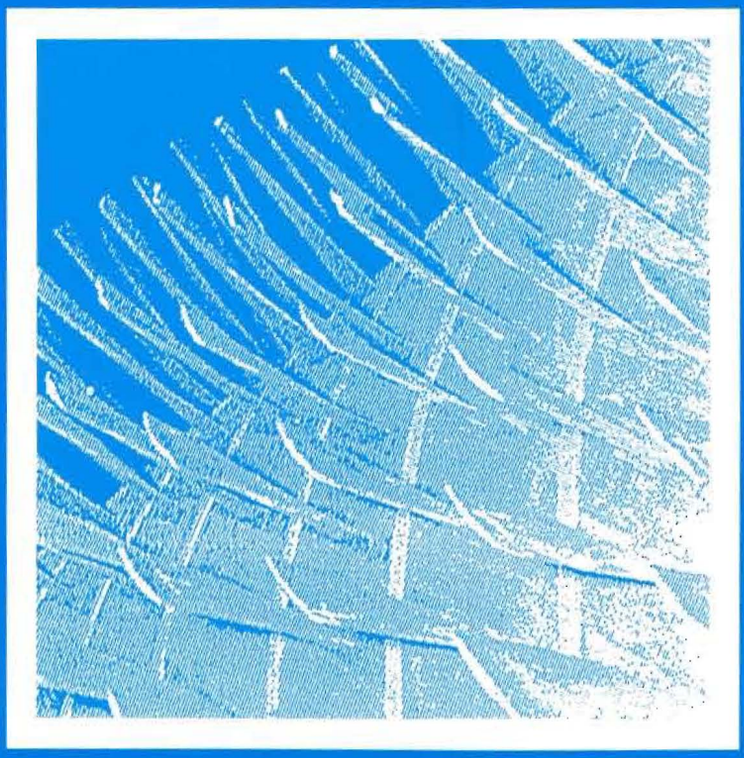
ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR
SPARSAMEN UND
UMWELTFREUNDLICHEN
ENERGIEVERBRAUCH E. V.

Grundlagen – Technik – Betrieb



Gasturbinen in der Praxis

Inhalt

Einführung	1
Grundlagen	2
Technik	4
Anwendungsmöglichkeiten	10
Betrieb	15
Wirtschaftlichkeit	18
ASUE-Veröffentlichungen	19

Herausgeber:

ASUE
Arbeitsgemeinschaft für
sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e.V.
Heidenkampsweg 101 · 20097 Hamburg
Telefon (0 40) 23 45 09

Vertrieb:

Verlag
Rationeller Erdgaseinsatz
Postfach 10 03 04 · 20002 Hamburg
Telefax (0 40) 23 66-33 61

Grundlagen – Technik – Betrieb
Best.-Nr. 11 09 94
Schutzgebühr 3,– DM

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR
SPARSAMEN UND
UMWELTFREUNDLICHEN
ENERGIEVERBRAUCH E.V.

ASUE informiert

Gasturbinen: Grundlagen, Technik, Betrieb

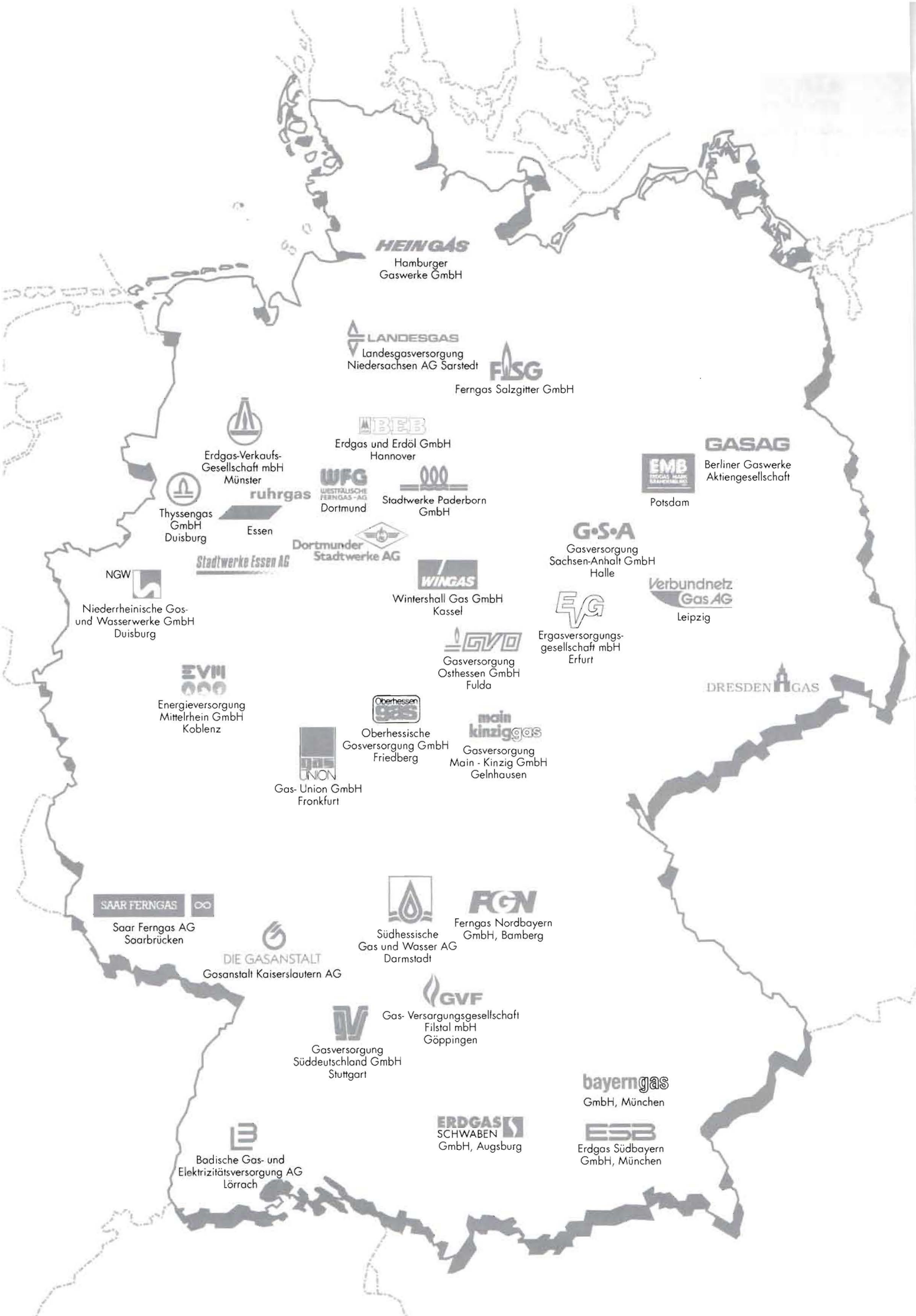
Das Interesse an einem Einsatz von Gasturbinen in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen. Verstärkt finden insbesondere gekoppelte Prozesse von Gas- und Dampfturbinen (GuD) Anwendung. Wesentliche Gründe für diese Entwicklung sind die Forderung nach möglichst hoher Stromkennzahl sowie großer Flexibilität hinsichtlich des Kraft-Wärme-Verhältnisses aus der Industrie. Der Markt für Gasturbinen bietet derzeit ein fast lückenloses Angebot in einem Bereich zwischen 0,5 und 230 MW_{el}. Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Aggregate liegen häufig über 95 %. Mit neuentwickelten Brennkammern können heute schon die dynamisierten Grenzwerte der TA Luft für Stickstoffoxide im Erdgasbetrieb eingehalten bzw. deutlich unterschritten werden. Die neue Veröffentlichung gibt einen Überblick über die Grundlagen der Gasturbinentechnik sowie deren Anwendungsmöglichkeit in Kraft-Wärme-Kopplungs-Schaltungen. Weiterhin werden Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen-KWK-Aggregaten behandelt. Die Veröffentlichung soll den Entscheidungsträgern von Industrie- und Gasversorgungsunternehmen sowie Ingenieurbüros einen Einblick in die Technik des Gasturbineneinsatzes in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen geben.

Die Veröffentlichung (24 Seiten DIN A4) kann gegen eine Schutzgebühr von 3,– DM bestellt werden bei:

Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Postfach 10 03 04, 20002 Hamburg.

P.S.: Aus Kostengründen ist dieses Informationsblatt über die Veröffentlichung in die Broschüre integriert. Es läßt sich jedoch heraustrennen, genauso wie der am Ende der Broschüre eingeheftete Bestellschein.

ASUE · Postfach 10 03 04 · 20002 Hamburg · Telefon 0 40/23 45 09 · Telefax 0 40/23 66-33 61


HEINGAS
Hamburger Gaswerke GmbH
LANDESGAS
Landesgasversorgung Niedersachsen AG Sarstedt
FSG
Ferngas Salzgitter GmbH
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH Münster
BEB
Erdgas und Erdöl GmbH Hannover
GASAG
Berliner Gaswerke Aktiengesellschaft
EMB
Potsdam
WFG
WESTFÄLISCHE FERNGAS-AG
Dortmund
Stadtwerke Paderborn GmbH
Thyssengas GmbH Duisburg
ruhrgas
Essen
Dortmunder Stadtwerke AG
Stadtwerke Essen AG
G•S•A
Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH Halle
NGW
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH Duisburg
WINGAS
Wintershall Gas GmbH Kassel
Verbundnetz Gas AG
Leipzig
EVG
Ergasversorgungs-gesellschaft mbH Erfurt
GVO
Gasversorgung Osthessen GmbH Fulda
EVM
Energieversorgung Mittelrhein GmbH Koblenz
DRESDEN GAS
Oberhessen gas
Oberhessische Gosversorgung GmbH Friedberg
main kinzig gas
Gasversorgung Main - Kinzig GmbH Gelnhausen
gas UNION
Gas- Union GmbH Fronkfurt
SAAR FERNGAS
Saar Ferngas AG Saarbrücken
FGN
Ferngas Nordbayern GmbH, Bamberg
Südhessische Gas und Wasser AG Darmstadt
DIE GASANSTALT
Gosanstalt Kaiserslautern AG
GVF
Gas- Versargungsgesellschaft Filstal mbH Göppingen
Gasversorgung Süddeutschland GmbH Stuttgart
bayerngas
GmbH, München
ERDGAS SCHWABEN
GmbH, Augsburg
ESB
Erdgas Südbayern GmbH, München
Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG Lörrach

Einführung

Seit Mitte der 80er Jahre ist ein steigendes Interesse, vornehmlich in der Industrie, an Gasturbinen in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bis etwa 10 MW festzustellen.

Zu Beginn der 90er Jahre hat sich dieser Trend durch zusätzliche Nachfrage der kommunalen Energiewirtschaft nach Gasturbinen verstärkt. Jetzt werden auch vermehrt größere Maschinen eingesetzt, die zunehmend in GuD-Prozessen – d. h. die Kopplung von Gas- und Dampfturbinenprozeß – arbeiten.

Inzwischen hat die Gasturbine auch Eingang gefunden in Konzepte der Abluftentsorgung und der thermischen Verwertung von Reststoffen.

Der Gasturbinenmarkt boomt derzeit weltweit. Die wesentlichen Gründe für die Entwicklung sind:

- Als Folge von Energieeinsparungsanstrengungen in der Industrie ändert sich das Verhältnis von Strom- zu Wärmebedarf. Es werden Kraft-Wärme-Kopplungs-Konzepte mit möglichst hoher Stromkennzahl und großer Flexibilität hinsichtlich des Kraft-Wärme-Verhältnisses erforderlich.

- Ausgehend von den Entwicklungsfortschritten bei Gasturbinen in der Luftfahrt werden vorzugsweise durch Komponentenoptimierung Industriegasturbinen unter 10 MW_{el} mit Klemmenwirkungsgraden bis über 30 % verfügbar. Der Gasturbinenmarkt bietet heute ein gestuftes Programm von Gasturbinen in einem Bereich zwischen 0,5 und 230 MW an.

- Die Preisdifferenz zwischen Fremdstrombezug und Brennstoff verspricht kurze Amortisationszeiten für Gasturbinenheizkraftwerke.

- Aufgrund laufender Verbesserungen weisen Industriegasturbinen derzeit Verfügbarkeiten und Zuverlässigkeiten von mehr als 95 % auf.

- Mit neuen Brennkammerentwicklungen können schon heute die dynamisierten Grenzwerte für Stickoxide im Erdgasbetrieb eingehalten bzw. deutlich unterschritten werden. Damit dürften sekundäre Maßnahmen wie Wasser- und Dampfeindüsung der Vergangenheit angehören.

Ziel dieser Broschüre ist es, einen Überblick zu geben über die Grundlagen der Gasturbinentechnik und deren Anwendungsmöglichkeiten in Kraft-Wärme-Kopplungs-Schaltungen. Des weiteren werden die wesentlichen Bauteile, der Betrieb und die Wirtschaftlichkeit behandelt.

Grundlagen

Eine Gasturbine ist eine Energiewandlungsanlage, in der chemisch gebundene Energie (Brennstoff) in mechanische Energie umgesetzt wird. Sie gehört zur Gruppe der Turbokraftmaschinen.

Gasturbinen werden in der Praxis sowohl für mobile Systeme zum Antrieb von Fahr- bzw. Flugzeugen als auch für stationäre Anlagen zum Antrieb von Generatoren, Verdichtern oder Pumpen eingesetzt.

Die wesentlichen Komponenten einer stationären Gasturbinenanlage sind Verdichter, Brennkammer und Turbine (Bild 1).

