

Berührungslose Temperaturmessung an Verbrennungsgasen bei hohen Temperaturen und hohen Drücken

*Matthias Zipf¹, Jochen Manara¹, Thomas Stark¹, Mariacarla Arduini¹, Hans-Peter Ebert¹,
Jürgen Hartmann²*

*¹Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., Magdalene-Schoch-Straße 3, 97074
Würzburg, Deutschland*

*²Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Ignaz-Schön-Straße 11, 97421
Schweinfurt, Deutschland*

Zusammenfassung

Stationäre Gasturbinen sind von großer Bedeutung für die heutige Energieversorgung. Der Wirkungsgrad einer Gasturbine steigt mit zunehmender Heißgastemperatur an. Turbinenhersteller bzw. Kraftwerksbetreiber sind daher bestrebt, Turbinen bei der höchsten materialtechnisch möglichen Heißgastemperatur einzusetzen. Eine entsprechende Prozessoptimierung des Turbinenbetriebs setzt somit die exakte Kenntnis der Gastemperaturen während des Betriebs und damit eine verlässliche Messung derselben voraus.

Zur Messung der Gastemperatur werden derzeit in der Regel Thermoelemente unmittelbar im Abgasstrom platziert. Aufgrund der dort vorherrschenden extremen Bedingungen degradieren diese Sensoren allerdings sehr schnell. Ein alternativer Ansatz sieht die Entwicklung eines berührungslosen Messverfahrens auf der Grundlage von Strahlungsthermometern vor.

Für die Umsetzung dieses Vorhabens ist die genaue Kenntnis des Verhaltens der infrarot-optischen Emissions- und Transmissionsspektren der im Abgasstrom enthaltenen Gase bei hohen Temperaturen und Drücken eine wesentliche Voraussetzung. Aus diesem Grund wurde am ZAE Bayern eine Hochtemperatur-Hochdruck-Gaszelle entwickelt, die es in Verbindung mit einem FTIR-Spektrometer erlaubt, Gase und Gasgemische hinsichtlich dieser Gesichtspunkte zu charakterisieren.

In dieser Arbeit wird die neue Messapparatur vorgestellt und Gasgemische, die für die Turbinenanwendungen relevant sind, werden analysiert. Zur Identifizierung eines geeigneten Wellenlängenbereichs für die geplante berührungslose Temperaturmessung wurden erste Messungen durchgeführt, auf deren Grundlage ein adäquater Wellenlängenbereich ermittelt werden konnte.

Keywords: Gas-Transmissions-Spektren, stationäre Gasturbinen, Strahlungs-Thermometrie, berührungslose Gas-Temperaturmessung, FTIR-Spektrometrie.

Einführung

Eine der dringendsten Aufgaben, mit der wir derzeit konfrontiert sind, ist die Weiterentwicklung von Techniken und Methoden zur Elektrizitätsversorgung. Noch immer wird der größte Teil des weltweiten Bedarfs an Elektrizität aus fossilen Energieträgern – allen voran Kohle – gedeckt [1]. Unter ökologischen Gesichtspunkten sind diese jedoch problematisch, da z. B. Kohle-Kraftwerke im Zuge des Energieumwandlungsprozesses große Mengen an Kohlenstoffdioxid ausstoßen, welches zur Beschleunigung des Treibhauseffektes und somit des Klimawandels beiträgt. Daher müssen diese Energieträger im Zuge der Energiewende vollständig durch erneuerbare und kohlenstoffdioxidarme Energieträger wie Solar- und Windenergie ersetzt werden. Doch bisher sind die Entwicklung und der Ausbau der erneuerbaren Energieträger noch nicht weit genug fortge-

schritten, um die konventionellen Energieträger bereits vollständig ersetzen zu können.

