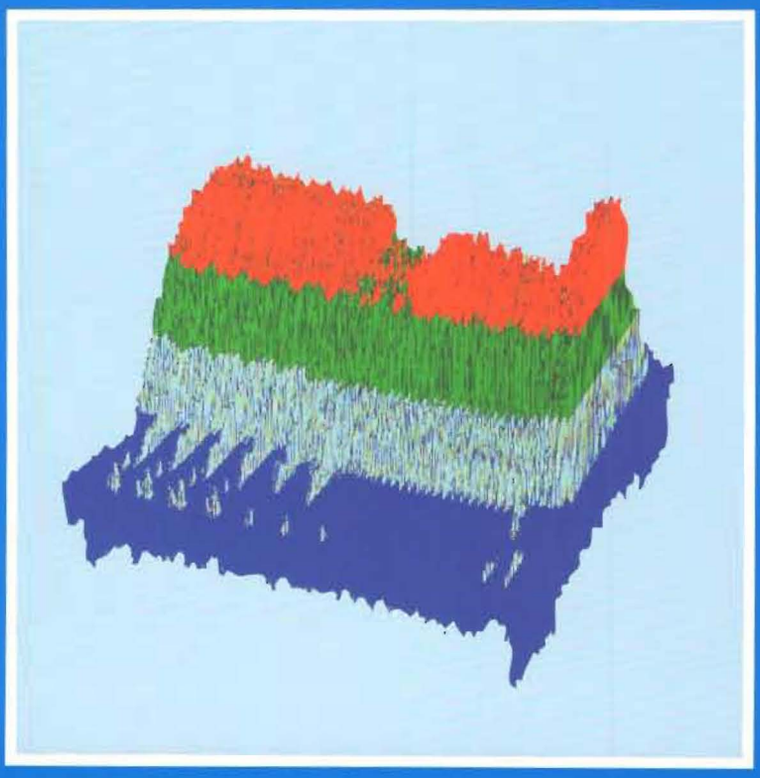
**A**RBEITSGEMEINSCHAFT FÜR
**S**PARSAMEN UND
**U**MWELTFREUNDLICHEN
**E**NERGIEVERBRAUCH E.V.

# Flexible Stromerzeugung mit Gasturbinen



**Gasturbinen in der Praxis**

# Inhalt


**Einleitung** 3

**Leistungsregelung von Gasturbinen** 4

Regelung durch Brennstoffzufuhr 4

Maßnahmen zur Leistungserhöhung 4

Dampfeindüsung 4

Wassereindüsung 5

Ansaugluftkühlung 5

**Betriebserfahrungen** 6

Gasturbinenanlage mit Dampfeindüsung 6
„Grace GmbH", Worms

Gasturbinenanlage mit Cheng-Cycle-Prozeß 7
„TU-München", Garching

Gasturbinenanlage mit Wassereindüsung 8
„Boehringer Ingelheim Pharma KG", Biberach/Riss

Gasturbinenanlage mit Verdunstungskühlung 9
„Brauerei Felsenkeller", Herford

Gasturbinenanlage mit „künstlicher Kühlung" 10
„Michelin AG", Hallstadt/Ofr.



Herausgeber:

ASUE
Arbeitsgemeinschaft für
sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e.V.
Bismarckstraße 16
67655 Kaiserslautern

Telefon: (06 31) 360 90 70
Internet: http://www.asue.de

Vertrieb:

Verlag Rationeller Erdgaseinsatz
Postfach 2547
67613 Kaiserslautern
Telefax: (06 31) 360 90 71