Der Energieumwandlungsprozeß in einer Gasturbine läßt sich anschaulich durch die Zustandsänderungen des Arbeitsmediums hinsichtlich Druck, Temperatur und Geschwindigkeit erklären (Bild 2).

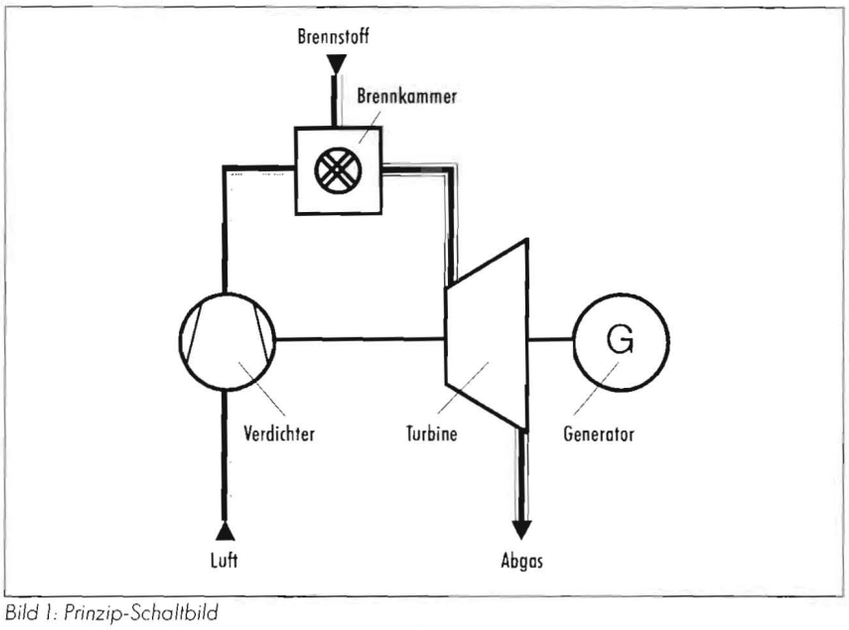


Bild 1: Prinzip-Schaltbild

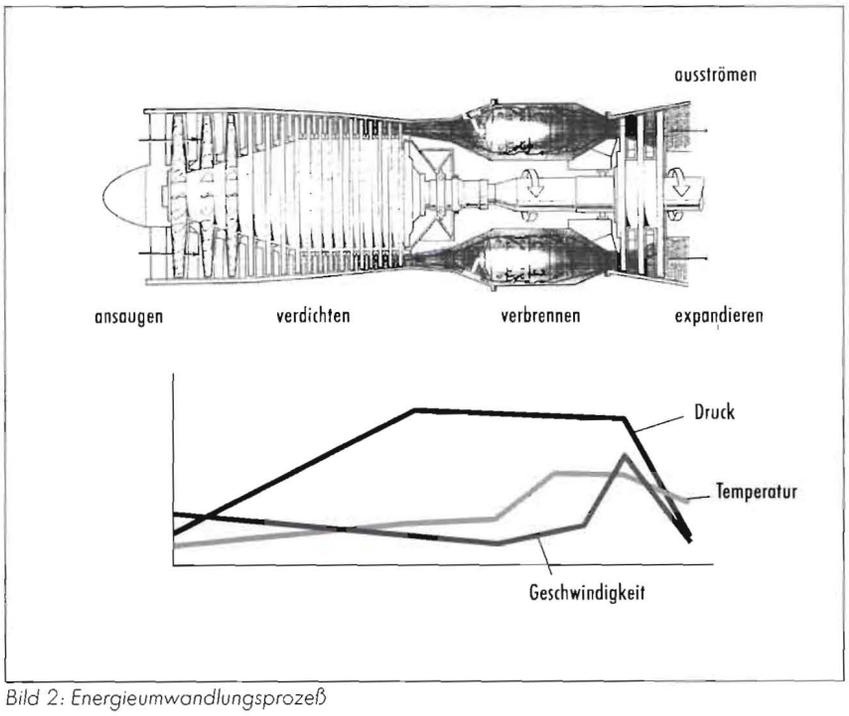


Bild 2: Energieumwandlungsprozeß

Der Verdichter saugt Luft an und verdichtet sie, wodurch die Geschwindigkeit abnimmt. Während des Verdichtungsvorganges nimmt die Temperatur der Luft zu. Heute übliche Werte für den Verdichterenddruck liegen zwischen 10 und 25 bar.

Nach dem Verdichter strömt die Luft in die Brennkammer. Dort wird Brennstoff zugemischt, der bei annähernd konstantem Druck verbrannt wird. Dabei heizt sich das Abgas auf Temperaturen von 1.500 °C und mehr auf. Durch die Energiezufuhr in der Brennkammer erhöht sich die Geschwindigkeit des Abgases.

In der nachgeschalteten Turbine expandiert das energiereiche, heiße Abgas annähernd auf Umgebungsdruck und verringert dabei seine Geschwindigkeit. Während des Expansionsvorganges gibt das Abgas Leistung an die Turbine ab. Zum Antrieb des Verdichters werden zwei Drittel dieser Leistung benötigt, und etwa ein Drittel steht als Nutzleistung, z. B. zum Antrieb eines Generators bzw. als Kompressor- oder Pumpenantrieb, zur Verfügung (Bild 3).

Nach der Entspannung in der Turbine auf Umgebungsdruck besitzt das Abgas noch eine hohe Temperatur (ca. 500 °C). Man kann eine wesentlich bessere Ausnutzung des Brennstoffes erreichen, wenn die Abgaswärme zu Heizzwecken verwendet bzw. vorher soweit wie möglich in mechanische Energie umgewandelt wird. Für diese Kraft-Wärme-Kopplungs-Technik gibt es eine Reihe von praktisch erprobten Schaltungen.

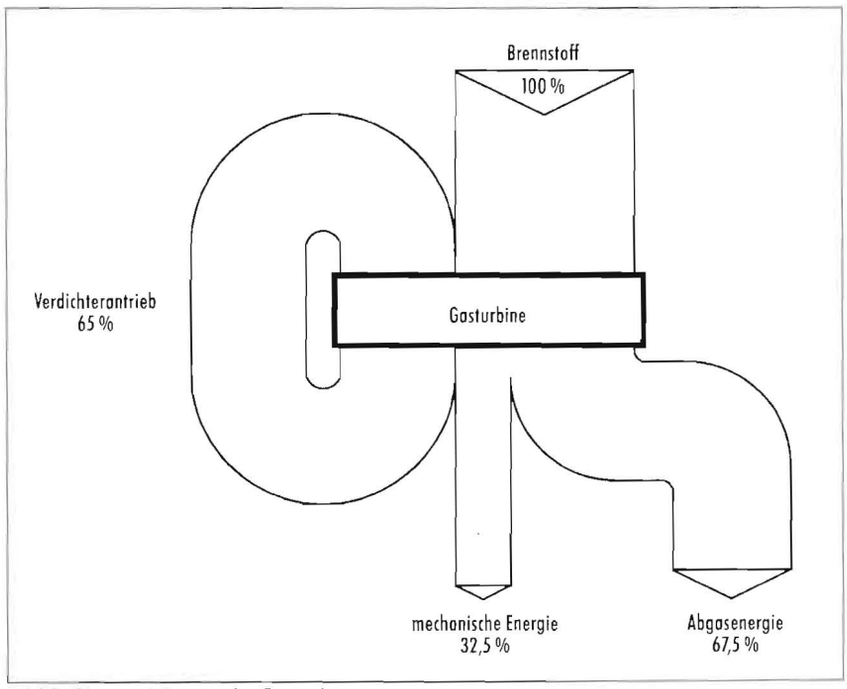


Bild 3: Energieströme in der Gasturbine

In der Praxis ist eine möglichst hohe Stromausbeute der KWK-Anlage im Verhältnis zur ausgekoppelten Nutzwärme (Stromkennzahl) bei weitgehender Unabhängigkeit von Strom- und Wärmeerzeugung gewünscht.

Diese Anforderungen lassen sich erfüllen mit Gasturbinen-Heizkraftwerken und kombinierten Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerken, die entweder im Abhitzebetrieb oder mit unterschiedlichen Zusatzfeuerungsraten betrieben werden.

Neben dem bedarfsgerechten Strom-/Wärmeverhältnis ist einer optimalen Brennstoffausnutzung besondere Beachtung zu schenken. Der Brennstoffnutzungsgrad ist definiert als Quotient aus den Nutzenergieströmen (Strom und Wärme) und dem Brennstoffeinsatz.

Gasturbinenbauarten

Entsprechend den Anwendungsgebieten wurden unterschiedliche Gasturbinenbauarten entwickelt. Je nach Einsatzgebiet unterscheiden sich die Gasturbinenanlagen hinsichtlich Leistung, Größe und Anforderung (Bild 4).

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

Bild 4: Einsatzgebiete für Gasturbinen

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Entwicklungswege. Die leichten und kompakten Gasturbinen sind Abänderungen von Flugtriebwerken. Dies ist zu erkennen an der unter aerodynamischen Gesichtspunkten konzipierten Bauweise (Bild 5).

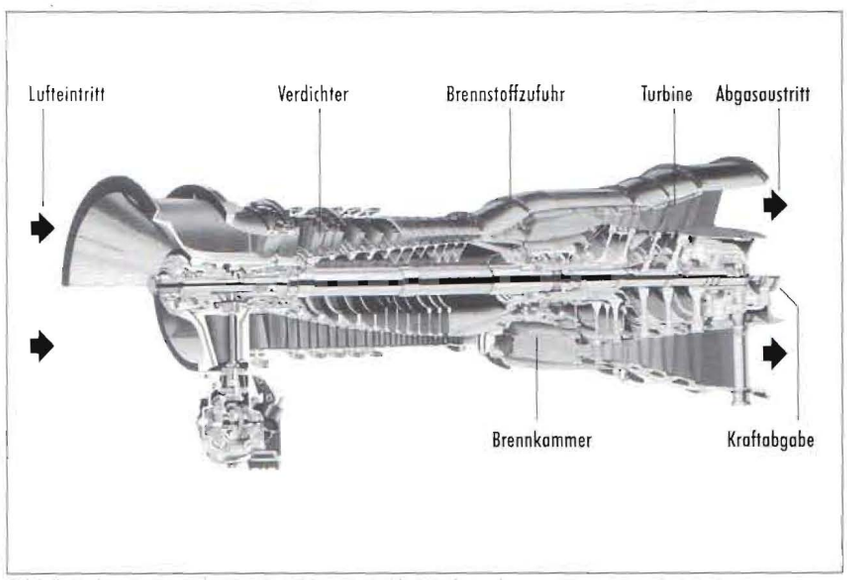


Bild 5: Industriegasturbine, abgeleitet vom Flugtriebwerk

Dem gegenüber stehen Gasturbinen in Schwerbauweise, bei denen das Gewicht und der Raumbedarf eine untergeordnete Rolle spielen (Bild 6).

