

## Hybride Verbrennungsluftkonditionierung

# Ein Verfahren zur Optimierung des Betriebs von Gasturbinen

Gasturbinen dienen im stationären Betrieb als Antriebe für Elektrogenatoren, Gasverdichter und Flüssigkeitspumpen. Ihr Vorzug liegt im Vergleich zu Kolbenmaschinen in einem einfachen Aufbau, in einer äußerst hohen Leistungsdichte, einer höheren Lebensdauer und der Möglichkeit des Betriebs mit unterschiedlichen Brennstoffheizwerten. Dabei konnten die Leistung und der Wirkungsgrad der Gasturbinen in den vergangenen Jahren gesteigert und die Schadgasemissionen in den Abgasen den gestiegenen gesetzlichen Anforderungen entsprechend reduziert werden. In Nebenprozessen der Gasturbine liegt jedoch nach wie vor ein bedeutendes Optimierungspotenzial.

**G**asturbinen sind durch die Verwendung eines Axialverdichters als Volumenmaschine in ihrer Leistung und Effektivität stark abhängig von der Temperatur der Prozessluft am Verdichtereintritt. Mit steigender Ansauglufttemperatur fallen die Luftdichte und damit die vom Axialverdichter angesaugte Luftmenge. Proportional dazu sinken die Leistung und der Wirkungsgrad der Gasturbine (*Bild 1*).

Durch die künstliche Kühlung der Ansaugluft im Sommer können die angesaugte Luftmenge, die Leistung und der Wirkungsgrad wieder erhöht werden, wozu bereits folgende Verfahren in der Praxis zur Anwendung kommen:

- direkte adiabatische Kühlung der Ansaugluft mit Wasser durch:
  - Eindüsung in den Luftstrom mit Einstoffhochdruckdüsenstöcken (kaum regelbar),

- Eindüsung in den Luftstrom mit Zweistoffdüsenstöcken (Zusatzverbrauch an Luft),
- Riesel- oder Filmbefeuchtung mit Wasser an Kühleinbauten (max. 65 bis 80 % r. F.)
- Durchströmung von Eisspeichern.
- indirekte Kühlung der Ansaugluft durch Wärmeübertrager, gekühlt mit:
  - Absorptionskältemaschinen,
  - Adsorptionskältemaschinen,
  - Kompressionskältemaschinen.

Kältemaschinen sind aufwendig in Investition und Betrieb. Die Kompressionskältemaschinen erfordern hochwertige Elektroenergie zum Antrieb. Die in Wärme umgewandelte Antriebsenergie und die dem Ansaugluftstrom entnommene Wärme müssen an die Umgebungsluft abgeführt werden. Dazu sind wiederum große Rückkühlwerke erforderlich, die ebenfalls Wasser und Elektroenergie verbrauchen.

### Bemerkenswertes Optimierungspotenzial

#### Anti-Icing

In kälteren Gegenden tritt im Winter bei hohen Ansaugluftfeuchten die Gefahr der Vereisung der Ansaugluftfilter und des Eintrittsdiffusors des Axialverdichters auf. Dem wird

entgegengewirkt, indem die relative Feuchte durch die Luftvorwärmung künstlich reduziert wird. Dieser Prozess wird in Fachkreisen Anti-Icing genannt. Dafür werden folgende Verfahren und Wärmequellen herangezogen:

- direkte Vorwärmung der Ansaugluft durch Mischung mit:
  - warmer Luft aus dem Verdichteraustritt,
  - warmer Abluft des Packages der Gasturbine,
  - warmem Abgas (seltener).
- indirekte Vorwärmung der Ansaugluft mit Wärmeübertragern im Ansaugluftstrom mit:
  - Wärme aus einem GuD-Kreislauf.

Die Ansaugluftvorwärmung bewirkt jedoch wie o. a. eine Reduzierung des angesaugten Luftvolumenstroms, der Leistung und des Wirkungsgrads der Gasturbine. Diese Reduzierung ist besonders hoch, wenn für das Anti-Icing warme Luft aus dem Verdichteraustritt genutzt wird, da diese nach der Verdichtung dem Prozess entnommen wird und nicht mehr für die Verrichtung von Arbeit in der Gasturbine und dem Dampfprozess zur Verfügung steht.

#### Teillastbetrieb

Für den Betrieb mit Teillast wird bei Gasturbinen vordringlich die durchgesetzte Ansaugluftmenge reduziert. Dazu werden die Leitschaufeln am Eintritt des Axialverdichters angestellt. Diese Maßnahme erhöht den Druckverlust auf der Saugseite und senkt damit den Wirkungsgrad der Gasturbine. Außerdem fehlt der reduzierte Luftstrom im nachgeordneten Dampfprozess eines kombinierten Gas- und Dampf-(GuD-) Prozesses, was zur Reduzierung der Parameter auch in diesem Teilprozess führt.

