

Fortschrittliche gasbefeuerte Kraftwerksprozesse für höchste Wirkungsgrade und niedrige Stromerzeugungskosten

Dipl.-Ing. C. Kail, Erlangen

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Artikel werden die zur Zeit diskutierten Entwicklungsrichtungen bei GUD-Kraftwerken, wie z.B. die Zwischenerhitzung der Turbinenrauchgase oder die Dampfkühlung der Brennkammer und der Turbine, und andere Kraftwerksprozesse, wie der HAT- und der STIG-Prozeß, unter thermodynamischen und ökonomischen Gesichtspunkten analysiert und bewertet.

Die Untersuchung hat ergeben, daß die GUD-Varianten höhere Wirkungsgrade und niedrigere Stromerzeugungskosten erreichen als der HAT- und der STIG-Prozeß. Unter den GUD-Varianten schneidet der GUD-Prozeß mit der „einfachen“ Gasturbine am besten ab. Die Stromerzeugungskosten des GUD-Prozesses mit der Gasturbine mit Zwischenerhitzung und ohne Zwischenkühlung sind rund 2 % höher als beim „einfachen“ GUD-Prozeß. Die zusätzliche Zwischenkühlung der Verdichterluft bewirkt eine Verminderung der spezifischen Anlagenkosten und dadurch eine Reduzierung der Stromerzeugungskosten auf einen Wert, der nur noch 1 % höher ist.

Der Vergleich der verschiedenen Gasturbinen-Kühltechniken hat gezeigt, daß die geschlossenen Dampfkühlsysteme der Brennkammer und der Turbine zu den höchsten Wirkungsgraden und Leistungen führen. Die geschlossenen Kühlsysteme sind jedoch mit technischen Problemen und Risiken verbunden. Dies gilt insbesondere für die Turbinenkühlsysteme. Wenn diese Probleme gelöst werden und wenn die Verfügbarkeit und die Kosten für Wartung und Instandhaltung in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wie bei der offenen Luftkühlung, dann bieten die geschlossenen Kühlsysteme wirtschaftliche Vorteile gegenüber der heute üblichen, offenen Luftkühlung.

Summary

The report will analyze and evaluate the most recent and significant trends in combined cycle gas turbine power plants (GUD power plants) configurations. Furthermore, HAT and STIG power plants are analyzed.

The results show, that GUD power plants have a lower cost of electricity than HAT or STIG power plants. In comparison with the GUD power plant with the "simple" gas turbine, the GUD power plant with the gas turbine with reheat cannot transform its efficiency and output advantages into lower electric power generation costs, as the additional investments and higher maintenance costs overwhelm the thermodynamic advantages. Intercooling improves the cost situation of the gas turbine with reheat. However, the GUD power plant with the "simple" gas turbine achieves the lowest electrical power costs and is therefore from an economic point of view the best process.

The concept of steam-cooled turbine blades places very stringent requirements on the blade materials, on the quality of the cooling steam and on the design of the closed cooling system. If the technical problems can be satisfactorily solved and the availability and the maintenance costs are similar to those of the air cooled gas turbine, closed steam cooling of the turbine blades offers cost advantages due to the higher efficiency and the significantly increased power output over open air cooling.

The gas turbine with a closed combustion chamber cooling system is less problematic than the gas turbine with a closed blade cooling system. It also has cost advantages in comparison with the open combustion chamber cooling system due to its efficiency and output advantages. Either air or steam can be used as the cooling fluid.

wiedergibt, wird für Energiebilanzen und Wirkungsgradangaben üblicherweise der untere Heizwert als Bezugspunkt gewählt. Die Energieflußbilder sind hier deshalb die einzigen Abbildungen, bei denen die Brennstoffenergie auf den oberen Heizwert bezogen wird. In den übrigen Diagrammen und Tabellen wird die Brennstoffenergie immer auf den unteren Heizwert des Brennstoffes bezogen, um die bisher übliche Art beizubehalten.