Verglichen mit Kohlekraftwerken erreichen moderne GuD-Kraftwerke einen deutlich höheren Wirkungsgrad [2], [3]. Außerdem entspricht der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid je abgegebener Kilowattstunde an elektrischer Energie bei Gas-Kraftwerken nur etwa der Hälfte des CO₂-Ausstoßes von Kohlekraftwerken [1]. Bis kohlenstoffbasierte Energieträger vollständig ersetzt werden können, können Gasturbinen daher als Brückentechnologie dienen, und den weltweiten CO₂-Ausstoß bereits stark reduzieren. Darüber hinaus haben Gasturbinen kurze Anlaufzeiten von nur wenigen Minuten und sind somit flexibel einsetzbar [4]. Daher können Gasturbinen auch bei einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien dazu beitragen Bedarfslücken zwischen der Stromnachfrage und der schwankenden Erzeugung zu schließen,

die beispielsweise bei Windstille und gleichzeitig geringer solarer Einstrahlung entstehen können.

Eine Gasturbine stellt eine Realisierung des Brayton-Prozesses (auch Joule-Prozess) dar [4]. Der Wirkungsgrad einer Gasturbine kann somit erhöht werden, indem die Differenz zwischen den Gastemperaturen am Turbinenein- und -auslass erhöht wird. In der Praxis bedeutet dies die Erhöhung der Verbrennungsgastemperatur [5].

Jedoch setzen die Materialparameter dieser Erhöhung Grenzen. Eine Überschreitung der materialtechnisch vorgegebenen Maximaltemperaturen reduziert die Lebensdauer der Turbinenkomponenten – vor allem der Turbinenschaufeln – erheblich. Im Extremfall können diese zerstört werden [4].

Daher besteht die Notwendigkeit einer verlässlichen Messung der Temperatur der Turbinenkomponenten und des Brenngases am Turbineneingang im Betrieb. Wegen der Rotation der Turbine im Betrieb ist ein berührungsloses Verfahren zur Messung der Bauteiltemperatur von Vorteil, wie es in [6] und [7] vorgestellt wird.

Die heute gebräuchliche Methode zur Messung der Brenngastemperatur besteht in der Platzierung von Thermoelementen direkt im Abgasstrom. Thermoelemente bieten hohe Messgenauigkeiten und Auflösungen. Allerdings stellt sich der wirkliche Messwert stets erst mit einem gewissen Verzug ein, was in Turbinenbetriebsarten mit schnellen Temperaturwechseln ein Nachteil ist. Außerdem reduziert sich die Lebenszeit von Thermoelementen bei hohen Temperaturen erheblich. Bei den extremen Bedingungen im Turbineninneren können daher Teile der Thermoelemente abbrechen und in der Turbine Schaden verursachen. Deshalb wird bisher die Gastemperatur am Turbineneingang in vielen Fällen nicht gemessen [4], [8].

Ein neuer Ansatz mittels Strahlungsthermometrie

Die Entwicklung einer berührungslosen Messtechnik stellt einen neuen Ansatz zur Gastemperaturmessung dar, welcher es unter Verwendung von Infrarotstrahlung ermöglicht, die Brenngastemperatur auch am Turbineneinlass zu messen. Mittels Pyrometrie soll dabei die vom heißen Gas emittierte Strahlung detektiert werden. Das Pyrometer selbst muss dazu nicht im Turbineninneren angebracht und daher nicht den dortigen Bedingungen ausgesetzt werden. Für die Temperaturmessung genügt ein infrarottransparentes Fenster im Turbinengehäuse, das die IR-Strahlung aus dem Inneren zum Pyrometer leitet.

Zur Entwicklung eines Pyrometers für diesen Zweck muss zuerst ein für die Brenngase pas-

sender Wellenlängenbereich bestimmt werden. Das Brenngasgemisch einer Gasturbine besteht im Allgemeinen hauptsächlich aus den in Tab. 1 genannten Gasarten. Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf [4]. Stickstoff und Sauerstoff bilden davon wiederum die größten Anteile. Als zweiatomige Moleküle aus zwei gleichartigen Atomen besitzen sie allerdings kein anregbares Dipolmoment und sind somit infrarotinaktiv, weshalb sie nicht nutzbar für eine Gastemperaturmessung mittels IR-Strahlung sind [9]. Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid sind dagegen infrarotaktiv und somit prinzipiell für die geplanten Temperaturmessungen nutzbar [10].