Flexible Stromerzeugung
Best.-Nr. 11 03 99
Schutzgebühr: 3,50 DM

# Einleitung

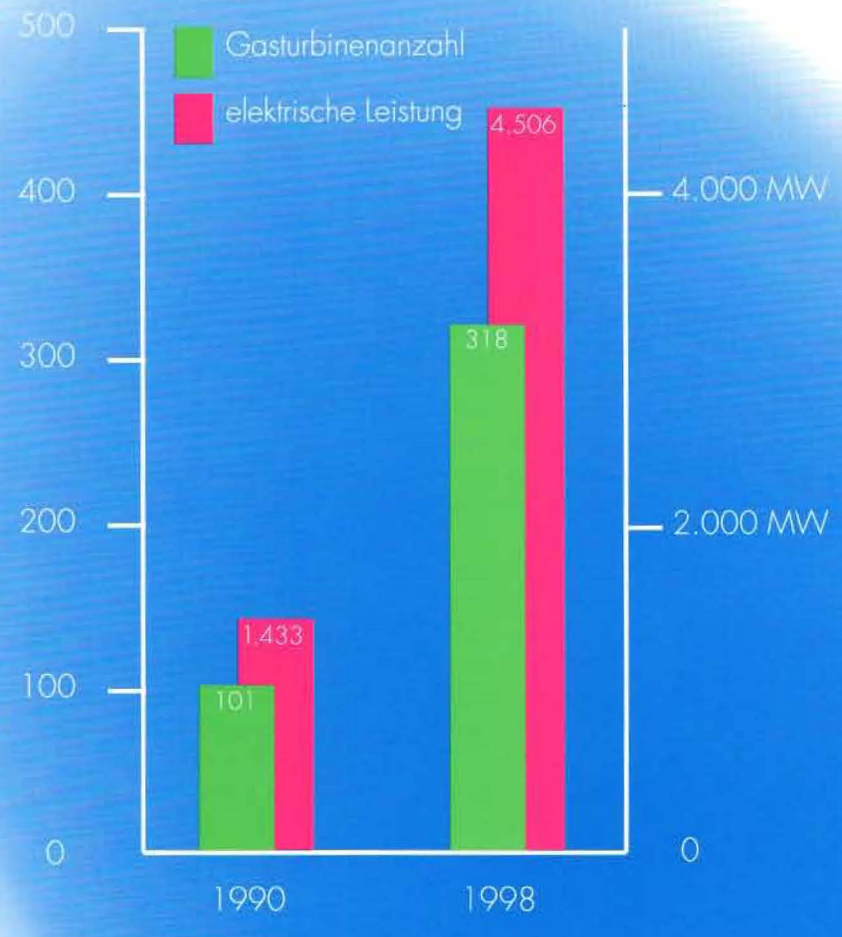
Die Gasturbine hat sich in der industriellen und kommunalen Kraft-Wärme-Wirtschaft einen festen Platz erobert. Dies zeigt eindrucksvoll ein Vergleich der installierten Gasturbinen der Jahre 1990 und 1998. In dieser Zeit hat sich die elektrische Erzeugungsleistung von 1.500 auf 4.500 MW verdreifacht (Bild unten).

Der Grundgedanke bei der Auslegung dieser Anlagen war eine möglichst hohe Anlagenauslastung, d.h. Betrieb in der Grund- bzw. Mittellast.

Ausgelöst durch geänderte Strukturen in der Energiewirtschaft, wird es zunehmend interessant, die Gasturbinen stärker leistungsorientiert zu betreiben.

Es ist die Zielsetzung dieser Broschüre darzustellen, welche Möglichkeiten die Gasturbine in dieser Hinsicht bietet.

## Gasturbinenanzahl und elektrische Leistung in Deutschland



# Leistungsregelung von Gasturbinen

Die Leistung der Gasturbine wird im wesentlichen von drei Faktoren bestimmt:

- Massenstrom
- Verdichtungsverhältnis
- Temperaturdifferenz zwischen Verdichter- und Turbineneintritt.

Im folgenden wird dargestellt, wie sich diese Faktoren auswirken und wie man sie gezielt beeinflussen kann.

## Regelung durch Brennstoffzufuhr

Grundsätzlich erfolgt die Regelung der Gasturbine über die Brennstoffzufuhr, wobei die Obergrenze durch die zulässige Turbineneintrittstemperatur gegeben ist. Bei der üblichen Grundlastauslegung wird die Maschine aus wirtschaftlichen Gründen an dieser Belastungsgrenze temperaturgeregelt gefahren.