#### Nebenkühlkreislauf

Gasturbinen sind äußerst effektive Antriebe. Trotzdem fällt in Nebenprozessen (Ab)wärme an, die über gesonderte Kühlsysteme an die Umgebung abgeführt werden muss. Dazu gehört die (Ab)wärme des Generators und des Schmieröls der Lager ggf. vorhandener Getriebe und je nach Fabrikat auch andere (Ab)wärmequellen. Vor allem in wärmeren Gegenden, aber auch infolge



Dr.-Ing. *Frank Triesch*,  
Geschäftsführer, Airtainer  
GmbH & Co. KG, Leipzig

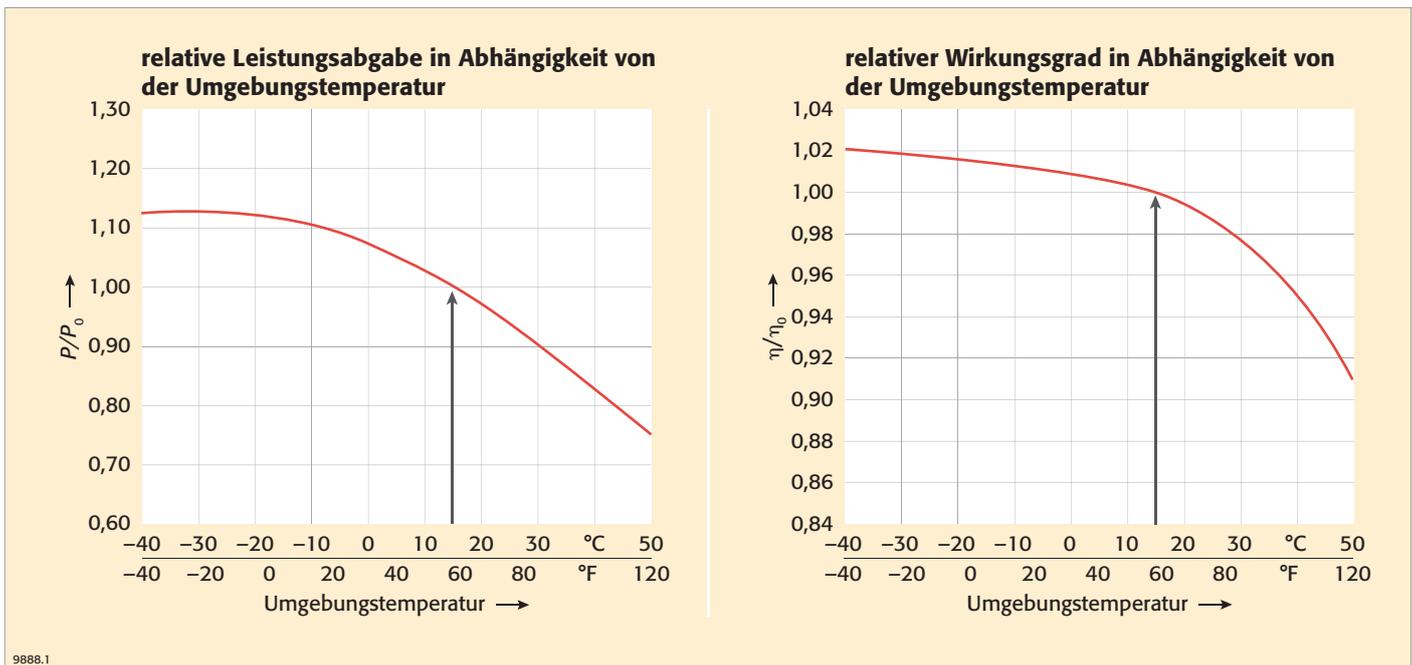


Bild 1. Beispiel der Abhängigkeit von Leistung und Wirkungsgrad einer Gasturbine von der Umgebungstemperatur

des globalen Klimawandels werden diese Kühler häufig zum Problem für den Betrieb der Gasturbinen. Die Schmieröltemperatur kann im Sommer nicht mehr eingehalten werden, die Gasturbinenleistung muss reduziert, mitunter auch der Betrieb zeitweilig komplett eingestellt werden. Das Schmieröl altert schneller und ggf. müssen andere Schmierölsorten eingesetzt werden.