Tab. 1: *Typische Volumen-Anteile der Hauptbestandteile von Turbinen-Abgasen [4].*

Gas	Volumen-Anteil / %
O ₂	13
N ₂	74
CO ₂	4
H ₂ O	8

Bei der Gastemperaturmessung im Brenngasstrom einer Gasturbine kann es durch die Temperaturunterschiede zwischen dem sehr heißen Turbineninneren und dem gekühlten Gehäuse zur Bildung von Gasschichten unterschiedlicher Temperaturen kommen [4]. Eine Gasschicht mit niedriger Temperatur im Randbereich des Gasstroms kann das Messsignal erheblich beeinflussen [7]. Um diesem Problem zu begegnen und verlässliche Messergebnisse zu erhalten, ist es nötig, Temperaturinformationen aus verschiedenen Gasschichten im Gasstrom zu sammeln.

Abb. 1 zeigt das typische Verhalten einer Absorptionsbande eines infrarotaktiven Gases in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Tiefe der Bande (die mit der Höhe des Absorptionsgrades korreliert) steigt mit steigendem Druck. Bei einem konstanten Druck, bei welchem bereits Sättigung vorliegt, steigt die Breite der Bande mit steigender Temperatur in Folge der Dopplerverbreiterung [11]. Aufgrund dieser Umstände können drei Wellenlängenintervalle im Bereich einer Absorptionsbande benannt werden, wo eine Temperaturmessung jeweils an einer bestimmten Position im Gasstrom möglich ist.

Im Zentrum einer Absorptionsbande (vgl. Abb. 1, grüne Fläche) geht der Transmissionsgrad gegen Null. Strahlung aus dem Turbineninneren wird in dieser Wellenlängenregion vollständig absorbiert, ehe sie einen Sensor außerhalb des Gasstroms erreicht. Im Wellenbereich des Zentrums einer Absorptionsbande kann so-

mit die Gastemperatur am Rand des Gasstroms bestimmt werden, da in diesem Wellenlängenbereich nur von dort Strahlung den Sensor erreicht.

Am Rand der Bande (vgl. Abb. 1, blaue Flächen) hängt der Transmissionsgrad von der Gastemperatur ab. Da somit auch ein gewisser Anteil der Strahlung aus dem Turbineninneren die äußeren Gasschichten passiert und zum Sensor gelangt, können in diesem Wellenlängenbereich Aussagen über die Gastemperatur im Inneren getroffen werden. Abseits einer Absorptionsbande (vgl. Abb. 1, purpurne Flächen) geht der Transmissionsgrad gegen eins – unabhängig von der Gastemperatur. Hier bleibt die Strahlung unbeeinflusst vom Brenngasstrom, wodurch hier Temperaturmessungen an Bauteilen im Turbineninneren möglich sind.

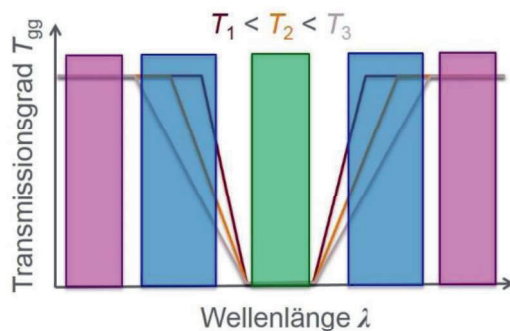


Abb. 1: Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Verlaufs des spektralen Transmissionsgrades im Wellenlängenbereich einer Gas-Absorptionsbande bei konstantem Druck. Markierte Bereiche: 1) Zentrum der Bande, Absorption befindet sich in der Sättigung (grün); 2) Rand der Bande, Transmission ist temperaturabhängig (blau); 3) Region abseits der Bande, keine Absorption vorhanden (purpurn).