Entgegen der vielfach verbreiteten Meinung lassen sich Gasturbinen in gewissen Grenzen im Teillastbetrieb wirtschaftlich betreiben. Dabei ist das unterschiedliche Verhalten von Ein- und Zwei-Wellenturbinen zu beachten.
Bei beiden Bauarten tritt im Teillastbetrieb eine Verringerung des elektrischen Wirkungsgrades ein, wobei die Zwei-Wellenmaschine einen kleinen Vorteil aufweist.

Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich in der Temperatur des Abgases, die bei der Ein-Wellenausführung aufgrund der starren Kopplung von Verdichter und Arbeitsturbine im Teillastbetrieb stärker abnimmt. Bei neueren Maschinen wird dieser Effekt durch verstellbare Leitschaufeln im Verdichter teilweise kompensiert. Die Leitschaufelverstellung bewirkt eine Verringerung des Volumenstroms. Dieser Effekt, nämlich im Teillastbetrieb die angesaugte Luftmenge zu reduzieren und dadurch die Abgastemperatur auf ein höheres Niveau zu heben, kann auch bei bestehenden Gasturbinenanlagen durch Nachrüstung eines Vorleitrades vor den Verdichter erreicht werden. Es bietet die Möglichkeit, bei Teillast bis etwa ¾ der Nennlast gleichbleibend hohe Abgastemperaturen bereitzustellen.

Da bei Zwei-Wellen-Gasturbinen die Drehzahl von Nutzleistungs- und Verdichterantriebsturbine entkoppelt ist, ergibt sich ein besseres Teillastverhalten. Die Drehzahl des Verdichters vermindert sich in Teillast und reduziert dadurch den angesaugten Luftmassenstrom. Somit werden höhere Austrittstemperaturen und bessere Teillastwirkungsgrade realisiert als bei Ein-Wellenanlagen.

Ein dauerhafter Teillastbetrieb der Gasturbine läßt sich dadurch energetisch verbessern, indem man einen Teil der Abwärme dazu verwendet, die Ansaugluft vorzuwärmen. Dadurch tritt eine Massenstromreduzierung ein und infolgedessen eine verringerte Leistung. Da aber insgesamt die Prozeßtemperaturen angehoben werden, bleibt der Brennstoffnutzungsgrad fast erhalten.

Generell ist ein Regelbereich bis zu Teillasten von 70 % sinnvoll realisierbar.

Ausgehend von diesen Zusammenhängen ist bei der Auslegung einer Gasturbine zu erwägen, etwas größer zu dimensionieren und eine teillastige Fahrweise bewußt in den Betrieb einzubeziehen.
In der Praxis zeigt sich, daß der größere Gasturbinentyp häufig einen höheren Wirkungsgrad aufweist bei geringerer spezifischer Investition. So hat man eine höhere elektrische Leistung zur Verfügung, die kurzfristig eingesetzt werden kann.

## Maßnahmen zur Leistungserhöhung

Die Maßnahmen zur Leistungssteigerung beruhen auf einer Erhöhung des Massenstromes. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Maßnahmen, die eine Erhöhung des Massenstromes in der Brennkammer bewirken *(Dampf- und Wassereindüsung)* und solchen, die eine Erhöhung des Massenstroms am Verdichtereintritt zur Folge haben *(Ansaugluftkühlung)*.

Eine neuere Entwicklung setzt die Wassereindüsung zur Kühlung zwischen zwei Verdichterstufen ein. Damit wird nicht nur der Massenstrom erhöht, sondern auch eine Verringerung der spezifischen Verdichtungsarbeit erreicht.

### Dampfeindüsung

Die Dampfeindüsung bietet eine effiziente und wirtschaftlich interessante Möglichkeit der Leistungssteigerung von Gasturbinen. Der Dampf wird in der Regel mit der Abgaswärme der Gasturbine in einem Abhitzekessel erzeugt und in die Brennkammer der Maschine eingedüst.
Die Eindüsung von Dampf in die Brennkammer führt unmittelbar zu einer entsprechenden Vergrößerung des Turbinenmassenstroms. Damit ist eine Steigerung der Leistung der Turbine verbunden.