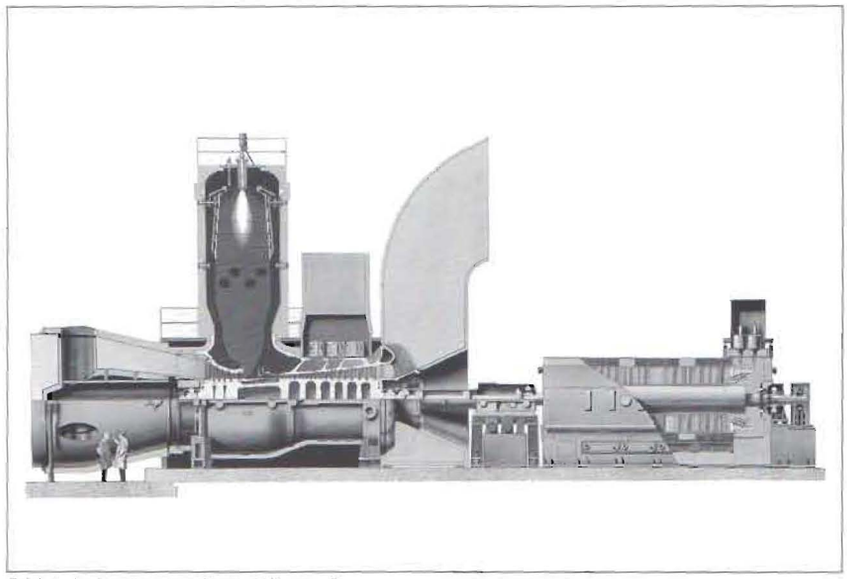


Bild 6: Industriegasturbine, schwere Bauweise

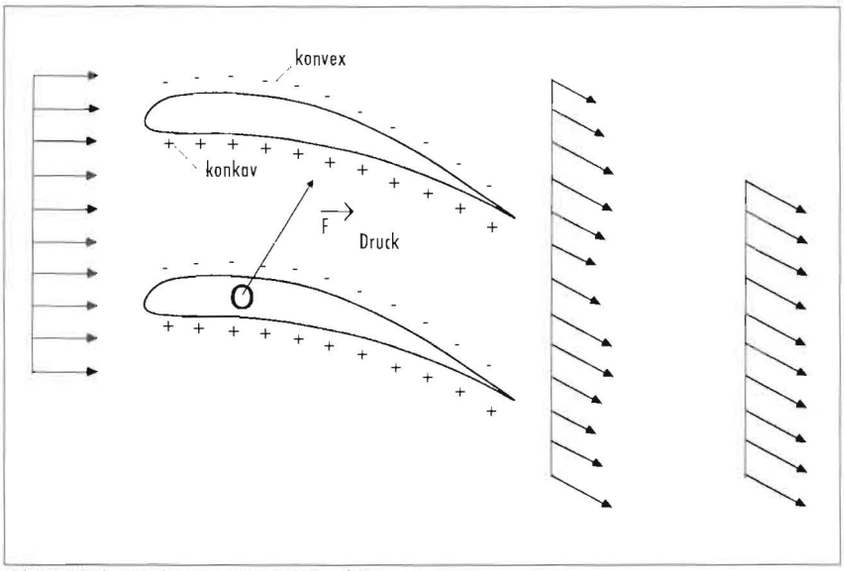


Bild 7: Kraftentstehung in einem Schaufelkanal

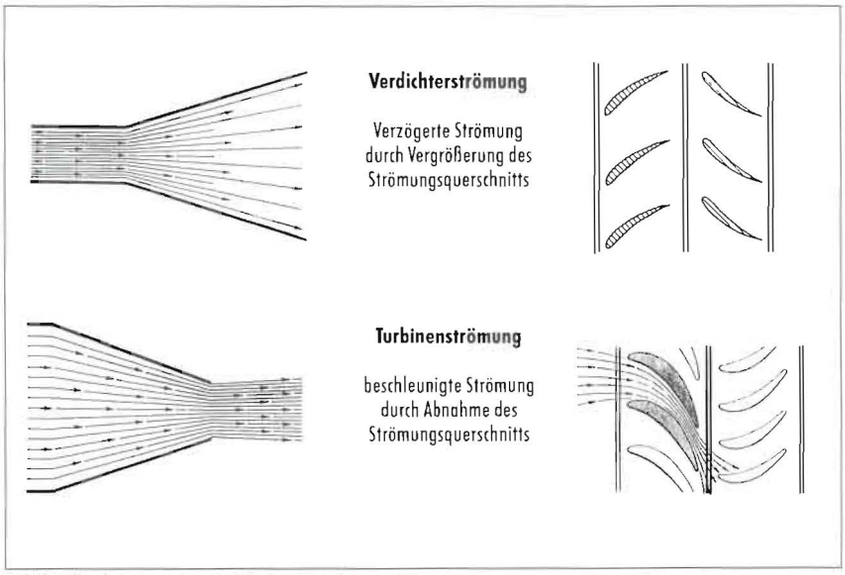


Bild 8: Funktionsweise der Turbomaschinen

Hauptkomponenten

Arbeitsweise der Turbomaschinen

Turbomaschinen bestehen aus mehreren Schaufelreihen, die vom Fluid durchströmt werden. Bei der Umströmung einer Turbinenschaufel – diese ist ähnlich wie ein Flugzeugtragflügel aerodynamisch profiliert – wird die Strömung umgelenkt. Da die Strömungsgeschwindigkeit auf der konvexen Seite größer ist als auf der konkaven, entstehen (gemäß dem Satz von Bernoulli: hohe Geschwindigkeit – niedriger Druck, niedrige Geschwingkeit – hoher Druck) unterschiedliche Drücke auf beiden Schaufelseiten. Diese erzeugen eine Kraft, die von der Druckseite (konkav) auf die Saugseite (konvex) wirkt (Bild 7).

Mit einer Schaufelreihe kann man keine beliebige Umlenkung erreichen, d. h., der Druckaufbau pro Schaufelreihe ist nicht beliebig steigerbar. Turbomaschinen sind deshalb aus mehreren Reihen aufgebaut, die hintereinander durchströmt werden. Dabei werden die Laufschaufelreihen zur Reduktion der Wandlungsverluste und zur Herstellung einer definierten Strömung zwischen feststehenden Leitschaufelreihen eingebunden (Bild 8).

Die Kombination von Leit- und Laufschaufelkranz wird Stufe genannt. Die Anzahl der Stufen im Verdichter und in der Turbine sind ein wesentliches Kennzeichen von Gasturbinenanlagen.

Verdichter

Der Verdichter hat die Aufgabe, die angesaugte Luft auf einen möglichst hohen Druck zu komprimieren, um einen günstigen Gasturbinenwirkungsgrad zu erreichen. Es gibt sowohl Axial- als auch Radialverdichter. Überwiegend werden, aus strömungstechnischen und fertigungstechnischen Gründen, axiale Verdichter in mehrstufiger Bauweise eingesetzt (Bild 9).

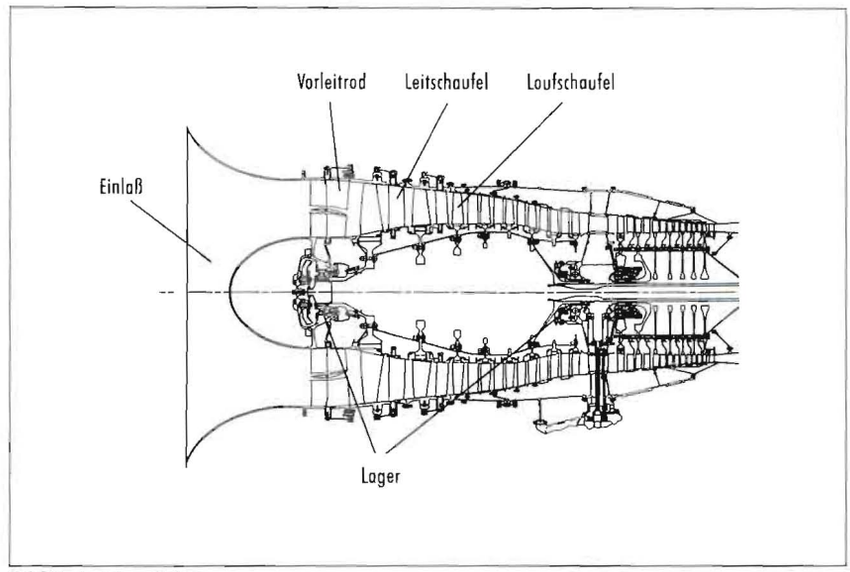


Bild 9: Axialverdichter

Da ca. zwei Drittel der Brennstoffenergie zum Antrieb des Verdichters benötigt wird, ist ein guter Verdichterwirkungsgrad notwendig, um einen hohen thermischen Wirkungsgrad der Gasturbine zu erzielen.

Das Betriebsverhalten des Verdichters wird in einem Verdichterkennfeld dargestellt (Bild 10), in dem das Druckverhältnis über dem Massenstrom für verschiedene Drehzahlen eingezeichnet ist.

Der Auslegungspunkt ist mit deutlichem Abstand von der Pumpgrenze (Strömungsinstabilität) zu wählen, um Druckschwankungen, die stoßartige Belastungen auf die Schaufeln hervorrufen, zu vermeiden.

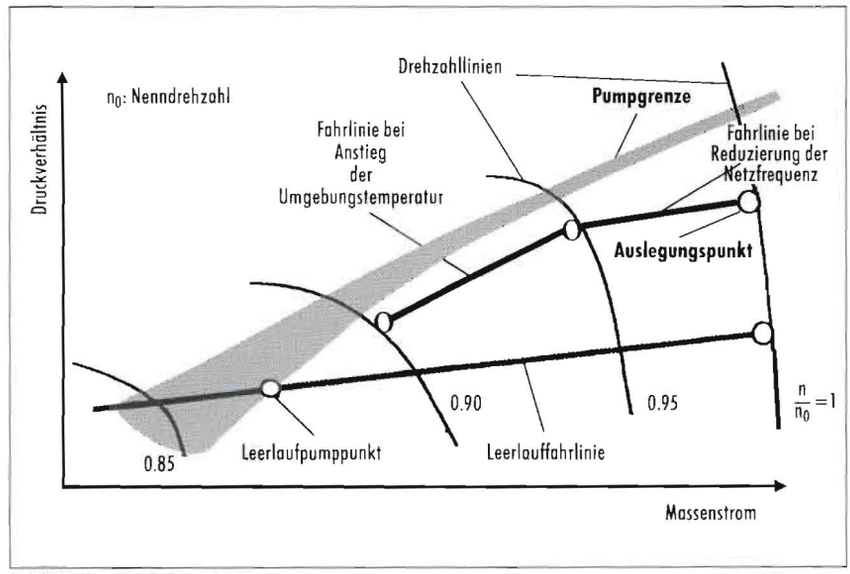


Bild 10: Verdichterkennfeld

Brennkammer

Die im Verdichter auf hohen Druck gebrachte Luft strömt in die Brennkammer, dort wird Brennstoff zugeführt und unter Freisetzung von Wärme verbrannt.

Eingesetzt werden sowohl Einzel- als auch Ringbrennkammern, die gleichmäßig über den Umfang verteilt sind.

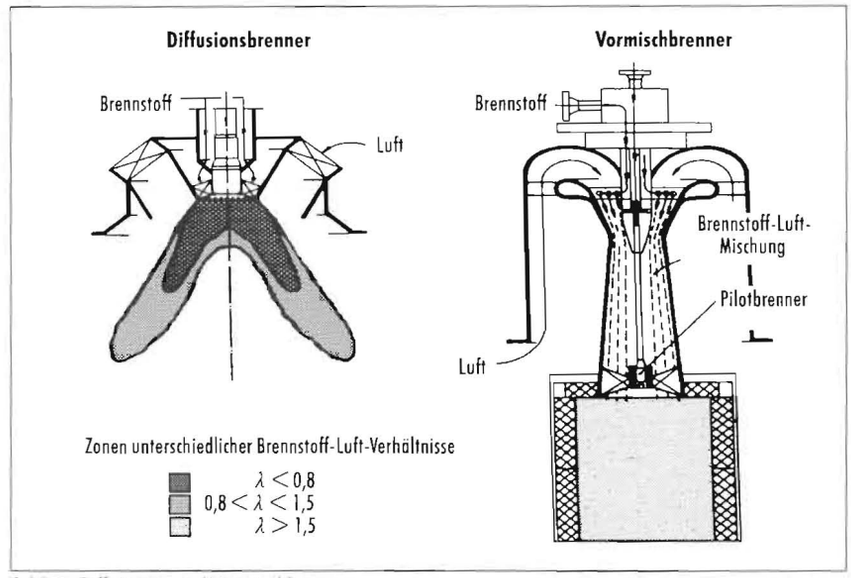


Bild 11: Diffusions- und Vormischbrenner

Folgende Anforderungen werden gestellt:
- stabile Flammenfront
- vollständige Verbrennung
- Einstellung der maximalen Turbineneintrittstemperatur
- homogene Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung am Turbineneintritt
- geringe Schadstoffemissionen
- geringe thermische Belastung der Brennkammer

Weitverbreitet sind Diffusionsbrenner, bei denen Luft und Brennstoff in der Brennkammer zusammengeführt werden. Entsprechend dem Fortschritt in der Reduktion von Schadstoffen gelangen Vormischbrenner zum Einsatz, um die Stickstoffoxidbildung ohne Sekundärmaßnahmen zu verringern (Bild 11).

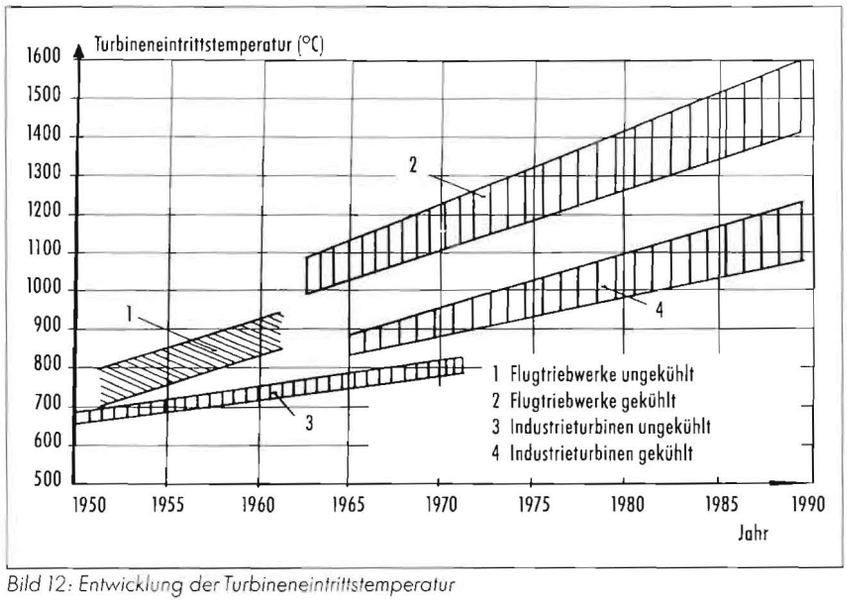


Bild 12: Entwicklung der Turbineneintrittstemperatur

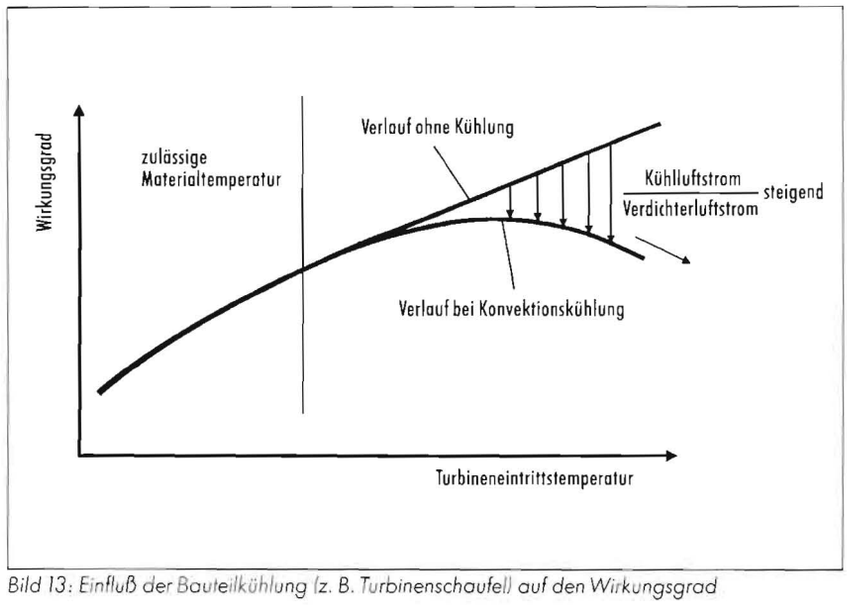


Bild 13: Einfluß der Bauteilkühlung (z. B. Turbinenschaufel) auf den Wirkungsgrad

Turbine

Die heißen Verbrennungsgase aus der Brennkammer strömen durch die Turbine und werden dabei entspannt, d. h., sowohl Druck als auch Temperatur sinken. Die freiwerdende Energie wird an die Welle der Turbine abgegeben.

