

VGB PowerTech

International Journal for Electricity and Heat Generation

Thermodynamisch basierte Grenzwertfestlegung für Stickoxidemissionen von Gasturbinenanlagen

Von Dipl.-Ing. Manfred Freimark,
Professor Dr.-Ing. Uwe Gampe
Dr.-Ing. Mario Raddatz

Thermodynamisch basierte Grenzwertfestlegung für Stickoxidemissionen von Gasturbinenanlagen

Manfred Freimark, Uwe Gampe und Mario Raddatz

Abstract

Thermodynamical Based Definition of Limits for Nitrogen Oxide Emissions of Gas Turbine Plants

The policy document of the Federal Government for an integrated energy and climate program represents the basis for the Regulation Concerning Assurance of Air Quality Standards (37. BImSchV) which comprises the revision of emission limits with consequences for gas turbines. After commencement of this regulation gas turbine plants of firing heat capacity > 100 MW with gases from public gas supply will be faced with tightened limits for nitrogen oxide emissions.

Because gas turbine technology has a relevant share in ecologically compatible and reliable energy supply, the authors show the necessary link of gas turbine efficiency to nitrogen oxide emission limits on the basis of thermodynamical considerations. Thus, a conflict of objective between climate protection and air pollution prevention and a discrimination of high efficient gas turbines can be avoided. The "eta algorithm" is a proper approach which doesn't privilege these plants at all. By its linear increase of the NO_x emission limit with the ratio of net efficiency to reference efficiency this definition comprises the requirement of combustion technology advancement. It meets the thermodynamical principles much better than a limit definition which is only based on the exhaust gas flow rate for ISO reference conditions. That the "eta algorithm", which is already implemented in the existing document "13. BImSchV", will also be adopted in the "37. BImSchV" can be considered as an achievement although this approach should be applied for combined-cycle plants as well.

Autoren

Dipl.-Ing. Manfred Freimark

Senior Expert Engineer für Gasturbinen,
Vorsitzender des Arbeitskreises Gasturbinen,
VGB PowerTech e. V., Essen/Deutschland.

Professor Dr.-Ing. Uwe Gampe

Dr.-Ing. Mario Raddatz

Technische Universität Dresden,
Institut für Energietechnik,
Professur für Thermische Energiermaschinen und -anlagen,
Dresden/Deutschland.

Einleitung

Der Europäische Rat der Staats- und Regierungschefs hat im Frühjahr 2007 unter deutscher Präsidentschaft mit der EU-NEC (NEC = National Emission Ceiling) die Weichen für eine integrierte europäische Klima- und Energiepolitik bis 2020 gestellt. Dazu gehören sowohl anspruchsvolle Klimaschutzziele als auch Ziele für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und die Steigerung der Energieeffizienz. Das im Frühjahr 2007 vereinbarte Ziel sieht unter anderem vor, EU-weit die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 20 % gegenüber 2005 zu senken.

Die Bundesregierung hat die Umsetzung der europäischen Richtlinienentscheidung, in die wichtige deutsche Anregungen eingeflossen sind, auf nationaler Ebene in einem Dokument „Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm“ [1] zusammengefasst, das die Aussagen der Regierungserklärung vom 3. April 2007 und die Ergebnisse des Energiegipfels vom 3. Juli 2007 berücksichtigt. Die Bundesregierung hat dazu unter anderem erklärt, dass sich die angestrebte kosteneffiziente Umsetzung der einzelnen Maßnahmen des Eckpunktepapiers im Rahmen eines kontinuierlichen Prozesses weiterhin am Zieldreieck „Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz“ orientieren wird. Im Abschnitt 5 „Saubere Kraftwerkstechnologien“ des aus 29 Positionen bestehenden Eckpunktepapiers ist die Verpflichtung formuliert, modernste Emissionsminderungseinrichtungen entsprechend des Standes der Anlagentechnik (BAT) mit dem Ziel einzusetzen, ab 2013 die Stickoxid- (NO_x) -Emissionen bei neuen Feuerungs-, Abfallverbrennungs- und Abfall-Mitverbrennungsanlagen mit mehr als 50 MW Feuerungswärmeleistung gegenüber geltenden Anforderungen deutlich zu senken.

Zur Umsetzung dieser Maßnahmen wurde das BMU beauftragt, relativ kurzfristig eine entsprechende Verordnung mit verschärften NO_x -Grenzwerten im Vergleich zur Dreizehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (13. BImSchV) [2] zu erstellen. In dieser 37. BImSchV „Verordnung zur Absicherung von Luftqualitätsanforderungen“ [3] sind unter anderem die stationären Gasturbinenanlagen (GTA) in kombi-

nierten Gas-Dampf-Anlagen sowie die GTA im Solobetrieb zur Elektroenergieerzeugung und zum mechanischen Antrieb berücksichtigt. Hinsichtlich des erwähnten BAT-Standes wird seitens des BMU die Notwendigkeit zur Orientierung an den BREF-Dokumenten (BREF = Best Available Technique Reference Documents) der EU-Kommission in Sevilla gesehen, die Bestandteil der EU-IVU-Richtlinie [4] sind. Bei Betrachtung des BREF-Dokuments für Gasturbinen ist allerdings festzustellen, dass bedeutende emissionsrelevante Details bezüglich Parametrierung, Betriebsbedingungen der GTA sowie Brennstoffeigenschaften [5, 6] bisher nicht hinreichend berücksichtigt sind.

