacher AG**  
Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung bei der Nutzung von Biogas in Gasmotoren  
Skript, ATV Seminar, Essen 08./09. Februar 1999  
Kontakt: Martin Schneider, e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1148>)
- **Jenbacher AG**  
Kraft-Wärme-Kältekopplung mit Gasmotoren  
10. Deutsche Euroforum-Branchentage, 19.-22. Oktober 1998, Bonn  
Kontakt: Martin Schneider, e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1141>)
- **Unterlagen ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Unterlagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)



- **Untelagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
Kontakt:  
e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate, O.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1154>
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>

### Dampfkolbenmotor

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)

### ORC-Prozess

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)

### Brennstoffzelle

- **Brennstoffzellen-Systeme – Energietechnik der Zukunft?**  
Publikation: Günter Simader, e-mail: [simader@eva.ac.at](mailto:simader@eva.ac.at)
- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>
- **Untelagen ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Brennstoffzelle, eine Option für die Zukunft**  
Vortrag von Martin Pokojski, Berliner Kraft- und Licht (Bewag)- AG  
2. EUROFORUM-Branchentage „KWK“

(nähere Informationen: <http://www.eva.ac.at/publ/pdf/fuelcell.pdf>)

Download: <http://www.eva.ac.at/publ/pdf/fuelcell.pdf>

- **Das Brennstoffzellen BHKW PC25-A: Ein Erfahrungsbericht**  
Vortrag von Thomas Heissenberger, Austria Ferngas Gesellschaft m.b.H.  
2. EUROFORUM-Branchentage „KWK“
- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publikation von Arthur D. Little  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1118>
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>

#### Stirlingmotor

- **Forschungsunterlagen der Fa. SOLO Kleinmotoren GmbH**  
Kontakt: Dipl.-Ing. Andreas Baumüller [andres.baumueller@solo-germany.com](mailto:andres.baumueller@solo-germany.com)  
Tel.: +49 / 7031 301-0
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>

#### Dampfschraubenmotor

- **Forschungsunterlagen: UNI Dortmund (Fluidenergiemaschinen)**  
Kontakt: Prof. Kauder e-mail: [kauder@fem.mb.uni-dortmund.de](mailto:kauder@fem.mb.uni-dortmund.de)  
Dr. Claus Fost e-mail: [fost@fem.mb.uni-dortmund.de](mailto:fost@fem.mb.uni-dortmund.de)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)
- **Schraubenmaschinen**  
Tagung Dortmund, 30. September und 1. Oktober 1998 ; VDI Bericht 1391  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1149>)

#### Inverser Gasturbinenprozess

- **Forschungsunterlagen der TU-Graz**  
Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik  
Kontakt:  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)

#### Heißluftturbinenprozess

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)

Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1153>

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
 Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
 Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
 Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
 (nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)

#### Dampfkolbenmotor

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
 Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
 Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
 Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>

### 5.3 Wirtschaftliche Gesichtspunkte:

- **Untelagen zsw** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)  
 Kontakt:  
 Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
 Kontakt:  
 Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
 Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
 Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
 Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
 (nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1128>)
- **Wärmetechnik I**  
 Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
 Lehrveranstaltung 307.001  
 Bezugsmöglichkeit:  
 Reetz Beate, O.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1154>
- **Thermische Turbomaschinen**  
 Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
 3. Auflage, Graz  
 Nähere Information:  
 Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
 Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
<http://energytech.at/kwk/results.html?id=1153>
- **Untelagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
 Kontakt:  
 e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
 Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)

- **Jenbacher AG**  
Kraft-Wärme-Kältekopplung mit Gasmotoren  
10. Deutsche Euroforum-Branchentage, 19.-22. Oktober 1998, Bonn  
Kontakt: Martin Schneider, e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1141>)
- **Forschungsunterlagen der Fa. SOLO Kleinmotoren GmbH**  
Kontakt: Dipl.-Ing. Andreas Baumüller [andres.baumueller@solo-germany.com](mailto:andres.baumueller@solo-germany.com)  
Tel.: +49 / 7031 301-0
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: <http://energytech.at/kwk/results.html?id=1146>





Cogeneration (CHP)  
a Technology Portrait

Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics  
Graz University of Technology





# Table of Content

<b>I. TECHNOLOGY PROFILE .....</b>	<b>1</b>
<b>1 WHAT IS COGENERATION (CHP)? .....</b>	<b>2</b>
<b>2 DIFFERENT CONCEPTS OF CHP PLANTS .....</b>	<b>4</b>
2.1 CHP WITH STEAM TURBINE CYCLE .....	5
2.1.1 CHP with steam cycle and back pressure turbine .....	8
2.1.2 CHP with steam cycle and extraction condensing turbine .....	9
2.1.3 General information on CHP with steam turbine cycle .....	10
2.2 CHP WITH GAS TURBINE CYCLE .....	12
2.2.1 Gas turbine cycle with heat recovery .....	13
2.2.2 Cheng-Cycle (Steam Injected Gas Turbine, STIG) .....	16
2.2.3 Microturbine .....	19
2.2.4 General information on the gas turbine cycle .....	23
2.3 CHP WITH COMBINED STEAM-AND-GAS CYCLE .....	24
2.3.1 Combined steam and gas turbine cycle with back pressure turbine .....	26
2.3.2 Combined steam and gas cycle with extraction condensing turbine .....	27
2.3.3 General information on the combined steam and gas cycle .....	28
2.4 BLOCK CHP PLANTS WITH DIESEL AND GAS ENGINES .....	31
2.5 CHP WITH ALTERNATIVE PROCESSES .....	35
2.5.1 Steam-engine process .....	36
2.5.2 CHP on the basis of an ORC process (Organic Rankine Cycle) with biomass .....	40
2.6 INNOVATIVE PROCESSES .....	45
2.6.1 CHP with fuel cell technology .....	46
2.6.2 Stirling engine process .....	51
2.6.3 Inverse gas turbine cycle .....	58
2.6.4 Hot air turbine cycle (indirect gas turbine cycle) .....	61
2.6.5 Steam screw-type engine process .....	64
<b>3 WHICH TYPE OF FUEL CAN BE USED FOR EACH PROCESS? .....</b>	<b>68</b>
3.1 GAS .....	68
3.2 BIOMASS .....	69
3.3 COAL, PETROLEUM PRODUCTS .....	70
<b>4 ECONOMIC ASPECTS: .....</b>	<b>71</b>
<b>5 REFERENCES .....</b>	<b>73</b>
5.1 BASICS (IN GERMAN) .....	73
5.2 CONCEPTS OF CHP PLANTS .....	74
5.3 ECONOMIC ASPECTS (IN GERMAN): .....	79

# I. Technology Profile

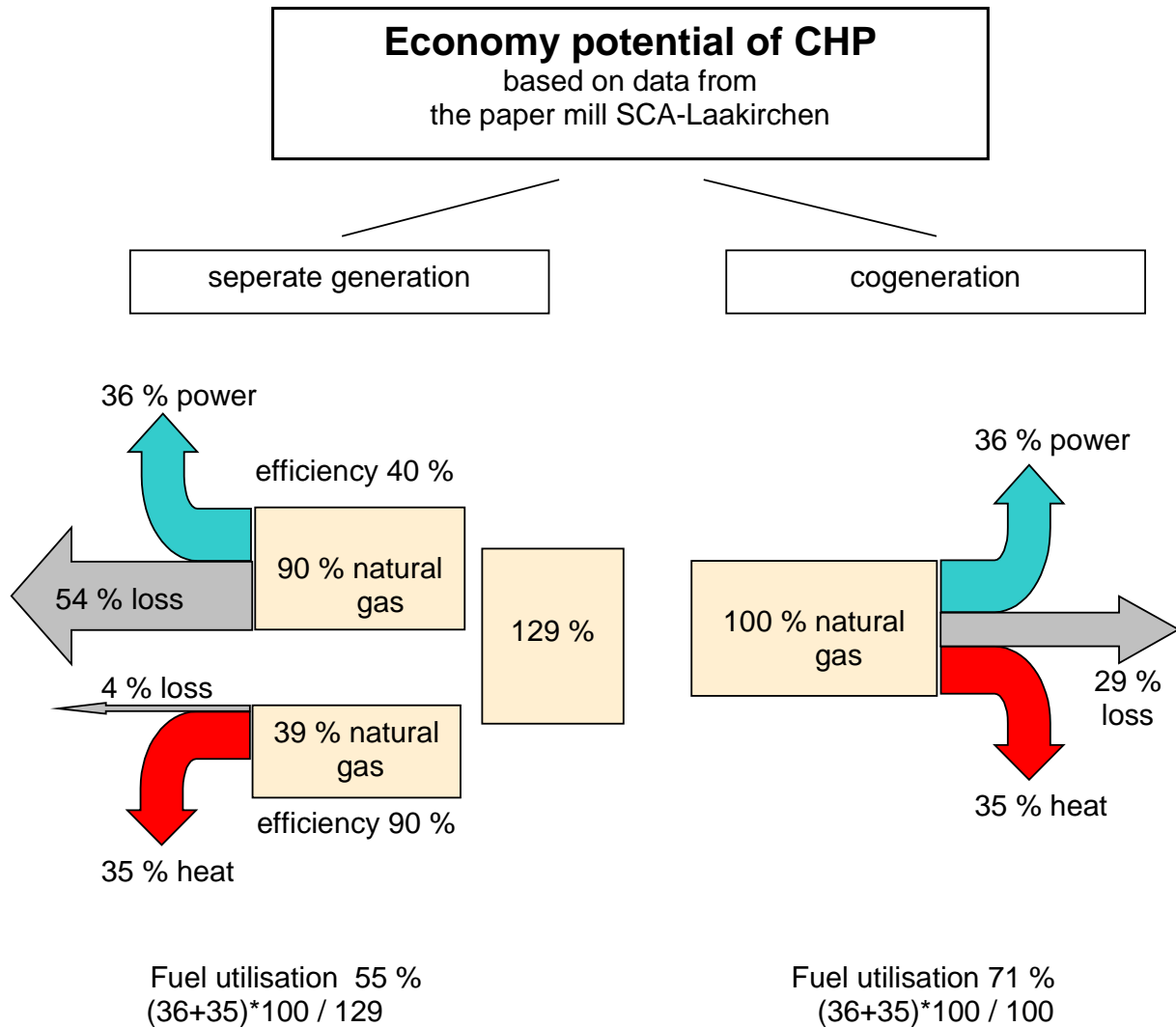
The Technology Profile is designed to give an overview of the different possibilities for production and utilization of electricity and heat through combined heat and power (CHP, cogeneration).

Besides technologies that are ready for the market, like e.g. gas turbine cogeneration, you will also find an overview of technologies in the stage of development or in the testing phase.

The Technology Profile is further designed to help people interested in CHP find the type of cogeneration plant suitable for their needs.

# 1 What is cogeneration (CHP)?

CHP plants provide the consumer with the two most important types of energy, namely with electrical power and heat. The heat obtained during power generation is used for supplying heating water, steam or drying heat. By utilizing this waste heat, losses can be kept low and therefore consumption of primary energy can be reduced. The following figure explains this connection using the example of a gas and steam turbine plant.



**Figure 1: Economy potential of CHP (source OKA)**

Comments on figure 1:

This figure is based on a comparison of fuel consumption for the production of heat and power with and without cogeneration. Using e.g. a gas and steam turbine cycle during which waste heat is utilized, primary energy input – at the same level of heat and power production - is significantly lower than in separate generation of heat and power. The above example shows that the fuel

utilization of a CHP plant amounts to 71 % whereas it only amounts to 55% in separate generation. This leads to a sustainable use of primary energy which results in a reduction of emissions of pollutants to the environment.

#### Design options:

CHP plants can basically be designed in the following ways

- heat-oriented design and operation mode
- power-oriented design and operation mode
- cost-oriented design and operation mode

#### **Heat-oriented design and operation mode:**

In the heat-operated application of a CHP plant the heat requirements are determined and the whole plant is aligned with them. The surplus power produced will be injected into the public power network.

#### **Power-oriented design and operation mode:**

In the power-operated application of a CHP plant the focus is on the power requirements. The utilized heat will vary depending on the power production.

#### **Cost-oriented design and operation mode:**

The lowest operating costs of a CHP plant are achieved using the cost operated design and operation mode. The annual total costs (investment costs and running costs) are calculated for different design variants, later the design with the lowest total costs will be implemented. Possible surplus or underproduction of power and heat can be evened out with the help of the public power and heat network.

Yet it is of great importance that the plant is run at full load. Therefore most plants are dimensioned to cover the basic load.

To cover peak heat demand usually a peak boiler providing the necessary heat is used. Another possibility is to cover the demand by connecting to the public network.

Incidental peak loads regarding power requirements can then for example be covered by the public power network.

The extra costs resulting from this have to be taken into account in the evaluation of economic efficiency.

Another possibility would be to use the plant only for peak load coverage. As peak loads are particularly expensive, this possibility represents a good option to the above mentioned designs and operation modes.

CHP plants are of great significance to power and heat generating enterprises (higher output) because of the primary energy savings and other reasons which will be dealt with later in more detail. They do also offer attractive options for providing smaller outputs of power and heat like they are needed in industrial companies, laundries, housing estates etc. In the following particularly the decentralized application of CHP will be discussed in more detail while the special needs of public energy supply companies will not be described any further.

## 2 Different concepts of CHP plants

There are various concepts allowing a process to be carried out on the basis of cogeneration.

The most important types of plants are outlined in figure 2.

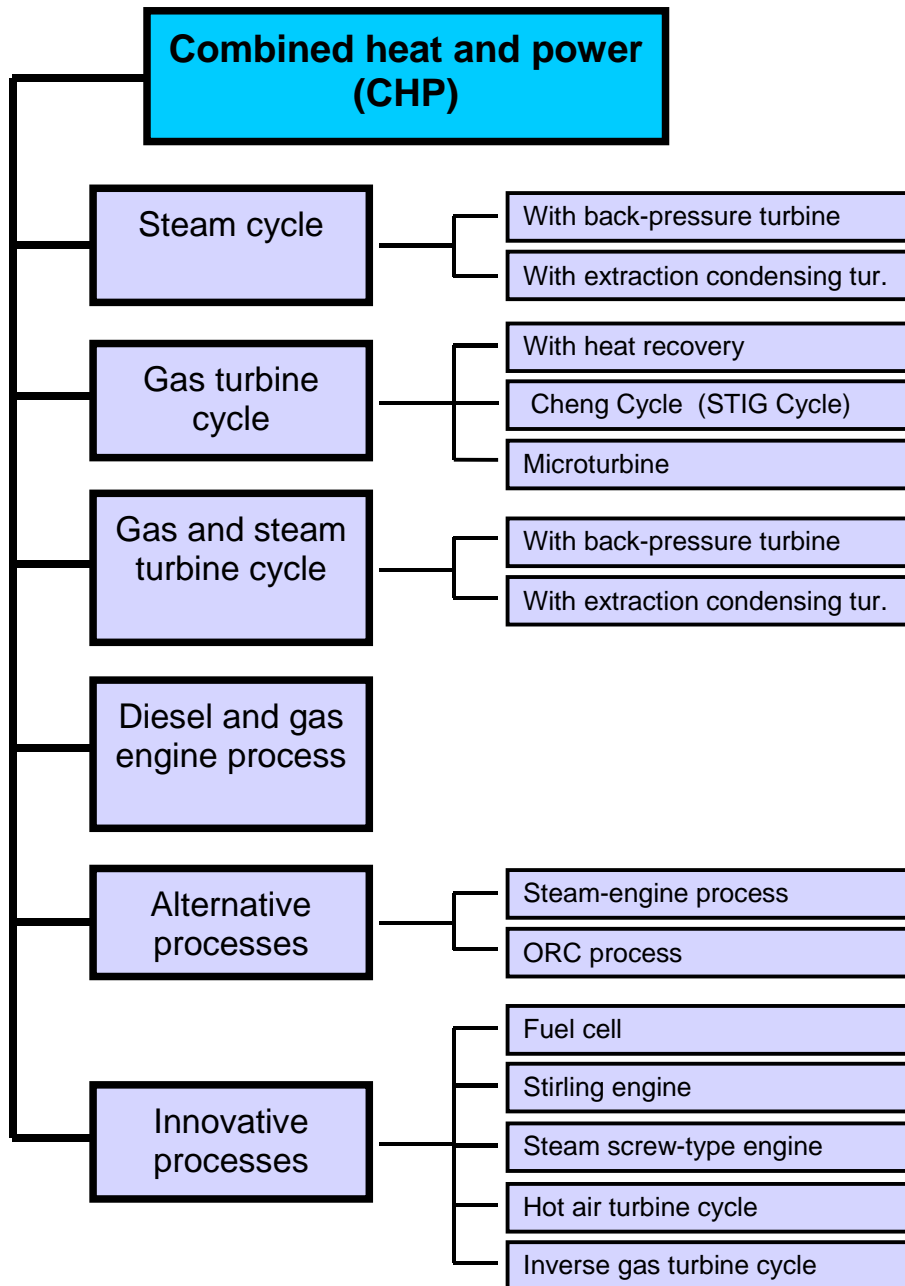


Figure 2: CHP concepts

The microturbine process, the fuel cell as well as the gas and diesel engine process are typical exponents for decentralized plants that can be run as block heat and power plants. A block heat and power plant is a CHP plant which is completely installed, delivered and run as a “block”.

## Design options for a block CHP plant:

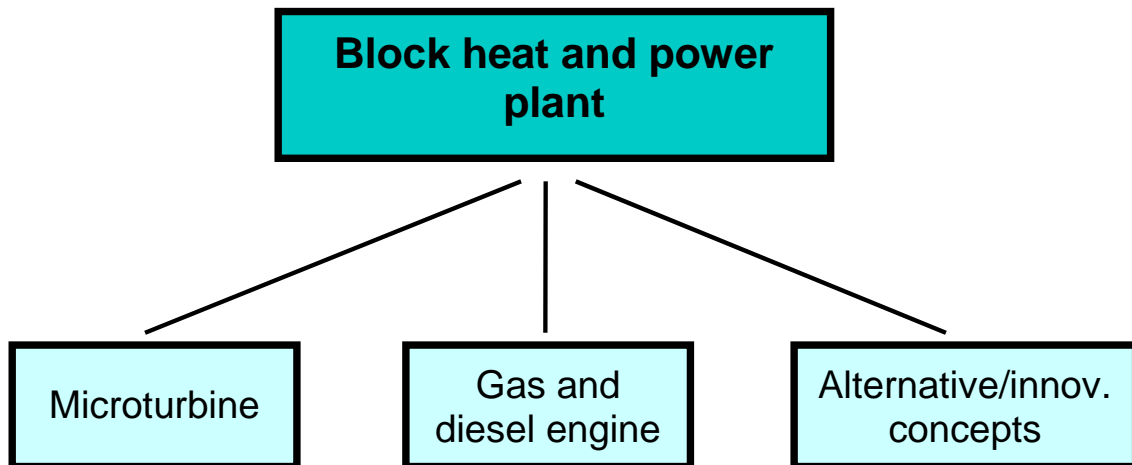


Figure 3: Block heat and power plant processes

## 2.1 CHP with steam turbine cycle

### Basic principle:

- Conversion of mechanical energy (turbine) into electrical energy with the help of a generator.
- Utilization of the heat energy of the steam discharging from the turbine to provide heat.