Im GUD-Prozeß setzt die Gasturbine 34.7 % der zugeführten Brennstoffleistung in mechanische Leistung um und die Dampfturbine 18.7 % (Abbildung 1). Der Wirkungsgrad des GUD-Prozesses ergibt sich aus der Summe dieser Leistungen zu 53.4 % (bzgl. H_o , ohne Generatorverluste). Die an die Umgebung abgegebene Wärme besteht aus 17.0 % Abgaswärme und 29.3 % Kondensationswärme. Sie beträgt zusammen 46.3 % der dem Prozeß zugeführten Brennstoffenergie.

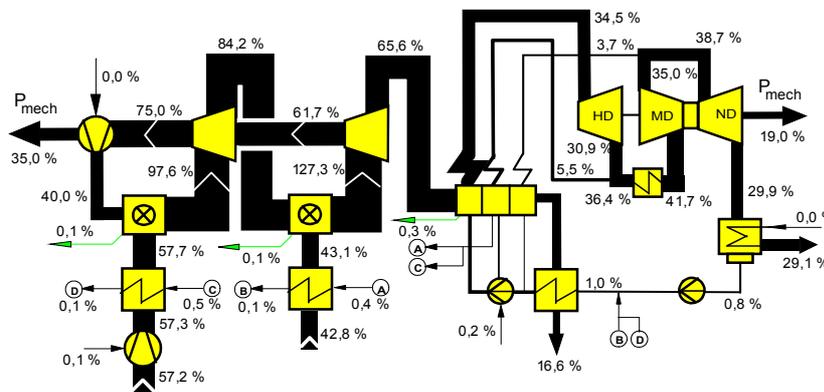


Abbildung 2: Energiefluß bzgl. H_o im GUD-Prozeß mit Gasturbine mit Zwischenerhitzung (Druckverhältnis 28, Turbineneintrittstemperatur 1191/1160 °C ISO)

Wird der „einfache“ Gasturbinenprozeß durch eine zweite Brennkammer, in welcher die Turbinenrauchgase wieder erhitzt werden, ergänzt (Abbildung 2), so steigt die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr und dadurch auch das Wirkungsgradpotential des Prozesses. Die Wiedererhitzung der Rauchgase in der zweiten Brennkammer wird als Zwischenerhitzung (ZE) bezeichnet. Das erforderliche Verdichterdruckverhältnis der Gasturbine mit Zwischenerhitzung ist rund doppelt so hoch wie bei einer Gasturbine ohne Zwischenerhitzung. Hierdurch nimmt die benötigte Verdichterleistung auf 40.0 % der zugeführten Brennstoffleistung zu. Die Turbinenleistung steigt wegen des höheren Druckverhältnisses und der erhöhten mittleren Temperatur der Expansion auf 75.0 % der zugeführten Brennstoffleistung. In der Hochdruckbrennkammer wird 57.2 % und in der Niederdruckbrennkammer 42.8 % des Brennstoffes zugeführt. Der Wirkungsgrad (bzgl. H_o) der Gasturbine mit Zwischenerhitzung beträgt 35.0 % und ist damit 0.3 %-Pkt. höher als bei der „einfachen“ Gasturbine. Die höhere Abgastemperatur der Gasturbine mit Zwischenerhitzung erhöht den Wirkungsgrad des nachgeschalteten Dampfprozesses auf 29.3 %. Der GUD-Wirkungsgrad beträgt 54.0 % (bzgl. H_o , ohne Generatorverluste) und ist 0.6 %-Pkt. höher als bei der „einfachen“ Gasturbine.