Die Positionen der Absorptionsbanden von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf sind seit langem und in hoher Genauigkeit aus der Literatur bekannt, z. B. [12], [13], [14], [15]. Auch können entsprechende Spektren simuliert werden [16]. Abb. 2 zeigt die HITRAN-Simulation des spektralen Transmissionsgrades eines typischen Brenngasgemisches einer stationären Gasturbine (vgl. Tab. 1) mit den entsprechenden Molekülschwingungen (vgl. Tab. 2). Jedoch muss das Verhalten dieser Banden unter Bedingungen wie im Inneren einer Gasturbine noch weitergehend experimentell untersucht werden. Das heißt, die Absorptionsspektren von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf müssen unter entsprechenden Bedingungen verlässlich gemessen werden.

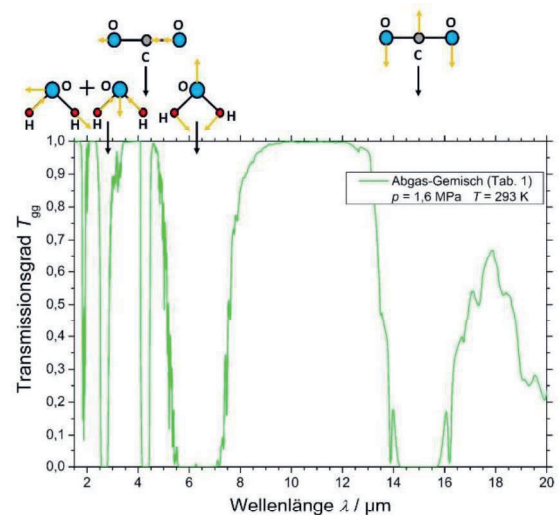


Abb. 2: HITRAN-Simulation [16] des spektralen Transmissionsgrades des Abgas-Gemisches aus Tab. 1 bei Raumtemperatur bei einem Druck von 1600 kPa im Wellenlängenbereich von 1,5 µm bis 20 µm. Den Absorptionsbanden sind die entsprechenden Molekülschwingungen zugeordnet.

Tab. 2: Erwartete Positionen der Molekülschwingungen von CO₂ und H₂O im untersuchten Wellenlängenbereich [10], [17], [18].

Gas	Bande	Position in µm	Bemerkung
CO ₂	v ₁	7,78/7,20	IR-inaktiv
	v ₂	14,99	IR-aktiv
	v ₃	4,26	IR-aktiv
H ₂ O	v ₁	2,73	IR-aktiv
	v ₂	6,27	IR-aktiv
	v ₃	2,66	IR-aktiv

In dieser Arbeit wurde als ersten Schritt das Transmissionsspektrum von Kohlenstoffdioxid im mittleren Infrarotbereich hochaufgelöst unter Turbinenbedingungen gemessen, um so eine Grundlage für die Wahl einer Messwellenlänge für die Gastemperaturmessung zu schaffen.

Messaufbau

In Abb. 3 ist schematisch der hier zur Bestimmung der Gastransmissionsspektren verwendete Messaufbau dargestellt, der aus einem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) und einer Hochtemperatur-Hochdruck-Gaszelle besteht. Im FTIR-Spektrometer wird von einem Globar Infrarotstrahlung emittiert und in ein Michelson-Interferometer geleitet. Dort wird der Strahl geteilt. Ein Teilstrahl fällt auf einen festen, der zweite auf einen beweglichen

Spiegel, wodurch sie jeweils zurück zum Strahlteiler reflektiert werden, wo sie miteinander interferieren. Das resultierende Interferenzbild hängt von der Weglängendifferenz der Teilstrahlen ab [19]. Das Interferenzsignal wird von dort aus durch die Probenkammer und zum Detektor geleitet.