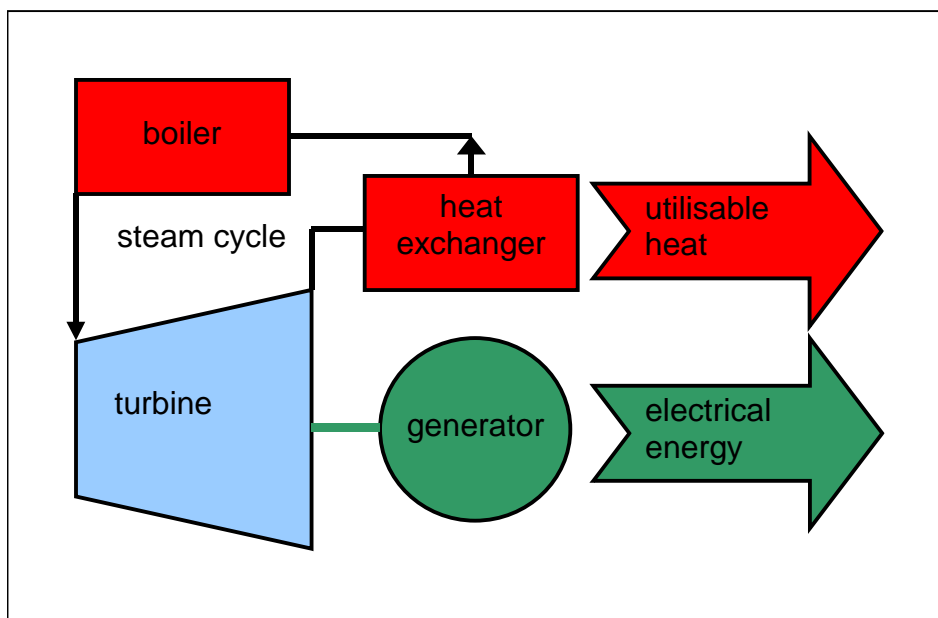


Figure 4: Principle of CHP with steam turbine cycle

The basis for this type of CHP is the steam turbine cycle which is explained in more detail in the following.

## Steam turbine cycle:

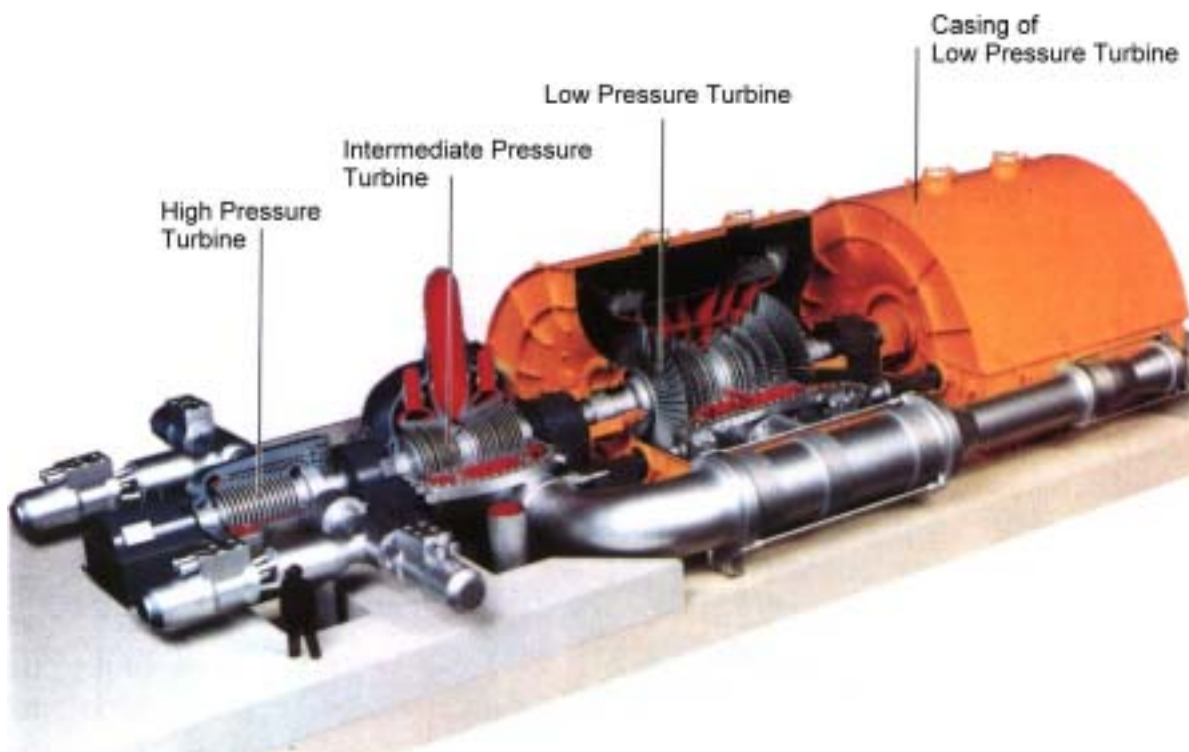
The main elements of a steam turbine cycle are: the boiler with super-heater, the turbine, the condenser and the feed water pump.

The water is vaporized in the boiler and later brought to the desired temperature in the super-heater. This live steam then is flowing through the turbine which drives the generator to generate power. In the condenser the steam discharging from the turbine condenses and is brought to process pressure with the help of the feed water pump. Afterwards the steam is fed into a boiler whereby the cycle is closed.

As a cooling medium in the condenser usually river water or surrounding air will be used, and the released condensation heat remains unused.

To use this waste heat there are a series of different configurations allowing the usage of any incidental heat. It is crucial though that for using waste heat a higher pressure and temperature level is required.

The following figure shows a section through a steam turbine for high output which consists of a high pressure-, a medium pressure- and a low pressure section . In this kind of machines about 70 % of live steam from the low pressure sections is passed on to the condenser, the remaining 30 % are used for preheating feed water and afterwards are fed to the steam cycle.



**Figure 5: Section through a steam turbine**

The following figure shows the rotor of a steam turbine with an output of 8 MW<sub>el</sub>.  
Source: Peter Brotherhood Ltd



**Figure 6: Rotor of a steam turbine with 8 MW<sub>el</sub>**

In figure 7 a plant with a condensation steam turbine is depicted. The plant has an electrical output of 10MW.



**Figure 7: A condensation steam turbine with 10 MW<sub>el</sub>**

There are two main types of CHP plants based on steam cycle:

- Steam cycle with a back pressure turbine
- Steam cycle with an extraction condensing turbine



For lower heat output steam is extracted by tapping the steam turbine and therefore the technical design is simpler compared to an extraction condensing turbine. Yet pressure and temperature during the tapping process can only be kept when run in full load.

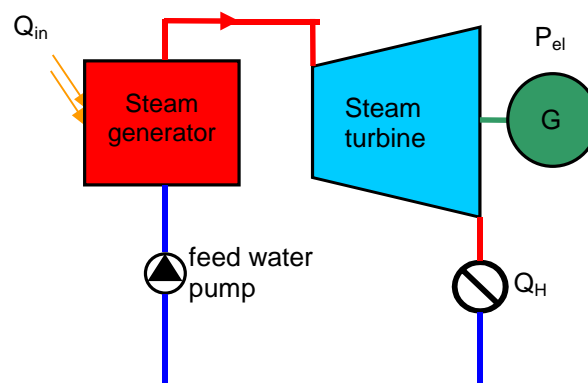
## 2.1.1 CHP with steam cycle and back pressure turbine

### Functionality:

In a turbine (back pressure turbine) the hot steam produced in the boiler is expanded down to back pressure which results from the desired temperature of the process heat. Thus it is performing mechanical work for the generator. The generator transforms mechanical energy into electrical energy. Heat exchangers outside the turbine can be used to pass the remaining heat quantity of the steam to another medium (e.g. water) with the help of condensation. This heat quantity can now be utilized in different ways. Later the condensed steam is fed to the steam generator again with the help of water preparation through a feed water pump. Thus the cycle starts again. Valves on the turbine are used for control.

This design is mostly used when a more or less constant amount of heat is required.

### Set-up of a simple steam cycle with back pressure turbine :



$P_{el}$	electrical output	<span style="color: blue;">—</span>	feed water
$Q_H$	heat consumer	<span style="color: red;">—</span>	steam
$Q_{in}$	heat input	<span style="color: green;">—</span>	shaft
G	generator		

Figure 8: Steam cycle with back pressure turbine

### Application

- Industry and power supply enterprises (electricity, district heating), (outputs of  $\sim 0,5-30 \text{ MW}_{el}$  and more)
- When a constant amount of heat is required (because of little possibilities of control)
- Very often there are various steam turbines arranged on a line in order to allow using one or more turbines according to the requirements.

## 2.1.2 CHP with steam cycle and extraction condensing turbine

### Functionality:

The functionality is similar to that of a cycle with back pressure turbine with the difference that here the extraction steam for heat generation is not taken from the rear part but from the middle part of the turbine. This has the advantage that heat and power generation can be adjusted to the different requirements.

With the help of valves the extraction pressure can be adjusted right at the extraction point so that the required steam conditions for heat generation can also be kept when run at part load. This is the advantage over the topping steam turbine where the conditions vary according to the load point.

To meet the demands of high heat requirements all steam for heat generation can be taken from the extraction point. For low heat requirements this type of turbine can be used like a conventional condensing turbine. Various other operational modes are possible due to valve control.

### Set-up of a simple steam cycle with an extraction condensing turbine:

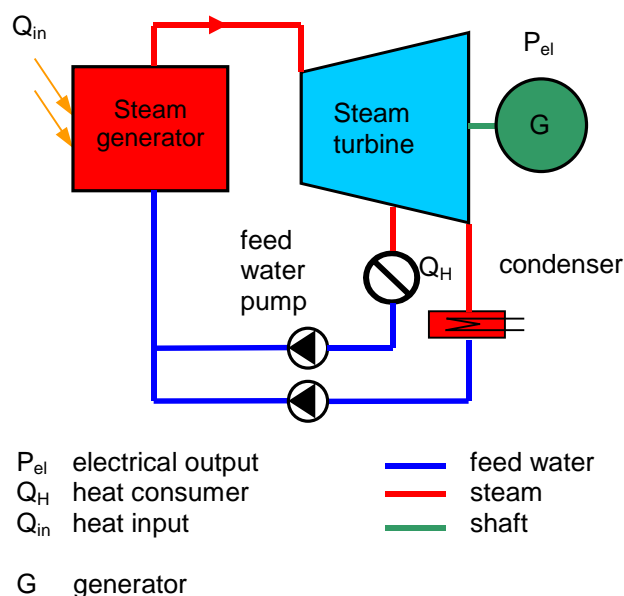


Figure 9: Steam cycle with extraction condensing turbine

**Application**

- medium to higher output (~0,5-10 MW<sub>el</sub> and more)
- variable heat and power requirements

**2.1.3 General information on CHP with steam turbine cycle****Possible fuels**

- coal
- petroleum
- biomass, garbage
- basically every fuel is possible that can be burnt in a boiler

**Advantages**

- basically every fuel can be used
- well-established technology
- size of plants is not limited

**Disadvantages**

- low electrical plant efficiency
- bad part load performance
- expensive operation

In table 1 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~ 1 MW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs (with back pressure turbine)	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 1.500
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,007
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	10 - 20
Overall efficiency	[%]	70 - 85
Emissions (NOx) – coal fired	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 450 - 600

**Table 1: Data of a back pressure steam plant**

**Best operational mode:**

Power or heat operated.

Very often various steam turbines are arranged on one line so that one or more machines can be used according to power demands. Therefore it is possible to run the turbines close to the optimal operating point.

## Steam conditions:

Decentralized CHP plants of low to medium output (output ~1 - 10 MW)

Steam pressure: 30 - 70 bar

Live steam temperature: ~ 400 – 500 °C

## Control:

Control of the steam turbine can be reached through the following two possibilities:

- Through a throttle valve in front of the turbine which controls steam pressure of the flow leading from the steam line to the individual turbines as well as their output.
- Through nozzle group control in the individual turbine, which allows individual nozzles before the first blade wheel (control wheel) to be switched in or off. Thus the mass flow rate of the other stages as well as the output can be regulated.

## Maintenance:

- Inspection of the turbines and the steam pipelines for irregularities once a week
- Every 5 years a more extensive one-week revision should be conducted
- Regular inspection of steam conditions

## Ecological aspects:

During the vaporization process of water the salts contained in the water remain in the boiler. In order to avoid high salinity (scale build-up!) water is continuously desalinated (1-5 % of the circulated feed water).

In addition it is necessary to discharge the mud resulting from material abrasion and the remaining salts in the water ( manually or automatically).

When discharging sewages into a stream or into the sewerage system, the corresponding legal regulations have to be complied with.

## Weak points:

a) Thermodynamics:

High electrical efficiency can only be achieved through high live steam pressure and temperature (170 bar, 600°C) at given condensation conditions. Since this requires expensive high temperature material, CHP plants of low and medium output are designed for lower live steam conditions.

b) Operation:

The operation of a steam plant is relatively expensive because according to the Austrian laws for steam boiler operation there always has to be a steam guard present.

c) Biomass utilization:

Live steam temperature in biomass plants is limited because of the increased danger of corrosion due to alkali metals, sulphur and chlorine contained in the fuel.

Variations in the water content of biomass can lead to changes in temperature and mass flow of the steam. In order to prevent this, it has to be taken into account in the control system.

## Stage of development/outlook:

Industrial steam turbines are well-established and therefore used in big quantities all over the world.

Trends are definitely going towards higher temperatures resulting in increased output . Therefore the development of high temperature proof material is of great importance.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

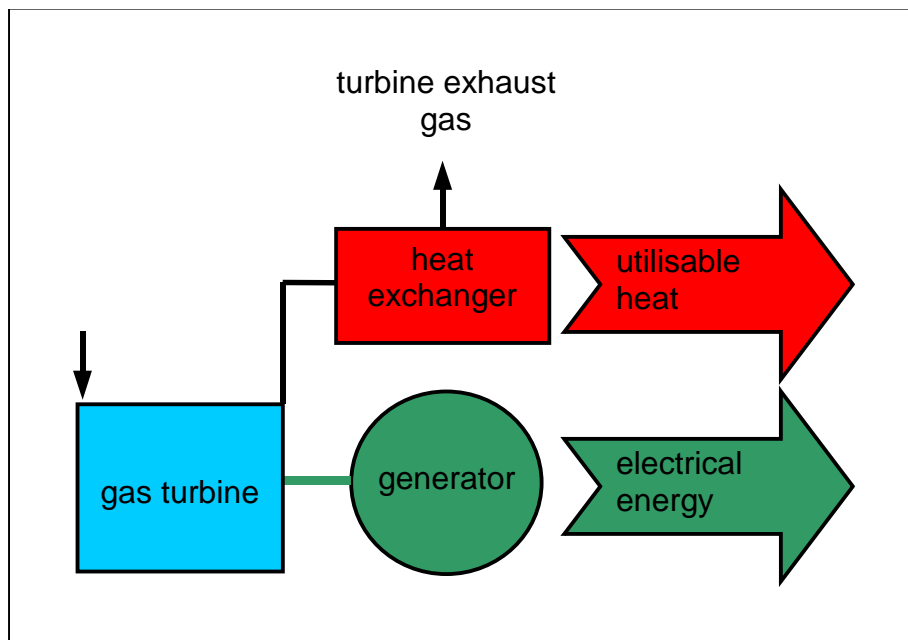
<sup>1)</sup> Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

<sup>2)</sup> 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.2 CHP with gas turbine cycle

### Basic principle:

- Conversion of mechanical energy (turbine) into electrical energy with the help of the generator.
- Utilization of gases escaping from the turbine for heat supply.



**Figure 10: Basic principle of CHP with gas turbine cycle**

The basis for this type of CHP is the gas turbine cycle which is explained in more detail in the following.

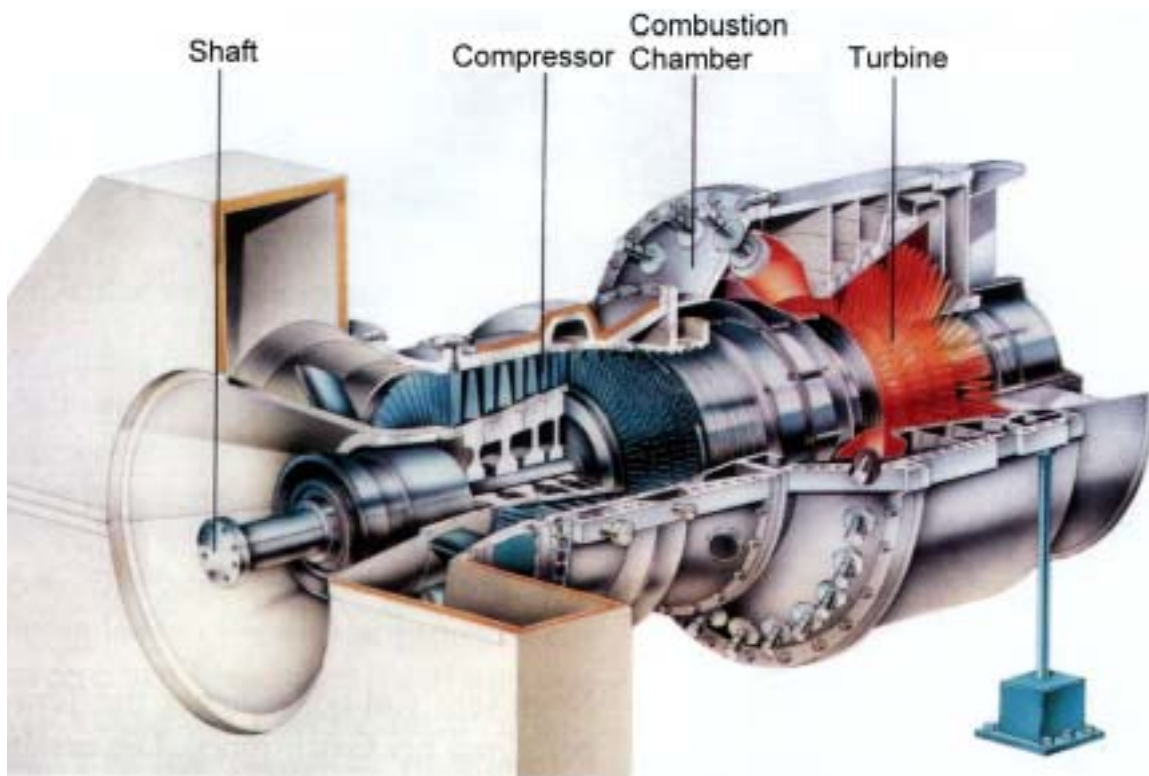
## Gas turbine cycle:

The main elements of the gas turbine cycle are: the compressor, the combustion chamber and the turbine.