Ausgangssituation

Infolge ihres hohen Entwicklungsstandes leistet die Gasturbinentechnologie einen wichtigen Beitrag zur umweltverträglichen, ressourcenschonenden und stabilen Energieversorgung. Niedrige Schadstoffemissionen resultieren aus der hochentwickelten Technologie der Mager-Vormisch-Verbrennung, und niedrige Kohlendioxid- (CO_2) -Emissionen werden insbesondere durch hohe Prozessparameter, d. h. Druck und Temperatur, erreicht. Betrachtet man z. B. die zur Elektroenergieerzeugung vielfach eingesetzten GTA in Schwerbauweise, repräsentieren Netto-Wirkungsgrade von rund 38 % den Stand der Technik (Bild 1). Die Spitzenwerte des elektrischen Wirkungsgrades kombinierter Gas-Dampf-Anlagen liegen bei rund 59 %. Weil die Verbesserung der Prozessgüte durch weitere Erhöhung der Prozessparameter das größte Potential zur Effizienzsteigerung und damit auch für niedrigere spezifische, d. h. auf die Nutzerarbeit bezogene CO_2 -Emissionen bietet, sind die Entwicklungsziele ehrgeizig: GTA mit Turbineneintrittstemperaturen deutlich über 1400 °C für Netto-Wirkungsgrade reiner GTA $\eta_e \geq 0,40$ und kombinierter Gas-Dampf-Anlagen $\eta_e \geq 0,60$, z. B. [7]. Aeroerivate GTA, die ebenfalls sowohl im Solobetrieb als auch in Gas-Dampf-Prozessen eingesetzt werden, erreichen heute sogar Wirkungsgrade von rund 45 %.

Für GTA mit Feuerungswärmeleistungen ≥ 50 MW (th.) sind die zulässigen Schadstoffemissionen gegenwärtig in der 13. BImSchV

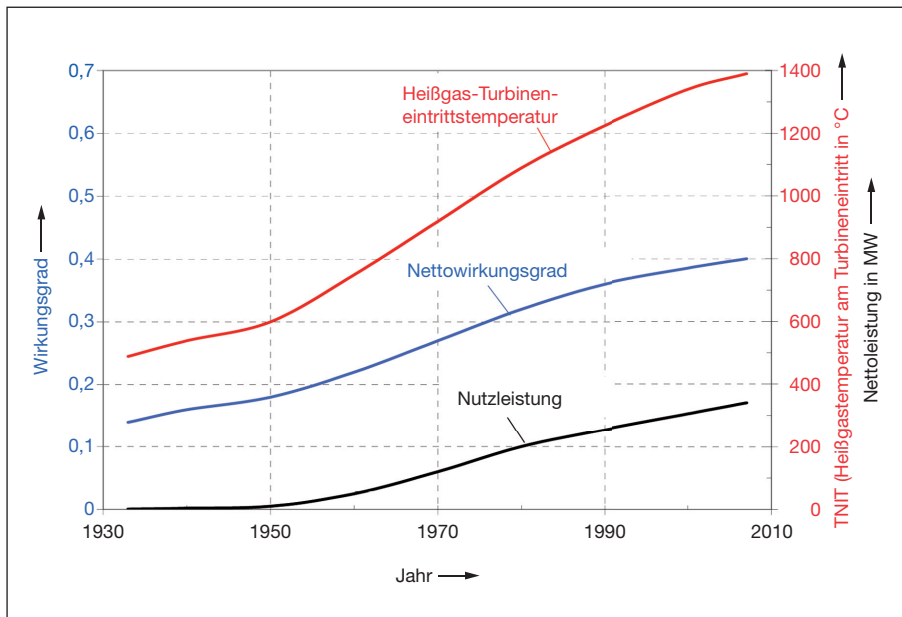


Bild 1. Parameterentwicklung bei Gasturbinenanlagen in Schwerbauweise.

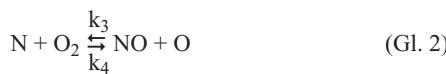
[2] geregelt. Bemerkenswert ist dabei, dass in §6 (3) zumindest für erdgasbefeuerte Gasturbinen zur Elektroenergieerzeugung im Solobetrieb bei der Festlegung der NO_x-Emissionsgrenzwerte auch der Gasturbinenwirkungsgrad Berücksichtigung findet, indem die zulässigen Emissionen bei einem Wirkungsgrad unter ISO-Bedingungen von mehr als 35 % entsprechend der prozentualen Wirkungsgraderhöhung gegenüber dem Basiswert von 50 mg/m³ (i. N.) heraufgesetzt werden („Eta-Algorithmus“). Ein NO_x-Emissionsgrenzwert von 75 mg/m³ (i. N.) darf jedoch nicht überschritten werden.

Eine entsprechende Wirkungsgradkorrektur findet sich auch in der Richtlinie 2001/80/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2001 zur Begrenzung der Schadstoffemissionen von Großfeuerungsanlagen in die Luft sowie im jüngst von der Europäischen Kommission vorgelegten neuen Entwurf einer Richtlinie für Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) vom 21. Dezember 2007.

Die im Entwurf zur 37. BImSchV vom September 2007 ausgewiesenen NO_x-Emissionsgrenzwerte auf einem nicht allein mit feuerungsseitigen Maßnahmen (Primärmaßnahmen) einhaltbarem Niveau ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrades der GTA haben Betreiber, Hersteller und Hochschulen aufgrund der sich abzeichnenden technischen und wirtschaftlichen Konsequenzen der Neuregelungen veranlasst, im Rahmen des Gestaltungsprozesses dieser Verordnung eine detaillierte Betrachtung zur Stickoxidbildung in Verbindung mit einer sinnvollen Grenzwertfestlegung anzustellen.