Der Detektor nimmt das Interferenzsignal in Abhängigkeit der momentanen Position des beweglichen Spiegels auf. Das Spektrometer ermittelt aus diesen Daten ein Interferogramm, welches dann durch eine Fourier-Transformation in den Frequenzraum konvertiert wird, woraus die spektrale Intensität resultiert. Durch dieses Verfahren wird zudem jegliche Störstrahlung (auch die Wärmeabstrahlung des Heißgases selbst), die zwischen Interferometer und Detektor in den Strahlengang eingekoppelt wird, eliminiert.

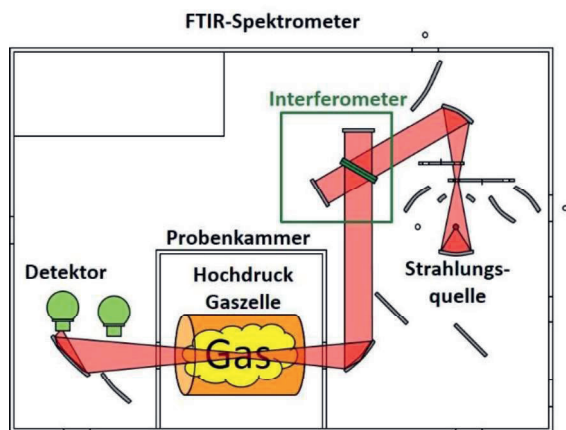


Abb. 3: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung des Transmissionsgrades von heißen Gasen bestehend aus FTIR-Spektrometer und Hochdruck-Gaszelle

Zur Bestimmung des spektralen gerichtet-gerichteten Transmissionsgrades wird zunächst als Referenzmessung die spektrale Intensität bei leerem Strahlengang gemessen. Danach wird die zu analysierende Probe bzw. Gas Mischung in der Probenkammer platziert und die spektrale Intensität erneut gemessen. Der spektrale gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad wird nun als Quotient dieser beiden Einzelmessungen berechnet.

Um das in dieser Arbeit untersuchte gasförmige Kohlenstoffdioxid im Strahlengang zu platzieren, wird eine eigens entwickelte Gaszelle (vgl. Abb. 4) verwendet, welche eine den Turbinenanwendungen ähnliche geometrische Weglänge der Strahlung im Gas von 16 cm aufweist. Die erzielten Ergebnisse können daher gut übertragen werden.

Die Gaszelle kann in der Spektrometer-Probenkammer platziert werden. Sie ermöglicht die Untersuchung von Gasgemischen mit Drücken

zwischen 0 Pa und 1 MPa und kann außerdem elektrisch auf Temperaturen bis 1100 K geheizt werden. Die Zelle kann abhängig von zu untersuchendem Gas und Wellenlängenbereich mit verschiedenen infrarotdurchlässigen Fenstern versehen werden. In dieser Arbeit wurden Fenster aus Kaliumbromid verwendet, welches einen weiten Bereich hohen Transmissionsgrades im NIR- und MIR-Bereich aufweist [20]. Durch eine Temperaturstabilisierung mittels Thermostat werden die Fenster einerseits vor thermischen Schäden geschützt und andererseits wird der mögliche Temperatureinfluss auf die optischen Eigenschaften der Fenster minimiert. Im in dieser Arbeit untersuchten Druckbereich kann die Druckabhängigkeit des Brechungsindex von Kohlenstoffdioxid sowie dessen Einfluss auf den Reflexionsgrad an der Grenzschicht und somit auf die optischen Eigenschaften der Fenster vernachlässigt werden [21].