Surrounding air is sucked in and compressed in a compressor. Subsequently it is fed into the combustion chamber where a combustion reaction takes place when fuel (gas, oil...) is added. The exhaust gas resulting from the combustion is expanded in the turbine. The turbine drives the compressor as well as the generator responsible for power generation. The exhaust gas leaves the turbine with a temperature of about 400-600°C and in the simple gas turbine cycle escapes into open air without any further utilization.

For further utilization of this heat a heat exchanger transferring heat energy to another medium (mostly water) is required. For this process there are various set-ups described in more detail in the following.

The following figure shows a gas turbine from Siemens (Siemens V64.3) for higher output.



**Figure 11: Section through a gas turbine of higher output**

### **2.2.1 Gas turbine cycle with heat recovery**

#### Functionality:

In this process the heat content of the turbine exhaust gases is entirely used for supplying heat. This heat is then available for heating purposes, drying processes or other processes requiring heat (e.g. absorption refrigerating machines).

## Set-up of a gas turbine cycle with heat recovery:

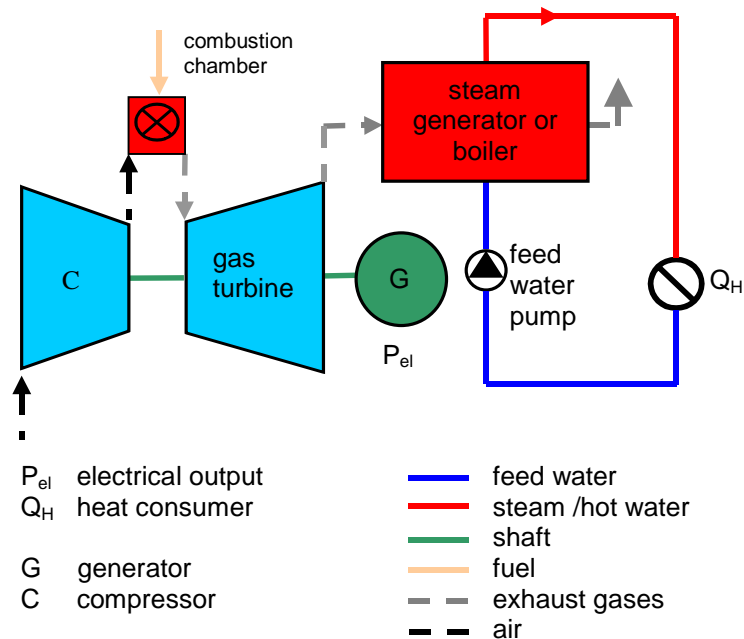


Figure 12: Gas turbine cycle with heat recovery

Application	
<ul style="list-style-type: none"> <li>for generation of electrical output and heat from <math>\sim 30 \text{ kW}_{el}</math></li> <li>when a relatively constant amount of heat is required</li> </ul>	
Possible fuels	
<ul style="list-style-type: none"> <li>gas</li> <li>petroleum</li> <li>gasification of coal</li> <li>...</li> </ul>	

In table 2 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size $\sim 20 \text{ MW}_{el}$	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	$\sim 1.200$
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	$\sim 0,007$
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	25 - 35
Overall efficiency	[%]	70 - 92
Emissions (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	$\sim 25$

Table 2: Data of a gas turbine plant with heat recovery

**Best operational mode:**

Power or heat operated.

**Picture of a gas turbine:**

The picture shows a gas turbine type FP-16-G with an electrical output of about 1,6 MW.  
Source: FP Turbomachinery



**Figure 13: Gas turbine FP-16-G**

**Operating state:**

Gas turbines of medium and higher output (~20 MW<sub>el</sub> and more)

Peak temperature: ~1200 °C

**Control:**

Control of the gas turbine is mostly achieved through the amount of fuel injected into the combustion chamber of the turbine. To cover increased heat requirements there is an auxiliary firing equipment in the waste heat boiler.

**Stage of development/ outlook:**

CHP plants with gas turbines are well-established and therefore used in big quantities all over the world.

Trends are definitely going towards higher temperatures and pressures resulting in increased output and efficiency.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table



Stage of development/ outlook	Status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

### 2.2.2 Cheng-Cycle (Steam Injected Gas Turbine, STIG)

#### Functionality:

The so-called Cheng-Cycle (STIG-Cycle) offers another variant of the gas turbine cycle with utilization of waste heat. The generated steam is partly fed into the combustion chamber and the turbine. Thus output and electrical efficiency are significantly increased. It also allows an adjustment to the heat requirements of the plant so there can be more or less steam fed into the gas turbine according to the requirements.

#### Set-up of a Cheng-Cycle:

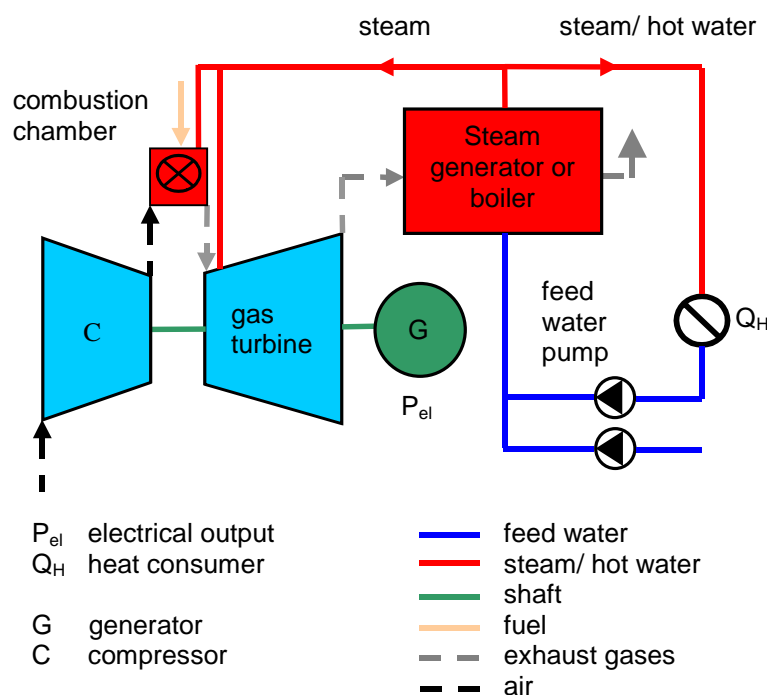


Figure 14: Set-up of a Cheng-Cycle

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>• variable power and heat requirements</li> <li>• for higher output ( ~ 20 MW<sub>el</sub> and more)</li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gas</li> <li>• petroleum</li> <li>• gasification of coal</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• released heat can be varied</li> <li>• increase in gas turbine output and electrical efficiency</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processing of steam fed into the gas turbine is expensive</li> </ul>

In table 3 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~ 20 MW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 1.300
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,007 – 0,011
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	~ 40
Overall efficiency	[%]	~ 70 - 85
Emissions (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 25

**Table 3: Data of a Cheng-Cycle**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Operating state:

Gas turbines of medium and higher output (~20 MW<sub>el</sub> and more)

Peak temperature: ~1100 °C

### Control:

Control of the electrical output is achieved through fuel supply into the combustion chamber of the gas turbine and through variation of the amount of steam injected into the turbine.

Control of the released heat is achieved through variation of the amount of steam injected into the turbine.

## Stage of development/ outlook:

CHP plants with Cheng-Cycle are well-established and therefore used in big quantities all over the world.

Trends are definitely going towards higher temperatures and pressures resulting in increased electrical output and efficiency.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/ outlook	Status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	medium <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.2.3 Microturbine

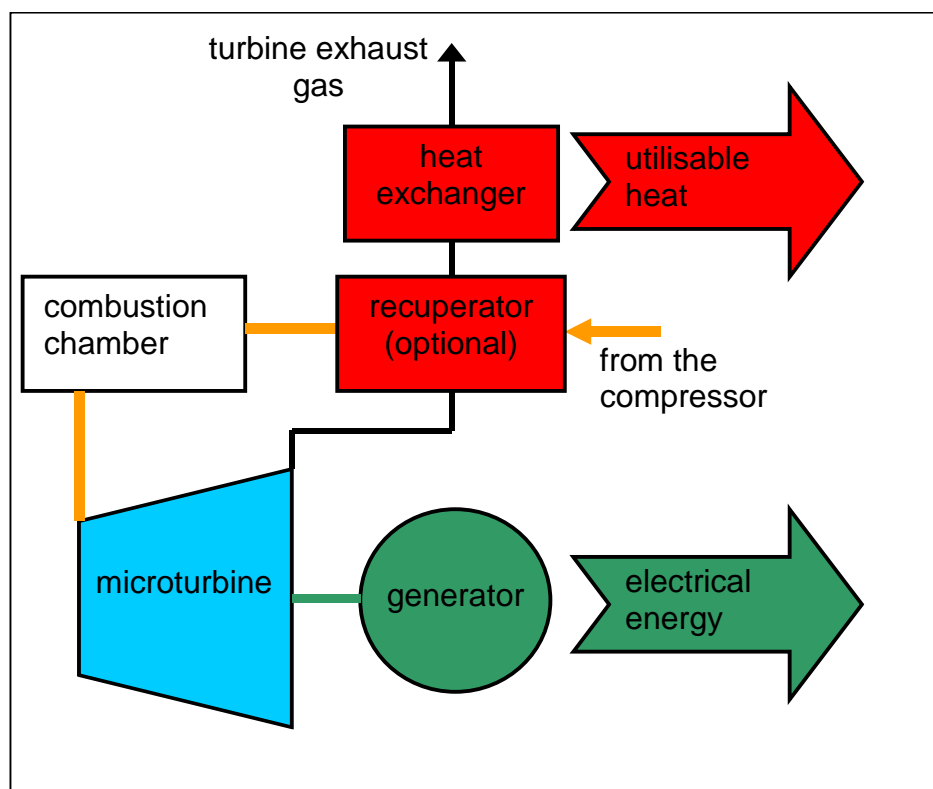
So-called microturbines offer an interesting possibility for the realization of lower output (~30-300 kW and less).

### Functionality:

In contrast to a gas turbine cycle with heat recovery, block construction is possible because of the compactness of the plant. Therefore this microturbine plant can also be seen as a block heat and power plant. Yet electrical efficiency of the plant is relatively low (~15-25%) because of its small size.

In order to achieve good electrical efficiency despite low peak temperatures usually a heat exchanger (recuperator) is used for preheating combustion air with the help of hot turbine exhaust gas. Another heat exchanger is used for obtaining process heat. If the first heat exchanger can be switched off the released process heat can be increased at the expense of electrical efficiency if required. This enables a very good adjustment to variable heat requirements.

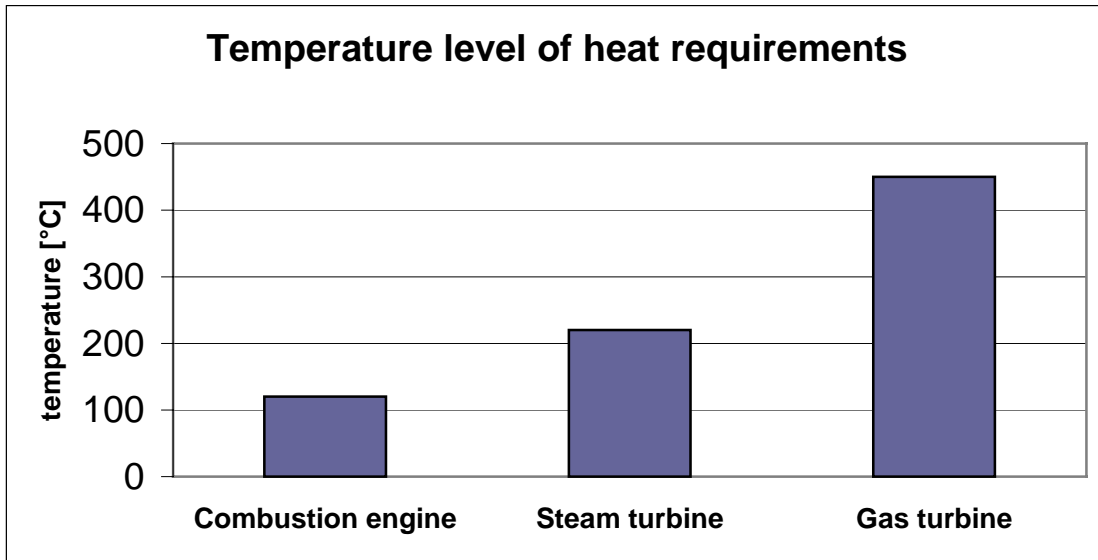
### Set-up of a microturbine:



**Figure 15: Diagram of a microturbine**

Besides block heat and power plants equipped with gas or diesel engines, recently also microturbines are gaining importance as another variant of a block CHP plant. If, however, high waste heat temperatures are required the microturbine represents the better solution.

Figure 16 shows the temperature level at which heat is available for different concepts. A high temperature level is usually put down to worse electrical efficiency. Therefore bigger heat quantity, that has to be taken in account in the design, is obtained in the gas turbine if electrical efficiency of the gas turbine and the internal combustion engine are equal.



**Figure 16: Temperature level of heat available for different CHP plants**

#### Application of microturbines

- steam generation in small boiler plants
- high temperature water networks over 100°C
- drying plants
- hospitals
- laundries
- local heat networks
- ....

#### Possible fuels for microturbines

- natural gas
- fuel oil
- liquid gas
- sewage gas
- firedamp
- petroleum associated gas
- ...

Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• compact design</li> <li>• low maintenance costs at maintenance intervals of at least 8000 hours of operation</li> <li>• easy installation Because of compact design and low plant weight it is possible to keep a small plant area.</li> <li>• adjustment of heat and power requirements is possible</li> <li>• quiet because there are no low frequency noise emissions</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• full market maturity of the technology is not yet achieved</li> </ul>

In table 4 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size 30-75 kW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	650 – 1.100
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,005 – 0,007
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	15 - 25
Overall efficiency	[%]	70 - 90
Emissions (NO <sub>x</sub> ) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	20

<sup>1)</sup> based on 15% O<sub>2</sub> in exhaust gas

**Table 4: Data of a microturbine**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Picture of a microturbine:

The picture shows a microturbine type FP-CS-30 with a heat output of about 69 kW.  
Source: FP Turbomachinery



**Figure 17: Microturbine FP-CS-30**

### Operating state:

For microturbines of low output ( ~55 kW<sub>el</sub>):

Exhaust gas temperature: ~600 °C

Pressure ratio: 3 - 5

Rotational speed: 105.000 rpm

### Control:

Control of the gas turbine is usually achieved through fuel supply.

### Maintenance:

(Source Capston)

Part	Action	Maintenance interval
Air filter and fuel filter	replace	8.000 hrs.
Turbine exhaust gas thermocouple	replace	16.000 hrs.
Ignition	replace	16.000 hrs.
Fuel injection	replace	16.000 hrs.

### Stage of development:

The breakthrough of the microturbine has not yet been achieved in Austria. However in the USA they are often used and have therefore already reached high technological maturity.

Because of their easy handling and high overall efficiency they will soon win recognition in Austria too and will offer an alternative possibility to block heat and power plants with internal combustion engines.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/outlook	Status
Present stage of development	Demonstration stage to market maturity <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	high <sup>2)</sup>
Short term development potential	medium <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.2.4 General information on the gas turbine cycle

### Ecological aspects:

When using natural gas in gas turbines very low emission values can be obtained. The NO<sub>x</sub> content amounts to 25 ppm, the CO content can be further reduced with the help of a downstream catalyst.

### Weak points:

Thermodynamics:

High efficiency of gas turbines can be achieved through high turbine inlet temperatures of up to 1300 °C. This process requires expensive material and complex technologies for blade cooling. Therefore gas turbines of highest efficiency are very maintenance intensive.



## 2.3 CHP with combined steam-and-gas cycle

### Basic principle:

- Mechanical energy (gas turbine and steam turbine) is converted into electrical energy with the help of a generator.
- Hot gases escaping from the gas turbine are used for generating steam for the steam turbine.
- Heat energy of the steam escaping from the turbine is used for providing heat.

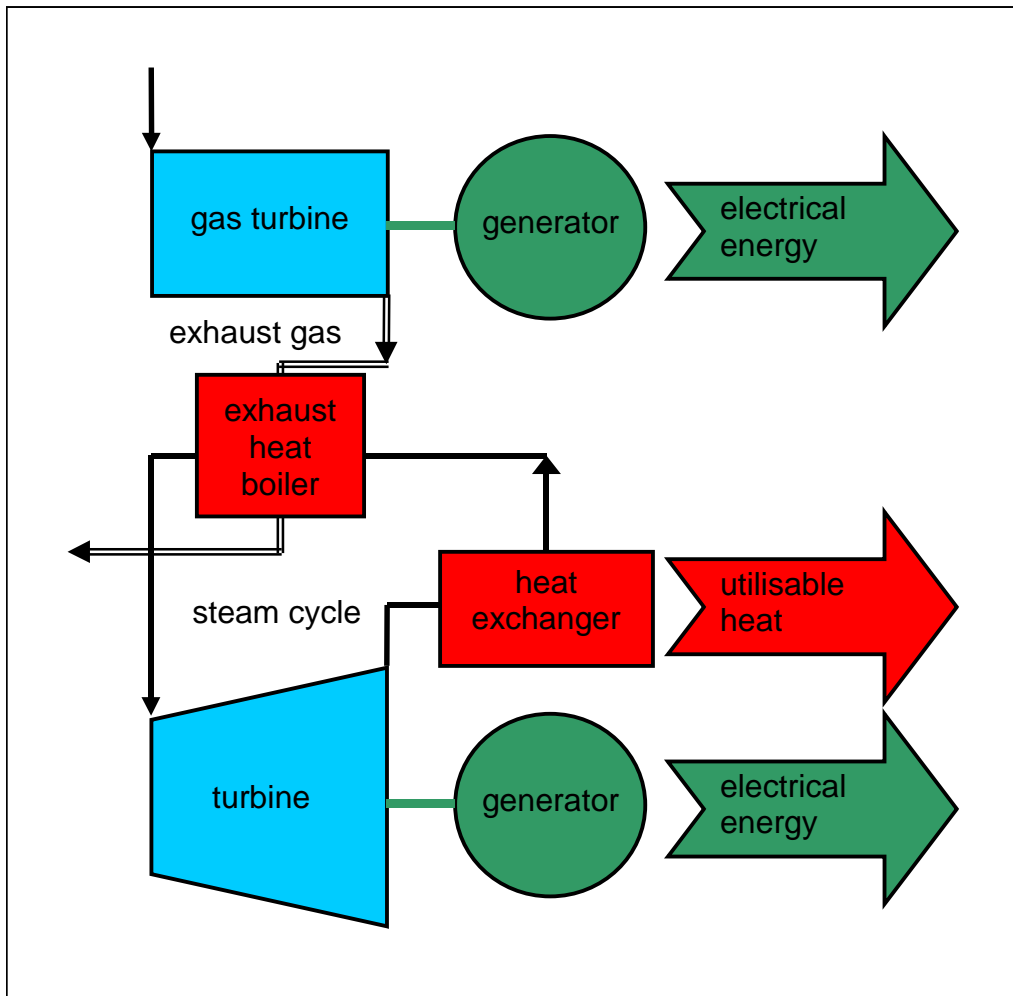
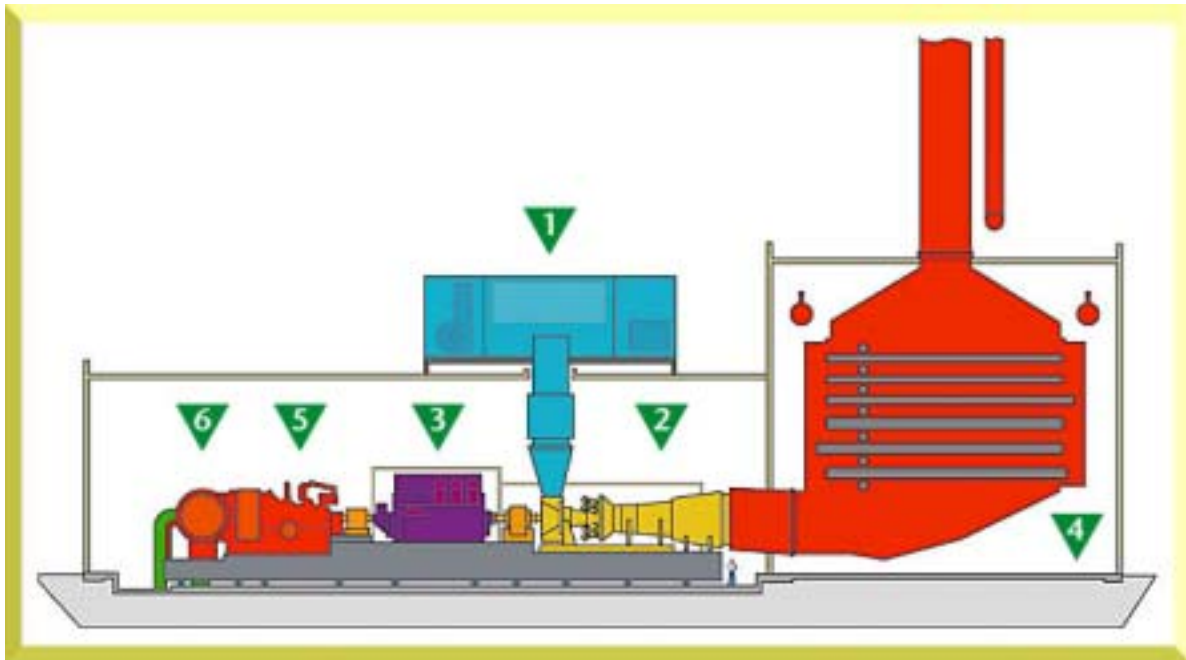