Grundsätzlich ist diese Maßnahme bei allen Gasturbinen durchführbar, wobei die Leistungserhöhung durch die Schluckfähigkeit der Turbine begrenzt ist. In der Praxis werden Leistungssteigerungen von bis zu

20 % der Nennlast erreicht. Bei speziell angepaßten Gasturbinen (Cheng-Cycle-Anlagen) ist eine Steigerung der Leistung bis 60 % möglich.

Neben der Leistungssteigerung hat die Dampferzeugung aus dem heißen Abgas und die Eindüsung dieses Dampfes in die Turbine noch den Vorteil, daß der elektrische Wirkungsgrad des Prozesses gesteigert wird.

Ursache für diese Steigerung ist, daß mit der Abgaswärme Energie in den Gasturbinenprozeß zurückgeführt wird. Der Dampf, der in die Brennkammer eingedüst wird, sollte überhitzt sein. Durch die Überhitzung wird die Menge der eingebrachten Energie im Vergleich zu Sattdampfeindüsung erhöht. Desweiteren wird erreicht, daß kein Wasser im Bereich der Dampfzuführung und in der Brennkammer ausfällt.

Bei der hier beschriebenen Maßnahme zur Leistungssteigerung liegt die Geschwindigkeit der Leistungsanpassung im Bereich weniger Minuten. Durch die Dampfeindüsung wird eine Entkopplung von Strom und Wärme erreicht und damit eine gute Anpassung an den Energiebedarf.

## Wassereindüsung

Anstelle von Dampf kann auch Wasser zur Massenstromerhöhung in die Brennkammer eingedüst werden. Die Verdampfungsenergie für das Wasser wird der Flamme direkt entzogen, wodurch die Bildung von CO gefördert wird. Aus diesem Grund ist die Leistungssteigerung mit dieser Methode auf rd. 10 % der Nennlast begrenzt.
Anders als bei der Dampfeindüsung sinkt der elektrische Wirkungsgrad, da die Verdampfungswärme hier direkt der Flamme entnommen wird und sich anschließend nicht mehr für den Prozeß zurückgewinnen läßt.

Der Aufwand für die Wassereindüsung ist deutlich geringer als bei der Dampfeindüsung. Um Ablagerungen in der Gasturbine zu vermeiden, ist vollentsalztes Wasser zu verwenden.

## Ansaugluftkühlung

Eine Erhöhung der Ansaugluft-temperatur bewirkt eine Leistungsminderung aus zwei Gründen:

- zum einen geht der Massenstrom wegen der geringeren Luftdichte zurück
- zum anderen steigt die Verdichtungsendtemperatur, so daß die Brennstoffzufuhr zurückgenommen werden muß, um die zulässige Turbineneinlaßtemperatur nicht zu überschreiten.

Dieser Leistungsrückgang beträgt ca. 0,7 % pro K bezogen auf die Nennleistung.

In der Praxis werden zwei Methoden der Ansaugluftkühlung eingesetzt.

Bei nicht zu hoher Luftfeuchtigkeit ist die *Verdunstungskühlung* die meist verwendete Methode. Hierbei wird Wasser entweder fein verdüst oder über Kontaktkörper verrieselt. Die Abkühlung wird bewirkt durch die Verdunstung des Wassers bis nahe an die Sättigungsgrenze der Ansaugluft. Unter hiesigen klimatischen Bedingungen können damit rd. $^2/_3$ des temperaturbedingten Leistungsverlustes zurückgewonnen werden. Ein zusätzlicher Vorteil entsteht dadurch, daß die Ansaugluft vorgereinigt wird. Dadurch verlängern sich die Filterstandzeiten.

Eine von der Ausgangsfeuchte unabhängige Kühlung der Luft ist die *„künstliche Kühlung"* mit Kältemaschinen.

Hierdurch kann sogar eine stärkere Abkühlung und ein größerer Leistungsgewinn erzielt werden. Außerdem kann die Temperaturabsenkung gezielt gesteuert werden.

# Gasturbinenanlage mit Dampfeindüsung – Betriebserfahrungen

**Firmenportrait:**

Grace GmbH
In der Hollerhecke 1
67547 Worms

Im Werk Worms der Firma Grace werden Molekularsiebe, Silicagele und Katalysatoren hergestellt. Zur Zeit sind etwa 800 Mitarbeiter beschäftigt.