Eine Turbinenstufe besteht aus der Kombination Leitrad/Laufrad. Die Turbine besitzt eine geringere Stufenzahl als der Verdichter, da sie pro Stufe ein höheres Druckgefälle abbaut, als eine Verdichterstufe aufbaut.

Da der Wirkungsgrad der Gasturbine mit der Turbineneintrittstemperatur steigt, sollte mit einer möglichst hohen Temperatur gearbeitet werden, die ihre Grenzen in den verwendeten Werkstoffen findet.

Bild 12 gibt die Entwicklung der Turbineneintrittstemperatur für Flug- und Industriegasturbinen in dem Zeitraum von 1950 bis 1990 wider. Erst mit der Einführung der Kühlung der Turbinenbauteile konnte die Turbineneintrittstemperatur und damit der Wirkungsgrad der Maschinen deutlich gesteigert werden.

Das heute übliche Verhältnis von Kühlluft zu Gesamtluft beträgt ca. 20 %. Meistens wird die Konvektions- in Kombination mit der Prallkühlung verwendet (Bild 13). Neue Entwicklungen sehen zusätzlich den Einsatz der Filmkühlung vor.

Strömungstechnische Anlagenteile

Die Verunreinigungen der angesaugten Luft werden in einem *Zuluftfiltersystem* abgeschieden (Bild 14). Dadurch werden einerseits Beeinträchtigungen der Aerodynamik der Beschaufelung vermindert, die zu Wirkungsgradverlusten führen. Andererseits wird möglichen Schäden vorgebeugt.

Grundsätzlich kann beim Zuluftsystem zwischen *Tiefenfiltern* und *Oberflächenfiltern* gewählt werden. Für mitteleuropäische Standorte haben sich Tiefenfiltersysteme bewährt. An Standorten mit zeitweise auftretenden hohen Staubkonzentrationen und trockener Luft konnten sich Oberflächenfilter behaupten.

Zu empfehlen ist der Einbau von *Anti-Icing-Systemen* und Verdunstungskühlern. Das Anti-Icing-System verhindert das Einfrieren und Blockieren der Vorfilterstufen. Um eine Leistungssteigerung durch Absenkung der Zulufttemperatur zu erreichen, werden *Verdunstungskühler* eingesetzt.

Zur Verminderung des Lärms durchströmt die Luft einen *Ansaugschalldämpfer,* ohne den die geforderten Schallemissionswerte in der Regel nicht eingehalten werden können. Die Luftführung zum Verdichter der Gasturbine übernimmt das Einströmgehäuse.

Hinter der Turbine wird das Abgas in den *Abgasdiffusor* zum Kamin geführt. Durch den sich vergrößernden Querschnitt des Diffusors wird die Strömungsgeschwindigkeit reduziert und der Druck dadurch gesteigert. Ein *Abgasschalldämpfer* sorgt für eine Senkung des Schallpegels im Abgaskanal.

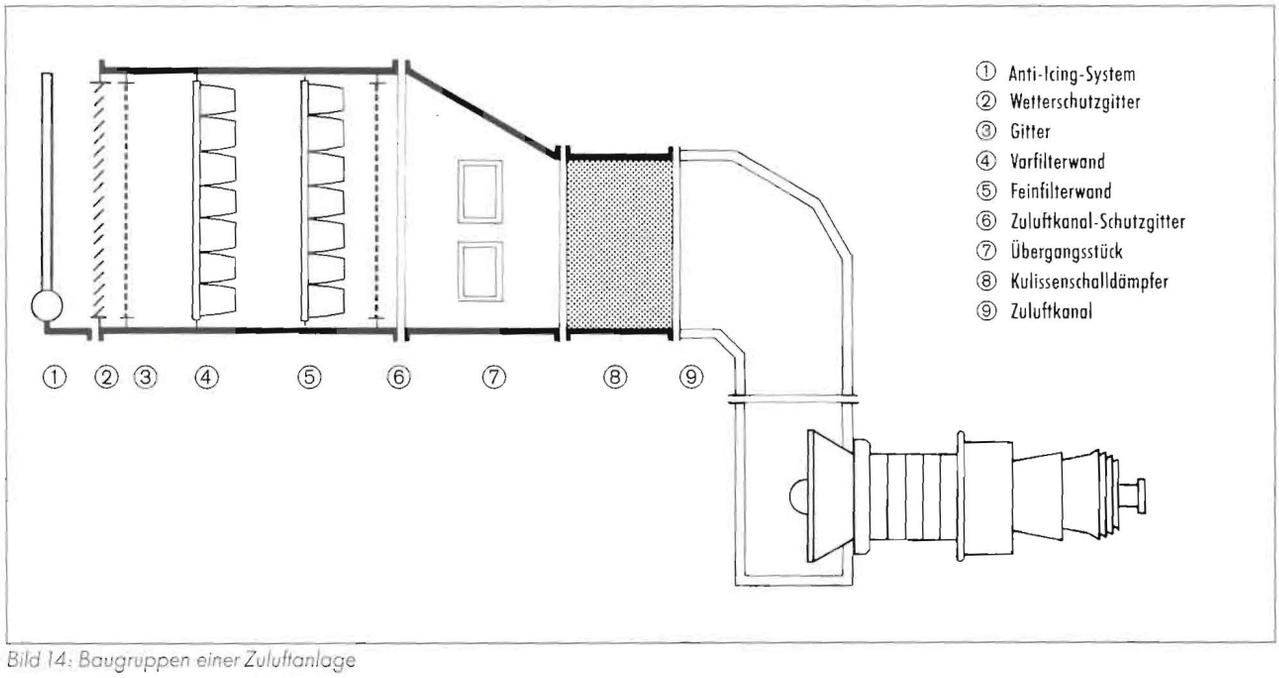


Bild 14: Baugruppen einer Zuluftanlage

Hilfsaggregate

Arbeitet die Gasturbine mit einem flüssigen Brennstoff, übernimmt die *Brennstoffpumpe* die Kompression vor dem Eintritt in die Brennkammer.

Bei Verwendung gasförmiger Brennstoffe ist gelegentlich ein *Brenngasverdichter* erforderlich, sofern der Gasvordruck nicht ausreichend ist. Je nach Gasnetzdruck und Verdichtungsverhältnis der Gasturbine werden maximal 2 – 3 % der elektrischen Leistung der Gasturbinenanlage benötigt.

Zur Schmierölversorgung der Lager gehören eine *Ölpumpe*, ein Ölkühler und entsprechende Überwachungseinrichtungen.

Der *Anlasser* (hydraulisch, elektrisch, pneumatisch) der Gasturbine sorgt beim Beginn des Anfahrvorganges für den Antrieb des Verdichters.

Zur Regelung der angesaugten Luftmenge besitzt der Verdichter eine *Schaufelverstelleinrichtung*, über die die Abströmung aus den Leitschaufeln und damit der angesaugte Luftmassenstrom variiert werden.

Zum Betrieb einer Gasturbinenanlage werden weiterhin eine *Verdichterwaschanlage* und eine *Ölnebelabscheideanlage* benötigt.

Überwachungs- und Schutzeinrichtungen

Zur Anpassung der Brennstoffmenge an den jeweiligen Bedarf werden *Regelventile* eingesetzt. Bei einem notwendigen Abschalten der Gasturbine unterbinden Schnellschlußventile die Brennstoffzufuhr.

Die Flamme wird von *Flammenwächtern* oder *Temperaturfühlern* überwacht. Erlischt die Flamme, wird die Brennstoffzufuhr abgestellt.

Eine *Heißgastemperaturüberwachung* kontrolliert die Gastemperatur. Der Temperaturschutz löst beim Überschreiten des zulässigen Grenzwertes Alarm- und Abschaltfunktionen aus.

Das Laufverhalten einer Gasturbine wird durch eine *Schwingungsüberwachung* kontrolliert. Drehzahlwächter bzw. Überdrehzahlschutz gewährleisten, daß die Gasturbine im zulässigen Drehzahlbereich betrieben und der Rotor nicht überbeansprucht wird.

Ein Maß für den Zustand von Tiefenfilter- und Oberflächenfilteranlagen ist der Betriebsdifferenzdruck. An der Zuluftanlage sollten für jede Filterstufe zuverlässige *Differenzdruckmanometer* angebracht sein, die täglich abgelesen werden. Zusätzlich zu den Differenzdruckwerten ist die Aufzeichnung der meteorologischen Daten wünschenswert. Eine Fernanzeige der Daten ermöglicht eine automatisierte Protokollierung.

Werkstoffe

Die unterschiedlichen Beanspruchungen in den Gasturbinenbauteilen erfordern genaue Kenntnisse über die Festigkeiten und Einsatzmöglichkeiten der Werkstoffe. Von Bedeutung sind bei den Werkstoffeigenschaften unter anderem eine hohe Zeitstandfestigkeit, Zähigkeit und das Ermüdungsverhalten bei Schwingungsbeanspruchungen.

Im Bereich höherer Beanspruchungen werden Hochtemperaturlegierungen auf *Chrom- und Nickelbasis* eingesetzt. Die niedriglegierten Werkstoffe sind billig, gut schweiß- und bearbeitbar, kommen aber aufgrund geringerer Festigkeit nur bei niedrigeren Belastungen zum Einsatz.

Turbinenschaufeln sind hohen Temperaturen sowie großen Biege- und Temperaturwechselbeanspruchungen ausgesetzt. Sie werden aus Nickelbasislegierungen hergestellt und zwecks Verringerung der Korrosion inchromiert.

Die Entwicklung von *keramischen* Werkstoffen erfolgt mit hohem Nachdruck. Hierdurch wird eine Steigerung der Turbineneintrittstemperatur mit der Konsequenz eines besseren Wirkungsgrades angestrebt. Vereinzelt kommen schon Turbinenschaufeln aus *monokristallinen* Werkstoffen zum Einsatz.

Anwendungsmöglichkeiten

Kraft-Wärme-Kopplungs-Schaltungen

Gasturbine mit Abhitzekessel

Die Gasturbine treibt den Generator zur Stromerzeugung an. Die mit ca. 500 °C austretenden sauerstoffreichen Abgase (15 % O_2) werden in einem Abhitzekessel genutzt (Bild 15). Kennzeichnend für diese Anlagenkonfiguration ist eine relativ hohe Stromkennzahl, die über 0,6 liegen kann in Abhängigkeit vom thermischen Wirkungsgrad der jeweils gewählten Gasturbine. Der erforderliche Dampfdruck und die damit erreichbare Abgastemperatur bestimmen den Brennstoffnutzungsgrad und den Kesselwirkungsgrad.

Durch einen, dem Abhitzekessel nachgeschalteten, Wärmetauscher läßt sich die im Abgas enthaltene Energie auch noch für die Heißwassererzeugung nutzen. Dadurch kann der Nutzungsgrad weiter gesteigert werden.