Mechanismus der Stickoxidbildung und Einflussfaktoren auf die Stickoxidemissionen

Die Stickoxidemissionen beim Betrieb von GTA resultieren bekanntermaßen nicht primär aus dem Brennstoff, sondern aus der Reaktion eines Teils der Stickstoffmoleküle der Luft in Abhängigkeit von den Verbrennungsrandbedingungen und der dadurch zur Verfügung stehenden Aktivierungsenergie. Die thermische NO-Bildung, auf die sich im Rahmen dieses Beitrages beschränkt werden soll, wird durch die von *Zeldovich* aufgestellten Elementarreaktionen beschrieben (Zeldovich-Mechanismus).



Darin sind k_i (i = 1 bis 6) die aus dem ARRHENIUS-Ansatz ermittelten Geschwindigkeitskonstanten. Bei den nachfolgenden Betrachtungen zur Stickoxidbildung in Gasturbinenbrennkammern bleibt (Gl. 3) – erweiterter Zeldovich-Mechanismus – unberücksichtigt, weil die Verbrennung unter Luftüberschuss (Luftüberschusszahl λ > 1) erfolgt.

Tabelle 1. Berechnungsrandbedingungen für die als Beispiel ausgewählten GTA.

	Verdichterdruckverhältnis π _v	Luftüberschuss in der Reaktionszone	Verweilzeit t in ms
GTA 1	16	1,92	30
GTA 2	24	1,66	30

Auf der Grundlage einer vereinfachten Modellbetrachtung mit

- Annahme der Brennkammer als idealer Rührreaktor,
- vereinfachter Betrachtung von Erdgas als Methan CH₄,
- alleiniger Berücksichtigung der NO-Emissionen, die den Hauptanteil im NO_x bilden,
- Vernachlässigung der Rückreaktion in (Gl. 1),
- Vernachlässigung der Rückreaktion in (Gl. 2) und
- Gleichgewichtsannahme für die Reaktion $\frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons O$

erhält man folgende Gleichung für die NO-Bildungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dc_{NO}}{dt} \approx 4,7 \cdot 10^{13} \exp\left(\frac{-67837}{T}\right) c_{N_2} \sqrt{c_{O_2}}$$

in $\frac{\text{kmol}_{NO}}{\text{m}^3 \text{ Abgas s}}$ (Gl. 4)

Darin sind c_i die Konzentration des Stoffs i mit i = NO, N₂, O₂

$$c_i = \psi_i \frac{p}{R_m T} \tag{Gl. 5}$$

R_m die allgemeine Gaskonstante und ψ_i die Molkonzentration

$$\psi_i = \frac{\text{Anzahl der Mole des Stoffs } i}{\text{Gesamtzahl Mole}}$$

Man erkennt drei wesentliche Einflussfaktoren auf die NO-Konzentration c_{NO}:

- Verbrennungstemperatur,
- Druck und
- Verweilzeit in der Reaktionszone

Diese Zusammenhänge sind in den Bildern 2 bis 4 dargestellt und sollen am Beispiel von zwei GTA mit sehr unterschiedlichen Auslegungsparametern diskutiert werden, um daraus Schlussfolgerungen bezüglich einer thermodynamisch basierten Grenzwertdefinition für die Stickoxidemissionen zu ziehen. Dabei werden die mittels (Gl. 4) ermittelten NO-Konzentrationen umgerechnet und auf den Normzustand (ISO-Bedingungen) und 15 Vol.-% Sauerstoffanteil im trockenen Abgas bezogen. Bei den beiden GTA wird von folgenden Annahmen ausgegangen (Tabelle 1).

Für GTA 1 mit dem niedrigeren Druckverhältnis und dem größeren Luftüberschuss wird eine adiabate Verbrennungstemperatur von 1520 °C ermittelt, die als Temperatur in der Brennkammer angenommen wird (Bild 2). GTA 2 verfügt dagegen über eine viel höhere

Verbrennungstemperatur von 1700 °C. Die Konsequenzen für die NO-Emissionen, die aus den unterschiedlichen Drücken und Temperaturen resultieren, sind in Bild 3 dargestellt. Um den signifikanten Einfluss der Verweilzeit t auf die NO-Emissionen zu verdeutlichen, sind zusätzlich zu den druck- und temperaturabhängigen Werten für die Verweilzeit von 30 ms (Ring-Brennkammer) auch die NO-Emissionen für 150 ms (Silo-Brennkammer) ausgewiesen. Unter den genannten Modellannahmen und bei gleicher Verbrennungstechnologie hat GTA 2, also die Gasturbine mit den höheren Prozessparametern, gegenüber GTA 1 eine in der Größenordnung um den Faktor 10 höhere NO-Emission.

Auch die Auftragung der NO-Emissionen in Abhängigkeit vom Druckverhältnis bzw. vom Brennkammerdruck ist sehr aufschlussreich (Bild 4) und lässt erkennen, dass eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur um 50 K die NO-Emissionen etwa verdoppelt.