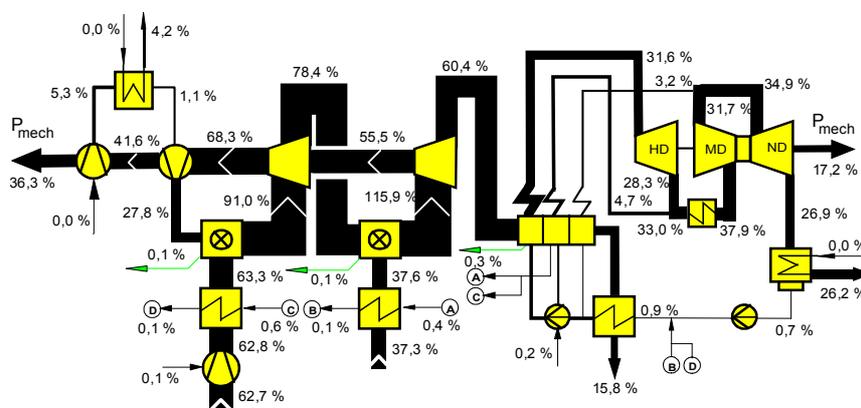


Abbildung 3: Energiefluß bzgl. H_o im GUD-Prozeß mit Gasturbine mit Zwischenkühlung und Zwischenerhitzung (Druckverh. 28, Turbineneintrittstemp. 1224/1172 °C ISO)

Die Gasturbine mit Zwischenerhitzung kann zur Erhöhung der Nutzleistung durch eine Kühlung der Verdichterluft ergänzt werden, die zwischen dem Nieder- und dem Hochdruckverdichter angeordnet ist (Abbildung 3). Die Zwischenkühlung (ZK) senkt die mittlere Temperatur der Kompression und vermindert dadurch die benötigte Verdichterleistung. Sie ist bei hohen Verdichterdruckverhältnissen

besonders effektiv und könnte deshalb eine sinnvolle Ergänzung für die Gasturbine mit Zwischen-
erhitzung sein, da sie ein relativ hohes Druckverhältnis hat.

In dem hier betrachteten Beispiel nimmt das Verhältnis von Verdichter- zu Turbinenleistung durch
die Zwischenkühlung um 10 % ab. Der Gasturbinenwirkungsgrad steigt hierdurch um 1.3 %-Pkt. auf
36.3 % (bzgl. H_0). Die zusätzliche Wärmeabfuhr der Zwischenkühlung verringert die an den Dampf-
prozeß weitergegebene Abwärmeleistung von 65.6 % auf 60.4 %. Der Dampfprozeß erzeugt bei
gleicher Qualität entsprechend weniger Leistung, nämlich 17.2 % statt 19.0 % der zugeführten Brenn-
stoffleistung. Die Leistungseinbuße an der Dampfturbine ist mit 1.8 %-Pkt. größer als der Gewinn an
der Gasturbine von 1.3 %-Pkt. Der GUD-Wirkungsgrad fällt deshalb um 0.5 %-Pkt. auf 53.5 % (bzgl.
 H_0 , ohne Generatorverluste).

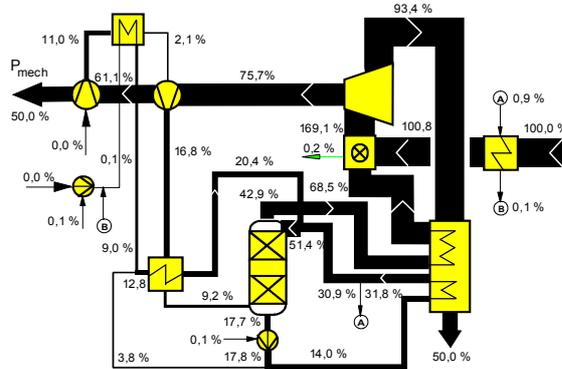


Abb. 4: Energiefluß bzgl. H_0 im HAT-Prozeß
(Druckverhältnis 24, Turbinen-
eintrittstemp. 1227 °C ISO)

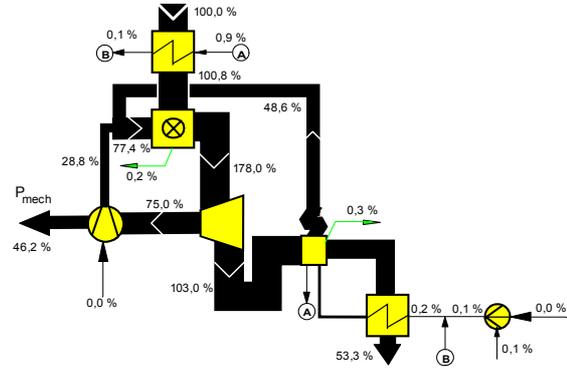


Abb. 5: Energiefluß bzgl. H_0 im STIG-Prozeß
(Druckverhältnis 20, Turbineneintritts-
temperatur 1190 °C ISO)

