Diss. Nr. 5633

Eine Theorie der gekühlten Gasturbine

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

Vorgelegt von

MAX EHRBAR
dipl. Masch. Ing. ETH
geboren am 5. März 1943
von Urnäsch AR

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. W. Traupel, Referent
Prof. M. Berchtold, Korreferent

aku-Fotodruck
Zürich
1975

8.6 Wärmeaustausch durch Strahlung

Aufgrund des heutigen und des in Zukunft noch zu erwartenden Temperaturniveaus des Heissgases am Eintritt in die Turbine, muss mindestens prinzipiell mit einem merklichen Einfluss der Strahlung auf den Wärmeübergang an Schaufeln und Begrenzungswände gerechnet werden.
Um die Abschätzung dieses Einflusses geht es in diesem Unterkapitel.

Dabei interessieren zwei Möglichkeiten der Wärmeübertragung, nämlich einmal die Strahlung des Heissgaskörpers an Schaufeln und Seitenwände, zum andern die Strahlung der meist heisseren Schaufeloberflächen an die meist kühleren Seitenwände, die zu einer zusätzlichen Kühlung der Schaufel führt.

Hier interessiert aber nur der Wärmetransport vom Gas an die umliegenden Oberflächen.

Die Berechnung des Wärmeaustausches durch Strahlung führt bei komplizierten geometrischen Verhältnissen, wie sie in Gasturbinen aufzutreten pflegen, rasch zu umfangreichen Berechnungen, selbst dann, wenn vereinfachend mit schwarzen Oberflächen gerechnet wird. Da es hier primär nur darum geht, überhaupt einmal Grössenordnungen anzugeben, werden die Verhältnisse an idealisierten Geometrien untersucht, die zudem die obere Grenze für die übertragene Wärme darstellen.

Das aus der Brennkammer austretende Rauchgas enthält als strahlungsfähige Komponenten (d.H. Komponenten, deren Strahlung überhaupt merklich ist) die beiden im folgenden als ideale Gase behandelten Stoffe CO_2 und H_2O. Daneben kommen in geringen Mengen andere drei- und mehratomige Moleküle vor, so beispielsweise SO_2 (ab dreiatomigen Molekülen ist im allgemeinen eine merkliche Strahlung vorhanden.

Für CO_2 und H_2O wurden schon vor etwa fünfzig Jahren in Zusammenhang mit der Kesselfeuerung Berechnungen und Untersuchungen angestellt, sodass recht gute Unterlagen vorliegen. Die nachfolgenden Angaben stützen sich vor allem auf das Buch von SCHACK [71] . Wir untersuchen hier die in Abb. 8.6.1 gezeigte Geometrie, bestehend aus

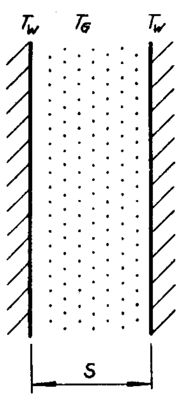

Abb. 8.6.1

Strahlender Gaskörper, Bezeichnungen.

zwei unendlich ausgedehnten, schwarzen und parallelen Wänden, dazwischen eingeschlossen ein Gas, im vorliegenden Falle CO_2 oder H_2O. Uns interessiert nun die Wärmemenge $\dot{q}$, die der Gaskörper an <u>eine</u> der beiden Wände abgibt. Nach den Ausführungen von SCHACK beschreibt folgende Interpolationsformel mit guter Genauigkeit das Problem:

$$CO_2: \quad \dot{q}_{CO_2} = 13.7 \cdot (p \cdot s)^{0.4} \left(\frac{T_G}{100}\right)^{3.2} \quad [W/m^2] \tag{1}$$

$$H_2O: \quad \dot{q}_{H_2O} = 70.3\,(1 - 3.6\,p \cdot s) \cdot (p \cdot s)^{0.6} \left(\frac{T_G}{100}\right)^{2.32 + 1.72\sqrt[3]{ps}} \tag{2}$$