Bestimmende Parameter für Effizienz sowie CO₂-Emissionen von Gasturbinenanlagen und Bezug zu den Stickoxidemissionen

Auch bei GTA und kombinierten Gas-Dampfkraftwerken erfolgt die Effizienzsteigerung und Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen künftig in erster Linie durch Verbesse-

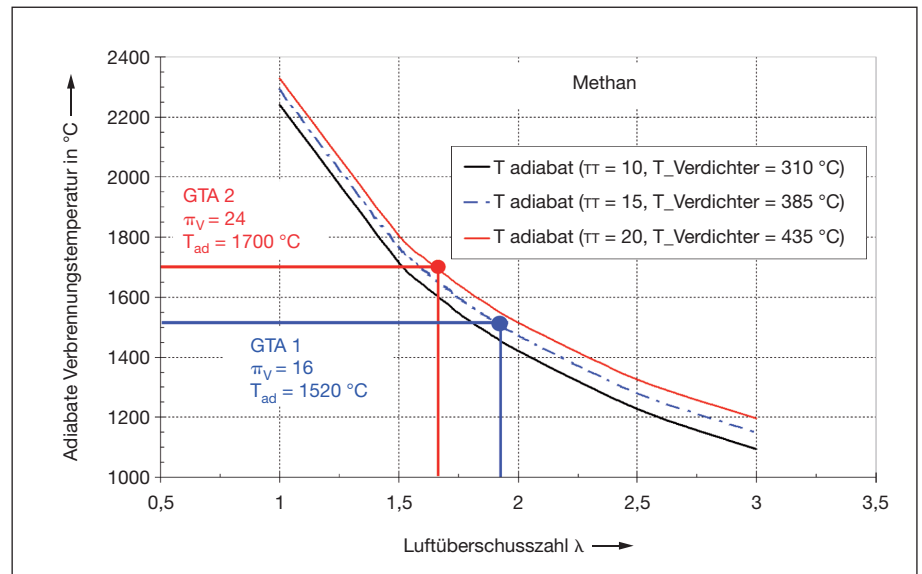


Bild 2. Einfluss der Luftüberschusszahl auf die adiabate Verbrennungstemperatur.

rung der Prozessgüte infolge Erhöhung der Prozessparameter. Deshalb soll für die weitere Betrachtung des untrennbaren Zusammenhanges von Effizienz und CO₂-Emissionen einerseits und Stickoxidemissionen andererseits der Wirkungsgrad des realen Gasturbinenprozesses η_J die Grundlage bilden. Es wird dabei angenommen, dass sich eine Erhöhung des Prozesswirkungsgrades η_J proportional im Nettowirkungsgrad η_e niederschlägt.

$$\eta_J = \frac{\Delta h_T - \Delta h_V}{h_3 - h_2} = \tag{Gl. 6}$$

$$\frac{\eta_{iT} \Delta h_{sT} - \Delta h_{sV} / \eta_{iV}}{h_3 - h_2}$$

Darin sind:

- Δh polytrope Enthalpiedifferenz von Turbine (T) und Verdichter (V),
- Δh_s isentrope Enthalpiedifferenz von Turbine (T) und Verdichter (V),