**Ansprechpartner:**

Herr Franz Schmitt

Telefon: 0 62 41/403-575
Telefax: 0 62 41/403-590

**Anlagenkonzept:**

- Gasturbinenanlage mit ungefeuerten Abhitzekesseln.
- Dampfeindüsung zur Spitzenstromerzeugung.
- Verwertung von Überschußdampf.

**Technische Daten:**

2 Gasturbinen, Typ Ruston Tornado

| | | |
|---|---|---|
| Elektrische Leistung je Einheit | [MW] | 5,8 |
| • mit Dampfeindüsung (4 t/h) | [MW] | 6,8 |

**Erfahrungen:**

| | | |
|---|---|---|
| Inbetriebnahme | | 1990 |
| Betriebsstunden (Sep. 98) | | |
| • gesamt | | 56.400 |
| • mit Dampfeindüsung | | 19.000 |
| Verfügbarkeit | [%] | 98 |
| Zusatzinvestition „Dampfeindüsung" | [TDM] | 500 |
| Amortisation | [a] | 1 |

*Gasturbine mit Dampfeindüsung*

# Gasturbinenanlage mit Cheng-Cycle-Prozeß – Betriebserfahrungen

**Firmenportrait:**

Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85747 Garching

Für die Fakultäten Chemie, Physik und Maschinenwesen der Technischen Universtität München (TUM) am Campus Garching wurde ein zentrales Heizwerk zum Heizkraftwerk ausgebaut.

**Ansprechpartner:**

Herr Dr.-Ing. Klaus Kwanka

Telefon: 0 89/2 89-1 62 68
Telefax: 0 89/2 89-1 62 71

**Anlagenkonzept:**

- Cheng-Cycle-Anlage zur Anpassung an den stark schwankenden Strombedarf.

**Technische Daten:**

1 Gasturbine, Typ Allison 501KH5

| | | |
|---|---|---|
| Elektrische Leistung | [MW] | 3,75 |
| • mit Dampfeindüsung (9,7 t/h) | [MW] | 6,00 |

**Erfahrungen:**

| | | |
|---|---|---|
| Inbetriebnahme | | 1996 |
| Betriebsstunden (Sep. 98) | | |
| • gesamt | | 21.190 |
| Verfügbarkeit | [%] | 98 |
| Mehrinvestition „Cheng-Cycle" | [TDM] | 800 |
| Amortisation | [a] | 3 - 3,5 |

*Cheng-Cycle-Anlage der TUM*

# Gasturbinenanlage mit Wassereindüsung – Betriebserfahrungen

**Firmenportrait:**

Boehringer Ingelheim Pharma KG
Birkendorfer Str. 65
88397 Biberach/Riss

Boehringer Ingelheim beschäftigt weltweit rund 25.000 Mitarbeiter. In Deutschland verfügt das Pharmaunternehmen über die Standorte Ingelheim und Biberach an der Riss. Biberach ist Zentrum der deutschen Pharma-Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, insbesondere für die Produktion biotechnisch hergestellter Medikamente.

**Ansprechpartner:**

Herr Waldemar Neumann

Telefon: 07351/54-78 32
Telefax: 07351/54-21 54

**Anlagenkonzept:**

- Gasturbinenanlage mit Abhitzekessel und Zusatzfeuerung.
- Wassereindüsung zur Spitzenstromerzeugung.

**Technische Daten:**

| | | |
|---|---|---|
| 1 Gasturbine, Typ Solar Centaur H | | |
| Elektrische Leistung | [MW] | 3,50 |
| • mit Wassereindüsung (550 l/h) | [MW] | 3,62 |