T ist die absolute Temperatur des Gaskörpers, s die Schichtdicke des Gaskörpers und p der Partialdruck des strahlenden Gases in bar . Die den obigen Gleichungen zugrunde liegenden Formeln von SCHACK gelten für eine Gashalbkugel und sind im technischen Masssytem angeschrieben. In (1) und (2) ist die Umrechnung auf das MKS-System und auf die gewählte Geometrie mit parallelen Wänden inbegriffen. Gültig sind diese Formeln in den Bereichen:

$$\begin{aligned} 700\,°K &\leq T_G \leq 2000\,°K \\ 0 &\leq p \cdot s \leq 0.36\ m \cdot bar \end{aligned} \tag{3}$$

Haben schwarze Wand und Gaskörper gleiche Temperatur, so gilt wegen des zweiten Hauptsatzes

$$\dot{q}_{Gas} = \dot{q}_{Wand} \tag{4}$$

In Analogie zu schwarzen Wänden, kann für die resultierende Strahlung bei ungleichen Wand und Gastemperaturen der Ansatz

$$\dot{q}_{CO_2} = 13{,}7 \cdot (ps)^{0{,}4} \left[\left(\frac{T_G}{100}\right)^{3{,}2} - \left(\frac{T_W}{100}\right)^{3{,}2} \right] \tag{5}$$

benützt werden, der hier nur für CO_2 angeschrieben wurde, aber ebenso für H_2O oder ein anderes strahlendes Gas verwendet werden kann. Im Gegensatz zu schwarzen Oberflächen die miteinender Wärme durch Strahlung austauschen, gilt Gleichnung (5) bei Gasen nur näherungsweise. Dies kommt daher, als Gase nur selektiv bei ganz bestimmten Wellenlängen Wärme emmittieren und absorbieren, wobei Absorptionszahl und Wellenlängenbereich im allgemeinen von der Gastemperatur abhangen. Da aber die Temperaturverhältnisse zwischen Wand und Gas in Gasturbinen auch in extremen Fällen kaum unter o.7 fallen, ist der Ansatz (5) genügend genau.

Für den Ingenieurgebrauch ist aber (5) noch zu wenig anschaulich. Um diese zu erhöhen definiert man eine Wärmeübergangszahl α_{str}:

$$\alpha_{str} = \frac{q_{res\,CO_2}}{T_G - T_W} = \frac{13{,}7 \cdot (ps)^{0{,}4}}{100^{3{,}2}} \left[\frac{T_G^{3{,}2} - T_W^{3{,}2}}{T_G - T_W} \right]$$

$$= \frac{13{,}7 \cdot (ps)^{0{,}4}}{100^{3{,}2}} \, T_G^{2{,}2} \left[\frac{1 - \left(\frac{T_W}{T_G}\right)^{3{,}2}}{1 - \left(\frac{T_W}{T_G}\right)} \right] \tag{6}$$

Für $T_w/T_g = 1$ erhält man für die eckige Klammer in (6)

$$\lim_{\frac{T_W}{T_G} \to 1} [\cdots] = 3{,}2 \tag{7}$$

Damit lautet der Ausdruck für die Wärmeübergangszahl von CO_2:

$$\underline{\alpha_{str_{CO_2}} \leq 1{,}75 \cdot 10^{-5} \cdot (ps)^{0,4} \, T_G^{2,2}} \quad [W/m^2 \, °] \tag{8}$$

Dies stellt gleichzeitig die obere Grenze für die Wärmeübergangszahl dar, denn für $T_w/T_g < 1$ wird der Klammerausdruck in (6) kleiner als nach der Grenzwertbildung in (7). Das analoge Vorgehen im Falle des Wasserdampfes liefert für $\alpha_{str_{H_2O}}$:

$$\underline{\alpha_{str_{H_2O}} \leq \frac{70{,}3 \cdot (1 - 3{,}6\, ps)}{100^{2,32 + 1,72 \sqrt[3]{ps}}} \left(2{,}32 + 1{,}72 \sqrt[3]{ps}\right) (ps)^{0,6} \cdot T_G^{1,32 + 1,72 \sqrt[3]{ps}}} \tag{9}$$