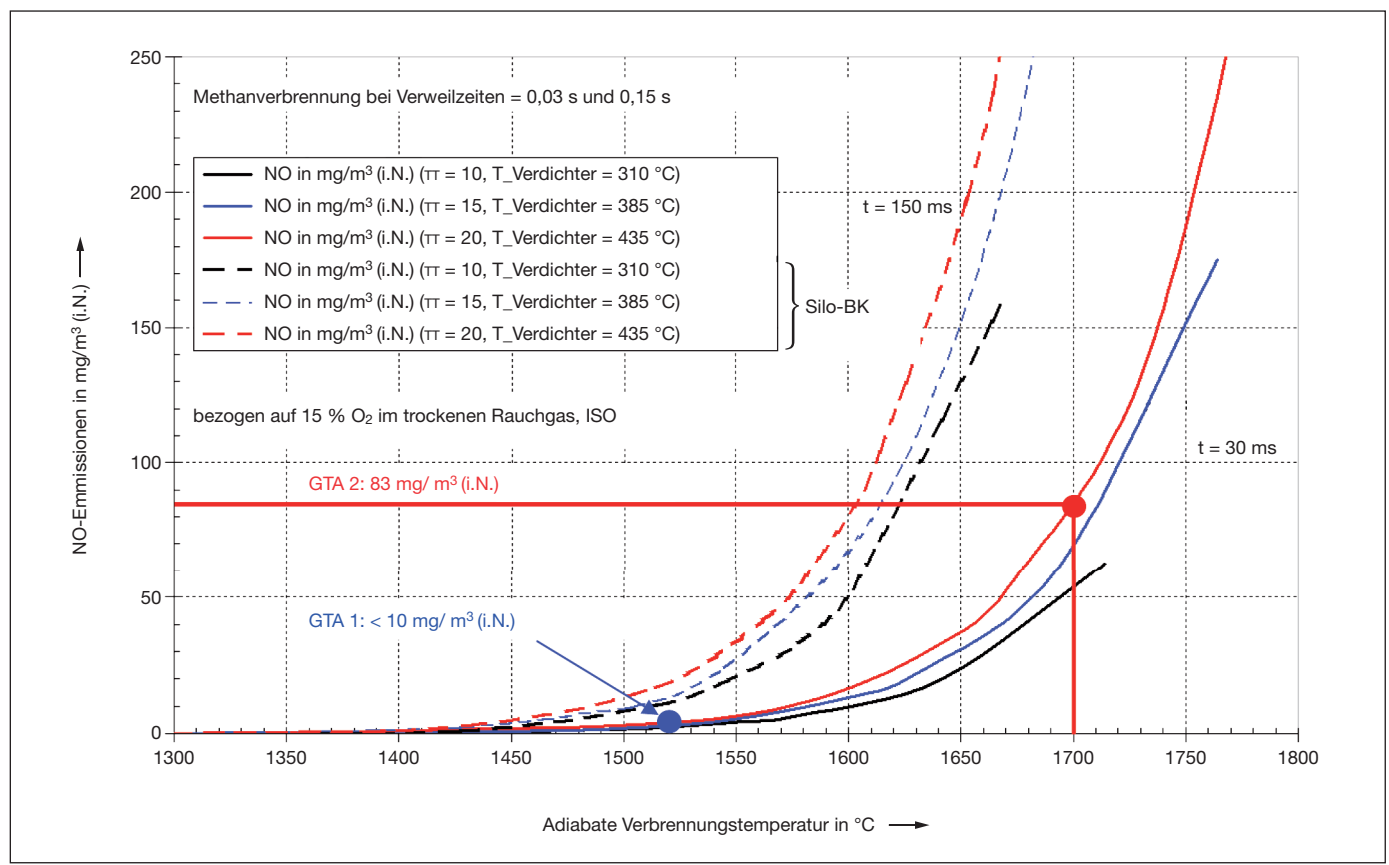


Bild 3. NO-Emissionen in Abhängigkeit von adiabater Verbrennungstemperatur, Verweilzeit und Druck.

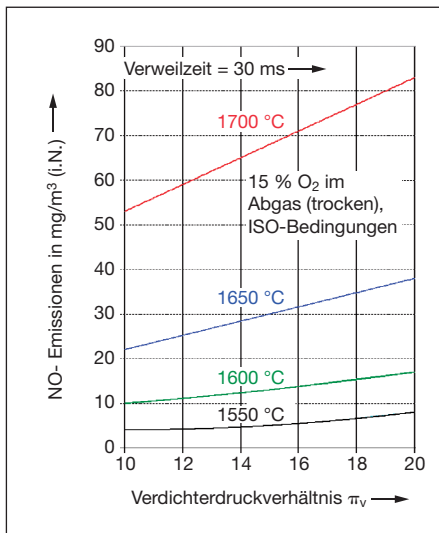


Bild 4. NO-Emissionen in Abhängigkeit vom Druck bei unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen und einer Verweilzeit in der Reaktionszone von 30 ms.

$h_3 - h_2$ Enthalpiedifferenz zwischen Brennkammeraustritt und -eintritt bei Zugrundelegung von idealem Gas als Kreisprozessfluid,

$\Delta\eta_i$ innerer Wirkungsgrad von Turbine (T) und Verdichter (V).

Mit den Gleichungen für die isentropen Zustandsänderungen in Turbine und Verdichter kann man den Wirkungsgrad des realen Gas-

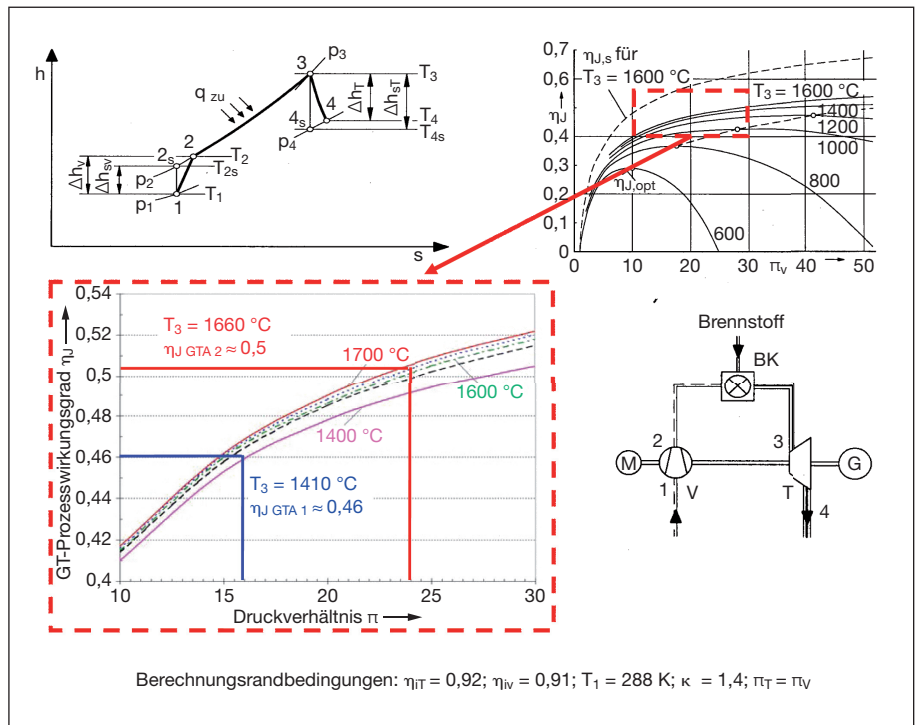


Bild 5. Wirkungsgrad des realen Gasturbinenprozesses in Abhängigkeit vom Druckverhältnis und der oberen Prozesstemperatur.

turbinenprozesses auch in Abhängigkeit von den Druckverhältnissen π in Turbine (T) und Verdichter (V) und dem Temperaturverhältnis der Kelvin-Temperaturen $\tau = T_3/T_1 = T_{max}/T_{min}$ ausdrücken:

$$\eta_J = \frac{\eta_{iT} \eta_{iV} \tau (1 - \pi_T^{-m}) - (\pi_V^m - 1)}{\eta_{iV} (\tau - 1) - (\pi_V^m - 1)} \quad (Gl. 7)$$

Darin ist $m = (\kappa - 1)/\kappa$ und κ der Isentropenexponent.