Der HAT-Prozeß (**H**umid **A**ir **T**urbine) besteht aus einer Gasturbine mit Zwischenkühlung, Auf-
sättigung und Rekuperation (Abb. 4). Die Wärme der Zwischenkühlung und die Abgaswärme werden
dem Prozeß durch Aufsättigung bzw. durch Rekuperation wieder zugeführt. Die Verdichterleistung
des HAT-Prozesses ist durch den reduzierten Verdichtermassenstrom und durch die
Zwischenkühlung niedriger als bei der „einfachen“ Gasturbine. Die Wasserzugabe im Sättiger erhöht
den Wasseranteil in den Turbinenrauchgasen und steigert dadurch die Turbinenleistung. Der
Wirkungsgrad des HAT-Prozesses ist deshalb rund 15 %-Pkt. höher als der Wirkungsgrad des
„einfachen“ Gasturbinenprozesses. Im Vergleich zum GUD-Prozeß mit der „einfachen“ Gasturbine ist
der Wirkungsgrad des HAT-Prozesses jedoch 3.4 %-Pkt. niedriger.

Der STIG-Prozeß (**S**Team **I**njected **G**as **T**urbine) ist weniger komplex als der vorher betrachtete
GUD- und HAT-Prozeß. Er besteht aus einer Gasturbine mit nachgeschaltetem
Abhitzedampferzeuger (Abb. 5). Die Abgaswärme der Gasturbine wird dem Prozeß durch die
Eindüsung des im Abhitzedampferzeuger erzeugten Dampfes in die Brennkammer wieder zugeführt.
Die Verdichterleistung ist beim STIG-Prozeß aufgrund des reduzierten Massenstromes niedriger als
bei der „einfachen“ Gasturbine und die Turbinenleistung ist durch die Dampfeindüsung in die
Brennkammer höher. Der STIG-Prozeß hat deshalb einen um 11.5 %-Pkt. höheren Wirkungsgrad als
der „einfache“ Gasturbinenprozeß. Im Vergleich zum GUD-Prozeß ist der Wirkungsgrad des STIG-
Prozesses jedoch 7.2 %-Pkt. niedriger.

Tabelle 1: Wirkungsgrade (bzgl. H_0) und Leistungen der Prozesse

		GUD	GUD-ZE	GUD-ZK-ZE	HAT	STIG
Wirkungsgrad (netto)	(%)	57.6	58.3	57.8	54.3	50.3
Leistung (netto)	(MW)	355	373	418	388	335

Tabelle 1 enthält die Nettowirkungsgrade und Nettoleistungen der Prozesse. Die Nettodaten
werden unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes aus den Bruttodaten ermittelt und werden hier, wie
üblich, auf den unteren Heizwert des Brennstoffes bezogen. Die drei GUD-Varianten erreichen mit
Wirkungsgraden zwischen 57.6 % und 58.3 % die höchsten Werte. Der Wirkungsgrad des HAT-
Prozesses beträgt 54.9 % und der Wirkungsgrad des STIG-Prozesses 50.8 %. In [1, 2] sind umfang-
reichere thermodynamische Analysen der GUD-Varianten enthalten.