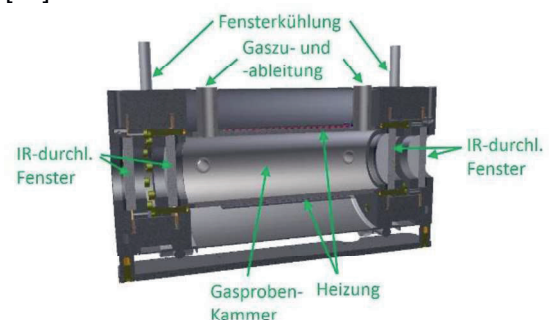


Abb. 4: Schnittdarstellung der elektrisch heizbaren Hochtemperatur-Hochdruck-Gaszelle zur Positionierung von Gas-Proben im FTIR-Spektrometer.

Messergebnisse und Diskussion

Ziel des ersten Versuchs in dieser Arbeit ist es, durch Analyse der Druckabhängigkeit des Verlaufs der einzelnen Absorptionsbanden von Kohlenstoffdioxid Banden zu identifizieren, die unter den Bedingungen beim Turbinenbetrieb in Sättigung sind. Dazu wird der spektrale gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid bei Raumtemperatur und verschiedenen Drücken gemessen.

Zur Charakterisierung von Kohlenstoffdioxid wird die Gaszelle in der Probenkammer des FTIR-Spektrometers platziert und der gesamte Strahlengang evakuiert. Zur Bestimmung eines jeden Transmissionsspektrums werden jeweils drei Einzelmessungen durchgeführt. Als erste davon wird stets bei evakuierter Zelle eine Referenzmessung ausgeführt. Anschließend wird die Zelle bis zu dem gewünschten Druck mit Kohlenstoffdioxid gefüllt und sogleich die spektrale Intensität gemessen. Nun wird die Zelle erneut evakuiert und es folgt eine weitere Referenzmessung.

renzmessung. Aus den beiden Referenzmessungen wird der Mittelwert gebildet, um so mögliche zeitabhängige Drifteffekte im Fenstermaterial zu minimieren. Der spektrale gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad resultiert nun schließlich aus dem Quotienten aus der Probenmessung und der gemittelten Referenzmessung

In Abb. 5 ist der spektrale Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid bei Raumtemperatur und Drücken zwischen 5 kPa und 600 kPa im Wellenlängenbereich von 1,5 μm bis 20 μm dargestellt. Wie erwartet, kann dort jede infrarotaktive Absorptionsbande (vgl. Tab. 2) von Kohlenstoffdioxid beobachtet werden. Darüber hinaus sind in Abb. 5 jedoch noch weitere, in Tab. 2 nicht genannte Banden zu sehen. Dabei handelt es sich um Kombinationsbanden, die aus einer Kombination zweier oder mehrerer fundamentaler Molekülschwingungen hervorgerufen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Bande bei 2,7 μm , die aus den fundamentalen Schwingungen in den Kombinationen $\nu_3 + \nu_1$ und $\nu_3 + 2\nu_2$ (vgl. Tab. 2) besteht [10], [22].

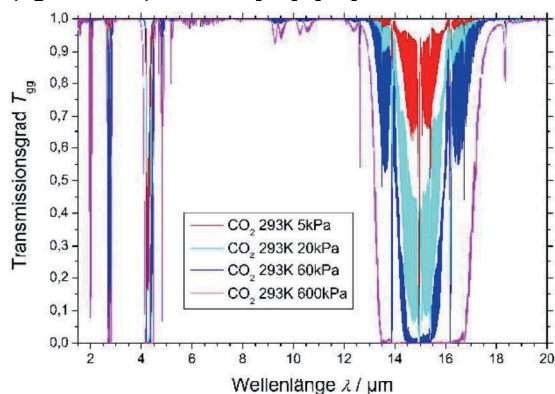


Abb. 5: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 bei Raumtemperatur und bei Drücken von 5 kPa bis 600 kPa im Wellenlängenbereich zwischen 1,5 μm und 20 μm .