Die graphische Darstellung von (Gl. 7) erfolgt in Bild 5. Darin sind auch die beiden GTA ausgewiesen, hier jedoch mit ihren Turbineneintrittstemperaturen (T_3). Die Differenz zwischen der Verbrennungstemperatur (Bild 2) und der Turbineneintrittstemperatur erklärt sich durch die Zumischung der Kühleuft der Brennkammer. Für GTA 2 wurden ganz bewusst sehr ambitionierte und visionäre Parameter gewählt, um die Unterschiede und Zusammenhänge deutlich herauszuarbeiten. GTA 2 mit den höheren Prozessparametern und demzufolge auch den höheren Stickoxidemissionen bei gleicher Verbrennungstechnologie verfügt erwartungsgemäß über den höheren Prozesswirkungsgrad η_J mit entsprechend niedrigeren spezifischen CO_2 -Emissionen.

Klar ist, dass Stickoxidemissionen und spezifische Kohlendioxidemissionen stets eine gegenläufige Tendenz in Bezug auf eine Veränderung der oberen Prozessparameter haben.

Während bei den bisherigen Betrachtungen unterschiedliche Drücke und Temperaturen zugrundegelegt wurden, kann gezeigt werden, dass selbst bei alleiniger Erhöhung des Druckverhältnisses und damit des Brennkammerdruckes die NO-Emissionen stärker steigen als der Prozesswirkungsgrad (Bild 6). Mit Erhöhung des Druckverhältnisses erhöht sich zwar auch der Wirkungsgrad bis das Optimum für die jeweilige Turbineneintrittstemperatur erreicht wird, aber der Anstieg vermindert sich.

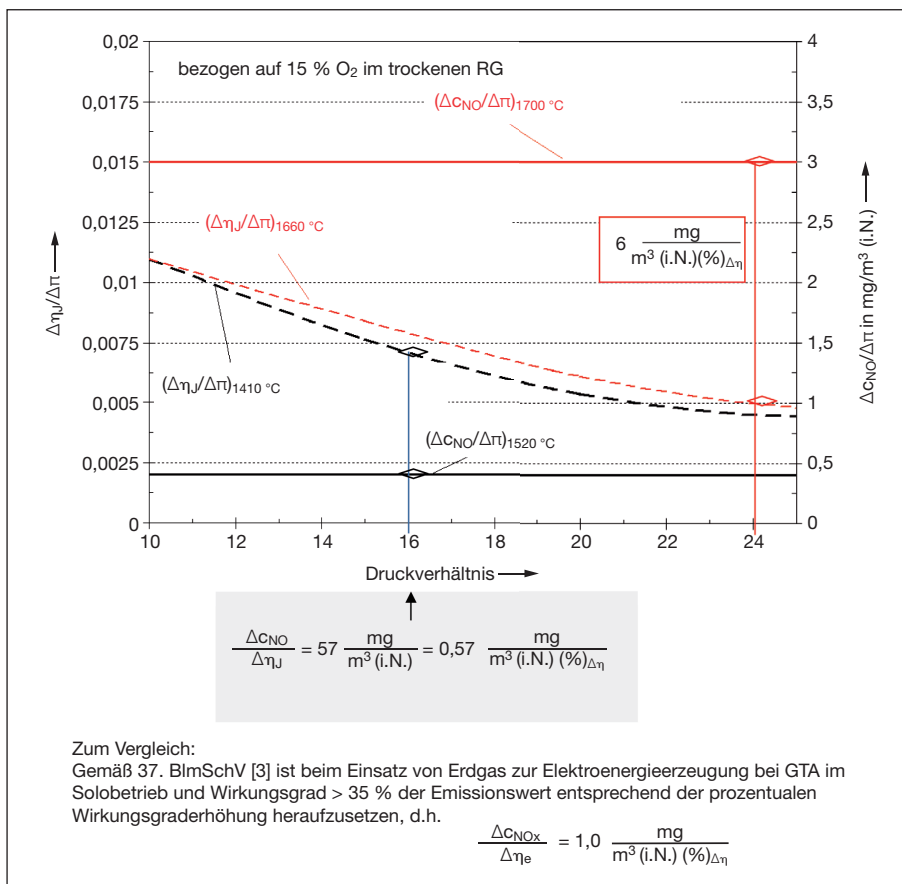


Bild 6. Darstellung der Anstiege des GTA-Prozesswirkungsgrades und der NO_x -Emissionen in Abhängigkeit vom Verdichterdruckverhältnis.