### Brennstoffvorwärmung

Bei mit Erdgas betriebenen stationären Gasturbinen ist die Brennstoffvorwärmung erforderlich, um den Joule-Thomson-Effekt bei der Entspannung des Erdgases vom Pipelinedruck auf den Brennkammerdruck zu kompensieren. Die beim isenthalpen Drosselprozess stattfindende Temperaturabsenkung des Erdgases kann je nach Druckverhältnis am Regler und der Eintrittstemperatur des Gases aus der Pipeline so stark sein, dass die Gefahr einer Unterschreitung des Wasserdampftaupunkts und folglich einer Vereisung innerhalb und außerhalb der Gasleitung besteht.

Für Gasturbinen mindestens ebenso folgenreich kann die Unterschreitung des Kohlenwasserstofftaupunkts im Erdgas sein. Im Erdgas anzutreffendes Propan, Butan und andere höhere Kohlenwasserstoffe fallen bei niedrigen Temperaturen

und/oder Drücken zu einem gewissen Teil in flüssiger Phase aus. Gelangt diese in Form von größeren Tropfen brennend in die Gasturbine, so kann es zu den gefürchteten Schäden an der Turbinenbeschaukelung kommen, auch als Flashback bezeichnet.

Die Gasturbinenhersteller fordern deshalb eine in jedem Betriebspunkt um rd. 15 K über dem Kohlenwasserstoff- bzw. Wasserdampftaupunkt liegende Gastemperatur am Brennkammereintritt. Diese Brenngasvorwärmung geschieht in Gasdruckregelstationen mit einem gesonderten Heizhaus mit nicht unbedeutendem Brenngaseigenverbrauch.

Darüber hinaus wird in Kraftwerken das Brenngas unmittelbar vor der Gasturbine weiter erwärmt, momentan bereits auf Temperaturen von rd. 200 °C. Dafür wird Wärme aus dem GuD-Prozess genutzt. Die Folge sind eine dem Wärmeäquivalent entsprechende Brenngaseinsparung sowie ein fast proportionaler Wirkungsgradanstieg des GuD-Prozesses.

### Prozess der hybriden Verbrennungsluftkonditionierung

Für die Konditionierung der Ansaugluft an Gasturbinen wurde ein neues System entwickelt, das mit wenigen bekannten und bewährten

Komponenten folgende Aufgaben erfüllt:

- Rückkühlung des Nebenkühlkreislaufts (Schmieröl, Generator)
- Brennstoffvorwärmung
- Verbrennungsluftkonditionierung der Gasturbine:
  - indirekte Vorwärmung der Ansaugluft bei Frostgefahr
  - direkte Befeuchtung der Ansaugluft bei positiver Umgebungstemperatur
  - indirekte Vorwärmung der Ansaugluft zur Erreichung des Teillastbetriebs.

Dazu werden mit dem geschlossenen Nebenkühlkreislauf/die (Ab)wärmquellen Generator, Schmieröl u. a. mit einem in der Brennstoffleitung zu installierenden Sicherheitswärmeübertrager und in der Ansaugluft zu installierenden Hybridkühlern untereinander verbunden zu einem System der hybriden Verbrennungsluftkonditionierung (Bild 2).

### Hybridkühler

Hybridkühler wurden bisher zur Rückkühlung eingesetzt. Bis zu Außentemperaturen von je nach Auslegung rd. 7 bis 18 °C werden diese ausschließlich trocken betrieben. Über ein beripptes Rohrregister wird rückgekühlt. Bei darüber hinaus gehender Außentemperatur wird dieses außen befeuchtet,