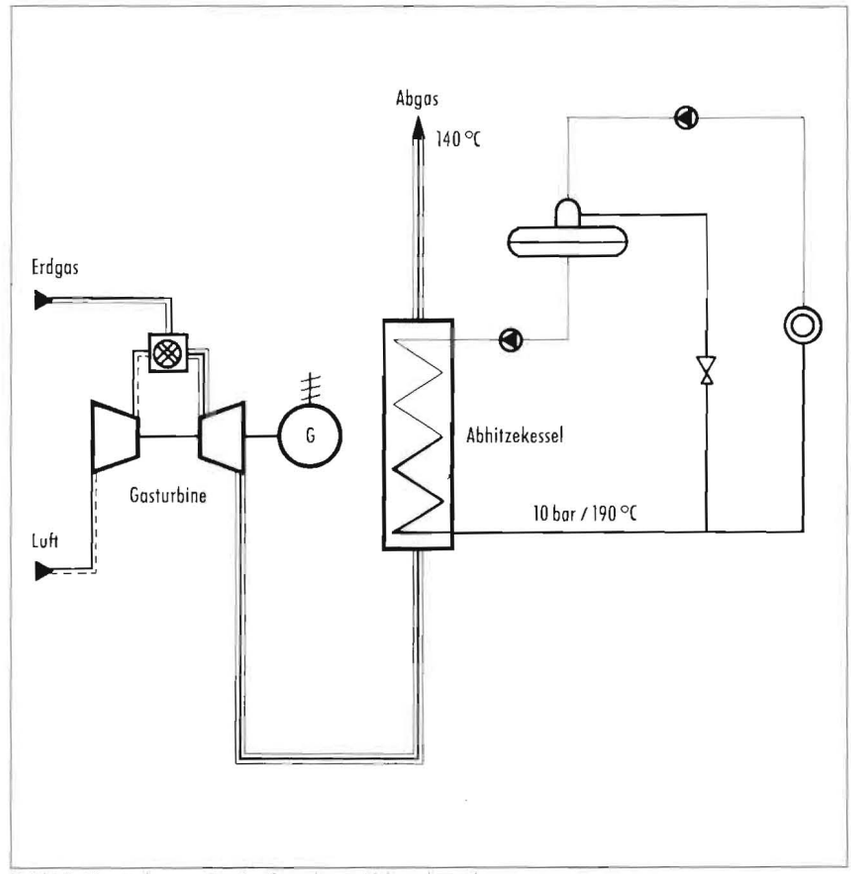


Bild 15: Gasturbinen-Heizkraftwerk mit Abhitzekessel

Gasturbine mit Abhitzekessel und Zusatzfeuerung

Durch Ausrüstung des Abhitzekessels mit einer Zusatzfeuerung wird das Einsatzspektrum zu höheren Dampfdrücken und besseren Brennstoffnutzungsgraden erweitert (Bild 16). Die Stromkennzahl des Gasturbinenheizkraftwerkes läßt sich in einem Bereich von 0,6 bis 0,15 verändern, denn die Wärmeleistung wird durch die Zufuhr von zusätzlichem Brennstoff bei gleicher Stromerzeugungsleistung erhöht.

Mit dem noch im Abgas enthaltenen Sauerstoff wird Brennstoff in einer Zusatzfeuerung verbrannt.

Mit Hilfe der Zusatzfeuerung in Verbindung mit Frischlüfterbetrieb läßt sich bei diesem Heizkraftwerk die Wärmeversorgung unabhängig von der Krafterzeugung in vollem Umfang aufrechterhalten.

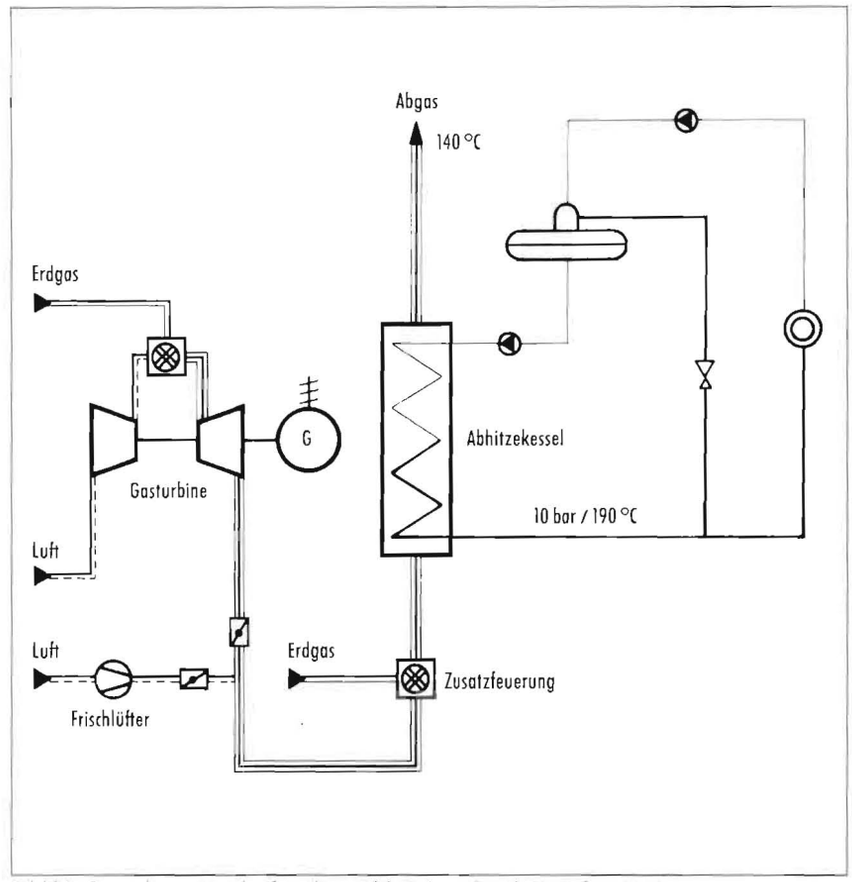


Bild 16: Gasturbinen-Heizkraftwerk mit Abhitzekessel und Zusatzfeuerung

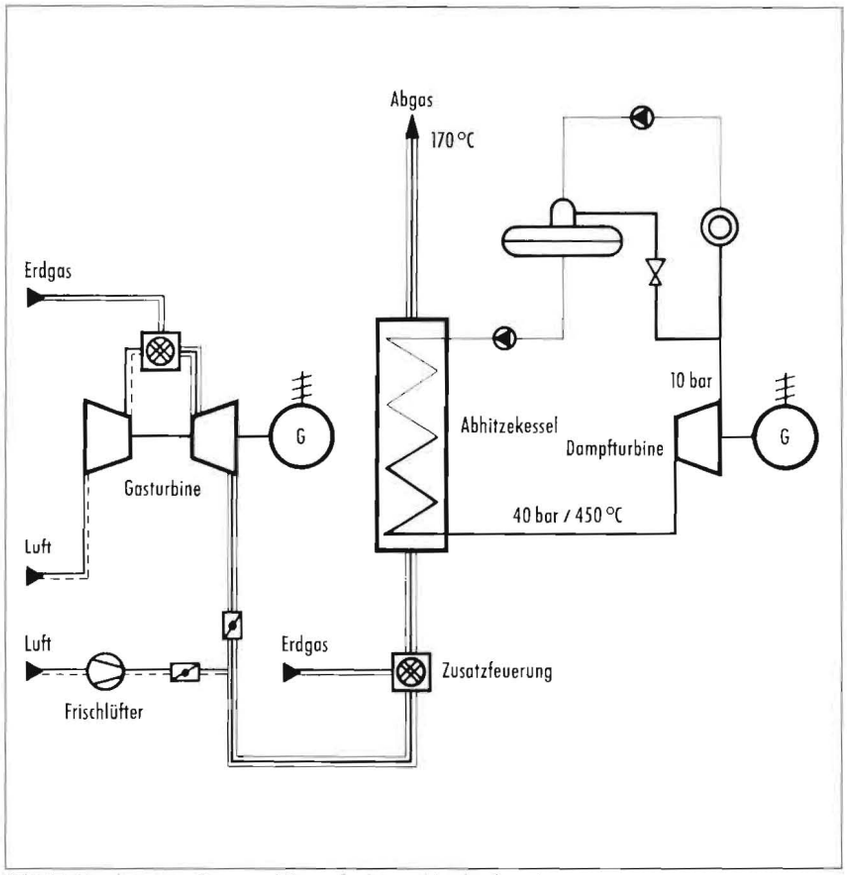


Bild 17: Kombiniertes Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk

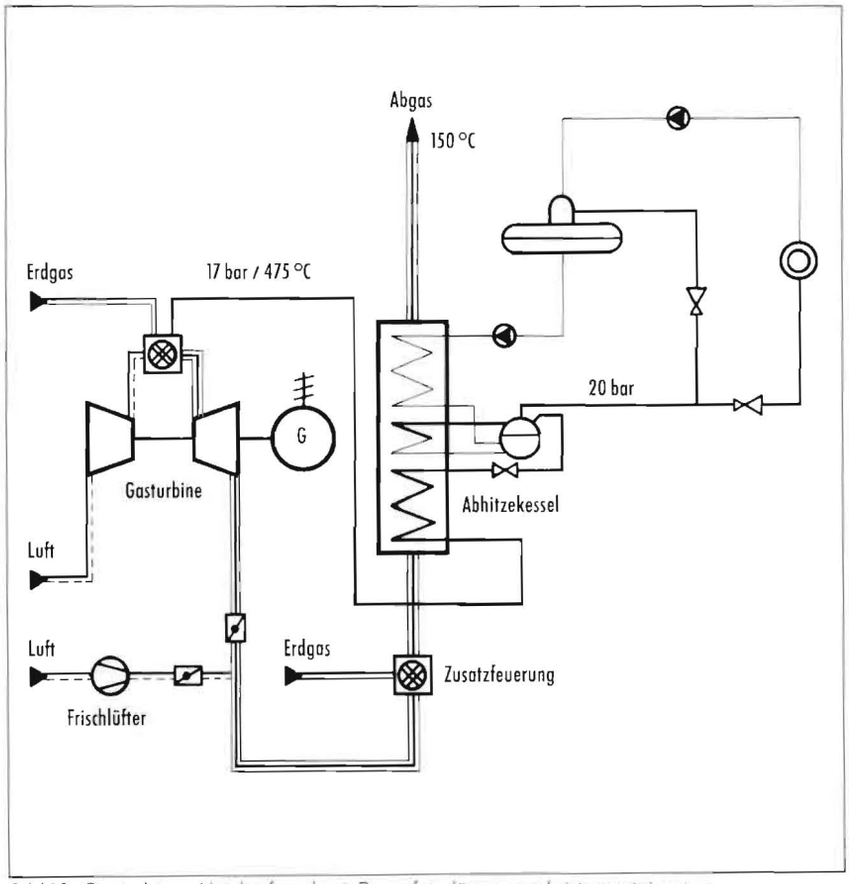


Bild 18: Gasturbinen-Heizkraftwerk mit Dampfeindüsung zur Leistungssteigerung

Kombinierter Gas- und Dampfturbinenprozeß (GuD)

Dieser Prozeß ist gekennzeichnet durch eine höhere Stromkennzahl im Vergleich mit dem Gasturbinenheizkraftwerk, die sich in weiten Grenzen durch eine Zusatzfeuerung verändern läßt. Je nach Anforderung wird eine Kombi-Anlage nicht ohne eine zumindest geringe Zusatzfeuerung betrieben (Bild 17). Das stellt einen hohen Brennstoffnutzungsgrad sicher.

Diese Schaltung verbindet den Vorteil des hohen Wirkungsgrades der Gegendruckstromerzeugung mit der hohen Stromkennzahl der Gasturbine.

In der Praxis werden auf diese Weise die Stromkennzahlen bestehender Dampfturbinenprozesse dem Bedarf entsprechend angehoben. Industrieanlagen erreichen elektrische Wirkungsgrade um 40 %.

Gasturbine mit Dampfeindüsung

Zur Leistungssteigerung, um beispielsweise Stromspitzen abzudecken, wird das Abgas der Gasturbine durch einen Wärmetauscher geleitet und zur Erzeugung von Dampf – zwecks Eindüsung in die Brennkammer – benutzt (Bild 18). Dieses Verfahren ist bekannt als Cheng Cycle bzw. STIG-Prozeß (Steam Injected Gasturbine).

Bedarfsgemäß läßt sich die Dampfeindüsung steigern bis zur vollständigen Verstromung, wobei die Bereitstellung von Prozeßwärme naturgemäß zurückgeht. Dann liegt der elektrische Wirkungsgrad zwischen 38 und 42 %.

Mit der Zusatzfeuerung kann gleichzeitig die Prozeßdampfproduktion aufrechterhalten werden.

Gasturbine mit direkter Abgaswärmenutzung

Vorzugsweise sind Trocknungsprozesse für die Anwendung dieser Kraft-Wärme-Kopplungs-Schaltung von Gasturbinen geeignet (Bild 19). Die Turbinenabgase werden direkt mit dem zu trocknenden Gut in Kontakt gebracht. Die Flexibilität hinsichtlich der Wärmeerzeugung kann durch eine Zusatzfeuerung mit Frischlüfterbetrieb verbessert werden. Bei niedrigen Prozeßtemperaturen erreicht der Brennstoffnutzungsgrad fast 100 %.

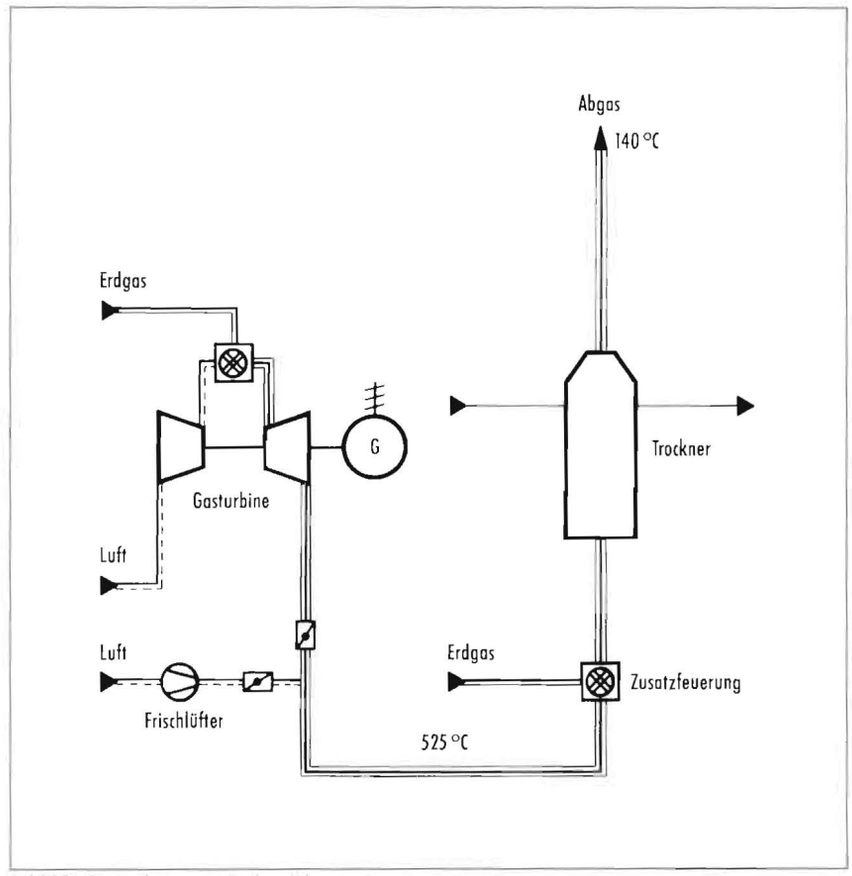


Bild 19: Gasturbine mit direkter Abgaswärmenutzung

Kälteerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung

Eine wichtige Schaltungsvariante ist die Verwendung der Gasturbinenabwärme zum Betrieb einer Absorptionskälteanlage.