Figure 18: Principle of CHP with combined steam and gas cycle

The following figure (Source: GEW Köln AG) shows a simplified section through a combined steam and gas plant with its most important components:

1. Air filter at the compressor inlet
2. Gas turbine
3. Generator
4. Waste heat boiler
5. Steam turbine
6. Condenser



**Figure 19: Section through a combined steam and gas plant**

The steam turbine cycle can again be carried out in backpressure operation or in extraction condenser operation.

These two types are explained in more detail in the following.

### 2.3.1 Combined steam and gas turbine cycle with back pressure turbine

#### Functionality:

The combined steam and gas cycle is a combination of the steam turbine cycle and the gas turbine cycle. Exhaust gases from the gas turbine are used for generating high pressure steam which is later expanded in a steam turbine. Electrical output is reached by the gas turbine as well as the steam turbine. The steam escaping from the steam turbine can further be used for providing heat.

#### Set-up of a combined cycle with back pressure turbine:

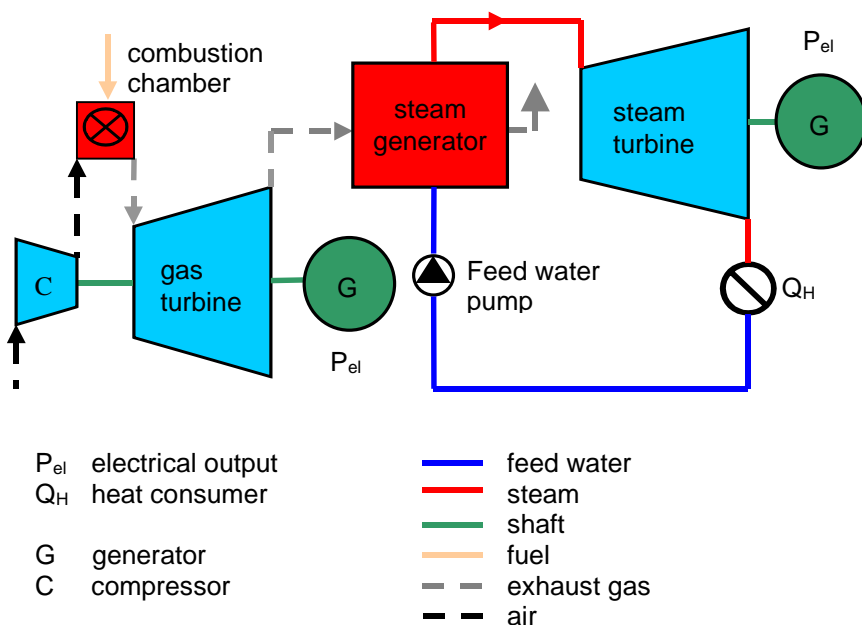


Figure 20: Combined steam and gas cycle with back pressure turbine

#### Application

- for power and heat requirements of higher output (> 10 MW electrical)
- if a constant process heat is required (e.g. paper mill)
- if high electrical efficiency is required

## 2.3.2 Combined steam and gas cycle with extraction condensing turbine

### Functionality:

The functionality is based on the same principle as the combined steam and gas cycle with back pressure turbine, but with the difference that here extraction steam for heat generation is not taken from the end of the turbine but from the middle part. This has the advantage that heat as well as power generation can be better adjusted to the different requirements.

### Set-up of a combined CHP plant with extraction condensing turbine:

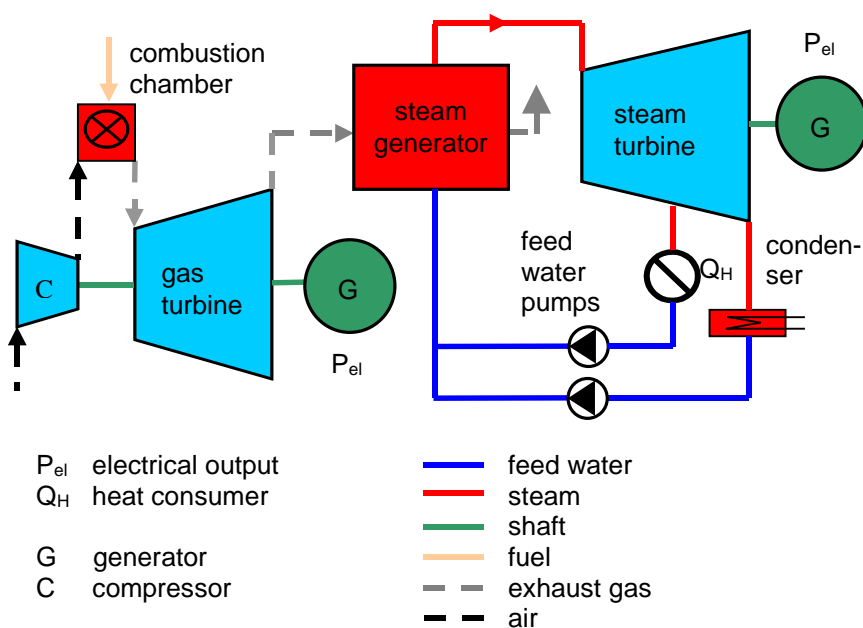


Figure 21: Combined steam and gas cycle with extraction condensing turbine

#### Application

- for heat and power requirements of higher output ( $> 10 \text{ MW}_{el}$ )
- different requirements concerning heat and power requirements
- if high electrical efficiency is required

### 2.3.3 General information on the combined steam and gas cycle

Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gas</li> <li>• petroleum</li> <li>• fuels obtained through gasification of biomass or coal</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• high electrical efficiency</li> <li>• sophisticated technology</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• expensive operation</li> <li>• only suitable for higher output (electrical)</li> </ul>

In table 5 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~40 MW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	800
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,007 – 0,011
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	up to 50 (55)
Overall efficiency	[%]	up to 85 (90)
Emissions (NOx) – gas turbine	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 25

**Table 5: Data of a combined steam and gas cycle**

#### Best operational mode:

Power or heat operated.

#### Operating state:

Decentralized CHP plants of medium output:

- gas turbine:
  - peak temperature: ~1150 °C
  - pressure: ~ 12 bar
- steam turbine cycle (often also run as a double-pressure cycle):
  - steam pressure: ~50 bar
  - live steam temperature: ~ 400 °C

## Control:

Control of the gas turbine is usually achieved through fuel supply.

Control of the steam turbine is on the one hand reached through the steam condition in the heat recovery steam generator which depends on the output of the gas turbine.

On the other hand the steam turbine can be controlled as follows:

- Through a throttle valve in front of the turbine controlling steam pressure and output
- Through nozzle group control in the individual turbine, which allows individual nozzles in front of the first blade wheel to be switched in or off. Thus the mass flow rate as well as the output of the turbine can be regulated.

## Maintenance :

Gas turbine cycle:

- Inspection of the fuel piping, the turbine casing, etc. once a week

Steam cycle:

- Inspection of the steam piping once a week
- Regular inspection of the steam conditions
- Every 5 years a more extensive one-week revision should be conducted

## Ecological aspects:

Gas turbine cycle:

When using natural gas in gas turbines very low emission values can be achieved. The NO<sub>x</sub> content amounts to 25 ppm, the CO content can be further reduced with the help of a downstream catalyst.

Steam cycle:

During the vaporization process of water the salts contained in the water remain in the boiler. In order to avoid high salinity (scale build-up!) water is continuously desalinated (1-5 % of the circulated feed water).

In addition it is necessary to discharge the mud resulting from material abrasion and the remaining salts in the water ( manually or automatically).

When discharging sewages into a stream or into the sewerage system, the corresponding legal regulations have to be complied with.

## Weak points:

Thermodynamics:

The greatest losses occur in the heat recovery steam generator because of the great temperature differences between the cooling curve of the exhaust gas and the heating curve of the steam including vaporization. Therefore often double pressure as well as triple pressure cycles are used in order to achieve a better adjustment of the steam curve to the exhaust gas curve.

Costs:

The operation of combined steam and gas plants is very expensive. Yet they show remarkably high electrical efficiency. In CHP they are usually used if a high amount of power is required.

### Stage of development/outlook:

CHP plants with combined steam and gas cycles use a well-established technology and therefore used in big quantities all over the world.

Trends are going towards gas turbines with high exhaust temperatures in order to have the possibility to connect a downstream steam cycle with high efficiency.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.4 Block CHP plants with diesel and gas engines

Diesel and gas engines are often used as block heat and power plants (also see CHP concepts).

**Definition of a block heat and power plant:** A block heat and power plant is a CHP plant which is completely installed, delivered and run as a “block”.

### Basic principle:

- Mechanical energy (gas and diesel engine) is converted into electrical energy with the help of a generator.
- Hot exhaust gases are used for providing heat.

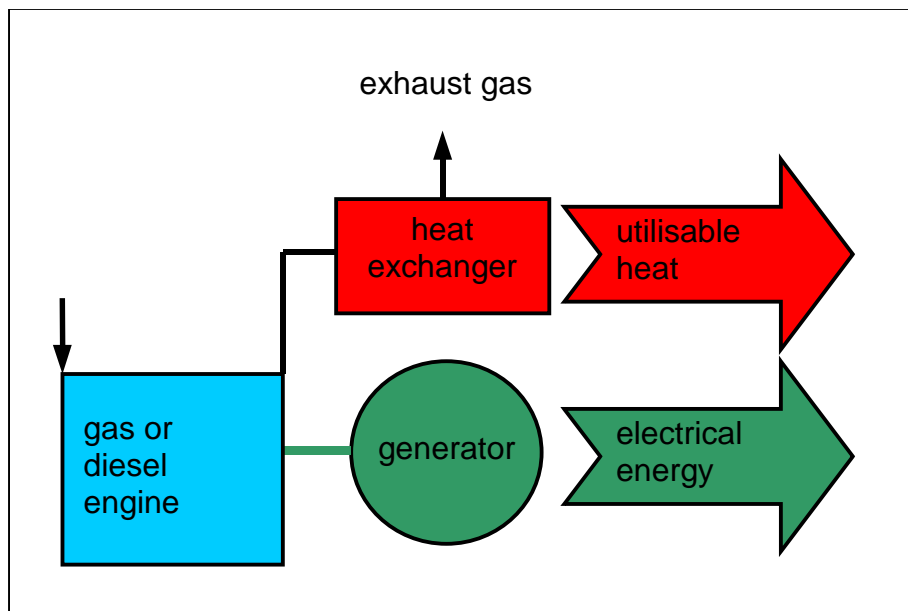


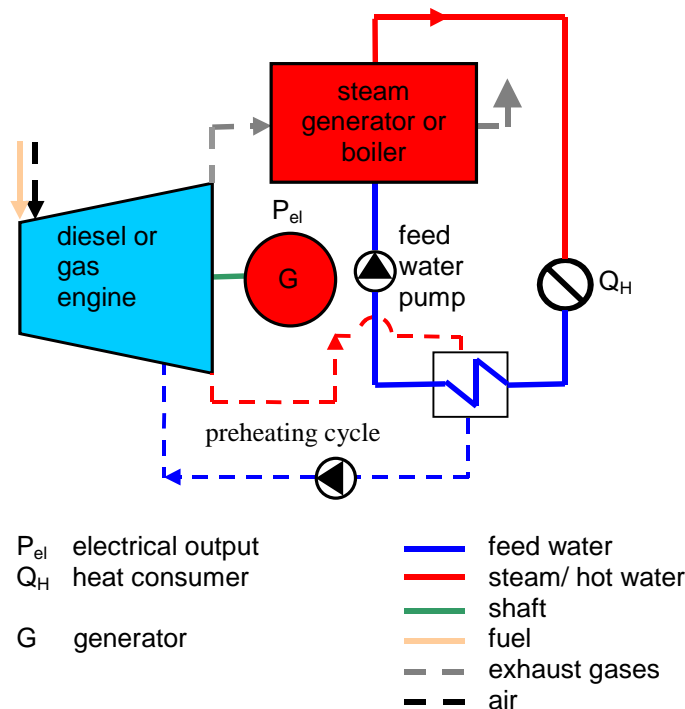
Figure 22: Basic principle of a block heat and power plant

### Functionality:

The generator is converting mechanical work produced at the engine shaft into electrical energy. The heat resulting from combustion during power generation is used for process heat supply or heating purposes. Exhaust gases and engine cooling water function as heat sources.



## Set-up of a block CHP plant:



**Figure 23: Diesel and gas engine block CHP plants**

## General information on block CHP plants with diesel and gas engines:

### Application

- For decentralized power and heat supply of lower to medium output (from ~15 kW<sub>el</sub> upwards)
- Examples: housing estates, industry (drying processes), hospitals, sewage plants (utilization of sewage gas)

### Possible fuels

- gas
- biogas (sewage gas, landfill gas)
- diesel
- gas from biomass gasification, methanol, rape oil
- gasification products

### Advantages

- Power and heat are generated right at the spot where they are needed and thus big transmission losses like they occur in district heating networks can be prevented.
- Overall efficiency of such block heat and power plants amounts to 85% and more referring to the end user. Thus its efficiency is up to 10% higher than in conventional district heating plants.
- Reduction of primary energy consumption with the help of high efficiency
  - through waste heat utilization of exhaust gases
  - through waste heat utilization of engine cooling and therefore
- Reduction of environmental pollution through waste heat and harmful substances.
- Modular design is possible
  - Adjustment to variable power requirements is possible
  - Maintenance work on one of the modules is possible while the other modules are at work.
- Low maintenance expenditure
- Many providers available

### Disadvantages

- High temperature heat supply is not possible (temperature level of waste heat is too low)

In table 6 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size 30-75 kW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	1.250 – 1.800
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,2 – 0,3
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	28 - 31
Thermal efficiency <sub>th</sub>	[%]	52 - 57
Overall efficiency	[%]	80 - 88
Emissions (NOx) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	100 - 250

<sup>1)</sup> based on 5% O<sub>2</sub> in exhaust gas

**Table 6: Data of a block heat and power plant**

High efficiency is reached at normal flow temperatures of up to about 90°C. In the water flow temperatures of about 120°C can be reached by using hot-cooled engines.

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Design:

Usually various modules, each consisting of a gas or diesel engine, a generator and a heat exchanger, are connected in parallel. According to the requirements one or more modules can be operated so that the individual units can be run near full load in a favorable efficiency range. Another advantage is that maintenance work and repairs at multi-module plants can be carried out easier.

Figure 24 shows an example of modular concept.

Source: Jenbacher



**Figure 24: Block CHP plant with modular construction**

Another extension possibility for a block heat and power plant is to use a combination with an absorption refrigerating machine which uses waste heat of the exhaust gas for generating cold. This combination is particularly favourable if besides heat there is also cold required, e.g. for air conditioning.

### Control:

Control can be achieved through the fuel supply.

### Maintenance :

Maintenance intervals amount to 2000 hours.

### Ecological aspects:

The exhaust gas resulting from combustion is cleaned in a catalyst. Exhaust gas emissions are usually below the permitted. Incidental amounts of waste oil have to be disposed of separately.

### Stage of development:

Block heat and power plants with gas and diesel engines are very well-established and therefore used in big quantities all over the world.

In the future, operator convenience of the plants is to be increased so that an automatic control of plant conditions is transmitted to plant administrators via internet. This allows them to react quicker to possible malfunctions.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

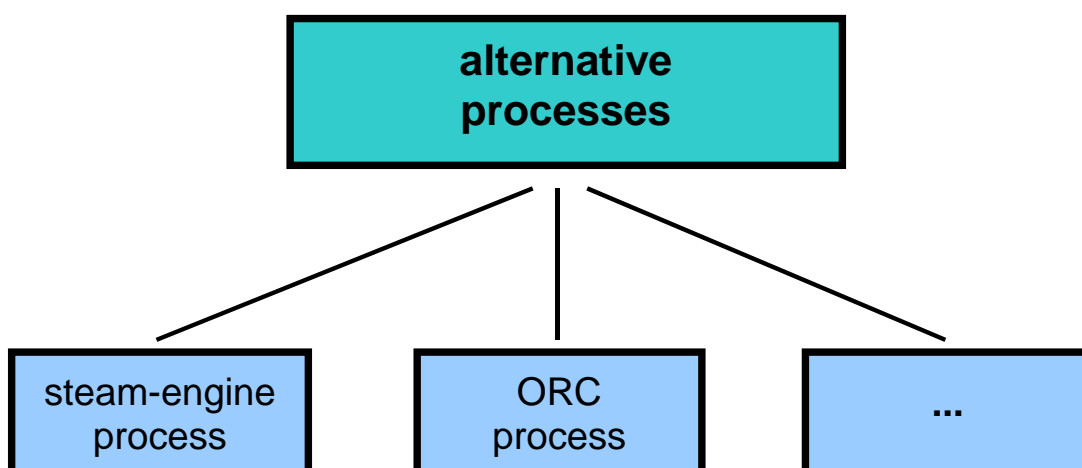
1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.5 CHP with alternative processes

Alternative processes are sophisticated enough to be put in practice but are not yet implemented in great numbers.