Thermodynamische Bewertung der Gasturbinen-Kühltechniken

Die Leistung und der Wirkungsgrad einer Gasturbine steigen mit der Turbineneintrittstemperatur.
Durch die Kühlung der Brennkammer und der Turbine wird eine Erhöhung dieser Temperatur über

das Niveau der zulässigen Materialtemperaturen hinaus ermöglicht. Dies führt zu höheren Wirkungsgraden und Leistungen. Das Kühlsystem der Brennkammer und der Turbine kann als offenes oder als geschlossenes System ausgeführt werden. Bei offenen Systemen kommt als Kühlmittel ausschließlich Luft zum Einsatz, da bei Dampf die Abgasverluste stark ansteigen und bei GUD-Kraftwerken dadurch der Wirkungsgrad sinkt. Die Kühlluft kühlt bei offenen Systemen zunächst die Brennkammer bzw. die Schaufeln der Turbine konvektiv von der kalten Seite, tritt dann durch Öffnungen auf die heiße Seite und wird dort zur Bildung eines Schutzfilmes auf der Oberfläche benutzt. Die Zumischung der Kühlluft zu den Rauchgasen senkt jedoch die Rauchgastemperatur und verschlechtert im Falle eines Turbinenkühlsystems den Expansionswirkungsgrad durch Störung des Strömungsfeldes. Bei geschlossenen Systemen können diese Verluste vermieden werden. Hier nimmt das Kühlmedium die Wärme nur konvektiv auf. Es kann sowohl Luft als auch Dampf als Kühlmedium eingesetzt werden. Im folgenden werden für den GUD-Prozeß Wirkungsgrad- und Leistungsdaten für die geschlossene Dampfkühlung der Turbine, die geschlossene Dampfkühlung der Brennkammer und die geschlossene Luftkühlung der Brennkammer vorgestellt.

Bei der Gasturbine mit geschlossener Dampfkühlung (DK) der Turbine wird der Kühldampf dem nachgeschalteten Dampfprozeß entnommen und wiederzugeführt. Dampf ist aufgrund seiner höheren Wärmekapazität und niedrigeren Viskosität ein besseres Kühlmedium als Luft. Der Abdampf der Hochdruckdampfturbine hat einen Zustand von rund 30 bar und 350 °C und ist deshalb gut für Kühlaufgaben in der Gasturbine geeignet. Die Gasturbine mit dampfgekühlter Turbine erreicht im GUD-Prozeß einen Wirkungsgrad von 58.5 % und eine Leistung von 426 MW. Die gegenüber der bisher üblichen offenen Luftkühlung (LK) der Turbine erhöhten Wirkungsgrad- und Leistungswerte sind vor allem auf die niedrigeren relativen Verdichterverluste (wegen erhöhter Brennstoffzufuhr), auf den erhöhten Expansionswirkungsgrad der Turbine und auf die verbesserte Qualität des nachgeschalteten Dampfprozesses zurückzuführen.

Bei geschlossenen Brennkammerkühlsystemen kann sowohl Luft als auch Dampf eingesetzt werden. Der Wechsel von offenen zu geschlossenen Brennkammerkühlsystemen kann zur Wirkungsgraderhöhung oder zur Emissionsminderung genutzt werden. Eine Wirkungsgraderhöhung ergibt sich bei gleicher Verbrennungstemperatur und einer Emissionsminderung bei gleicher Brennkammeraustrittstemperatur. Bei der geschlossenen Luftkühlung der Brennkammer wird der gesamte Verdichteraustrittsmassenstrom zur Kühlung der Brennkammer benutzt, bevor er an der Verbrennung teilnimmt. Dieses Kühlsystem wirkt wie ein Rekuperator. Die Gasturbine mit geschlossener Luftkühlung der Brennkammer erreicht im GUD-Prozeß einen Wirkungsgrad von 58.3 % und eine Leistung von 382 MW. Bei der geschlossenen Dampfkühlung der Brennkammer wird ein Teil des Abdampfes der Hochdruckdampfturbine benutzt, um die Brennkammer zu kühlen. Der Dampf wird anschließend mit dem im Abhitzedampferzeuger überhitzten Dampf gemischt und der Mitteldruckdampfturbine zugeführt. Der GUD-Wirkungsgrad dieser Variante beträgt wie bei der geschlossenen Luftkühlung 58.3 %. Die GUD-Leistung ist mit 393 MW etwas höher als im Falle der geschlossenen Luftkühlung, da die Vorwärmung der Verbrennungsluft entfällt und dadurch mehr Brennstoff zugeführt werden kann. Der Wirkungsgradvorteil der geschlossenen Brennkammerkühlsysteme gegenüber der bisher üblichen offenen Luftkühlung der Brennkammer kann hauptsächlich auf die Vermeidung der Verluste durch Zumischung der Kühlluft zu den Rauchgasen zurückgeführt werden.