Wie weiterhin erwartet, nimmt die Tiefe der Absorptionsbanden mit steigendem Druck zu. Im in dieser Arbeit untersuchten Druckbereich erreichen die drei Banden bei 2,7 μm , 4,26 μm und 14,99 μm Sättigung und erfüllen damit ein wesentliches Kriterium für die Nutzbarkeit für die spätere berührungslose Temperaturmessung.

In Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8 werden die spektralen Bereiche um diese drei Banden unter denselben Bedingungen wie zuvor, jedoch vergrößert gezeigt, um deren Verhalten bei verschiedenen Drücken näher zu betrachten. Abb. 6 zeigt die Bande bei 2,7 μm vergrößert. Es zeigt sich, dass die Absorptionsbande nur in einigen Bereichen überhaupt Sättigung erreicht. Selbst

bei einem Druck von 600 kPa bleiben Bereiche partieller Transmission zurück.

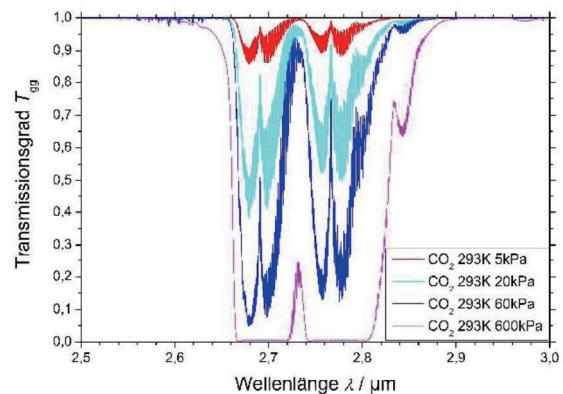


Abb. 6: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 im Wellenlängenbereich von 2,5 μm bis 3,0 μm bei Drücken zwischen 5 kPa und 600 kPa bei Raumtemperatur.

Abb. 7 zeigt den spektralen Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid im Wellenlängenbereich zwischen 3,9 μm und 4,6 μm mit der Absorptionsbande bei 4,26 μm bei Raumtemperatur bei verschiedenen Drücken. Diese Bande ist bereits bei niedrigen Drücken sehr stark und vergrößert sich mit steigendem Druck noch deutlich. Ab einem Druck von 20 kPa ist sie bereits in Sättigung.

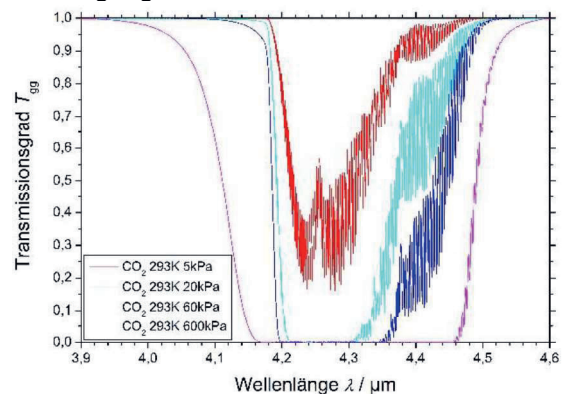


Abb. 7: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 bei Raumtemperatur und Drücken zwischen 5 kPa und 600 kPa im Wellenlängenbereich von 3,9 μm bis 4,6 μm .

In Abb. 8 ist der spektrale Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid im Bereich der Absorptionsbande bei 14,99 μm bei Raumtemperatur und bei Drücken zwischen 5 kPa und 600 kPa dargestellt. Auch hier kann ein Anstieg der Tiefe der Bande mit steigendem Druck beobachtet werden. Der Anstieg ist stärker als bei der Bande bei 2,7 μm aber schwächer als bei der Bande bei 4,26 μm . Sättigung erreicht diese

Bande erst ab einem Kohlenstoffdioxiddruck von 60 kPa.