Nun müssen die Partiakdrucke der beiden Komponenten CO_2 und H_2O für die in Gasturbinen vorkommenden Verhältnisse zu berechnen. Nach Traupel [ ] beträgt die durchschnittliche Zusammensetzung von flüssigen für Gasturbinen verwendete Brennstoffe aus

C	86 Gewichts-%	
H	12.5 "	(1o)
Rest	1.5 "	

Wenn wir nun den bescheidenen Rest von unbrennbaren Beimischungen vernachlässigen, so enthält der durchschnittliche Brennstoff

C	87	Gewichts-%	(11)
H	13	"	

Das ergibt umgerechnet für die beiden Stoffe ein Molverhältnis von

$$\frac{n_H}{n_C} = 0,9 \tag{12}$$

oder anders ausgedrückt hat unser Brennstoff die - fiktive - chemische Formel

$$CH_{0,9} \tag{13}$$

Mit diesem Brennstoff führen wir nun eine stöchiometrische Verbrennung durch.

$$1,225 \cdot O_2 + CH_{0,9} = CO_2 + 0,45\, H_2O \tag{14}$$

Verwendet man nun anstelle des reinen Sauerstoffs O_2 Luft als Sauerstoffspender und nimmt ein Luftverhältnis λ an, so folgt für die Reaktionsgleichung

$$\lambda(4,61\, N_2 + 1,225\, O_2) + CH_{0,9} = \tag{15}$$

$$= CO_2 + 0,45\, H_2O + \lambda \cdot 4,61\, N_2 + (\lambda - 1)\, 1,225\, O_2$$

λ bedeutet, dass die λ-fache Luftmenge, die zur stöchiometrischen Verbrennung nötig wäre, an der Reaktion teilnimmt.

Für die Molzahlen der einzelnen Komponenten des Verbrennungsgases ergen sich folgende Werte:

$$n_{tot} = 1 + 0.45 + 4.60\,\lambda + (\lambda-1).1.225$$
$$n_{CO_2} = 1$$
$$n_{H_2O} = 0.45$$

Da die Partialdrücke - ideale Gase vorausgesetzt - diesen Molverhältnissen proportional sind, gilt

$$\frac{p_{CO_2}}{p_{tot}} = \frac{1}{0{,}225 + 5{,}825\,\lambda} \qquad \frac{p_{H_2O}}{p_{tot}} = \frac{0{,}45}{0{,}225 + 5{,}825\,\lambda} \tag{16}$$

Diese Partialdruckverhältnisse werden unten als Funktion des Luftverhältnisses λ tab~~b~~elliert. Zwischen der Temperatur des Gases nach der Verbrennung und dem Luftverhältnis besteht folgender gut angenäherter Zusammenhang

$$T_G(\lambda) \approx \frac{1}{\lambda} T_G(1) \tag{17}$$

Nun die Tabelle:

λ	T_G	p_{CO_2}/p_{tot}	p_{H_2O}/p_{tot}
1	3000 °C	0.1650	0.0740
1.87	1600	0.0896	0.0403
2.14	1400	0.0787	0.0353
2.50	1200	0.0675	0.0303
3.33	1000	0.0509	0.0228
3.75	800	0.0453	0.0203

Auf Grund der hohen Temperaturen ist vor allem im ersten Leitradkranz mit einer hohen Belastung durch Wärmestrahlung zu rechnen. Für diesen Fall besteht auch noch der unmittelbere Zusammenhang zwischen dem Luftverhältnis λ und der Gastemperatur T_g nach (17). Um nun nicht mit Partialdrücken rechnen zu müssen, werden die Formeln (8) und (9) wie folgt umgerechnet:

$$\alpha_{str_{CO_2}} = 1{,}75 \cdot 10^{-5} \cdot (p_{tot} \cdot s)^{0,4} \left(\frac{p_{CO_2}}{p_{tot}}\right)^{0,4} \cdot T_G^{2,2} \qquad (18)$$