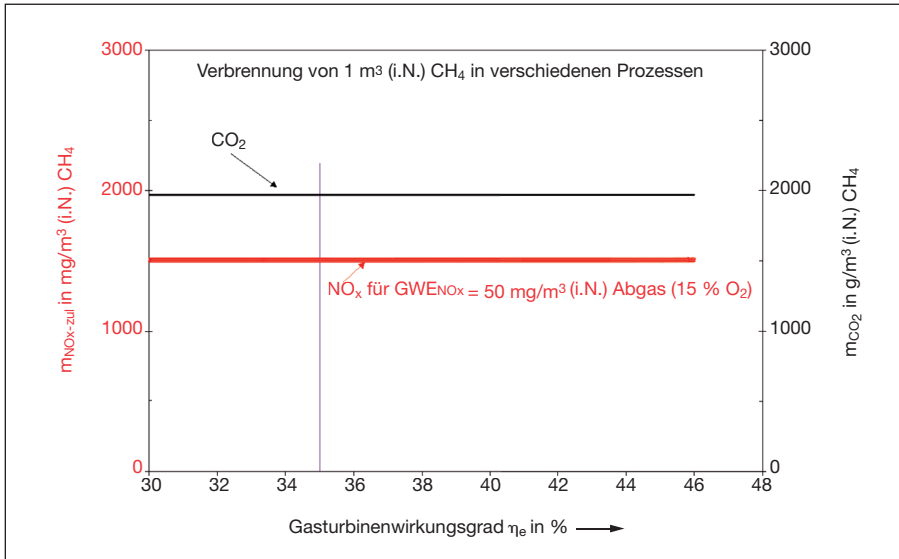


Bild 7. Darstellung der spezifischen CO₂- und NO_x-Emissionen von GTA für einen konstant festgelegten Grenzwert GWE von 50 mg/m³ (i. N.).

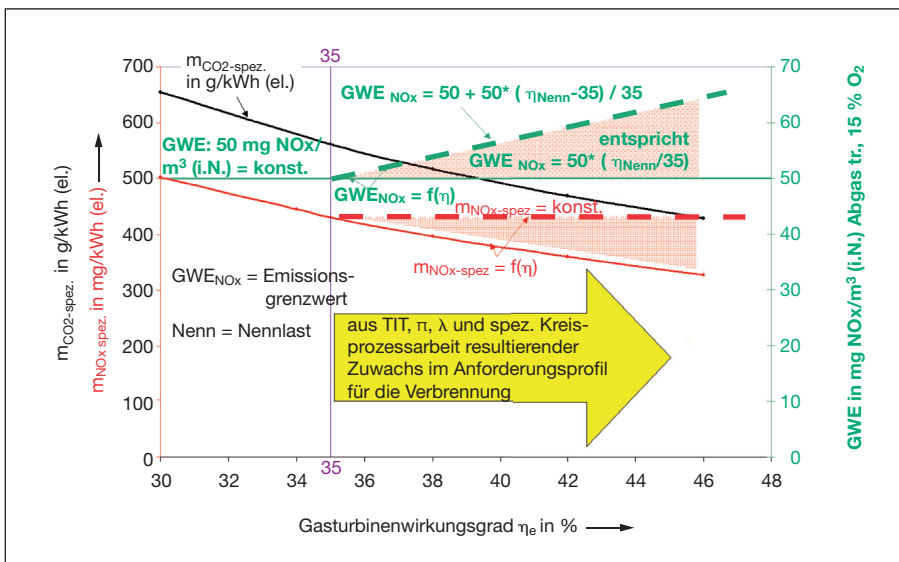


Bild 8. Darstellung der spezifischen CO₂- und NO_x-Emissionen von GTA für die Anwendung des „Eta-Algorithmus“ (GWE_{NO_x} = 50 mg/m³ i.N.).

Demgegenüber steigen die NO-Emissionen im betrachteten Parameterbereich fast linear mit dem Druck (Bild 4) und überproportional bei Erhöhung von Druck und Temperatur.

Schlussfolgerungen für eine thermodynamisch basierte Definition der Grenzwerte für Stickoxide

Bei gleicher Verbrennungstechnologie haben die effizienteren GTA mit den höheren Prozessparametern per se auch die höheren Stickoxidemissionen. Eine thermodynamisch basierte Grenzwertdefinition muss dieser Tatsache unbedingt Rechnung tragen. Das heißt: Die Festlegung eines abgasvolumenbezogenen NO_x-Grenzwertes, ausgedrückt in mg/m³ (i. N.), hat zur Konsequenz, dass von hocheffizienten GTA mit vermindertem Primärenergieverbrauch und damit verknüpfter ge-

ringerer spezifischer CO₂-Emissionen im Vergleich zu konservativ ausgelegten Gasturbinen zusätzlich eine deutliche Reduzierung der spezifischen, d. h. nutzungsbezogenen NO_x-Emissionen abverlangt wird. In den Bildern 7 und 8 sind die Zusammenhänge beispielhaft für einen zulässigen NO_x-Grenzwert von 50 mg/m³ (i. N., tr., 15 Vol.-% O₂) unter Annahme der reinen CH₄-Verbrennung dargestellt.

Eine Grenzwertdefinition in Verbindung mit dem Wirkungsgrad der GTA in Form des bereits in [2] implementierten sogenannten „Eta-Algorithmus“ trägt den genannten Anforderungen in geeigneter Form Rechnung:

$$GWE_{NO_x} = GWE_{NO_x,0} \cdot \eta_e / \eta_{Referenz}$$

Darin sind:

GWE_{NO_x} NO_x-Emissionsgrenzwert,

GWE_{NO_x,0} festgelegter NO_x-Sockel-Grenzwert,

η_e Netto-Wirkungsgrad bei Nennlast unter ISO-Bedingungen,

$\eta_{Referenz}$ festgelegter Bezugs-wirkungsgrad.