The following figure shows different options for CHP with alternative processes.



**Figure 25: CHP with alternative processes**

In the following the steam-engine process and the ORC process are explained in more detail.

## 2.5.1 Steam-engine process

### Functionality:

Exhaust gas resulting from combustion is passing through a boiler in which steam is generated. The steam is then flowing into the steam-engine where by expansion it is performing mechanical work which is later converted into electrical energy in the generator. Now the steam is passed into the condenser where incidental condensation heat can be used as district or process heat. The water is brought to operating pressure by a feed water pump and is then fed to the boiler, thus closing the cycle. Therefore the process corresponds to a steam turbine cycle in which the turbine is replaced by a steam-engine. However, compared to the steam turbine cycle the steam-engine can produce power from 20 kW<sub>el</sub> which allows a decentralized application for lower output.

### Set-up of a CHP plant with steam engine:

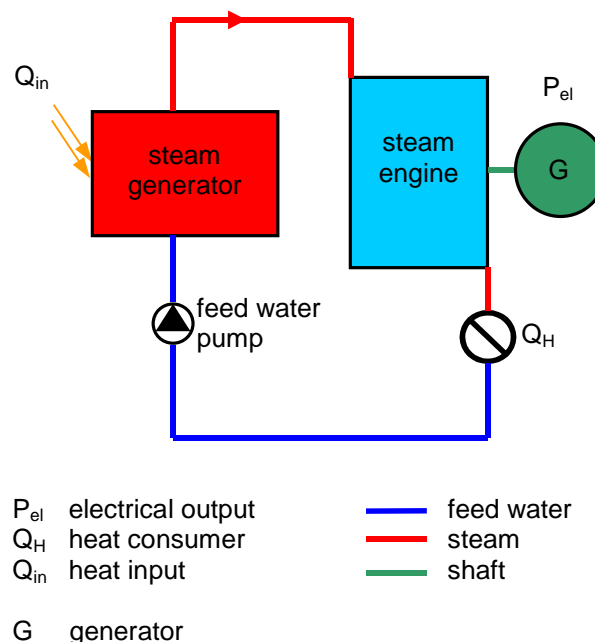


Figure 26: Diagram of a CHP plant with steam-engine

### Principle of a steam-engine:

The steam enters the cylinder (figure a) until the inlet process is stopped by control pistons. The steam expands and is performing work at the piston (figure b). Since thus the volume is increased, pressure is continuously reduced. When the piston has reached its dead center it moves to the right again which causes the control piston to unblock the outlet valve and the steam is leaving the cylinder again (figure c). Thus the process is restarted.

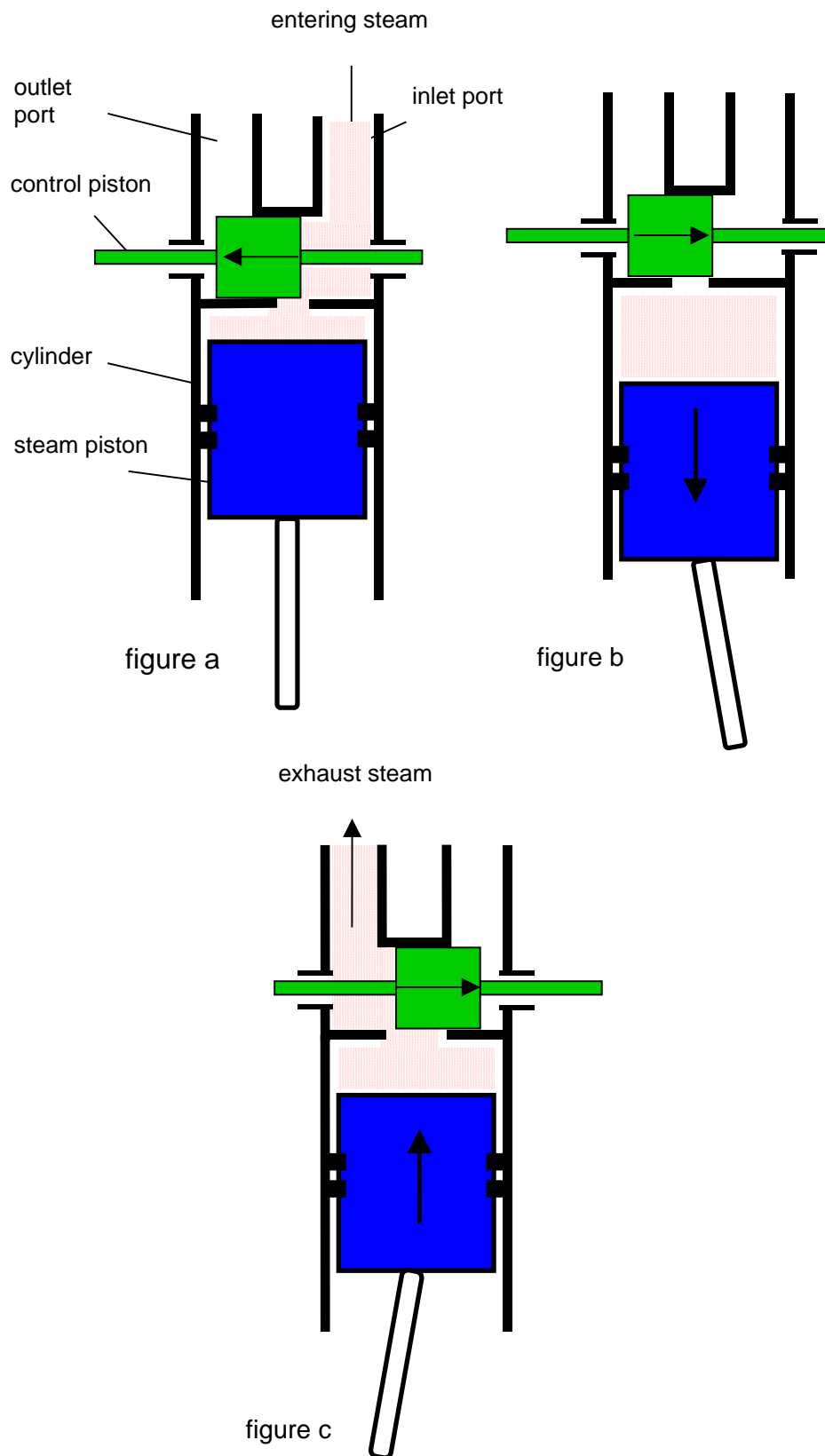


Figure 27: Principle of a steam engine

## General information on CHP with steam engine

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>• For decentralized power and heat supply of lower to medium output (from ~20 kW<sub>el</sub> to ~2000 kW<sub>el</sub>)</li> <li>• Examples: housing estates, industry (drying processes), hospitals</li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>• coal</li> <li>• petroleum</li> <li>• biomass, garbage</li> <li>• basically every fuel is possible</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• very good part-load performance</li> <li>• technology maturity</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• low electrical plant efficiency</li> <li>• requires much maintenance work</li> <li>• noise intensive (acoustic insulation!!)</li> </ul>

In table 7 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~500 kW <sub>el</sub> (biomass-fired)	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 1.500
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,007 – 0,011
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	6 – 20
Overall efficiency	[%]	~ 80 – 90
Emissions (NOx)	-	depending on fuel <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> at the scale of gas engines (ca. 50-500 mg/Nm<sup>3</sup>, according to output)

**Table 7: Data of a steam-engine process**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Design:

The steam engine can consist of one to six working cylinders. Each cylinder has its own control piston; thus the engine consists of two shafts, one regulator shaft and one working shaft. In the following important correlations concerning the steam engine are described.

### Control:

The amount of entering steam can be controlled through the control piston stroke. The stroke of the control piston is adjusted at the regulator shaft with the help of an eccentric with a centrifugal governor. The regulator shaft can be separated so that it is possible to run individual cylinders with different steam inlet and outlet conditions in multi-piston engines.

### Steam condition:

The steam engine can work with saturated steam as well as with superheated steam. If, however, superheated steam is used, the same engine can produce up to 60% more electrical output. The reason for this is the utilization of the higher enthalpy drop of superheated steam compared to the one of saturated steam.

Inlet pressures of the steam can range between 6 and 60 bar.

Steam quantities range from 0,2 to 20 t/h according to requirements.

### Feed water treatment:

Compared to the steam turbine the steam engine is less sensitive to soiling. This makes simpler feed water treatment plants possible (costs !!).

### Operating performance:

When run at part load the produced amount of steam decreases at unchanging temperature and pressure. The released mechanical energy and thus also the electrical energy decreases. It is important though that the greatest possible efficiency of the plant is not reached at the highest electrical output but slightly below it. This is an advantage of the steam engine if it is run at part load. After all, electrical part load efficiency amounts to 90% of the highest possible electrical efficiency when run at half load.

### Maintenance :

- daily check on cylinder oil ( takes about half an hour)
- condensate samples at sporadic intervals to check oil content (takes about half an hour)
- After about 8000 hours: - Oil change in the crank case of the engine  
- components of the steam engine have to be checked
- Replacement of piston and seal rings according to their condition
- Replacement of the piston every 3 - 5 years
- Regular check on the filter equipment

It can basically be assumed that a steam-engine reaches a service life of more than 200.000 operating hours if maintenance is sufficient and proper.

### Ecological aspects:

The oil obtained in the steam-engine can either be burnt in the firing equipment or has to be disposed of separately.



During the vaporization process of water the salts contained in the water remain in the boiler. In order to avoid high salinity (scale build-up!) water is continuously desalinated (1-5 % of the circulated feed water).

In addition it is necessary to discharge the mud resulting from material abrasion and the remaining salts in the water ( manually or automatically).

When discharging sewages into a stream or into the sewerage system, the corresponding legal regulations have to be complied with.

### Weak points:

Because of the high noise level (up to 95 dBA) an application of this technology is not possible without corresponding noise suppression measures in residential buildings etc.

### Stage of development:

Since service life of such a plant highly depends on the maintenance work carried out by the staff, attempts are made to reduce these works to a minimum in the future.

An important approach for achieving this is the development of piston materials that do not need lubrication. This would on the one hand improve operator convenience and on the other hand service life could generally be increased. Besides that, lubricant waste and thus also environmental impact could be reduced.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	ready for the market <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	low <sup>2)</sup>
Short term development potential	medium <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## **2.5.2 CHP on the basis of an ORC process (Organic Rankine Cycle) with biomass**

### Difference compared to the steam turbine cycle:

The difference compared to the steam turbine cycle is that instead of water an organic working fluid (hydrocarbons like isopentane, iso-octane, toluene or silicone fluid) is used. Since this working fluid vaporizes at lower temperatures than water, the process can better be adjusted to a fuel like biomass with its low combustion temperatures.

In order to delay the ageing process of the working fluid, the permitted temperatures close to the wall may not be exceeded. Therefore an intermediate thermo oil cycle allowing better temperature control is necessary.

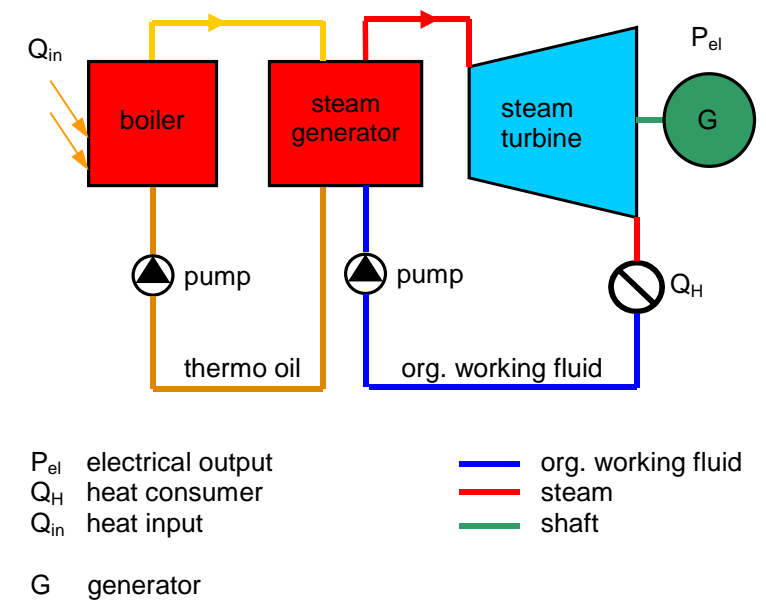
The thermo oil cycle further allows depressurized operating at high temperatures and thus does not require a steam guard.

### Functionality:

The exhaust gas resulting from the combustion process in the biomass boiler supplies heat to the thermo oil cycle. Later the heat is fed to an organic working fluid which therefore vaporizes. The vaporized fluid is expanded in a turbine and the obtained mechanical work is passed to a generator where it is converted into electrical energy. The expanded fluid then enters a condenser where the discharged heat is available at a temperature level which allows the operating of a hot-water network for district or process heat supply. Later the condensate is brought to operating pressure by the pump and is fed to the evaporator again.

In order to increase electrical output, the working fluid escaping from the turbine can be passed through a recuperator (not included in the figure) before it enters the condenser.

### Set-up of an ORC plant:



**Figure 28: Set-up of an ORC process**

#### **Application**

- For decentralized power and heat supply of medium output (~300 kW<sub>el</sub> and more)
- Examples: timber industry, industry (drying processes), housing estates

#### **Possible fuels**

- biomass
- basically every fuel is possible

Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• very good part-load performance</li> <li>• technology maturity</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• intermediate thermo oil cycle necessary (costs !)</li> <li>• little experiences with ORC plants with biomass firing</li> <li>• relatively high investment costs</li> </ul>

In table 8 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~500 kW <sub>el</sub> (biomass-fired)	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 2.300
Silicon oil	[EUR/l]	~ 22
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,007
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	10 – 20
Overall efficiency	[%]	up to 85
Emissions (NO <sub>x</sub> )	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	Depending on fuel ~ 250-400

**Table 8: Data of an ORC process**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Design:

ORC plants are offered as complete modules. The electrical output of an ORC module ranges between 200 and 1500 kW<sub>el</sub>. Higher plant output can be achieved by a parallel operation of modules.

The main part of heat supply is realized in the combustion chamber; but exhaust gas heat can further be utilized by releasing the heat in an economizer. The recovered heat can be used additionally for district and process heat, thus increasing overall efficiency of the plant. Besides that, exhaust gas utilization in the economizer allows a lower operating temperature of the condenser because the necessary heat for reaching the required final temperature for process heat is supplied by the economizer. Thus the electrical efficiency of the plant can be improved.

Usually silicone fluid is used as an organic working fluid in a closed cycle because it is neither toxic nor a greenhouse gas.

## Picture of an ORC plant:

Figure 29 shows an ORC plant like it was used for the timber industry in Admont



**Figure 29: ORC plant in Admont (Source Bios Bioenergiesysteme)**

## Control:

Control of the ORC process can be reached through the heat supply in the boiler.

## Operating state:

Evaporating pressure of the working fluid: 10 bar

Exhaust gas temperature from the boiler: 300 °C

## Maintenance :

ORC plants basically require little maintenance work. Maintenance works amount to about 4 hours a week.

The working fluid (usually silicone fluid) has to be replaced after about 20 years.

## Ecological aspects:

The frequently used silicone fluid doesn't have any ozone-depleting potential, it is easily combustible but not explosive. Because of the low flash point (34°C) leakage losses of the working fluid have to be widely avoided.

Because of the high service life of the fluid (up to 20 years) no replacement is required.

## Conditions for an efficient operating on biomass basis:

- High amount of annual full-load operating hours (> 4000 h)
  - achievable through proper plant design
- High possible efficiency
  - achievable through heat-oriented design
- Utilization of cheap fuel assortments
  - e. g. sawing by-products, production waste

## Weak points:

The low process temperature resulting from biomass utilization and limited upwards by the thermal stability of the working fluid and the thermo oil only allows relatively low efficiency.

## Stage of development:

In the field of geothermics there are already many ORC plants used. Therefore the process represents a proven technology.

In 1999 Austria's first biomass-fired ORC plant was put in operation by the timber industry in Admont (Styria). Further plants are being planned.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table. (Source: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien)

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	demonstration stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.6 Innovative processes

Innovative processes are processes that are not yet mature enough to be put into practice. Most of these processes are still in their developing stage. The following figure shows different options for CHP with innovative processes.

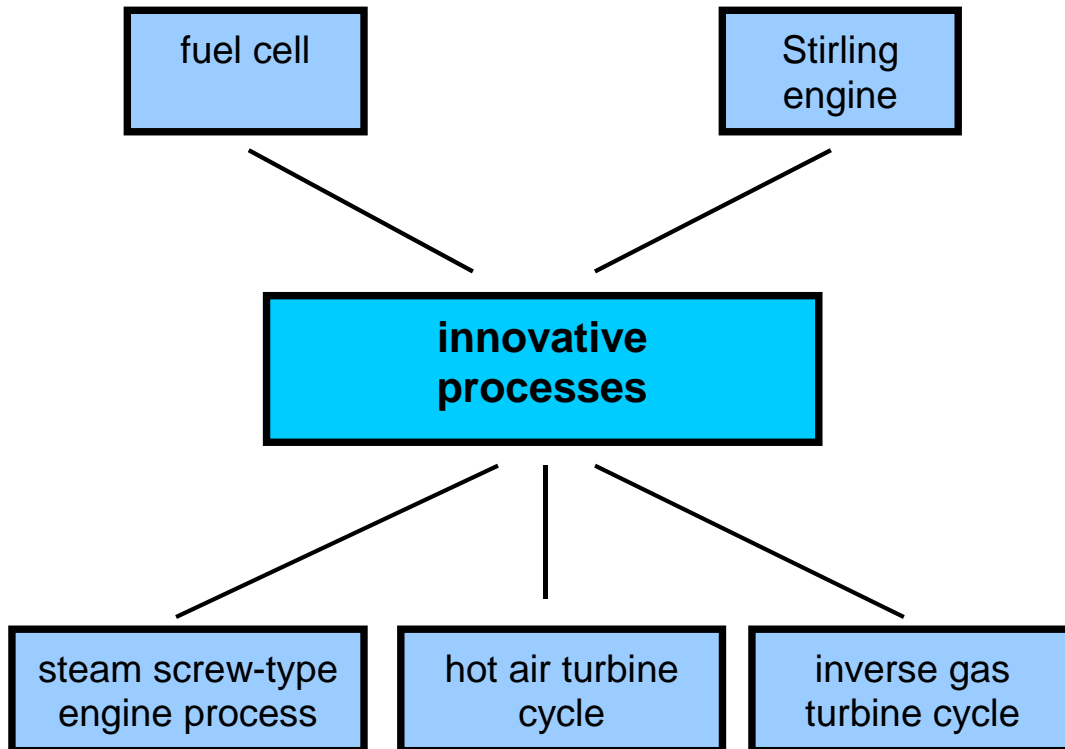


Figure 30: CHP with innovative processes

These technologies are mostly in their developing stage or are not tested enough yet. In the following, CHP with fuel cell technology, with Stirling engine, with inverse gas turbine cycle, with hot air turbine cycle and with steam screw-type engines are explained in more detail.