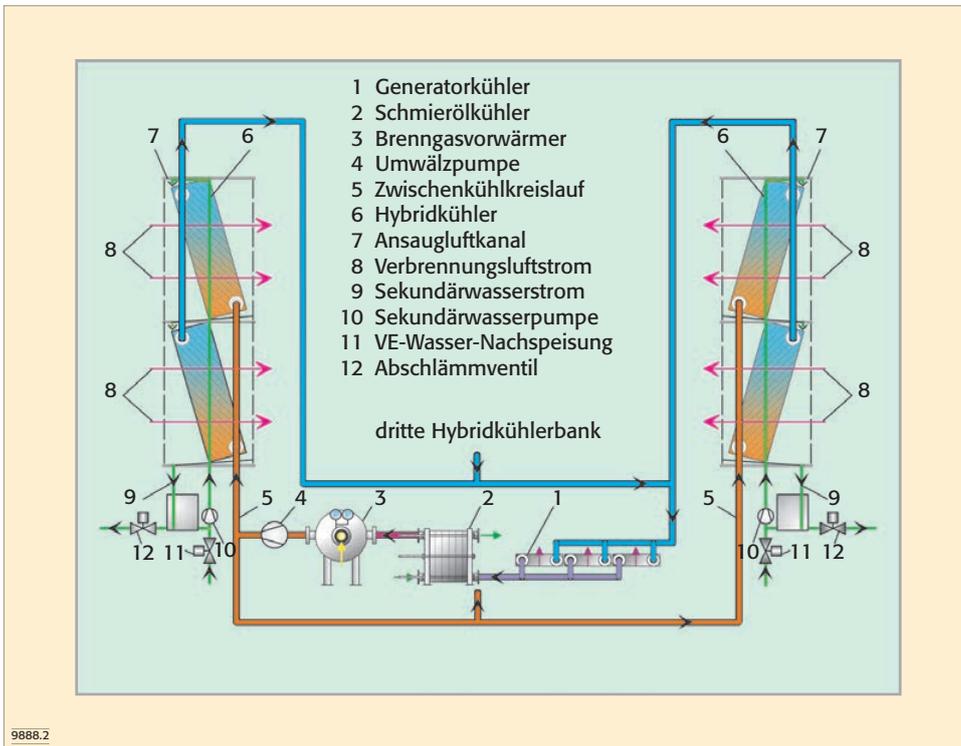


Bild 2. Schema eines hybriden Verbrennungsluftkonditionierungssystems für Gasturbinen

so dass ein Wasserfilm das gesamte Register mit Sekundärwasser benetzt. Durch die teilweise Verdunstung des Benetzungswassers findet eine indirekte Zusatzkühlung statt. Das überschüssige Wasser wird in einer Wanne unter dem Kühler aufgefangen und wieder dem Benetzungskreislauf zugeführt, bis die zulässige Eindickung erreicht ist und die automatische Abflutung stattfindet. Die Benetzung findet mit Wasserüberschuss statt, um Verschmutzungen aus der Umgebungsluft sicher auszuspülen und ein Abtrocknen der Lamellen während der Benetzung zu vermeiden. Drehzahlgeregelte Ventilatoren sorgen für die Luftzirkulation. Hybridkühler zeichnen sich so durch einen sparsamen Umgang mit Wasser und Elektroenergie aus. Aus dem Hybridkühlerbau abgeleitete Kühlelemente dienen auch der Verbrennungsluftkonditionierung an Gasturbinen.

**Anordnung der Hybridkühlerelemente im Air-Intake der Gasturbine**

Die Hybridkühlerelemente werden direkt in den Ansaugluftstrom installiert. Durch die Luftwäsche werden im Befeuchtungsbetrieb die jeweils nachgeordneten Luftfilter entlastet, was zu einer bedeutenden Standzeiterhöhung der Filterelemente führt.

Ausgelegt werden die Hybridwärmeübertrager auf den zulässigen zusätzlichen Druckverlust im Air-Intake, z. B. auf 100 Pa. Dadurch sind diese so groß dimensioniert, dass eine Kühlung des Zwischenkühlkreislaufs mit kleinsten Temperaturdifferenzen zwischen der Luft und dem Kühlwasser stattfindet.

Am Eintritt der Gasturbine werden bei Befeuchtungsbetrieb konstant rd. 98 bis 99 % r. F. ohne nennenswerten Tropfenaustrag erreicht. Befeuchtungsbetrieb ist ab einer Außenlufttemperatur von 5 bis 8 °C möglich. Die thermische Leistung und die Lufttemperatur am Austritt der Hybridkühler können mit der Benetzungswassermenge von rd. 30 bis 100 % geregelt werden. Kein anderes Befeuchtungsverfahren ist ebenso gut regelbar und effektiv. Die Aluminiumrippen werden elektrolytisch beschichtet, sind so korrosionsunempfindlich und haben eine hohe Lebensdauer.