Tabelle 2: Wirkungsgrade (bzgl. H_U) und Leistungen der Kühltechniken

Brennkammerkühlung		Offene LK	Offene LK	Geschl. LK	Geschl. DK
Turbinenkühlung		Offene LK	Geschl. DK	Offene LK	Offene LK
Wirkungsgrad (netto)	(%)	57.6	58.5	58.3	58.3
Leistung (netto)	(MW)	355	426	382	393

Die Nettowirkungsgrade und Nettoleistungen der verschiedenen Gasturbinen-Kühltechniken sind in Tabelle 2 noch einmal zusammengefaßt. Eine ausführlichere thermodynamische Analyse der Kühltechniken ist in [2] zu finden.

Ökonomische Bewertung der Prozesse und Kühltechniken

Die Produktkosten sind das entscheidende Kriterium bei der wirtschaftlichen Bewertung der Prozesse und bei der Prozeßoptimierung. In den hier betrachteten Fällen, in denen nur elektrischer Strom produziert und keine Wärme ausgekoppelt wird, entsprechen die Produktkosten den Stromerzeugungskosten (SEK). Sie werden in dieser Arbeit nach der TRR-Methode (Total Revenue Requirement) bestimmt [3]. Die Methode benutzt Barwerte und daraus berechnete Annuitäten.

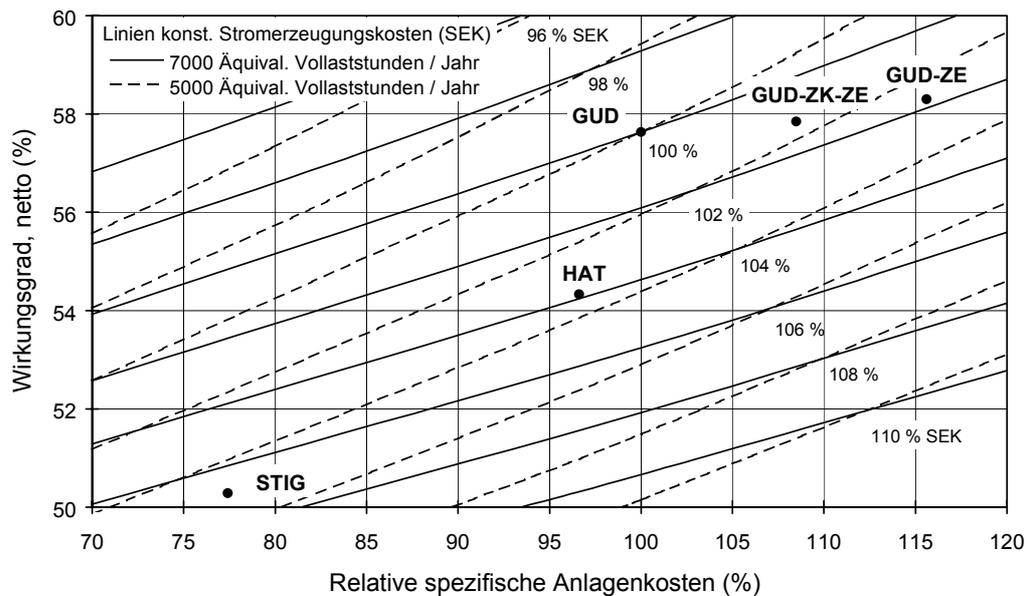
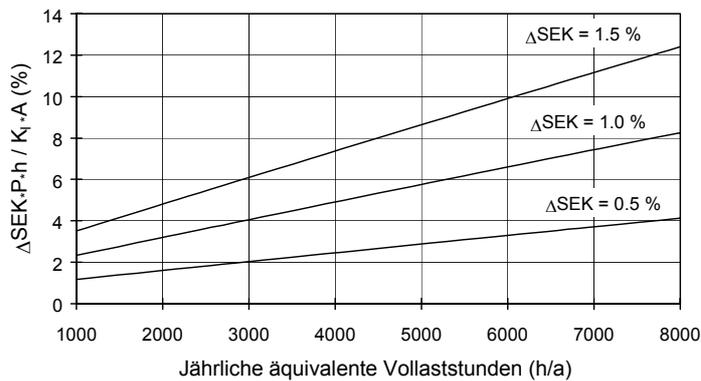