Sofern ausreichender Kältebedarf, vorzugsweise im Kaltwasserbereich besteht, kann durch Einsatz von Absorptionskältemaschinen die Auslastung von Gasturbinen-Heizkraftwerken verbessert werden.

Es werden verschiedene Anlagentypen angeboten, die entweder indirekt mit Dampf oder Heißwasser betrieben werden oder wie in diesem Beispiel durch direkten Wärmeaustausch mit den heißen Turbinenabgasen (Bild 20).

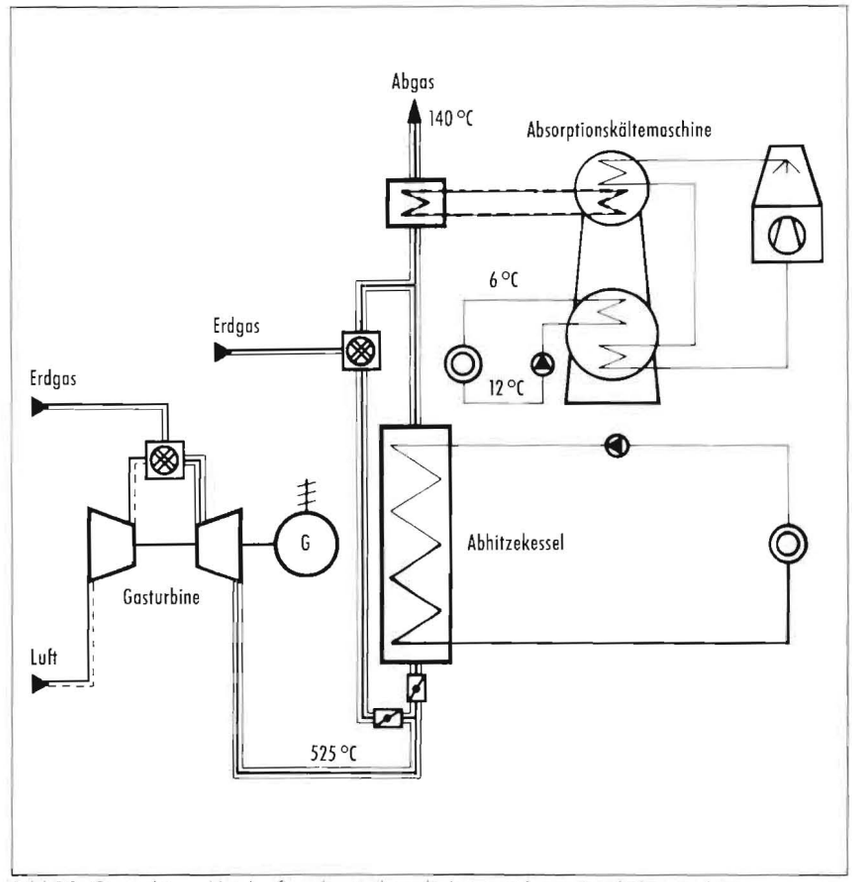


Bild 20: Gasturbinen-Heizkraftwerk mit abgasbeheizter Absorptionskältemaschine

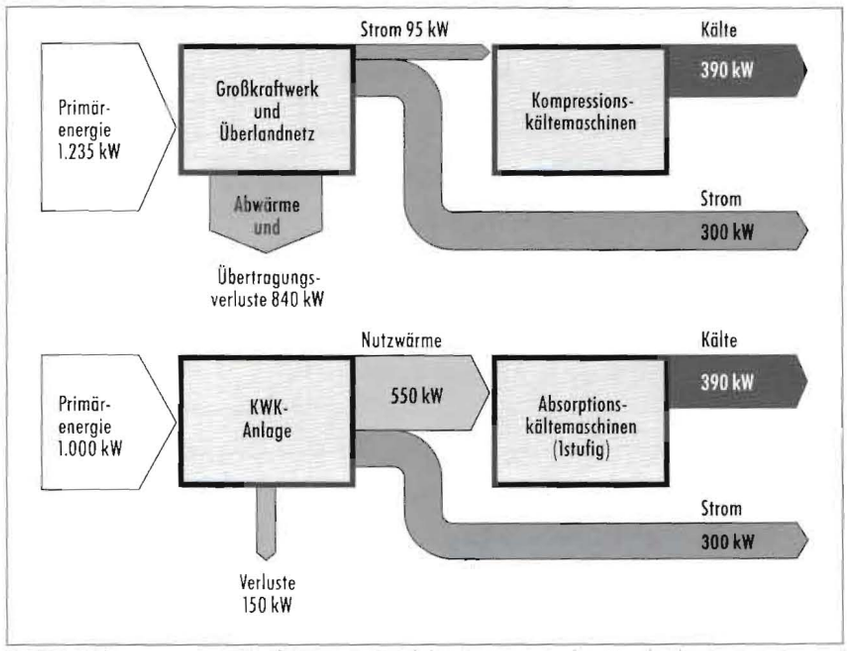


Bild 21: Kälteerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung im energetischen Vergleich mit konventioneller Kälteerzeugung

Im energetischen Vergleich mit der konventionellen Kälteerzeugung ergeben sich primärenergetische Vorteile. In Bild 21 ist dargestellt, daß bei Einsatz einer einstufigen Absorptionskältemaschine, die Abwärme aus einer Gasturbinenanlage nutzt, der Primärenergieverbrauch um ca. ein Viertel gesenkt werden kann. Außerdem werden Absorptionskältemaschinen ohne FCKW betrieben.

Neben der Hauptaufgabe der Stromerzeugung im Kraft-Wärme-Kopplungs-Betrieb lassen sich Gasturbinen zur thermischen Entsorgung von schad- und geruchsstoffbelasteter Abluft verwenden. Bei der Entsorgung lösemittelhaltiger Abluft hat sich gezeigt, daß die Eintrittskonzentration an Lösemitteln 5 g/m^3 nicht überschreiten sollte, um eine ausreichende Umsetzung zu erreichen. Durch nachgeschaltete CO-Katalysatoren werden die Anforderungen der TA Luft erfüllt.

Kennzahlen

Um einen realistischen Vergleich der Gasturbinenschaltungen zu bekommen, wird die Auskopplung von Prozeßdampf mit einheitlich 10 bar unterstellt.

In Bild 22 sind

$$\textit{Stromkennzahl} = \frac{\text{Strom}}{\text{Wärme}} \quad \text{und}$$

$$\textit{Brennstoff-nutzungsgrad} = \frac{\text{Strom} + \text{Wärme}}{\text{Brennstoff}}$$

von Gasturbinen- und Kombiprozeß ohne und mit Zusatzfeuerung dargestellt.
Diese wird bis zum Maximalwert gesteigert.

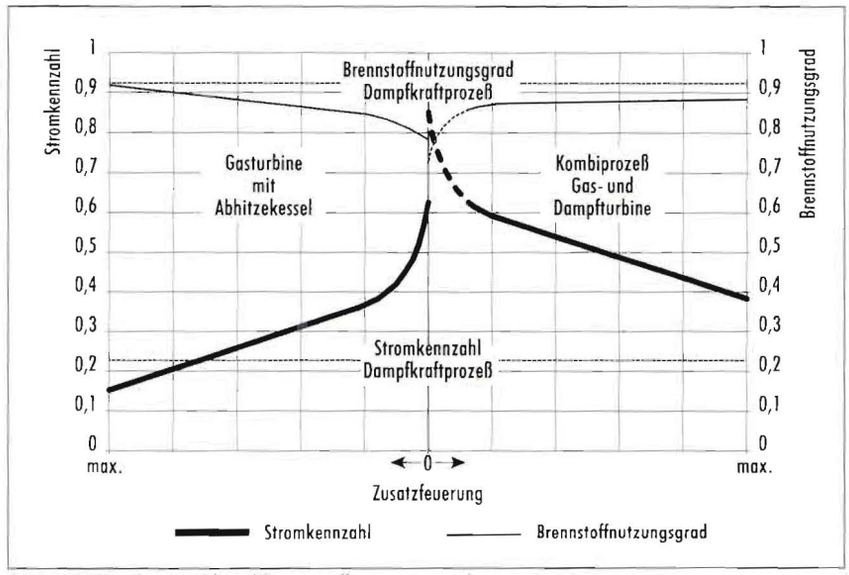


Bild 22: Stromkennzahl und Brennstoffnutzungsgrad

Es wird deutlich, daß eine Gasturbine mit Abhitzekessel und weitgehender Zusatzfeuerung ein Kraft-Wärme-Verhältnis produziert, das der Stromkennzahl des Dampfkraft-Prozesses entspricht. Durch Zurücknahme der Zusatzfeuerung steigt die Stromkennzahl des Gasturbinenheizkraftwerkes auf 0,4 an und erreicht damit das Kraft-Wärme-Verhältnis des Kombiprozesses aus Gas- und Dampfturbine bei maximaler Zusatzfeuerung. Soll mit dem Gasturbinenheizkraftwerk eine höhere Stromkennzahl erreicht werden, wird die Zusatzfeuerung weiter zurückgenommen bis zum reinen Abhitzebetrieb. In diesem Bereich sinkt allerdings der Brennstoffnutzungsgrad deutlich ab.

Bei einem Kombiprozeß kann die Stromkennzahl bis zu einem Verhältnis von 0,6 ohne nennenswerte Einbuße am Brennstoffnutzungsgrad gesteigert werden. Höhere Stromkennzahlen – bis 0,85 – sind mit einem Rückgang des Brennstoffnutzungsgrades verbunden.

Betrieb

Fahrweise

Start- und Abfahrvorgänge

Bei Start- und Abfahrvorgängen ist die Gasturbine hohen Beanspruchungen durch ungleichförmige thermische Belastungen der Bauteile ausgesetzt. In den ersten Minuten des Starts stellen sich naturgemäß größere Temperaturdifferenzen in der Turbinenschaufel ein als im Normalbetrieb.

Jeder Start verursacht durch die auftretenden Temperatur- und Laststeigerungen eine Abnahme der Lebensdauer der Bauteile. Um dieses bei der Berechnung der Lebensdauer zu berücksichtigen, werden von den Herstellern sogenannte Gewichtungsfaktoren benutzt. Diese sind abhängig von der werkstofflichen und konstruktiven Ausführung der Heißgasbauteile. So kann z.B. ein Normalstart etwa 20 Betriebsstunden und ein Schnellstart etwa 50 Betriebstunden entsprechen, was von der Bauart der Gasturbine abhängt.

Heute werden Gasturbinen mit An- und Abfahrprogrammen automatisch gestartet. Der An- und Abfahrvorgang wird dabei so geregelt, daß die Bauteile keinen unzulässigen Belastungen ausgesetzt sind.

Regelung

Eine Gasturbine wird nicht ständig in ihrem Auslegungspunkt betrieben. Oft ist es notwendig, die Leistung und bei bestimmten Anwendungen auch die Drehzahl der Abtriebswelle den betrieblichen Erfordernissen anzupassen. Das läßt sich durch Veränderung des Brennstoffmassenstroms und durch Leitschaufelverstellung des Verdichters erreichen:

- Bei der Brennstoffregelung wird die erforderliche Leistung über den Brennstoffmassenstrom gesteuert. Durch Reduzierung des Massenstroms sinken die Temperatur vor der Turbine und der Energieinhalt des Heißgases, das dann weniger Leistung an die Turbine abgeben kann.

  Die abgesenkte Turbineneintrittstemperatur hat einen reduzierten Volumenstrom zur Folge, wodurch sich über das Durchflußverhalten ein kleinerer Druck vor der Turbine einstellt. Der Wirkungsgrad fällt im allgemeinen stark ab.

- Durch die Leitschaufelverstellung erfolgt eine Änderung in der Geometrie des Strömungskanals. Am häufigsten wird die Leitschaufelverstellung in den ersten Stufen des Verdichters angewendet. Ein Zudrehen reduziert den Luftdurchsatz durch den bei konstanter Drehzahl arbeitenden Verdichter und wirkt damit auf das Verdichterkennfeld und auf das Teillastverhalten der Gasturbinenanlage.