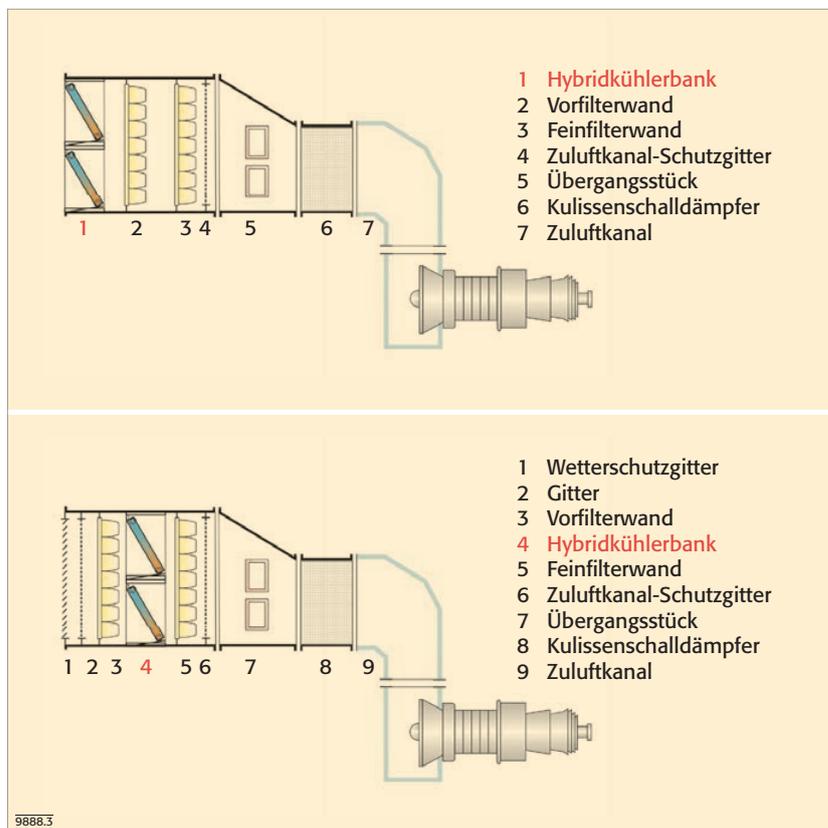


Bild 3. Möglichkeiten der Anordnung von Hybridkühlerelementen im Ansaugtrakt einer Gasturbine

In Wüstenregionen mit permanentem Sandanfall in der Ansaugluft sollten die Hybridkühlerelemente zwischen den Vor- und den Feinfiltern der Gasturbine angeordnet werden (Bild 3). Als Rohrmaterial wird Kupfer eingesetzt.

Die Benetzung der Hybridkühler sollte mit vollentsalztem Wasser stattfinden. Die deutlich seltener erforderliche Abschlämzung wird durch eine Leitfähigkeitsmessung im Sekundärwasserkreislauf gesteuert, was zu sparsamem Umgang mit dem Zusatzwasser beiträgt.

### Brennstoffvorwärmung

Eine Brennstoffvorwärmung mit der (Ab)wärme der Gasturbine ist sinnvoll, wenn der Brennstoff selbst ausreichend niedrige Temperaturen hat. Dies ist bei Erdgas der Fall, das aus einer Pipeline mit hohem Druck entnommen wird und sich bei der Entspannung auf den Verbrennungsdruck durch den Joule-Thomson-Effekt selbst stark abkühlt.

Durch die Verwendung von Sicherheitswärmeübertragern zur Brennstoffvorwärmung besteht absolute Sicherheit, dass bei einer eventuellen Leckage der Brennstoff nicht in den Zwischenkühlkreislauf eintreten kann. Eine eventuelle Leckage wird durch einen sicherheitsgerichteten Leckageschalter signalisiert. Sicherheitswärmeübertrager sind wartungsfrei und können durch die druckfeste Ausföhrung auch nach einer eventuellen Leckage eine begrenzte Zeit weiter betrieben werden.

### Nutzen der hybriden Verbrennungsluftkonditionierung

Aus der verfahrenstechnischen Kopplung der Rückkühlung von Nebenprozessen, der Brennstoffvorwärmung und der Verbrennungsluftkonditionierung ergeben sich sehr interessante Möglichkeiten für den Gasturbinenbau insgesamt:

- äußerst effektive Rückkühlung des Generators, des Schmieröls und anderer (Ab)wärmequellen ohne zusätzlichen Lüfterenergie- und Sekundärwasserbedarf durchgehend bei jedem Außenluftzustand – bis hin zum Entfall des herkömmlichen Rückkühlwerks