Abbildung 6: Wirkungsgrade (bzgl. H_u), spezifische Anlagenkosten und Stromerzeugungskosten

In Abbildung 6 sind die Nettowirkungsgrade und die spezifischen Anlagenkosten der untersuchten Prozesse und Linien konstanter Stromerzeugungskosten dargestellt. Die spezifischen Anlagenkosten und die Stromerzeugungskosten des GUD-Prozesses mit der „einfachen“ Gasturbine dienen hierbei als Bezugspunkt für die Kosten der anderen Varianten. Die niedrigsten Stromerzeugungskosten erreicht der GUD-Prozeß mit der „einfachen“ Gasturbine. Die spezifischen Anlagenkosten des GUD-Prozesses mit der Gasturbine mit Zwischenerhitzung sind 16 % höher als beim „einfachen“ GUD-Prozeß und sind damit, je nach jährlicher Betriebsdauer, 10 % bis 12 % höher, als dies durch den Wirkungsgradvorteil von 0,7 %-Pkt. gerechtfertigt ist. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung werden bei der Gasturbine mit Zwischenerhitzung wegen des größeren Hochtemperaturbereiches höher sein als bei der „einfachen“ Gasturbine und die Verfügbarkeit wird durch die höhere Komplexität des Prozesses niedriger sein. Diese zusätzlichen Nachteile sind in der obigen Abbildung nicht enthalten. Wird die Gasturbine mit Zwischenerhitzung durch eine Zwischenkühlung ergänzt, so sinken die spezifischen Anlagenkosten trotz höherer absoluter Anlagenkosten durch den Leistungsanstieg. Der Unterschied zwischen den realen und den gerechtfertigten spezifischen Anlagenkosten beträgt rund 6 % und ist damit nur halb so groß wie im Falle der Gasturbine mit Zwischenerhitzung und ohne Zwischenkühlung. Die spezifischen Anlagenkosten des HAT-Prozesses liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die des „einfachen“ GUD-Prozesses. Der HAT-Prozeß hat jedoch einen niedrigeren Wirkungsgrad als der GUD-Prozeß und kann deshalb nicht die gleichen Stromerzeugungskosten erreichen. Beim STIG-Prozeß ist die Kombination von Wirkungsgrad und Leistung noch ungünstiger als beim HAT-Prozeß. Wenn beim HAT- und beim STIG-Prozeß noch zusätzliche Rohwasserkosten anfallen, wird die Kostensituation noch ungünstiger.

Die Bedeutung von Differenzen bei den Stromerzeugungskosten ist von der jährlichen Betriebszeit abhängig. In Abbildung 7 ist am Beispiel eines GUD-Kraftwerkes das Verhältnis des kumulierten Betrages von Differenzen bei den Stromerzeugungskosten zu den Kapitalkosten in Abhängigkeit von den jährlichen äquivalenten Vollaststunden aufgetragen. Eine Differenz bei den Stromerzeugungskosten von 1 % verursacht demnach in Abhängigkeit von den Betriebsstunden eine Änderung der erforderlichen Kapitalrückflüsse von 2,3 % bis 8,3 %. Für die in Abbildung 6 dargestellten GUD-Varianten folgt daraus, daß bei einer jährlichen Betriebszeit von 7000 Stunden der Gewinn, der bei Betrieb eines GUD-Kraftwerkes mit einer „einfachen“ Gasturbine erzielt werden kann, rund 13 % der Kapitalkosten höher ist als bei der GUD-Variante mit der Gasturbine mit Zwischenerhitzung und ohne Zwischenkühlung.