## 2.6.1 CHP with fuel cell technology

The fuel cell is one option for decentralized power and heat generation with very high efficiency and very low emissions.

### Functionality:

The functionality of the fuel cell corresponds to the inversion of the water electrolysis. During water electrolysis water is split into hydrogen and oxygen by applying voltage to two electrodes.

If the reaction is run backwards and the electrodes are surrounded by hydrogen (or hydrogen rich gas) and oxygen (or air) the highly exothermic detonating gas reaction (combining hydrogen and oxygen into water) causes measurable direct voltage and release of heat. In order to continuously keep the process running, a consistent process gas supply has to be ensured.

Classic pollutants like CO und  $\text{NO}_x$  are not produced.

### Set-up of a fuel cell:

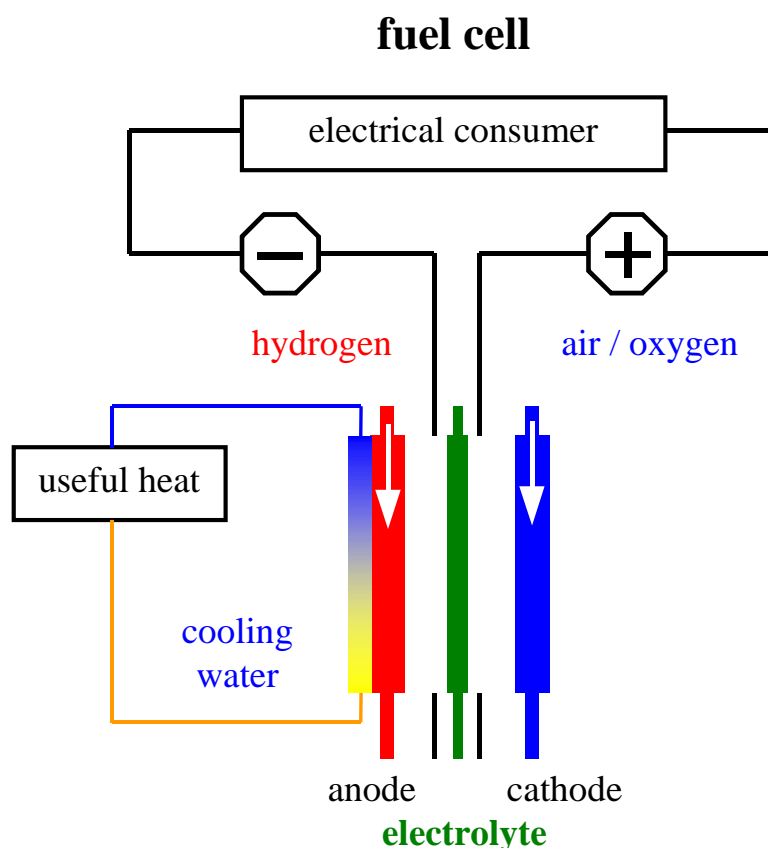


Figure 31: Principle of a fuel cell

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>The application of the fuel cell in decentralized CHP supply corresponds to the application of combustion engines in block heat and power plants. Fuel cells are covering the basic load while oil or gas boilers are responsible for the temporally limited peak load.</li> </ul>
Required fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>hydrogen</li> <li>oxygen / air</li> <li>electrolyte</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>Extremely low emissions without any secondary measures</li> <li>Another advantage is that the limits of the theoretically ideal Carnot process do not apply to this process. Thus fuel cells have a very big potential for generating power and heat with high efficiency.</li> <li>Efficiency of this process is almost independent of the unit size</li> <li>High part load performance</li> <li>Simple modular set-up</li> <li>Low maintenance effort</li> <li>Little noise</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>Very high acquisition costs (block CHP plant about 4000 US-\$/kW, Source Fa. ONSI).</li> <li>Technology not yet mature</li> <li>Another problem - which is not that serious though- is start-up time of the plants which still amounts to a couple of hours from a cold state .</li> </ul>

In table 9 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~100 kW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 3.000
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	low
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	25 - 40
Overall efficiency	[%]	up to 90
Emissions (NOx) <sup>1)</sup>	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 5

<sup>1)</sup> based on 5% O<sub>2</sub> in exhaust gas

**Table 9: Data of a fuel cell plant**

### Best operational mode:

Power or heat operated.



## Design/Application:

Operating temperatures in table 10 show that the SOFC type is more suitable for generating high temperature heat whereas the PEM type can also be used for low temperature heat supply (preheating temperature ~90 °C).

In the future fuel cell systems allowing flexible operating between 100% power and 100% heat are to be used. This makes the installation of a peak boiler unnecessary.

Type	Operating temperature	Electrolyte
<b>PEM</b> (Polymer Electrolyte Membrane)	~ 80-100 °C	solid
<b>PAFC</b> (Phosphoric Acid Fuel Cell)	~ 200°C	aqueous
<b>MCFC</b> (Molten Carbonate Fuel Cell)	~ 650°C	liquid
<b>SOFC</b> (Solid Oxide Fuel Cell)	~ 1000°C	solid

**Table 10: Types of fuel cells**

## Picture of a fuel cell plant:

The fuel cell plant shown on the picture has an electrical output of about 250 kW. This type of plant is also called „direct fuel cell power plant“.



Source: Fuel cell 2000

**Figure 32: Fuel cell plant (Energy Research Corporation) with an electrical output of 250 kW**

## Maintenance :

Maintenance details are not yet available since most of the plants are still in their pilot stage.

## Ecological aspects:

Since hydrogen and partly pure oxygen are used, tightness of the pipelines has to be ensured because of possible fire hazard. Basically these two components do not have environmental impact.

Low emissions are another crucial advantage.

Working with highly acidic electrolytes requires acid-resistant material preventing leakage.

Another important aspect are the seals which should prevent any possible leakage of acid.

## Stage of development:

At present fuel cells are still in their pilot stage. The high investment costs are the main reason preventing the breakthrough of this technology.

Starting from the USA R&D activities have also been intensified in Europe. The three leading enterprises (Sulzer Hexis AG, HGC, and Vaillant) are announcing commercial small batch series for the years 2002/2003.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

<b>Stage of development/ outlook</b>	<b>status</b>
Present stage of development	pilot stage to demonstration stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium to high <sup>2)</sup>
Short term development potential	medium <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

Ongoing projects:

(Source Austria Ferngas Gesellschaft m.b.H., EVA)

<b>PAFC</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Test runs with 200 plants of 50 KW up to 11 MW</li> <li>• More than 2 billion operating hours</li> <li>• Reliable concept</li> </ul>
<b>MCFC / SOFC</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Some pilot plants are being tested (up to 2 MW)</li> <li>• Material problems</li> <li>• Highest development potential</li> </ul>
<b>PEM</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• First stationary pilot plants</li> <li>• Particularly suitable for mobile application</li> <li>• Significant cost reduction potential</li> </ul>

**Table 11: Fuel cell projects**

## 2.6.2 Stirling engine process

### Functionality:

Exhaust gas resulting from a combustion process enters a boiler-heat exchanger and releases heat to the active gas in the engine. Possible working fluids are air, nitrogen, helium or hydrogen. Residual heat of the exhaust gas can be used for supplying heat with the help of an additional heat exchanger. Cooling in the cooler-heat exchanger happens with the help of the return pipe of the heat supply network. Thus the heat discharged in the engine can be further utilized (heating purposes, ...).

The operating mode of the Stirling engine is explained in more detail in the following.

### Set-up of a CHP plant with Stirling engine:

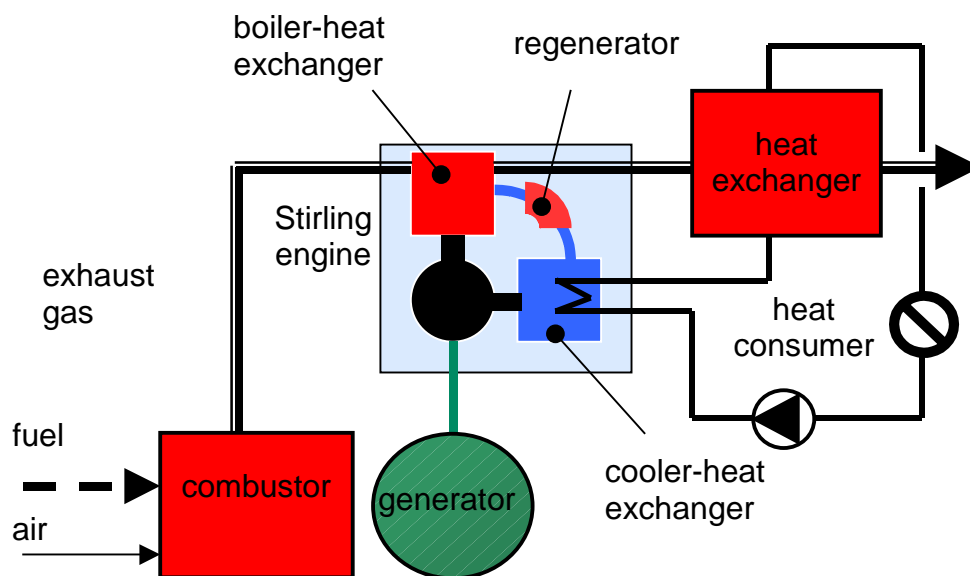


Figure 33: Set-up of a CHP plant with Stirling engine

### Operating mode of the Stirling engine:

In the Stirling engine the working fluid is moving in a closed system between two cylinders. In the working cylinder heat for the work output is supplied whereas in the compression cylinder heat is discharged in order to reduce compression work. When the working fluid is moved from the working cylinder to the compression cylinder the residual heat is stored in the regenerator. When the compressed fluid is moved back to the working cylinder this stored heat can be utilized again.

Basically one work cycle consists of the following individual phases:

#### **1-2: Isochoric heating phase:**

Because of the downward movement of the compression piston the gas is isochorically pushed into the working cylinder passing the regenerator. The piston of the working cylinder is then moving to the right. At the same time the heat stored in the regenerator

(see isochoric cooling phase) is discharged to the working fluid. Because of the heating in the working cylinder temperature and pressure are rising. The active gas is passed from the cold to the hot cylinder.

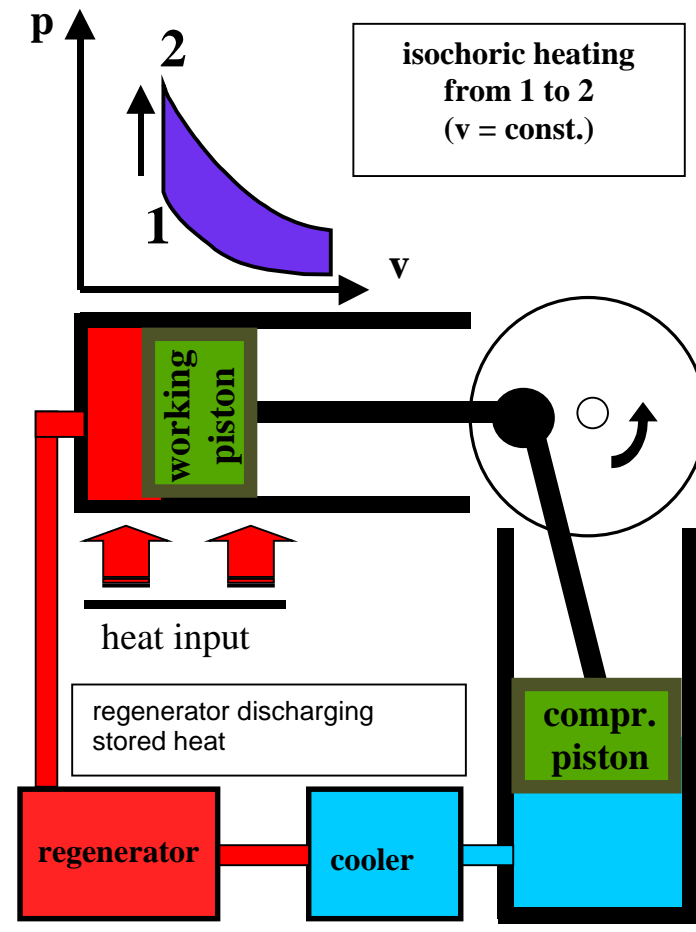


Figure 34: Functionality of a Stirling engine: Isochoric compression

### 2-3: Isothermic expansion phase:

Because of the additional heat input the working fluid expands and is pushing the working piston to the right. Mechanical output is transmitted to the piston rod. The compression piston is moving upwards with slight time shift.

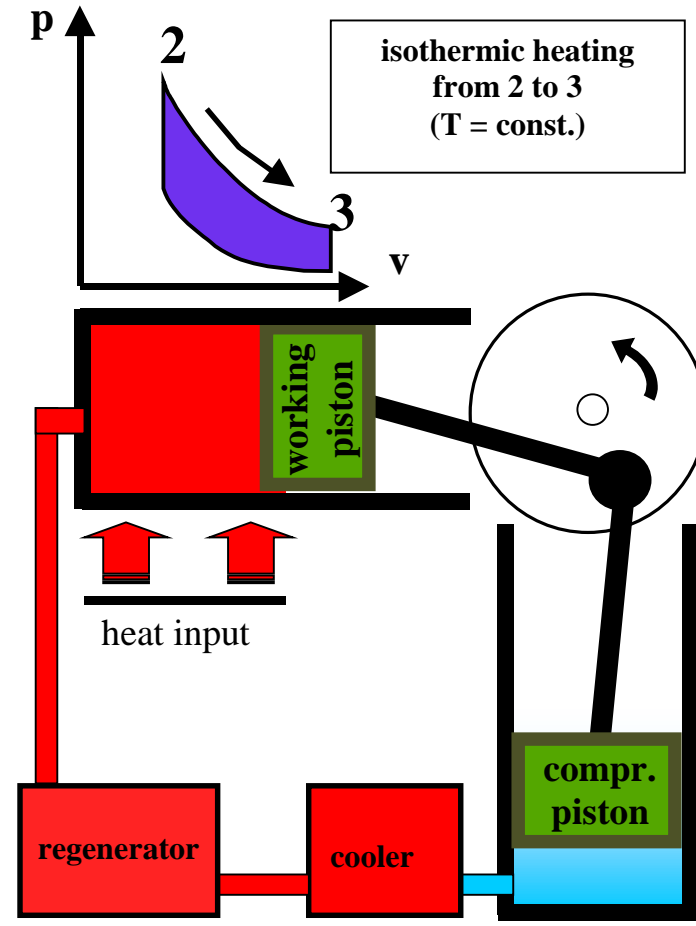


Figure 35: Functionality of a Stirling engine: Isothermic expansion

### 3-4: Isochoric cooling phase:

After reaching its lower dead center the working piston moves to the left and thus isochorically pushes the working fluid first through the regenerator which is taking up heat and then through the cooler before it enters the compression cylinder which is moving upwards.

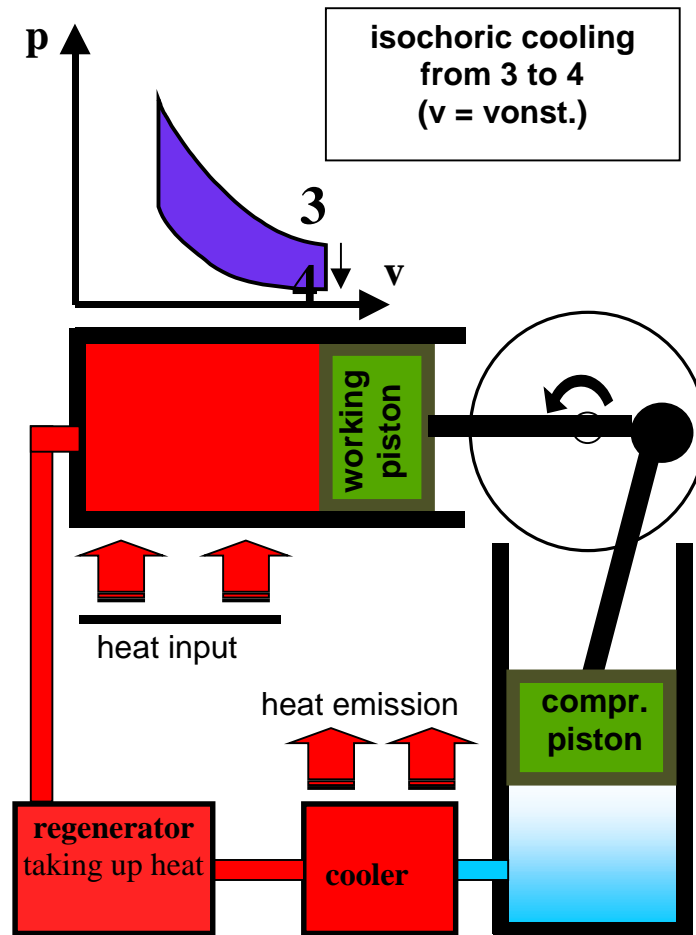


Figure 36: Functionality of a Sterling engine: Isochoric cooling phase

#### 4-1: Isothermic compression (without picture) :

The working fluid is cooled in the compression cylinder, its volume decreases, the compression piston moves down. The working piston moves to the left and is thus compressing the working fluid.

When the working piston has reached its upper dead center the cycle starts again.

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>• For decentralized power and heat supply of low output (10 - 45 kW<sub>el</sub>)</li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>• coal</li> <li>• petroleum</li> <li>• biomass</li> <li>• basically every fuel is possible</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• low in maintenance</li> <li>• low in noise</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boiler-heat exchanger is problematic because of the high temperature</li> <li>• Sealing difficulties</li> <li>• Poor part load performance</li> <li>• Small plant size (only up to ~ 50 kW<sub>el</sub> [in the future up to 150 kW<sub>el</sub>] possible)</li> </ul>

In table 12 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size 10 - 40 kW <sub>el</sub> (biomass-fired)	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 2.400
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	~ 0,004 – 0,011
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	21 - 28
Overall efficiency	[%]	63 - 86
Emissions (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	~ 10-15

**Table 12: Data of a Stirling engine process**

### Best operational mode:

Heat operated

### Design:

There are two important designs differing in the arrangement of the pistons.

- -Type: the pistons are at a 90° angle to each other
- -Type: The two pistons (working and compression piston) are arranged one above the other in the same cylinder. The necessary phase shift of the two pistons is reached with the help of a special linkage.