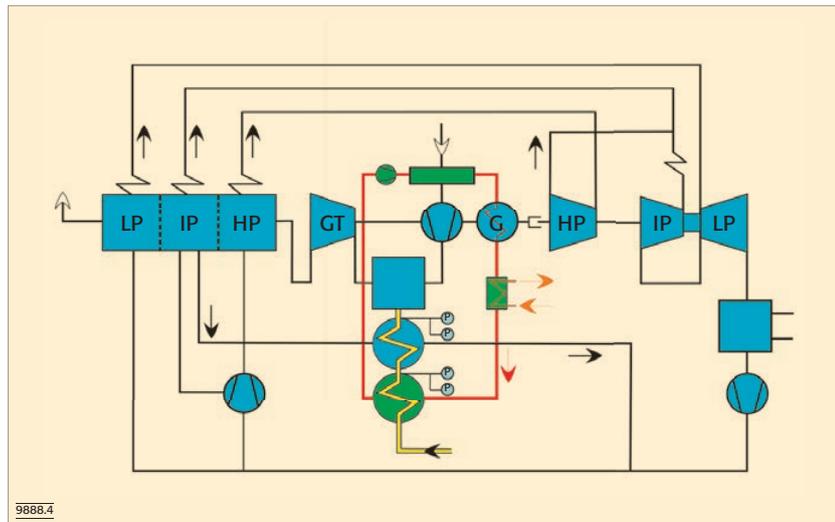


Bild 4. Einbindung eines hybriden Verbrennungsluftkonditionierungssystems in einen GuD-Prozess

- Anhebung von Leistung und Wirkungsgrad der Gasturbine über weite Teile des Jahres durch die Verbrennungsluftbefeuchtung bis auf rd. 98 bis 99 % r. F.; die Verbrennungsluftbefeuchtung wird damit auch in gemäßigten Klimazonen einsetzbar und kommt auf Betriebszeiten von über 5000 h/a. Allein durch den Einsatz von vollentsalztem Wasser wird hier zusätzliche Elektroenergie erzeugt
- Anhebung der Leistung und des Wirkungsgrads der Gasturbine bei Anti-Icing durch die Nutzung von (Ab)wärme
- Anhebung des Wirkungsgrads des GuD-Prozesses bei Teillastbetrieb, erzeugt durch die künstliche Verbrennungsluftvorwärmung mit (Ab)wärme; damit wird auch der Teillastbetrieb des GuD-Kraftwerks wirtschaftlich
- Vorfilterung der Ansaugluft im Hybridkühler bei Vorbefeuchtung; dadurch wird die Standzeit der nachgeordneten Luftfilterelemente deutlich erhöht
- Reduzierung der Aufstellfläche der Gasturbinenanlage durch den Wegfall des Rückkühlwerks des Nebenkühlkreislaufs
- Brennstoffeinsparung durch die Brennstoffvorwärmung mit (Ab)wärme – je 20 K Gasvorwärmung zusätzliche Brennstoffeinsparung von rd. 0,1 %, Entfall der herkömmlichen Heizkesselanlage



Bild 5. Filterhäuser mit hybrider Verbrennungsluftkonditionierung und dreistufiger Luftfilterung

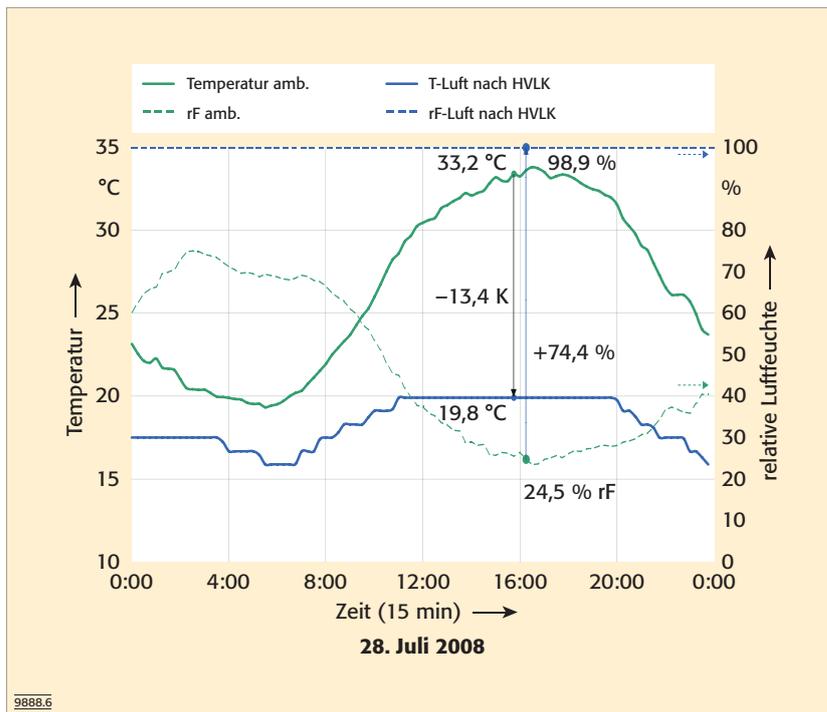


Bild 6. Senkung der Ansauglufttemperatur

- Nutzung des Brennstoffs zur indirekten Ansaugluftkühlung – die natürliche Erdgaskälte ist die preiswerteste Kälteenergie überhaupt
- Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Verbrennungsluftbefeuchtung.