A: Annuität
h: Äquivalente Vollaststunden
K_i: Gesamtinvestition
P: Vollastleistung
SEK: Stromerzeugungskosten

Abbildung 7: Kumulierter Betrag von Differenzen bei den Stromerzeugungskosten in Bezug auf die Kapitalkosten (Randbedingung: Kostenstruktur von GUD-Kraftwerken)

Die Varianten mit geschlossener Dampfkühlung erreichen die höchsten gerechtfertigten Anlagenkosten (Abbildung 8). Im Falle der dampfgekühlten Turbine betragen die gerechtfertigten Mehrkosten gegenüber der Basisvariante mit offener Luftkühlung der Brennkammer und der Turbine 31 % und im Falle der dampfgekühlten Brennkammer 18 %. An dritter Stelle liegt die geschlossene Luftkühlung der Brennkammer mit gerechtfertigten Mehrkosten von 14 %.

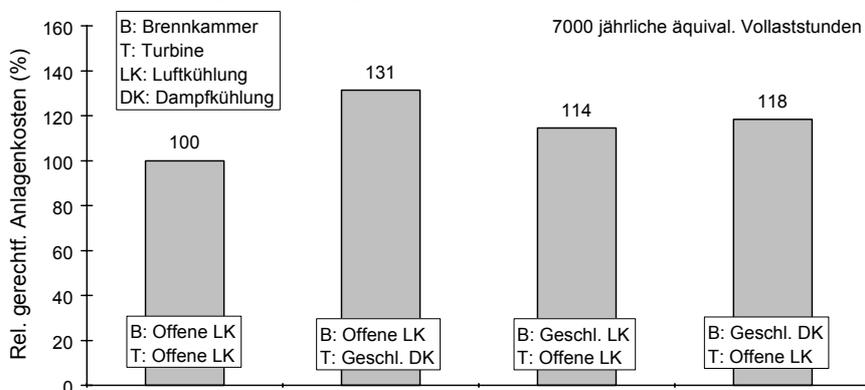


Abbildung 8: Relative gerechtfertigte Anlagenkosten der Gasturbinen-Kühltechniken

Die geschlossenen Kühlsysteme, insbesondere die geschlossene Dampfkühlung der Turbine, sind jedoch mit technischen Risiken und Problemen verbunden. Die hohen thermischen Spannungen in den zu kühlenden Bauteilen verringern ihre Lebensdauer und steigern dadurch die Kosten für Wartung und Instandhaltung. Des weiteren steigen die Anforderungen an die Wärmedämmschichten auf den Turbinenschaufeln und den Brennkammerwänden (Beschichtungstechnik). Die Kühlung der dünnen Schaufelnasen und Schaufelhinterkanten ist mit einem geschlossenen Kühlsystem nur schwer zu realisieren. Zur Vermeidung von Ablagerungen in den Schaufeln müssen an den Kühldampf extrem hohe Reinheitsanforderungen gestellt werden. Die Dichtheit des geschlossenen Dampfkühlsystems ist entscheidend, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Gegenüber der offenen Luftkühlung bedeutet dies einen enormen zusätzlichen Aufwand. Weiterhin besteht bei der Dampfkühlung die Gefahr von Hochtemperaturkorrosion. Bei der Brennkammer sind diese Probleme jedoch nicht so kritisch wie bei der Turbine, da keine zusätzlichen mechanischen Belastungen vorliegen, die zu kühlenden Teile nicht rotieren und die Kühlkanäle großzügiger dimensioniert werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Kail, C.; Rukes, B.: Fortschrittliche Gas- und Dampfturbinenprozesse zur Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung bei GUD-Kraftwerken. VDI-Berichte 1182, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [2] Kail, C.: Bewertung der zur Zeit besten gasbefeuerten Kraftwerksprozesse mit Heavy-Duty-Gasturbinen. VDI-Berichte 1321, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [3] Bejan, A.; Tsatsaronis, G; Moran, M.: Thermal Design and Optimization. John Wiley & Sons, New York, 1996