### Picture of a Stirling engine:

The following picture shows a Stirling engine with an easy functioning 90°-V2-machine with a shaft power between 3 kW and 10 kW.



**Figure 37: Stirling engine (Source: zsw)**

### Control:

Control of the Stirling engine is achieved through adjustment of the temperature in the boiler-heat exchanger.

### Operating state:

Operating pressure: between 33 bar and 150 bar

Exhaust gas temperature at the boiler-heat exchanger: between 600 °C and 1400 °C

### Maintenance :

Maintenance intervals range between 5.000 and 7.000 operating hours.

After 25.000 operating hours a more thorough revision should be carried out.

### Ecological aspects:

Stirling engines have noise emission levels that are 90% more favourable than those of comparable diesel engines.

The used fluids air and helium do not have environmental impact. The usage of hydrogen requires special precautions.

### Weak points:

The temperature can not be increased arbitrarily due to the properties of the material of the boiler-heat exchanger.

Another problem is the sealing of the pressurized exhaust chamber (space between the two pistons).

### Stage of development:

Stirling engines are gaining more and more importance in their application as block heat and power plants. The basis for this is an intensive advancement of the aggregates.

Output can be significantly improved by increasing the working pressure and reducing the mass of the moved parts.

CHP plants with Stirling engines are close to market maturity.

Intensive research is amongst others done at the research institute Joanneum Research in Graz. Mainly tests with a biomass firing equipment are being carried out there.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table. (Source: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien)

Stage of development/outlook	Stage
Present stage of development	pilot stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	Medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	high <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

### 2.6.3 Inverse gas turbine cycle

#### Functionality:

In the conventional gas turbine cycle air is compressed, fuel is fed and burnt, and exhaust gas is then expanded from high pressure to ambient pressure in the turbine.

In the inverse gas turbine cycle atmospheric combustion takes place, exhaust gas is expanded from ambient pressure to a pressure below atmosphere in the turbine and is later compressed to ambient pressure again in a compressor. The advantage of this cycle lies in atmospheric combustion which avoids expensive and difficult fuel supply to the pressure vessel if biomass is used.

The heat contained in the exhaust gas after passing the turbine is used for generating steam or hot water and is thus available for other heat consumers. At the same time cooling of the exhaust gas reduces compression work. The exhaust gas is heated during compression and this heat can further be used for preheating air before it enters the combustion chamber (not in the picture).

In order to increase electrical output and efficiency it is possible to produce steam with the help of turbine exhaust gas. This steam is then fed into the turbine again, which of course happens on the expense of heat output.

As another option a combined steam and gas cycle with a downstream steam turbine cycle which leads to increased electrical output and efficiency has been examined.

#### Set-up of a CHP plant with inverse gas turbine cycle:

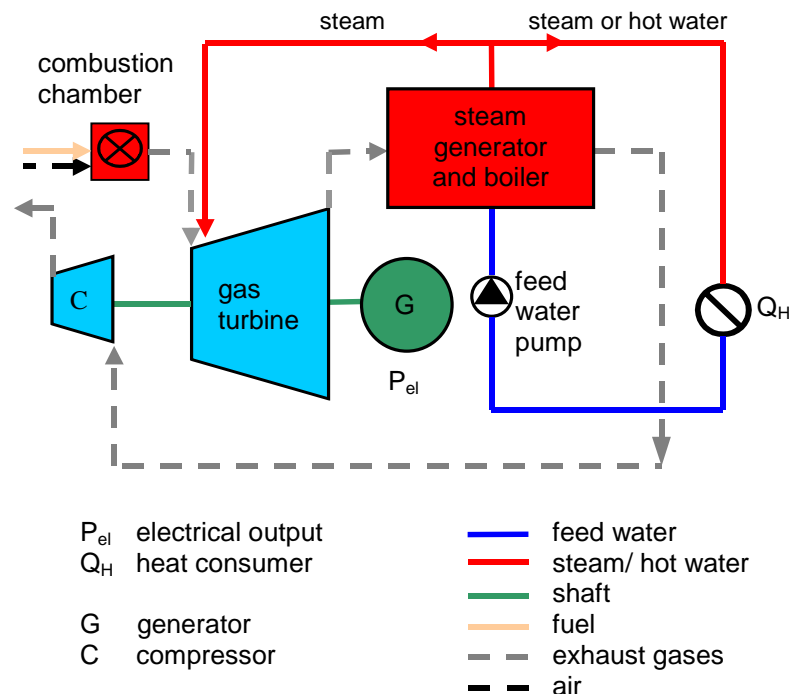


Figure 38: Inverse gas turbine cycle with heat recovery

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>For the production of electrical output and heat with biomass starting from about 1 MW<sub>el</sub></li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>Intended for biomass</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>Good electrical efficiency</li> <li>No overpressure</li> <li>Standard components can be used</li> <li>Also moist biomass can be used</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>Technology not yet mature</li> <li>Plant complexity</li> <li>High specific investment costs because turbo machines are very large due to vacuum operation</li> <li>Cleaning of exhaust gas with the help of a cyclone before entering the gas turbine is necessary</li> </ul>

In table 13 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~500 - 1500 kW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 3.600
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	Unknown
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	up to 22
Overall efficiency	[%]	up to 75
Emissions (NO <sub>x</sub> )	-	no data available yet

**Table 13: Data of an inverse gas turbine cycle**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Operating state:

Medium output (~1 MW<sub>el</sub> and higher)

Turbine inlet temperature: 600 – 800°C

Low pressure: 0,30 bar – 0,39 bar

**Control:**

Because of possible steam injection into the turbine a shift between heat and power output is possible.

Another possibility is to vary the amount of fuel burnt in the combustion chamber.

**Maintenance :**

There is no data available yet. However, if standard components are used there should not be any major problems.

**Ecological aspects:**

Since this process is intended to be run with biomass there are also low emissions associated with biomass combustion. Biomass is CO<sub>2</sub> neutral and is thus not contributing to the greenhouse effect.

**Stage of development:**

The concept of CHP with inverse gas turbine cycle was developed at the Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics of the Graz University of Technology. In a study supported by the Province of Styria the costs of such a plant and the possibilities for the construction of a pilot plant have been elaborated.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

<b>Stage of development/ outlook</b>	<b>status</b>
Present stage of development	concept stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	low <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

## 2.6.4 Hot air turbine cycle (indirect gas turbine cycle)

### Functionality:

In the conventional gas turbine cycle the exhaust gas is expanded in the turbine. In the indirect gas turbine cycle instead of exhaust gas air is expanded in the turbine and the heat is transmitted from the exhaust gas to the process air in a heat exchanger.

Any type of fuel can be atmospherically burnt in a boiler. In a high temperature heat exchanger the exhaust gas gives off heat to the compressed process air. The heated working air flows into the turbine and performs mechanical work. The escaping expanded air is passed to an air preheater preheating combustion air. The residual heat contained in the exhaust gas after passing the preheater can be used for generating steam or hot water and is thus available to other heat consumers.

Another possibility is steam injection into the turbine. In this process part of the generated steam is injected into the power turbine in order to increase electrical output and reduce heat output.

### Set-up of CHP plant with indirect gas turbine cycle:

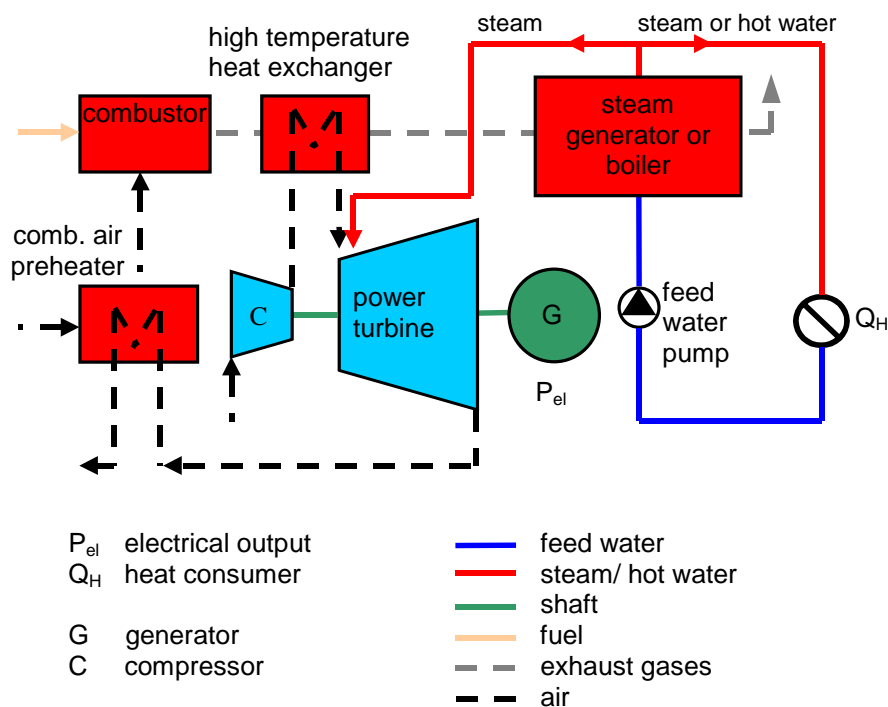


Figure 39: CHP plant with hot air turbine cycle

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>For the production of electrical output and heat starting from 400 kW<sub>el</sub></li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>biomass</li> <li>coal</li> <li>petroleum</li> <li>basically every fuel can be used</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>plants with high electrical output are possible</li> <li>high electrical plant efficiency can be achieved through steam injection</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>Technology is not yet mature</li> <li>Plant complexity</li> <li>High thermal stresses in the heat exchanger</li> <li>Expensive heat exchanger</li> </ul>

In table 14 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~250 – 500 kW <sub>el</sub>	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~3.900
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	unknown
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	up to 30 (with steam injection !)
Overall efficiency	[%]	~ 80
Emissions (NOx)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	depending on fuel <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> at a scale of about 200-500 mg/Nm<sup>3</sup>, according to output

**Table 14: Data of an indirect gas turbine cycle**

### Best operational mode:

Power operated

### Operating state:

Medium output (~1 MW<sub>el</sub> and higher)

Turbine inlet temperature: ~ 800 – 1000 °C

Turbine inlet pressure: ~ 10 bar

**Control:**

Because of possible steam injection into the turbine the electrical output can be increased while the released useful heat is reduced.

Control can also be achieved through variation of the amount of fuel burnt in the firing equipment. Yet it is important that the permitted temperature limits of the heat exchangers are not exceeded.

**Maintenance :**

The parts of the heat exchangers where the exhaust gas passes through have to be continuously cleaned which is mostly done automatically.

Besides that, the highly thermally stressed parts have to be regularly checked for stress cracks.

More detailed data about maintenance activities have to be gained through pilot plants.

**Ecological aspects:**

The ecological impact is mostly dependent on the type of fuel which is used.

**Stage of development/ outlook:**

Presently a test plant at the Free University of Brussels is run with biomass as a fuel. In order to avoid the problems caused by the varying moisture content of the biomass, it is only used as a basic fuel. The desired final temperature is achieved through an auxiliary gas firing equipment.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table.

<b>Stage of development/ outlook</b>	<b>status</b>
Present stage of development	demonstration stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	low <sup>2)</sup>
Short term development potential	low <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low



## 2.6.5 Steam screw-type engine process

### Functionality:

The steam screw-type engine process is different from the conventional steam turbine cycle or the steam engine process because a screw-type engine is used for steam expansion. The exhaust gas resulting from combustion produces steam inside the boiler. The steam enters the steam screw-type engine, where it is expanded. Because of that the steam performs mechanical work, which is converted into power by the generator. In the subsequent condenser the obtained condensation heat is used for district or process heat supply. With the help of a feed water pump the water is then brought to operating pressure and is fed into the boiler, thus closing the cycle.

### Set-up of a CHP plant with steam screw-type engine:

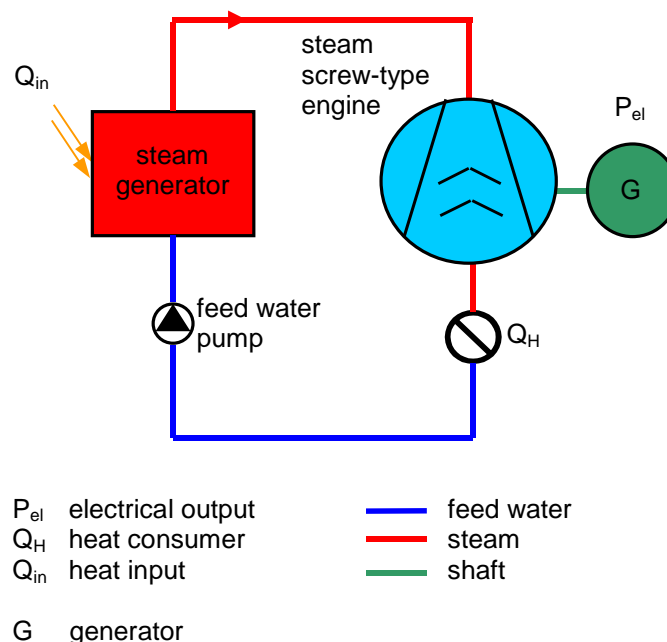


Figure 40: Diagram of a CHP plant with steam screw-type engine

### Principle of a steam screw-type engine:

A screw-type engine consists of two interlocking spiral rotors. The working space between the two spiral rotors is changing periodically.

The intake is open. The steam enters the working space, the intake is closing because of the continuous rotor movement, and the steam begins to expand.

The two rotors are driven by this expansion process. This mechanical work is later converted into power by the generator.

## General information on the steam screw-type engine

Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>For decentralized power and heat supply of lower to medium output (~20 kW<sub>el</sub> - ~2000 kW<sub>el</sub>)</li> </ul>
Possible fuels
<ul style="list-style-type: none"> <li>biomass</li> <li>petroleum</li> <li>coal</li> <li>basically every fuel is possible</li> </ul>
Advantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>good part load performance</li> <li>wet steam can be used</li> <li>low maintenance expenditure</li> </ul>
Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>little operational experience</li> <li>limited steam pressure</li> </ul>

In table 15 some data from a plant within a certain range of performance is outlined.

Plant size ~500 – 700 kW <sub>el</sub> (biomass-fired)	Unit	Value
Specific investment costs	[EUR/kW <sub>el</sub> ]	~ 1.600
Specific maintenance costs	[EUR/kWh <sub>el</sub> ]	0,004 – 0,007
Electrical efficiency <sub>el</sub>	[%]	10 – 15 (20)
Overall efficiency	[%]	up to 90
Emissions (NOx)	-	depending on fuel <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> at the scale of gas engines (ca. 50-500 mg/Nm<sup>3</sup>, according to output)

**Table 15: Data of a steam screw-type engine process**

### Best operational mode:

Power or heat operated.

### Design:

There are two types of steam screw-type engines: the wet-running and the dry-running engines.

In the wet-running engines oil is injected into the working space for lubrication purposes. Later this oil has to be filtered out of the cycle again.

The dry-running engines achieve a contactless movement because of a special synchromesh gear and therefore no lubrication is necessary. Yet the leakage between the screws and the engine casing is bigger than the one of the lubricated engine and thus also leakage loss is higher.

### Picture of a steam screw-type engine:

The following figure shows the prototype plant for a steam screw-type engine process at the University of Dortmund.

The plant has an electrical output of about 250 kW.

Source: UNI Dortmund



**Figure 41: Prototype plant for a steam screw-type engine at the University of Dortmund**

### Control:

Control can be achieved by throttling the steam entering the working space. Thus pressure and released electrical output are reduced.

### Steam conditions:

The steam screw-type engine can be operated with superheated steam and saturated steam as well as with wet steam.

### Maintenance :

Steam screw-type engines are very low in maintenance. The oil in the oil-lubricated design has to be checked regularly in order to avoid possible damage.

Maintenance expenditure amounts to about 3 hours per week.

After about 5 years a more extensive revision should be conducted.

### Ecological aspects:

The oil from the wet operated steam screw-type engine can be burnt in the firing equipment or has to be disposed of separately.

During the vaporization process of water the salts contained in the water remain in the boiler. In order to avoid high salinity (scale build-up!) water is continuously desalinated (1-5 % of the circulated feed water).

In addition it is necessary to discharge the mud resulting from material abrasion and the remaining salts in the water ( manually or automatically).

When discharging sewages into a stream or into the sewerage system, the corresponding legal regulations have to be complied with.

### Further information:

- Compared to the steam engine, the foundation required for the steam screw-type engine does not have to be that strong because the vibrations caused by the rotatory movements are not as strong as the ones caused by the translatory movements.
- Since steam screw-type engines with 90 dBA are pretty noisy, sufficient acoustic insulation is required when used in residential areas.

### Weak points:

Because of the high noise emissions (up to 90 dBA) an application of this technology in apartment houses etc. is not possible without corresponding noise insulation measures.

### Stage of development:

Today screw-type engines are mostly used as compressors. When they are run as engines, a well-proven technology is also used.

Trends are definitely going towards dry running engines because oil problems can be avoided and thus maintenance expenditure is reduced.

Some important parameters regarding stage of development and outlook are summed up in the following table. (Source: UNI Dortmund)

Stage of development/ outlook	status
Present stage of development	demonstration stage <sup>1)</sup>
Short term cost reduction potential	medium <sup>2)</sup>
Short term development potential	medium <sup>2)</sup>

1) Stages of development: concept stage, laboratory stage, pilot stage, demonstration stage, market maturity

2) 1 year...high, 2 years...medium, 3 years...low

### 3 Which type of fuel can be used for each process?

CHP plants can be operated with lots of different fuels, but not every fuel can be used for each process. Therefore an overview of the various possible fuels and their application in CHP is presented in the following.

#### 3.1 Gas

When operated with the low-emission fuel natural gas, block heat and power plants contribute to the reduction of environmental impact because there are hardly any pollutant-producing elements to be found in natural gas. Therefore the exhaust gases produced during combustion of natural gas in block heat and power plants are almost free of sulphur dioxide, dust, heavy metal and halogen compounds. Besides that, the low carbon natural gas contributes the least to the greenhouse effect compared to other fossil fuels. At the same energy content about 40-50% less CO<sub>2</sub> is produced during the combustion of natural gas than during the combustion of coal. About 25 % less CO<sub>2</sub> is produced than during the combustion of fuel oil.

The following figure shows options for the utilization of gas in CHP.

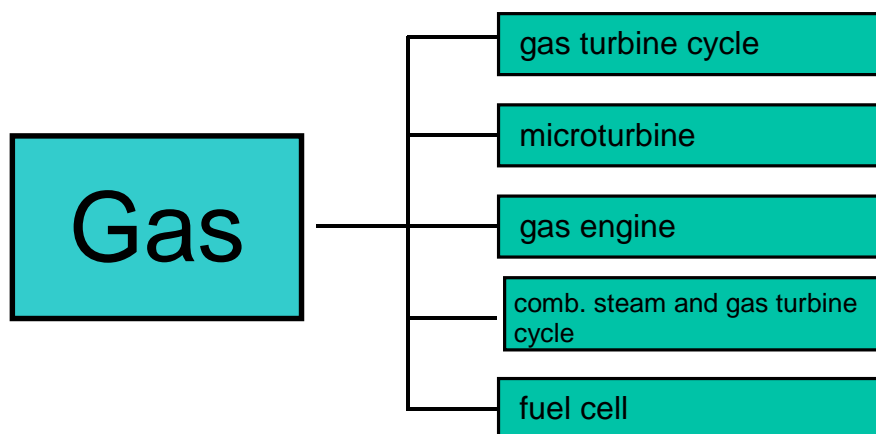


Figure 42: Options for the application of gas

## 3.2 Biomass

Decentralized thermal utilization of biomass is gaining more and more importance in Austria. The reason for this is on the one hand the decentralized production of biomass and on the other hand the high transportation costs compared to the fossil fuels because of the low energy density of biomass.