Dabei wird konservativ davon ausgegangen, dass sich die NO_x-Emissionen linear mit dem Wirkungsgrad erhöhen. Es wurde aber bereits gezeigt, dass der Anstieg der NO_x-Emissionen im Parameterbereich moderner GTA bei gleicher Verbrennungstechnologie überproportional zur Wirkungsgraderhöhung ist. Insofern führt eine derartige Grenzwertdefinition keinesfalls zu einer Übervorteilung hocheffizienter GTA, sondern sie erfordert eine Weiterentwicklung der Verbrennungstechnologie zur Einhaltung der NO_x-Grenzwerte.

Das bei hocheffizienten GTA erreichte Niveau der Prozessparameter lässt keine weitere Wirkungsgradsteigerung bei gleichzeitiger Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden NO_x-Emissionen zu, weil der Kühl-luftbedarf zur Reduzierung des Verbrennungs-luftanteils und damit der Luftüberschusszahl führt. Zur Vermeidung eines Zielkonflikts zwischen Klimaschutz und Luftreinhaltung sollten neue oder wesentlich geänderte GTA deshalb ihren Beitrag zum Umweltschutz über die mit der Wirkungsgradsteigerung verbundene bessere energetische Nutzung des eingesetzten Brennstoffs leisten.

Im Ergebnis einer intensiven und zielorientierten Diskussion zwischen den Gasturbinenbetreibern, Fachverbänden und gesetzgebenden Organen ist es nun offensichtlich gelungen, dass der „Eta-Algorithmus“ auch in der 37. BImSchV Berücksichtigung findet [3], wengleich auch nur für GTA im Solobetrieb. Für kombinierte Gas-Dampf-Anlagen mit hocheffizienten Gasturbinen wurde anstelle des „Eta-Algorithmus“ ein erhöhter NO_x-Sockelbetrag festgelegt.

Zusammenfassung

Das Eckpunktepapier der Bundesregierung für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm bildet die Grundlage für die Verordnung zur Absicherung von Luftqualitätsanforderungen (37. BImSchV) mit Neufestlegung der Emissionsgrenzwerte. Darin sind die zulässigen NO_x-Emissionenwerte für GTA mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 100 MW bei Einsatz von Gasen der öffentlichen Gasversorgung neu geregelt, die bei Inkrafttreten gegenüber der gegenwärtig geltenden 13. BImSchV eine Verschärfung darstellen würden.

Da die Gasturbinen-Technologie einen wichtigen Beitrag für die umweltverträgliche, ressourcenschonende und sichere Energieversorgung leistet, war es Anliegen der Autoren, auf

Basis einer thermodynamischen Betrachtung zu zeigen, dass es zur Vermeidung eines Zielkonfliktes zwischen Klimaschutz und Luftreinhaltung und einer Benachteiligung hocheffizienter GTA erforderlich ist, die Grenzwerte für Stickoxidemissionen an den Wirkungsgrad zu koppeln. Wird im Unterschied dazu der Emissionsgrenzwert als die auf den normierten Abgasvolumenstrom bezogene NO_x -Massenfracht definiert, wird damit unterstellt, dass, unabhängig von den Randbedingungen des Verbrennungsprozesses, für eine bestimmte Brennstoffmenge eine konstante Menge NO_x entstehen darf. Das entspricht jedoch nicht der Realität. Dagegen ist der „Eta-Algorithmus“ ein geeigneter Ansatz, der nach Erkenntnislage zu keiner Übervorteilung hocheffizienter GTA führt. Aufgrund der linearen Anhebung des NO_x -Grenzwertes mit dem Verhältnis des Netto-Wirkungsgrades zu einem Referenzwirkungsgrad ist somit zugleich auch ein Anspruch an die Weiterentwicklung der Verbren-

nungstechnologie formuliert. Dass es im Ergebnis der Diskussion mit den gesetzgebenden Organen nun aller Voraussicht nach gelungen ist, den „Eta-Algorithmus“ als eine thermodynamisch basierte Grenzwertfestlegung auch in die 37. BImSchV zu implementieren, kann als Erfolg angesehen werden, obgleich eine Übertragung dieses Ansatzes selbstverständlich auch auf GTA in kombinierten Gas-Dampf-Anlagen sinnvoll wäre.

Literatur

- [1] Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaschutzprogramm. BMWi/BMU, Berlin (2007).
- [2] 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen – 13. BImSchV), Bundesgesetzblatt (2004), Teil I, Nr. 37 vom 23. Juli 2004.
- [3] 37. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Absicherung von Luftqualitätsanforderungen – 37. BImSchV). Drucksache 147/08. Beschluss des Bundesrates vom 25. April 2008.
- [4] Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU). Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für Großfeuerungsanlagen. EU-Kommission, Institut für Technologische Zukunftsforschung, Sevilla, Mai 2005.
- [5] Common Business Practice „Harmonisation of Natural Gas Quality“. European Association for the Streamlining of Energy Exchange – gas (EASEE-gas). Paris, February 2005.
- [6] Auftrag der Europäischen Kommission an das Europäische Komitee für Normung (CEN) zur Durchführung von Normungsarbeiten auf dem Gebiet der Erdgasqualität. Dokument M/400 DE vom 16. Januar 2007.
- [7] *Bohn, D.E.*: Technologien für die Gasturbinen der übernächsten Generation – Ergebnisse aus dem DFG-Sonderforschungsbereich 561. Tagungsband der VGB-Fachtagung „Gasturbinen und Gasturbinenbetrieb 2005“. VGB Power-Tech Service GmbH, Essen. □