Nutzen beim Betrieb der Anlage. Das Verfahren der Verbrennungsluftkonditionierung ist somit ein wichtiger Fortschritt im Gasturbinenbau (Bild 4).

Referenzanlage an Gasturbinen im Heizkraftwerk Süd in Potsdam

Bei Neuanlagen sind im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen Einsparungen bei der Investition möglich. Hinzu kommt der bedeutende

Die Energie und Wasser Potsdam GmbH betreibt am Standort Süd seit 1996 als Heizkraftwerk eine GuD-Anlage mit zwei Siemens SGT-

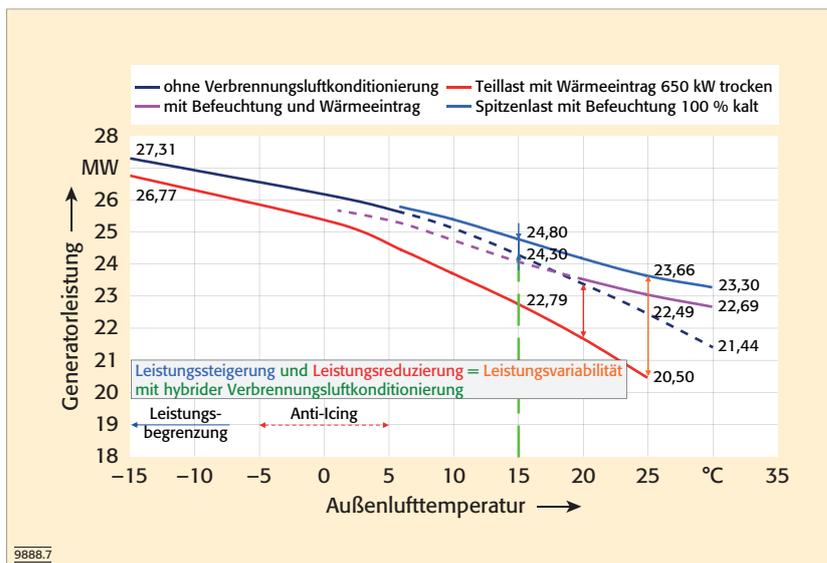


Bild 7. Leistungsvariabilität mit hybrider Verbrennungsluftkonditionierung an einer SGT-600

600-Gasturbinen (vormals ABB/Alstom GT10B).

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Nachrüstung einer Anlage zur hybriden Verbrennungsluftkonditionierung zum Schutz vor Vereisung und zur Leistungssteigerung und Wirkungsgradanhebung wurden in einer Studie folgende Betriebsfälle untersucht:

- Brenngasvorwärmung mit Abwärme
- Anti-Icing mit Abwärme über 300 h/a
- Leistungssteigerung mit adiabatischer Luftbefeuchtung über 5205 h/a
- Leistungsreduzierung mit Abwärme über 780 h/a.

Im Ergebnis wurde eine Amortisationszeit von rd. 2,2 bis 2,5 Jahren ermittelt. Auf dieser Basis wurde im Jahr 2007 die erste Anlage zur hybriden Verbrennungsluftkonditionierung an der Gasturbine 1 errichtet. Diese Maßnahme wurde mit dem Aufbau eines komplett neuen Filterhauses mit dreistufiger Luftfilterung verbunden, in dem die Hybridkühlelemente ein wichtiger Bestandteil sind. Die ersten Betriebserfahrungen stimmten positiv, so dass bereits im Jahr 2008 an der Gasturbine 2 die gleiche Anlage nachgerüstet wurde (Bild 5).

Anti-Icing mit Kühlwasser

Für das Anti-Icing wurden die Hybridkühler in das Kühlsystem eingebunden. Dies genügt, um die Verbrennungsluft bei kritischen Luftzuständen vor der Gasturbine von -5 bis +5 °C und einer relativen Feuchte von > 80 % in einen unkritischen Bereich vorzuwärmen. Die Ventilatoren der Trockenkühler werden bei niedrigerer Drehzahl betrieben.

Künstliche Leistungsreduzierung mit Abwärme

Ein in Kraft-Wärme-Kopplung betriebenes GuD-Kraftwerk arbeitet vornehmlich wärmegeführt, unterliegt heute aber auch den Anforderungen des Markts für Elektroenergie. Durch die Luftvorwärmung mit Abwärme kann die Leistung der Gasturbine künstlich reduziert werden. Die eliminierten Drosselverluste und der Abwärmeeintrag führen zu einem höheren Teillastwirkungs-

grad des GuD-Kraftwerks. Durch die Kombination des Anstellens der Leitschaufeln und der künstlichen Luftvorwärmung ist eine besonders niedrige Teillastleistung möglich, ohne die Emissionsgrenzwerte (CO) zu überschreiten.