Einflüsse auf das Betriebsverhalten

Die Daten einer Gasturbine, wie Leistung, Wirkungsgrad, angesaugte Luftmenge, Brennstoffmenge hängen vom Umgebungszustand ab. Eine Erhöhung des Luftdrucks und/oder ein Sinken der Umgebungstemperatur vergrößert die Luftdichte und damit den Massenstrom, der vom Verdichter angesaugt wird. Da die Leistung proportional zum Luftmassenstrom ist, steigt sie an. Damit die Bauteile durch eine Leistungszunahme im Winterbetrieb nicht unzulässig belastet werden, sind Maschinen mit einer Leistungsbegrenzung bei tiefen Temperaturen ausgerüstet. Durch verschmutzte Verbrennungsluft ergeben sich Beeinträchtigungen der Aerodynamik der Beschaufelung, die zu Wirkungsgradverlusten und Schäden führen können. Nachfolgend sind die wichtigsten Betriebseinflüsse auf den Gasturbinenbetrieb zusammengefaßt:

- Unter Erosion versteht man den Materialabtrag am Bauteil, hervorgerufen durch die abrasive Wirkung von mitgeführten Partikeln. Dabei verschwinden die Erosionswirkungen bei Partikelgrößen unterhalb ca. 3 µm. Um die Erosionswirkung zu eliminieren, reichen im allgemeinen Feinfilter aus.

- Unter Fouling versteht man die Belagbildung auf der Beschaufelung. Sie wird durch feine und feinste Partikel hervorgerufen (2 – 5 µm). Dies verändert die Geometrie der Schaufeln. Hierdurch kann bei Verdichtern, die nahe der Pumpgrenze betrieben werden, die Gefahr des Strömungsabrisses – bei sonst normalen Betriebsbedingungen – auftreten.

- Unter ungünstigen Bedingungen kann Korrosion an den Schaufeln auftreten. Da luftgetragene Partikel auch Salze, wie z. B. Ammoniumverbindungen, enthalten, kommt es in den Belägen zu Elektrolytbildungen, die an den Korngrenzen des Schaufelmaterials zu interkristalliner und Spannungsrißkorrosion führen können (Naßkorrosion).
  Als Maßnahme gegen die Korrosionsgefahr werden die Schaufeln des Verdichters und der Turbine beschichtet (Bild 23). Hierdurch wird vermieden, daß der Schaufelwerkstoff unmittelbar angegriffen wird.

- Ein Teil der verdichteten Luft wird zur Kühlung der Heißgasteile dem Verdichter entnommen. Obwohl die Kühlluftkanäle im Rotor bzw. Gehäuse der Gasturbine meist einen großen Querschnitt aufweisen, können feinste Partikel mit hoher spezifischer Oberfläche die Bohrungen und Schlitze in den Schaufeln mit der Zeit zusetzen. Dies führt zu Überhitzungserscheinungen und damit zu vorzeitiger Materialermüdung.

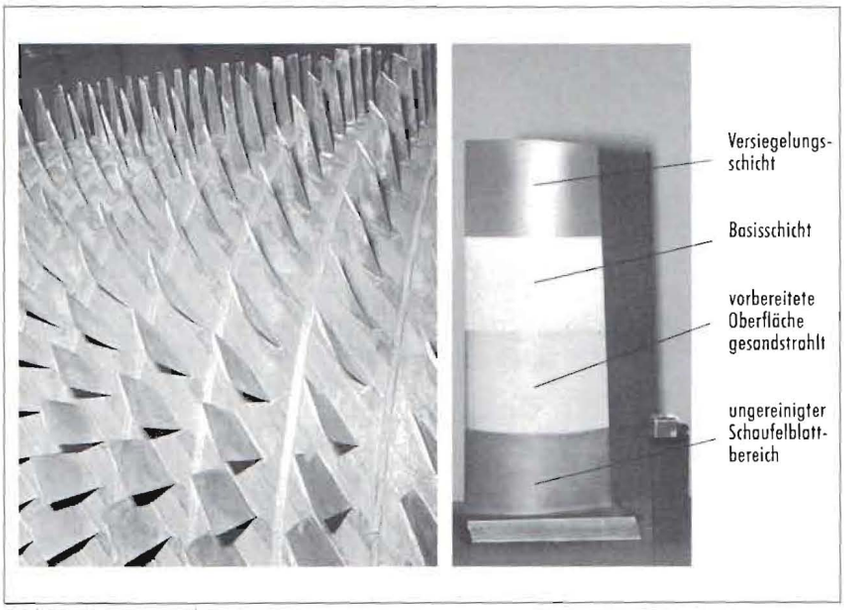


Bild 23: Korrosionsschutz

Instandhaltung

Durch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen – sie beinhalten *Wartung, Inspektion und Instandsetzung* – wirkt man verschleißbedingten Ausfällen und Schäden entgegen (Bild 24). Eine sachgerechte Instandhaltung führt zu hohen Verfügbarkeiten und Zuverlässigkeiten sowie niedrigen Betriebskosten. Je nach Anforderung an die Gasturbinenanlage werden folgende *Instandhaltungsmethoden* unterschieden:

- störungsabhängige Instandhaltung,
- vorbeugende, intervallabhängige Instandhaltung,
- zustandsorientierte Instandhaltung.

Die *störungsabhängige* Instandhaltung stellt inzwischen keine zeitgemäße Methode mehr dar.

Die gebräuchlichste Methode ist hingegen die *vorbeugende, intervallabhängige* Instandhaltung.

Die *zustandsorientierte* Instandhaltung repräsentiert die effektivste Methode. Bei ihr werden die zur Beurteilung des Anlagenzustandes erforderlichen Informationen mit geeigneten Mitteln erfaßt. Hierzu zählen Messungen, Endoskopie und Trenddarstellung von Prozeßparametern. Die exakte Erfassung des Anlagenzustands ermöglicht theoretisch die Durchführung der Instandhaltungsmaßnahme, unmittelbar bevor der Abnutzungsvorrat von Anlagenkomponenten verbraucht ist, d. h. vor dem Versagen eines Bauteils. Die zustandsorientierte Instandhaltung ist bisher allerdings nicht weit verbreitet.

In der Praxis wird der Betreiber eine Kombination aus der vorbeugenden, intervallabhängigen Instandhaltung und der zustandsorientierten Instandhaltung anwenden, wobei ein weitgehender Übergang zur zustandsorientierten Instandhaltung angestrebt wird.

Den umfangreichsten Teil der Instandhaltung nimmt die *Wartung* ein. Die Gasturbinenhersteller liefern dazu in den meisten Fällen detaillierte und erprobte Anleitungshandbücher.

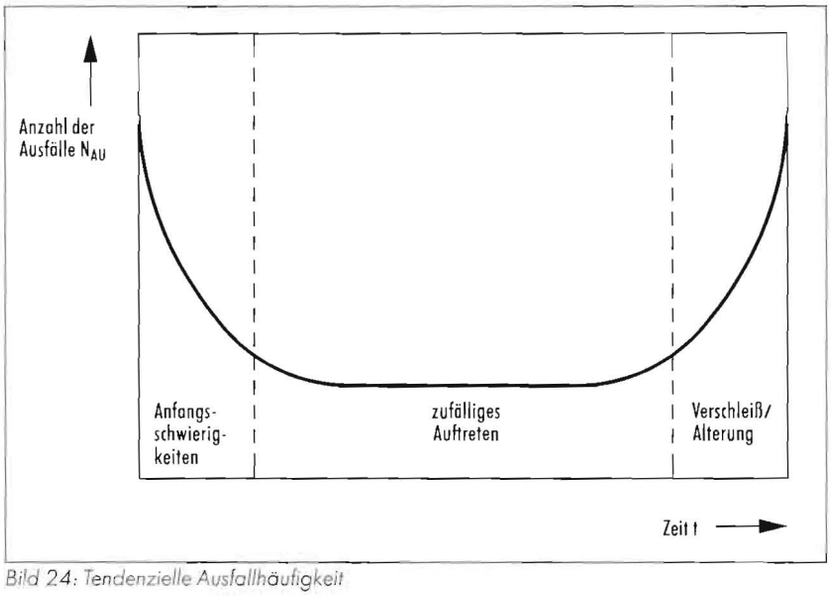


Bild 24: Tendenzielle Ausfallhäufigkeit

In regelmäßigen Abständen ist die Gasturbine von Verschmutzungen zu reinigen. Dies ist notwendig, um eine ungünstige Umströmung und damit verbunden eine Absenkung des Wirkungsgrades zu vermeiden. Es gibt zwei Methoden:

- Bei der Trockenreinigung werden vor dem Verdichter bei laufender Maschine Reis, Nuß- oder Aprikosenschalen zugegeben, wodurch sich trockene, pulvrige Beläge gut entfernen lassen.
- Bei der Naßreinigung, die heute am weitesten verbreitet ist, wird in die Maschine ein Reinigungsmittel eingespritzt, das nach der Einwirkzeit bei laufender Maschine ausgewaschen wird.

Unter *Inspektion* versteht man die Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes. Zur Zustandsbeurteilung von Gasturbinen haben sich die Endoskopie und in bestimmten Zeitabständen durchgeführte Schwingungs- und Leistungsmessungen bewährt.

Mit der *Instandsetzung* von Gasturbinen oder einzelnen Bauteilen wird in den meisten Fällen der Hersteller oder ein technisch versiertes Serviceunternehmen beauftragt. Inwieweit die Instandsetzungsarbeiten vor Ort vorgenommen werden können, hängt maßgeblich von dem Gasturbinentyp und vom Schadensumfang ab.

Wirtschaftlichkeit

Entscheidendes Kriterium für den Einsatz von Gasturbinenanlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme ist die Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit der konventionellen Bereitstellung dieser beiden Nutzenergien: Wärmeerzeugung in einer Kesselanlage und Fremdstrombezug aus dem Netz. Als Basiswert dient die Amortisationszeit. Hierzu wird der sogenannte „return of investment" berechnet, d. h. der Zeitpunkt in Jahren, an dem die summierten Jahresüberschüsse der Investition entsprechen. Zur schnellen, überschlägigen Ermittlung der Amortisationszeit von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit Gasturbinen dient ein Nomogramm, dessen Ergebnis als erster Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage verstanden werden kann (Bild 25).

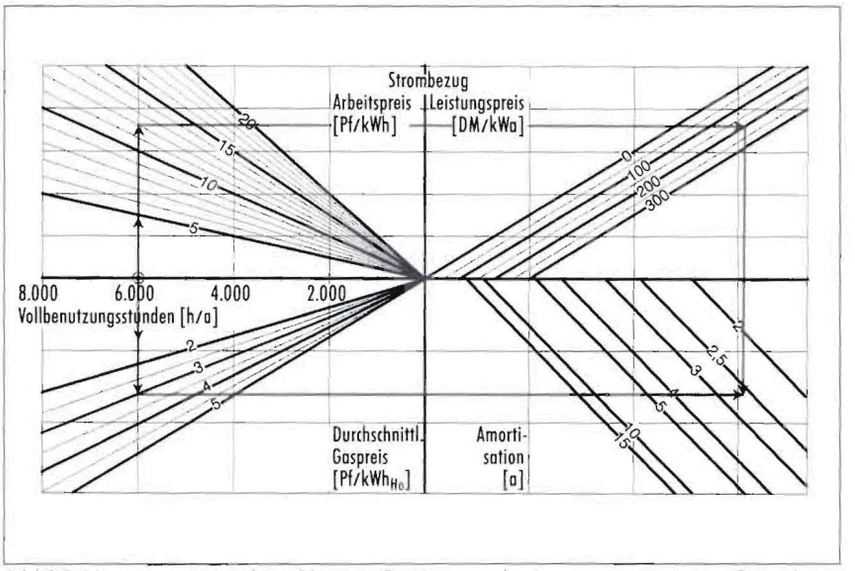


Bild 25: Nomogramm zur überschlägigen Bestimmung der Amortisationszeit einer Gasturbine

Wirkungsgrad der Stromerzeugung	29 %
Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung:	54 %
(Jahres-)Kesselnutzungsgrad für Wärmegutschrift:	85 %
Spezifische Investition (ohne Gebäude):	1.500 DM/kW$_{el}$
Instandhaltung:	1,2 Pf/kWh$_{el}$
Maschinenbruch- und Ausfallversicherung:	1,5 % der Investition pro Jahr

Bild 26: Ausgangsdaten des Amortisations-Nomogramms

Wesentliche Parameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung sind neben den Anlagenkosten die jährlichen Vollastbenutzungsstunden, der durchschnittliche Gaspreis und der Preis für Strombezug, aufgeteilt in Arbeits- und Leistungspreis. Diese sind auch als Variable im Nomogramm enthalten.

Die spezifischen Investitionen der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage, der spezifische Gasverbrauch, die Wärmegutschrift (entsprechend einem Gaskessel), die Wartungskosten und die Maschinenversicherung, die als Ausgangsdaten für das Nomogramm dienen, sind in Bild 26 angegeben.

Als Ergebnis wird die Amortisationszeit ohne Zinsen ausgewiesen, die sich aus der Jahreskostenersparnis gegenüber Fremdstrombezug ergibt.

Bei der Anwendung des Nomogramms beginnt man zweckmäßigerweise mit den Vollastbenutzungsstunden. Ein Linienzug, entsprechend den jeweiligen Strom- und Gaspreisen, führt dann zu der Amortisationszeit, wie sie beispielsweise im Nomogramm eingetragen ist.

Die Art der Finanzierung – z. B. Höhe der Zinsen und Abschreibungsdauer – ist hierbei nicht berücksichtigt. Die ermittelte Amortisationszeit ist als untere Grenze zu sehen.