Für p_{CO_2}/p_{tot} gilt

$$\frac{p_{CO_2}}{p_{tot}} = f(\lambda(T)) \qquad (19)$$

was in obiger Tabelle dargestellt wurde. Damit kann man $\alpha_{str_{CO_2}}$ als Funktion des in der Maschine im ersten Leitrad herrschenden Druckes und der entsprechenden Gastemperatur darstellen. Für CO_2 erhält man:

$\alpha_{str_{CO_2}}$ = [W/m² °C]

$p_{tot} \cdot s$ \ T_G	800	1000	1200	1400	1600 [°C]
1	24	36	56	78	106
0.8	22	33	51	71	97
0.6	20	29	46	64	86
0.4	17	25	39	54	73
0.2	13	19	29	41	56

Das gleiche Vorgehen liefert beim Wasserdampf H_2O:

	8oo	1ooo	12oo	14oo	16oo	[°C]
1	17	25	38	52	68	
o.8	13	19	3o	41	54	
o.6	9	14	22	3o	4o	
o.4	5	9	14	2o	26	
o.2	2	4	7	1o	13	

Der gesamte Wärmeübergang beider Komponenten kann nun durch einfache Addition beider Anteile gewonnen werden. Streng genommen ist dieses Vorgehen nicht ganz korrekt, da sich die beiden Anteile gegenseitig leicht absorbieren. Nach Schack ist die Abminderung des Wärmeübergangs durch diese Absorption im ungünstigsten Fall 7 %. Da andererseits andere noch Wärmestrahlung aussendende Anteile vernachlässigt wurden, werden hier die Anteile einfach addiert.

	8oo	1ooo	12oo	14oo	16oo	[illegible]
1	41	61	94	13o	174	
o.8	35	52	81	112	151	
o.6	29	43	68	94	126	
o.4	22	34	53	74	99	
o.2	15	23	36	51	69	

Wie bereits an früherer Stelle erwähnt, handelt es sich bei diesen Angaben um Maximalwerte. Da der Kanal der Gasturbine ja nicht aus zwei unendlich ausgedehnten parallelen Wänden besteht, sondern mehr ein Kanal rechteckförmigen Querschnitts ist. Für diesen wäre α_{Str} nach Schack's Unterlagen etwa 1o....2o % kleiner. Die Werte aus vorangehender Tabelle können näherungsweise auch für Leit- und Laufräder weiter stromabwärts benutzt werden. Man erhält dann allerdings eher zu niedrige Werte.

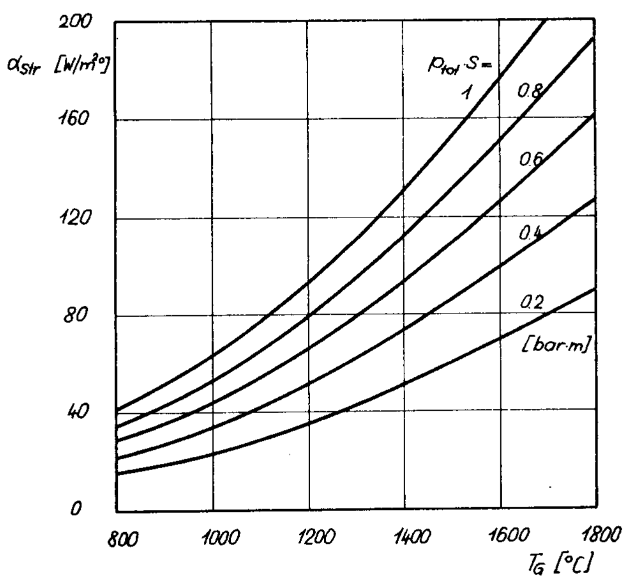

Abb. 8.6.2 Wärmeübergang Gas-Wand durch Strahlung. p_{tot} = Gesamtdruck s = Schichtdicke des Gases.