### Leistungssteigerung mit adiabatischer Luftbefeuchtung

Etwa von März bis November besteht die Möglichkeit, die Gasturbine mit Ansaugluftbefeuchtung zu betreiben. Die damit verbundene natürliche Abkühlung der Ansaugluft stabilisiert die Leistung der Gasturbine. In den heißen Monaten wurden bei Außenlufttemperaturen bis 34 °C stets Ansauglufttemperaturen von unter 20 °C gemessen (Bild 6).

Im Resultat steigen die Leistungsvariabilität und der Wirkungsgrad in einem weiten Betriebsbereich. Bei einer Außenlufttemperatur von 25 °C kann die Gasturbinenleistung an einer SGT-600 bei Bedarf von 20,5 bis rd. 23,7 MW – also um rd. 3,2 MW – variieren und damit die serienmäßige elektrische Leistung von 22,5 MW durch Luftvorwärmung um rd. 2 MW (-9,1 %) künstlich gesenkt oder durch Luftbefeuchtung um rd. +1,2 MW (+5,3 %) gesteigert werden (Bild 7). Der Wirkungsgrad der Gasturbine steigt durch die Ansaugluftbefeuchtung bei 25 °C um rd. 0,43 % absolut (Bild 8). Für die Luftbefeuchtung werden max. 1,75 t/h vollständig entsalztes Wasser verdunstet.

Die komplett erneuerten Filterhäuser mit der hybriden Verbrennungsluftkonditionierung und einer

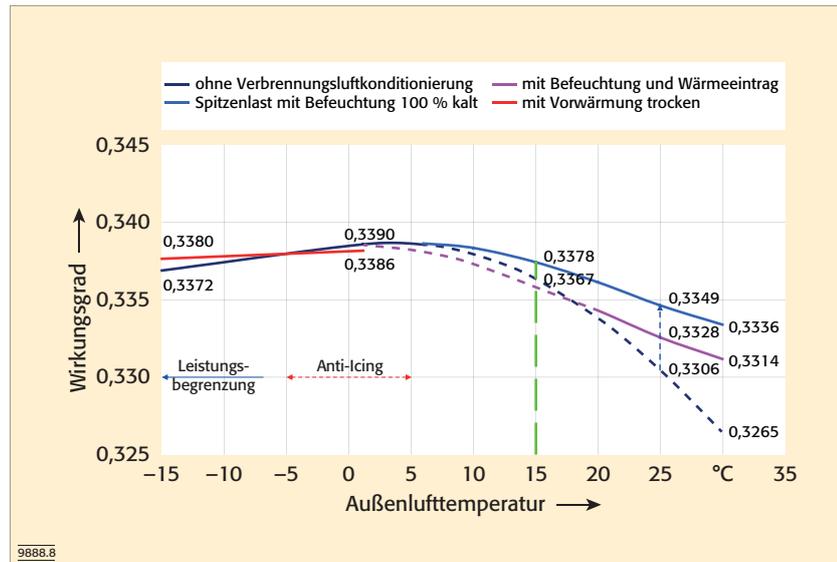


Bild 8. Wirkungsgradsteigerung mit hybrider Verbrennungsluftkonditionierung an einer SGT-600

dreistufigen Luftfilterung haben sich in den zurückliegenden neun Jahren des Betriebs bestens bewährt. Sie ermöglichen:

- sicheren Anti-Icing-Betrieb
- dauerhafte Senkung des Ansaugdruckverlusts
- größere Leistungsvariabilität
- Entfall der Verdichterwäschen
- deutlich längere Filterstandzeit
- Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen
- Entlastung des Rückkühlsystems im Sommer und im Winter.

Alternativ lässt sich die Verbrennungsluft in stapelbaren Airtainern konditionieren, die die dreistufige Luftfilterung und die hybride Verbrennungsluftkonditionierung in den Abmessungen eines genormten Elements vereinen. Im Vergleich zu

einem Filterhaus mit zweistufiger Luftfilterung amortisiert sich eine Airtainer-Konditionierungsanlage in weniger als zwei Jahren.

### Literatur

- [1] Triesch, E: Hybrid Combustion Air Conditioning – A New Method to Optimise the Operation of Gas Turbines. *EuroHeat&Power* English Edition, Vol. 13 III/2016, S. 33 – 38.

triesch@gmx.de

www.thermointegral.de