**Erfahrungen:**

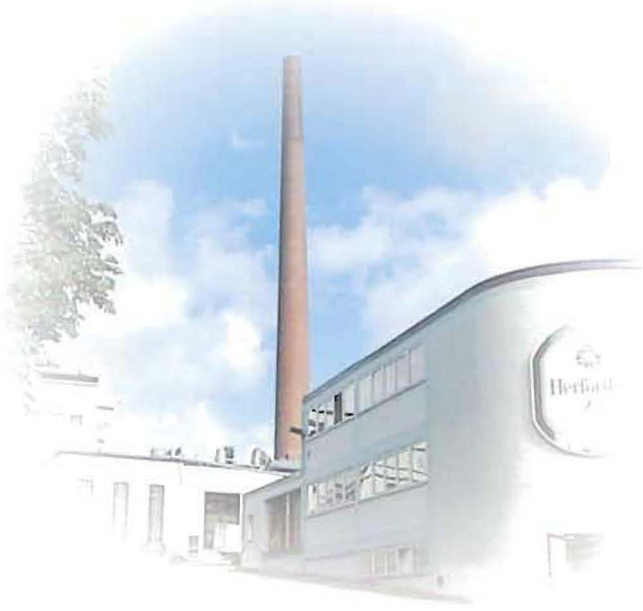
| | | |
|---|---|---|
| Inbetriebnahme | | 1990 |
| Betriebsstunden (31.12.98) | | |
| • gesamt | | 77.830 |
| • mit Wassereindüsung | | 9.900 |
| Verfügbarkeit | [%] | 97 |
| Zusatzinvestition „Wassereindüsung" | [TDM] | 83 |
| Amortisation | [a] | 2 -3 |

*Brennstoffdüsen mit Wassereinspritzung*

# Gasturbinenanlage mit Verdunstungskühlung – Betriebserfahrungen

**Firmenportrait:**

Brauerei Felsenkeller Herford
Gebr. Uekermann GmbH & Co.
Gebr. Uekermann Str. 1
31120 Hiddenhausen



Die Privatbrauerei wurde 1878 gegründet. Sie beschäftigt rund 390 Mitarbeiter. Der Jahresausstoß liegt bei 800.000 hl.

**Ansprechpartner:**

Herr Hans-Jürgen Engel

Telefon. : 0 52 21/9 65-321
Telefax. : 0 52 21/9 65-324

**Anlagenkonzept:**

- Gasturbinenanlage mit ungefeuertem Abhitzekessel.
- Verdunstungskühlung zur Kompensation temperaturbedingten Leistungsverlustes.

**Technische Daten:**

1 Gasturbine, Typ Solar Saturn MK III

| | | |
|---|---|---|
| Elektrische Leistung | [MW] | 1,08 |
| Leistungsgewinn (bei 30 °C Außentemperatur) | [MW] | 0,15 |

**Erfahrungen:**

| | | |
|---|---|---|
| Inbetriebnahme | | |
| • Turbine | | 1990 |
| • Verdunstungskühler | | 1992 |
| Betriebsstunden (Sep. 98) | | |
| • gesamt | | 47.000 |
| • mit Verdunstungskühlung | | 21.000 |
| Verfügbarkeit | [%] | 99 |
| Investition „Verdunstungskühler" | [TDM] | 35 |
| Amortisation | [a] | <1 |

*Verdunstungskühler*

# Gasturbinenanlage mit „künstlicher Kühlung" – Betriebserfahrungen

**Firmenportrait:**

Michelin Reifenwerke KGaA
Michelinstr. 130
96100 Hallstadt/Ofr.

Im Werk Hallstadt werden pro Jahr 50.000t Reifen für PKW hergestellt.