An EU target even aims at tripling the application of biomass until the year 2010. The following figure shows examples for the application of biomass in CHP.

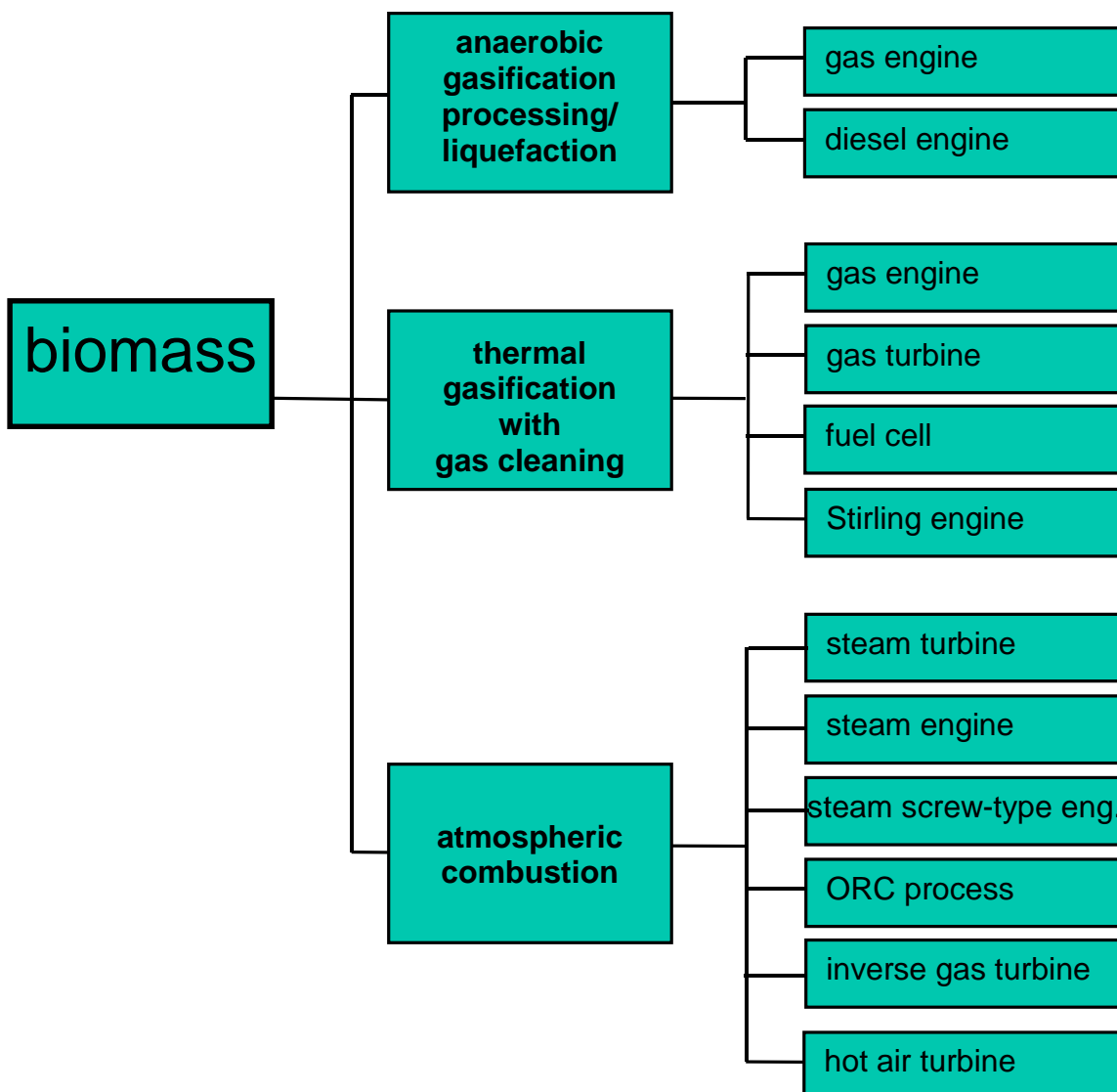


Figure 43: Options for the application of biomass

### 3.3 Coal, petroleum products

These fuels can basically be used in all plants in which a boiler has to be fired. However petroleum products can also be used in processes without boilers, e.g. in the diesel engine process or the gas turbine cycle.

The following figure shows examples for the application of coal and petroleum in CHP.

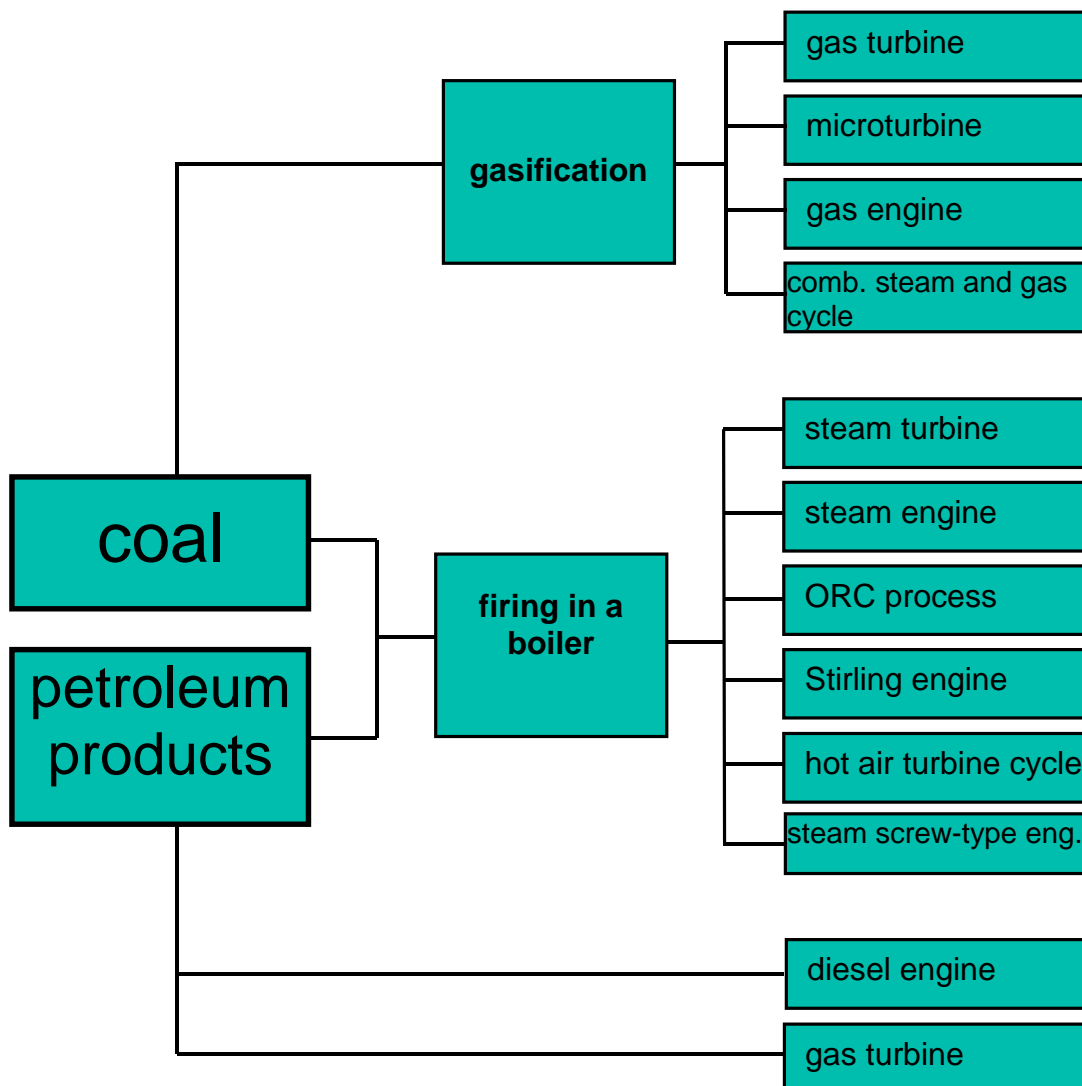


Figure 44: Options for the application of coal and petroleum products in CHP

## 4 Economic aspects:

CHP plants basically have a higher capital expenditure than heat or power plants. Yet they require less primary energy. Economic efficiency of the CHP plant is reached if energy cost reduction balances additional investment costs within an acceptable time.

The price level of fuel and electricity are of vital importance for energy cost reduction. Therefore the expected energy price development has to be taken into account in the calculations.

It also has to be noted that amortization time is not really informative regarding economic efficiency of the plant. It is only relevant for risk estimation.

In order to determine economic efficiency of the plant usually either the net present value method, the terminal value method, the actual cash value method or the annuity method are used. In addition to the static calculation methods also dynamic efficiency calculations which are taking price alterations into account, are used for long-term comparisons. In the following the receipts are compared with the incidental costs.

The receipts of a CHP plant consist of the following:

Receipts
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Electricity tariff and demand rate (service supply costs)</b></li> <li>• <b>Heating tariff when supplied by district heating network or own heat generation costs via a boiler</b></li> <li>• <b>Feeding of surplus power into the public network</b></li> <li>• <b>Avoided power outage costs through emergency power supply</b></li> </ul>

The annual costs of a CHP plant consist of the following:

Costs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Capital costs</b></li> <li>• <b>Consumption costs</b></li> <li>• <b>Operating costs</b></li> </ul>

In the following the different types of costs are explained in more detail.

### Capital costs:

In order to determine the capital costs, the investment costs of the individual plant components have to be calculated.

This type of costs is heavily influenced by the underlying interest rate and the depreciation time.



If the CHP plant only covers the base load (e.g. block CHP plants), also the investment costs for the peak boiler have to be taken into account.

Costs originate from:

- Required modules
- Electrical equipment
- Adjustment of the heating system
- System control
- Building, foundation,...
- Fuel supply
- Additional costs through planning, approval,...
- Commissioning
- ...

### Consumption costs:

Consumption costs are the costs for fuel and auxiliary power – mostly electrical energy – for pumps or the like.

If the CHP plant only covers the base load (e.g. block CHP plants), also the fuel and the auxiliary power for the peak boiler have to be taken into account.

### Operating costs:

This type of costs consists of the maintenance costs, the service costs and the personnel costs required for operating the plant.

Besides that, also reserve power costs can incur, e.g. insurances for larger plants.

Maintenance costs are difficult to calculate and are thus usually calculated percentally from the investment costs.

Using the costs and the receipts, the annual surplus can be calculated.

With the help of these surpluses the amortization time of the plant can be determined and thus it is also shown if an investment should be done.

When financing such plants, it has to be noted that it is possible to receive financial support. Thus investment costs can be reduced and the plant can be depreciated sooner.

The following link offers an overview of different possibilities for financial support.:

<http://www.energytech.at/foerderung/index.html>

## 5 References

### 5.1 Basics (in German)

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1153](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1153)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128)
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate; O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. ;e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1154](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1154)
- **Untelagen ZSW** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
Kontakt:  
e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1146)

## 5.2 Concepts of CHP plants

### Steam Turbine Process (in German):

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1153](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1153)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128))
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate; O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. ;e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1154](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1154)
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1146)

### Gas Turbine Process (in German):

- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1153](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1153)
- **Thermische Turbomaschinen I, 3.Auflage 1982**  
Autor: W.Traupel  
Verlag: Springer
- **Thermische Turbomaschinen II, 3.Auflage 1982**  
Autor: W.Traupel  
Verlag: Springer
- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>

- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate; O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. ;e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1154](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1154)
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1146)

### Gas Turbine Process (in English):

- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publication by Arthur D. Little  
More information: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1118](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1118)

### Microturbine (in German):

- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>
- **Unterlagen von G.Simader (EVA)**  
Kontakt: [simader@eva.ac.at](mailto:simader@eva.ac.at)
- **Mikroturbine, Neue Chancen der KWK im Leistungsbereich 30-200 kW<sub>el</sub>**  
Publikation, DI Reinhard Ihle, VDI, Krefeld

### Microturbine (in English):

- **Descriptive literature by Bowman, manufacturer**  
contact: [sales@bowmanpower.co.uk](mailto:sales@bowmanpower.co.uk)
- **Descriptive literature by Capstone, manufacturer**  
Website: <http://www.capstoneturbine.com>
- **Descriptive literature by Allied Signal Power Systems, manufacturer**  
Website: <http://www.alliedsignal.com>
- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publication by Arthur D. Little  
More information: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1118](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1118)

### Block CHP Plants (in German):

- **Jenbacher AG**  
Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung bei der Nutzung von Biogas in Gasmotoren  
Skript, ATV Seminar, Essen 08./09. Februar 1999  
Kontakt: Martin Schneider,e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1148](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1148))

- **Jenbacher AG**  
Kraft-Wärme-Kältekopplung mit Gasmotoren  
10. Deutsche Euroforum-Branchentage, 19.-22. Oktober 1998, Bonn  
Kontakt: Martin Schneider, e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1141](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1141))
- **Untelagen ZSW** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
Kontakt: e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Nähere Informationen:  
Reetz Beate; O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. ; e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1154](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1154)
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1146)

### Steam engine (in German):

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128))

### ORC Process (in German):

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128))

### Fuel Cell (in German):

- **Brennstoffzellen-Systeme – Energietechnik der Zukunft?**  
Publikation: Günter Simader, e-mail: [simader@eva.ac.at](mailto:simader@eva.ac.at)
- **Zeitschrift Ful (Siemens)**  
Artikel: Brennstoffzellen, Die Effizienz-Weltmeister: Brennstoffzelle mit Gasturbine  
Ausgabe: Heft 1/2000  
Online verfügbar unter: <http://www.siemens.com/Ful/de/zeitschrift/aktuell/index.html>

- **Untelagen ZSW** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt: Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Brennstoffzelle, eine Option für die Zukunft**  
Vortrag von Martin Pokojski, Berliner Kraft- und Licht (Bewag)- AG  
2. EUROFORUM-Branchentage „KWK“  
Download: <http://www.eva.ac.at/publ/pdf/fuelcell.pdf>
- **Das Brennstoffzellen BHKW PC25-A: Ein Erfahrungsbericht**  
Vortrag von Thomas Heissenberger, Austria Ferngas Gesellschaft m.b.H.  
2. EUROFORUM-Branchentage „KWK“
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1146)

### Fuel Cell (in English):

- **Opportunities for Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications**  
Publication by Arthur D. Little  
More information: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1118](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1118)

### Stirling engine (in German):

- **Forschungsunterlagen der Fa. SOLO Kleinmotoren GmbH**  
Kontakt: Dipl.-Ing. Andreas Baumüller  
e-mail: [andres.baumueller@solo-germany.com](mailto:andres.baumueller@solo-germany.com)  
Tel.: +49 / 7031 301-0
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>

### Steam screw-type engine (in German):

- **Forschungsunterlagen: UNI Dortmund (Fluidenergiemaschinen)**  
Kontakt: Prof. Kauder e-mail: [kauder@fem.mb.uni-dortmund.de](mailto:kauder@fem.mb.uni-dortmund.de)  
Dr. Claus Fost e-mail: [fost@fem.mb.uni-dortmund.de](mailto:fost@fem.mb.uni-dortmund.de)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128))
- **Schraubenmaschinen**  
Tagung Dortmund, 30. September und 1. Oktober 1998 ; VDI Bericht 1391  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1149](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1149))

### Inverse gas turbine cycle (in English):

- **Research reports of TU-Graz**

Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics

Contact:

Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)

### Hot air turbine cycle (in German):

- **Thermische Turbomaschinen**

Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz

Nähere Information:

Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn., e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)

Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)

[http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1153](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1153)

- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**

Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung

Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.

Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>

(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(en\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results.html?id=1128))

### 5.3 Economic Aspects (in German):

- **Unterlagen zsw** (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Untelagen BHKW Infozentrum**  
Kontakt:  
Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborne, e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)
- **Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien**  
Potentiale, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung  
Autoren: Ingwald Obernberger, Alfred Hammerschmid, unter Mitarbeit der E.V.A.  
Online Bezugsmöglichkeit: <http://bios-bioenergy.at/bios/bios.shtml>  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/results.html?id=1128](http://www.energytech.at/(de)/kwk/results.html?id=1128))
- **Wärmetechnik I**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Wärmetechnik an der TU-Graz  
Lehrveranstaltung 307.001  
Bezugsmöglichkeit:  
Reetz Beate; O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. ;e-mail: [reetz@iwt.tu-graz.ac.at](mailto:reetz@iwt.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/results.html?id=1154](http://www.energytech.at/(de)/kwk/results.html?id=1154)
- **Thermische Turbomaschinen**  
Vorlesungsskriptum für das Fach Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz  
3. Auflage, Graz  
Nähere Information:  
Herbert Jericha , Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. , e-mail: [jericha@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:jericha@ttm.tu-graz.ac.at)  
Wolfgang Sanz, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn., e-mail: [sanz@ttm.tu-graz.ac.at](mailto:sanz@ttm.tu-graz.ac.at)  
[http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/results.html?id=1153](http://www.energytech.at/(de)/kwk/results.html?id=1153)
- **Untelagen Energiewerkstatt, Deutschland (Hersteller)**  
Kontakt:  
e-mail: [steinborn@bhkw-info.de](mailto:steinborn@bhkw-info.de)  
Internet: [www.energiewerkstatt.de](http://www.energiewerkstatt.de)
- **Jenbacher AG**  
Kraft-Wärme-Kältekopplung mit Gasmotoren  
10. Deutsche Euroforum-Branchentage, 19.-22. Oktober 1998, Bonn  
Kontakt: Martin Schneider, e-mail: [m.schneider@jenbacher.com](mailto:m.schneider@jenbacher.com) ,  
Tel.: +43 / 5244 / 600-2507  
(nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/results.html?id=1141](http://www.energytech.at/(de)/kwk/results.html?id=1141))
- **Forschungsunterlagen der Fa. SOLO Kleinmotoren GmbH**  
Kontakt: Dipl.-Ing. Andreas Baumüller [andres.baumueller@solo-germany.com](mailto:andres.baumueller@solo-germany.com)  
Tel.: +49 / 7031 301-0
- **Praxis Kraft-Wärme-Kopplung**  
umfangreiches Buch zum Thema KWK (3500 Seiten)  
nähere Informationen: [http://www.energytech.at/\(de\)/kwk/results.html?id=1146](http://www.energytech.at/(de)/kwk/results.html?id=1146)