ASUE-Veröffentlichungen

Gasturbinen – Kenndaten

Die Veröffentlichung „Gasturbinen – Kenndaten" enthält die folgenden Kenngrößen von mehr als 70 Gasturbinentypen: Generator-Klemmenleistung, Brennstoffeinsatz und Klemmenwirkungsgrad sowohl unter Normbezugsbedingungen als auch unter Berücksichtigung von Ein- und Auslaßdruckverlusten. Weiterhin wurden Angaben über die Wärme- und Dampferzeugung aus dem Abgas mit und ohne Zusatzfeuerung erarbeitet, um die Einsatzmöglichkeiten der Gasturbinen für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen besser beurteilen zu können.

Gasturbinen – Referenzen

Die Broschüre gibt einen Überblick über die Gesamtzahl der installierten Anlagen (Stand: 1993), geordnet nach Industriebranchen bzw. Fern-/Nahwärmeversorgung sowie dem Inbetriebnahmejahr. Neben dem Gasturbinentyp und der elektrischen Leistung enthält die Referenzliste Angaben zur Anlagenart. Darüber hinaus werden typische Schaltungsvarianten kurz beschrieben.

Gasturbinen – Betriebsmanagement

Für ein bestmögliches Betriebsmanagement von Gasturbinen bedarf es der systematischen Erfassung von Betriebsdaten, deren analytischer Zusammenfassung zu Kennzahlen und Auswertung. Die Broschüre liefert das hierzu notwendige „Handwerkszeug". Die grundsätzliche Vorgehensweise wird dargestellt sowie anhand von Beispielen erläutert. Durch klare Definition wird eine eindeutige Zuordnung von Vorkommnissen sichergestellt.

Gasturbinen – Zuluftfiltration

Durch Zuluftfiltration werden die Betriebskosten von Gasturbinen reduziert. Einerseits werden Beeinträchtigungen der Aerodynamik der Beschaufelung vermindert, die zu Wirkungsgradverlusten führen. Andererseits wird möglichen Schäden vorgebeugt. In der Broschüre werden ausgehend von einer Beschreibung der Einflüsse verschmutzter Verbrennungsluft auf den Betrieb von Gasturbinen die Grundlagen der Luftfilterung und Ausführungsformen von Luftfiltern dargestellt. Darüber hinaus werden praktische Hinweise zu Auslegung, Ausführung und Betrieb gegeben. Der Anhang der Broschüre enthält eine Checkliste zur Planung der Zuluftfiltration von Gasturbinen in Form eines Fragebogens.

Gasturbinen – Emissionsverhalten

Unter Berücksichtigung aller Emissionen, aber auch im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung stellen KWK-Anlagen mit Gasturbinen für die dezentrale Energieerzeugung eine Lösung dar, die Ökonomie und Ökologie auf einen vernünftigen Nenner bringt. Dies ist das Fazit der Veröffentlichung, in der im Alltagsbetrieb gemessene Emissionswerte von 13 typischen Gasturbinen-KWK-Anlagen dargestellt sind.

Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasturbinen

Der umfangreiche Band enthält die überarbeiteten Referate der internationalen ASUE-Fachtagung „Turbo-KWK 90 – Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasturbinen" vom Dezember 1990. Die Beiträge der insgesamt 16 Referenten geben einen Überblick über Einsatzbereiche, Erfahrungen und Entwicklungsperspektiven mit Gasturbinen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Die Veröffentlichung ist als Band 13 der ASUE-Schriftenreihe im Vulkan-Verlag, Essen, erschienen.

Wärme macht Kälte

Absorptionskältemaschinen lassen sich energetisch und wirtschaftlich vorteilhaft mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (Gasmotoren und Gasturbinen) kombinieren. Zudem werden in Absorptionskältemaschinen keine Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) eingesetzt. Die Veröffentlichung zeigt zehn typische Anwendungsfälle. Einleitend wird ein Überblick über die energetischen und technischen Charakteristika von Absorptionskältemaschinen gegeben.

Genehmigungsverfahren für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

Entsprechend der wachsenden Bedeutung der rechtlichen Verfahren für den Entscheidungs- und Planungsprozeß solcher Anlagen bietet die Veröffentlichung eine Übersicht über die einschlägigen gesetzlichen Vorschriften und Verordnungen, die beim Bau von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zu berücksichtigen sind. Für Planer und künftige Betreiber solcher Anlagen wird jedes Verfahren anhand eines Ablaufschemas erläutert.

Risiko-Management

Gerade bei Investitionen in neue Techniken ist eine gründliche Analyse der möglichen Risiken in den verschiedenen Phasen des Projektes, soweit wie möglich eine Vermeidung dieser Risiken und letztlich eine Absicherung des verbleibenden Risikos über Versicherungen erforderlich. Die Veröffentlichung gibt einen Überblick über das Thema Risikoanalyse und -abdeckung. Dabei sind die verschiedenen Versicherungstypen jeweils kurz beschrieben und anhand von praktischen Beispielen während Planung, Bau und Betrieb einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage erläutert.

BHKW-Fibel

Mit Wirkungsgraden bei der Stromerzeugung von 35 % und mehr bei Gesamtnutzungsgraden von 80 – 90 % stellt die Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken ein sehr interessantes Instrument zur rationellen Energieverwendung und zum Umweltschutz dar. Die neue Veröffentlichung gibt einen Überblick über Energiesparpotentiale, Umweltvorteile, Funktionsweise und Einsatzfelder, aber auch Randbedingungen von dezentralen Blockheizkraftwerken. Darüber hinaus werden die notwendigen Rahmenbedingungen für einen sinnvollen BHKW-Einsatz aufgezeigt.

Bestellung von ASUE-Veröffentlichungen

Stand: Juli 1994

Mit dieser Preisliste verlieren alle bisherigen ihre Gültigkeit.

Titel	Bestell-Nr.	Bestellte Expl.	Schutzgeb.* DM/Expl.
Tätigkeitsbericht 1993	01 04 94		kostenlos
In aller Kürze – Das Wichtigste über ASUE	01 05 94		kostenlos
ASUE at a Glance	01 06 94		kostenlos
Preis der deutschen Gaswirtschaft für rationellen Erdgaseinsatz 1992 – Dokumentation	04 09 92		kostenlos
Preis der deutschen Gaswirtschaft 1980 – 1990	04 11 91		kostenlos
Erdgas – Chance für Umwelt und Klima	07 06 94		1,--
Umweltanforderungen – Erdgas und leichtes Heizöl im Vergleich	07 03 94		0,30
Energie und Klima – Erdgas als Beitrag zur Milderung des Treibhauseffektes	07 06 91		1,--
Energy and the World's Climate	07 03 92		1,50
Stichwort Methan – Erdgas in der Klimadiskussion	07 06 93		0,25
Methane – Natural Gas and the Environmental Debate	07 02 94		0,30
Erdgas plus erneuerbare Energien – Sonne, Umweltwärme, Biomasse	19 09 93		3,50
Die Richtung stimmt – Erdgas als Brücke zur idealen Energie	07 01 92		1,20
Erdgas – Chance für Umwelt und Klima (Materialien und Bildvorlagen)	07 08 94		4,--
Erdgaseinsatz in Kraftfahrzeugen	19 03 94		3,50
BHKW-Fibel	05 01 93		1,50
BHKW-Marktübersicht	05 10 93		0,25
Blockheizkraftwerke – Grundlagen	05 12 92		4,--
Blockheizkraftwerke – Beispiele	05 08 88		2,--
BHKW in Krankenhäusern	05 05 91		2,50
BHKW und Methanzahl	05 10 92		3,50
Erdgasbetriebene Blockheizkraftwerke	05 03 94		0,50
Cogen Europe – The European Association for the Promotion of Cogenerotion	05 02 94		kostenlos
Gasturbinen – Grundlagen, Technik, Betrieb	11 09 94		3,--
Gasturbinen – Kenndaten	11 01 92		3,--
Gasturbinen – Referenzen	11 04 93		2,50
Gasturbinen – Betriebsmanagement	11 01 91		2,50
Gasturbinen – Zuluftfiltration	11 11 91		3,--
Risiko-Management – Risikoerkennung und -absicherung	19 02 91		3,50
Stichwort „Entspannung" – Strom aus Gasdruck	19 04 91		2,50
Referenzliste Erdgas-Entspannungsanlagen	19 02 94		0,50
Bio-Logisch – Klär- und Deponiegas mit Erdgas sicher nutzen	19 09 91		2,50
Genehmigungsverfahren für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen	19 02 92		3,50
Wärme macht Kälte – Kraft-Wärme-Kopplung mit Absorptionskälteanlagen	19 09 90		2,--
Maßstab Umwelt – Gaswärmepumpen in einer veränderten Energielandschaft	06 06 87		0,50
Wärmelieferung – Grundlagen, Beispiele, Praxis-Hinweise	10 03 92		3,50
Contracting in der kommunalen und industriellen Energieversorgung	10 12 93		3,50
Checkliste Brennwerttechnik	09 07 94		1,--
Niedrigenergiehäuser – Heizung und Warmwasserbereitung	09 05 93		3,50
Kontrollierte Wohnungslüftung	09 11 93		0,25
Wärmstens zu empfehlen – Umwelt- und kostenbewußte Warmwasserbereitung mit Erdgas	09 03 94		1,50

Hinweis: Die letzten vier Ziffern der Bestell-Nr. geben jeweils Erscheinungsmonat und -jahr wieder.
* Schutzgebühr zuzügl. Verpackung, Versandkosten und Mehrwertsteuer, Mindestbestellwert 20,– DM

Bestellung von ASUE-Veröffentlichungen

Besteller / Rechnungsempfänger / Lieferanschrift

Verlag
Rationeller Erdgaseinsatz
Postfach 10 03 04

20002 Hamburg

Fax (0 40) 23 66 33 61

Kunden-Nr.: | | | | | |

Wir bestellen die umseitigen Veröffentlichungen.
(Mindestbestellwert DM 20,–)

Ort/Datum Unterschrift

für Lang-DIN-Fensterumschlag hier falzen

Titel	Bestell-Nr.	Bestellte Expl.	Schutzgeb.* DM/Expl.
Infoschieber Haustechnik inkl. Begleitheft**	09 01 92		10,--
Energieberatung heute (Broschüre)**	08 01 93		2,45
Aufstellung von Gasgeräten (Broschüre)**	08 02 94		2,45
Brennwerttechnik (Broschüre)**	08 02 93		1,50
Warmwasserbereitung (Broschüre)**	08 03 93		1,50
Energieberatung heute (Foliensatz, Begleittext)**	08 01 94		59,--
Aufstellung von Gasgeräten (Foliensatz, Begleittext)**	08 03 94		59,--
Brennwerttechnik (Foliensatz, Begleittext, Dias, Tonbandkassette)**	08 05 93		59,--
Warmwasserbereitung (Foliensatz, Begleittext)**	08 04 93		59,--

* Schutzgebühr zuzügl. Verpackung, Versandkosten und Mehrwertsteuer, Mindestbestellwert 20,– DM
** auch zu beziehen über: Information Erdgas (IntEl), Postfach 10 17 14, 45017 Essen

ASUE-Schriftenreihe***

Titel	Bestell-Nr.
Band 11: Brennwertgeräte – Technik, Vorschriften, Erfahrungen	52 39
Band 12: Neue Chancen der Gasanwendung im häuslichen Bereich	52 40
Band 13: Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasturbinen	52 41
Band 14: Eindämmung des Treibhauseffektes durch intelligente Technik	52 42
Band 15: Brennwerttechnik – Möglichkeiten, Erfahrungen, Hemmnisse	52 43

*** Die Bände der Schriftenreihe sind über den Vulkan-Verlag, Postfach 10 39 62, 45039 Essen zu beziehen.

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E. V.

Die 1977 gegründete ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltfreundlicher Technologien auf Erdgasbasis. Vorrangiges Ziel ist, solchen Techniken den Weg in die praktische Anwendung zu ebnen.

Aktivitäten

Fachtagungen
Veröffentlichungen
Preis der deutschen Gaswirtschaft

Arbeitskreise

Blockheizkraftwerke
Erdgas und Umwelt
Gasturbinentechnik
Gaswärmepumpen
Haustechnik
Wärmelieferung

Mitgliedsunternehmen

Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG, Lörrach
Bayerngas GmbH, München
BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover
Berliner Gaswerke AG (GASAG)
Dortmunder Stadtwerke AG
Dresden Gas GmbH
Energieversorgung Mittelrhein GmbH, Koblenz
Erdgas Mark Brandenburg GmbH, Potsdam
Erdgas Schwaben GmbH, Augsburg
Erdgas Südbayern GmbH, München
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster
Erdgasversorgungsgesellschaft mbH, Erfurt
Ferngas Nordbayern GmbH, Bamberg
Ferngas Salzgitter GmbH
Gasanstalt Kaiserslautern AG
Gas-Union GmbH, Frankfurt
Gasversorgung Main-Kinzig GmbH, Gelnhausen
Gasversorgung Osthessen GmbH, Fulda
Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, Halle
Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart
Gas-Versorgungsgesellschaft Filstal mbH, Göppingen
Hamburger Gaswerke GmbH
Landesgasversorgung Niedersachsen AG, Sarstedt
Maingas AG, Frankfurt
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg
Oberhessische Gasversorgung GmbH, Friedberg
Ruhrgas AG, Essen
Saar Ferngas AG, Saarbrücken
Stadtwerke Essen AG
Stadtwerke Paderborn GmbH
Südhessische Gas und Wasser AG, Darmstadt
Thyssengas GmbH, Duisburg
Verbundnetz Gas AG, Leipzig
Westfälische Ferngas-AG, Dortmund
Wintershall Gas GmbH, Kassel

Das Papier dieser Broschüre ist nicht mit Chlor gebleicht.