**Ansprechpartner:**

Herr Winfried Schäfer

Bereich Energieversorgung
Telefon. : 09 51/7 91-466
Telefax. : 09 51/7 91-491

**Anlagenkonzept:**

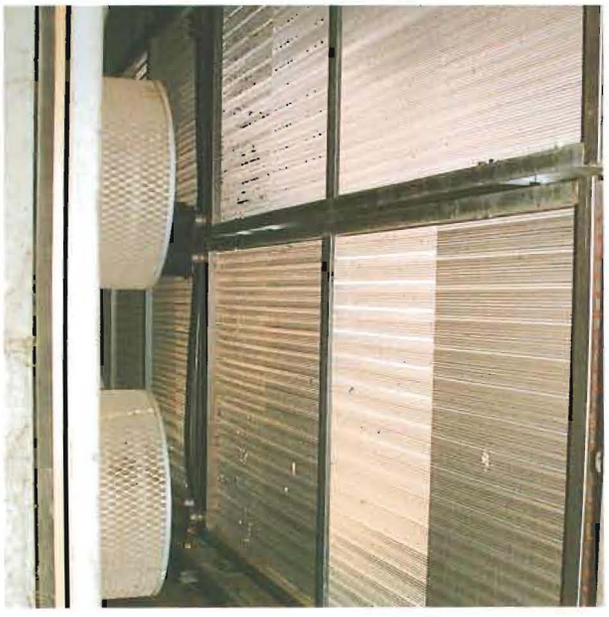
- Gasturbinenanlage mit Abhitzekessel und Zusatzfeuerung.
- Ansaugluftkühlung aus vorhandener, abwärmebeheizter Absorptionskälteanlage zur Spitzenstromerzeugung im Sommer.

**Technische Daten:**

| | | |
|---|---|---|
| 1 Gasturbinen, Typ Centaur 50H | | |
| Elektr. Leistung | [MW] | 4,0 |
| Leistungserhöhung bei 5 K Abkühlung der Außenluft | [MW] | 0,15 - 0,20 |

**Erfahrungen:**

| | | |
|---|---|---|
| Inbetriebnahme | | |
| • Gasturbine | | 1989 |
| • Ansaugluftkühler | | 1998 |
| Betriebsstunden (Sep. 98) | | |
| • gesamt | | 75.000 |
| • mit Ansaugluftkühlung | | 800 |
| Verfügbarkeit | [%] | 98 |
| Investition „Ansaugluftkühler" | [TDM] | 30 |
| Amortisation | [a] | 1 |



*Detailbild Ansaugluftkühler*

# ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V.

Die 1977 gegründete ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., ein Zusammenschluß von 37 Gasversorgungsunternehmen, fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltschonender Technologien auf Erdgasbasis.

Solchen Techniken den Weg in die praktische Anwendung zu ebnen, ist das vorrangige Ziel der ASUE.

**Aktivitäten**

Fachtagungen
Veröffentlichungen
Preis der deutschen Gaswirtschaft

**Arbeitskreise**

Blockheizkraftwerke
Erdgas und Umwelt
Gasturbinentechnik
Gaswärmepumpen und Kältetechnik
Haustechnik
Wärmelieferung

**Mitgliedsunternehmen:**

Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG, Lörrach
Bayerngas GmbH, München
BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover
egm Erdgas Mitteldeutschland GmbH, Kassel
EMB Erdgas Mark Brandenburg GmbH, Potsdam
Erdgas Schwaben GmbH, Augsburg
Erdgas Südbayern GmbH, München
Erdgas Südsachsen GmbH, Chemnitz
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster
Erdgasversorgungsgesellschaft Thüringen-Sachsen mbH (EVG), Erfurt
Ferngas Nordbayern GmbH, Bamberg
Ferngas Salzgitter GmbH
GASAG Berliner Gaswerke AG
Gasanstalt Kaiserslautern AG
Gasfernversorgung Mittelbaden GmbH, Offenburg
Gas-Union GmbH, Frankfurt
Gasversorgung Main-Kinzig GmbH, Gelnhausen
Gasversorgung Osthessen GmbH, Fulda
Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, Halle
Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart
Gasversorgung Westerwald GmbH, Höhr-Grenzhausen
Gasversorgung Westfalica GmbH, Bad Oeynhausen
Gas-Versorgungsgesellschaft Filstal mbH, Göppingen
HEIN GAS Hamburger Gaswerke GmbH
Landesgasversorgung Niedersachsen AG, Sarstedt
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg
Oberhessische Gasversorgung GmbH, Friedberg
Ruhrgas AG, Essen
Saar Ferngas AG, Saarbrücken
SpreeGas GmbH, Cottbus
Stadtwerke Essen AG
Stadtwerke Paderborn GmbH
Südhessische Gas und Wasser AG, Darmstadt
Thyssengas GmbH, Duisburg
VNG – Verbundnetz Gas AG, Leipzig
Westfälische Ferngas-AG, Dortmund
Wingas GmbH, Kassel

Das Papier dieser Broschüre ist nicht mit Chlor gebleicht.