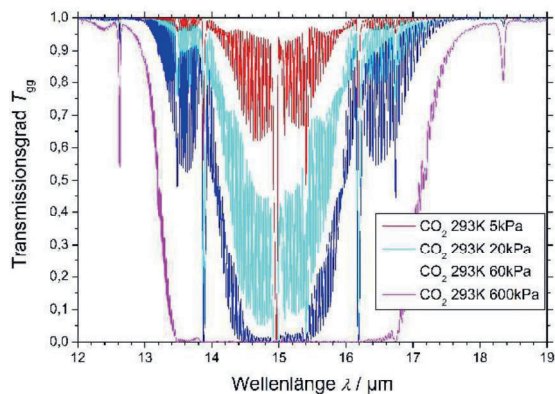


Abb. 8: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 im Wellenlängenbereich von $12\ \mu\text{m}$ bis $19,5\ \mu\text{m}$ bei Raumtemperatur und Drücken zwischen $5\ \text{kPa}$ und $600\ \text{kPa}$.

Bei Raumtemperatur erscheint daher die Kohlenstoffdioxidbande bei $4,26\ \mu\text{m}$ von den Untersuchten am passendsten. Bei geometrischen Weglängen in der Endanwendung von mindestens der der Gaszelle kann auch die Bande bei $14,99\ \mu\text{m}$ genügen.

Neben der Druckabhängigkeit beeinflusst jedoch auch das Verhalten einer Bande bei hohen Temperaturen ihre Nutzbarkeit für berührungslose Temperaturmessungen. Deshalb wird im nächsten Schritt die Temperaturabhängigkeit des spektralen gerichtet-gerichteten Transmissionsgrades von Kohlenstoffdioxid bei dem in Turbinenbrenngasen üblichen Partialdruck von $60\ \text{kPa}$ untersucht.

In Abb. 9 wird der spektrale gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid im Wellenlängenbereich zwischen $1,5\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ und bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$ gezeigt. Wie erwartet, nimmt die Breite der Banden mit steigender Temperatur zu. Zur näheren Betrachtung sind die Banden bei $4,26\ \mu\text{m}$ und $14,99\ \mu\text{m}$ in Abb. 10 und Abb. 11 erneut vergrößert dargestellt.

In Abb. 10 ist der spektrale Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid im Wellenlängenbereich zwischen $4,1\ \mu\text{m}$ und $4,8\ \mu\text{m}$ dargestellt. Die Absorptionsbande bei $4,26\ \mu\text{m}$ ist hier vergrößert dargestellt bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ und bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$. Die Breite der Bande zeigt eine starke Zunahme mit steigender Temperatur. Sie ist bei diesem Druck bei allen untersuchten Temperaturen klar in Sättigung, was hinsichtlich der Temperaturmessung von Vorteil ist.

Abb. 11 zeigt die Kohlenstoffdioxidbande bei $14,99\ \mu\text{m}$ vergrößert im Wellenlängenbereich zwischen $12\ \mu\text{m}$ und $19\ \mu\text{m}$. Wie zuvor ist der

spektrale Transmissionsgrad bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ und bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$ dargestellt. Auch hier zeigt sich eine Zunahme der Breite der Bande mit steigender Temperatur. Allerdings ist die Zunahme weniger deutlich als bei der Bande bei $4,26\ \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 10).

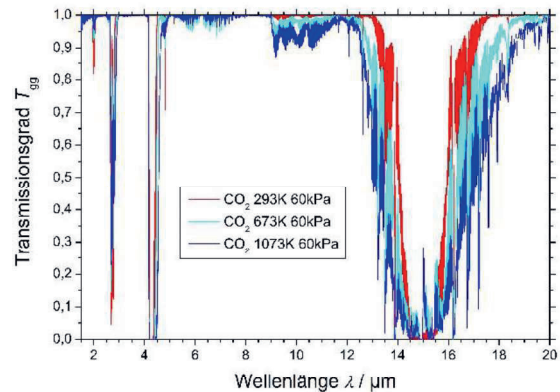


Abb. 9: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ und Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$ im Wellenlängenbereich von $1,5\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$.

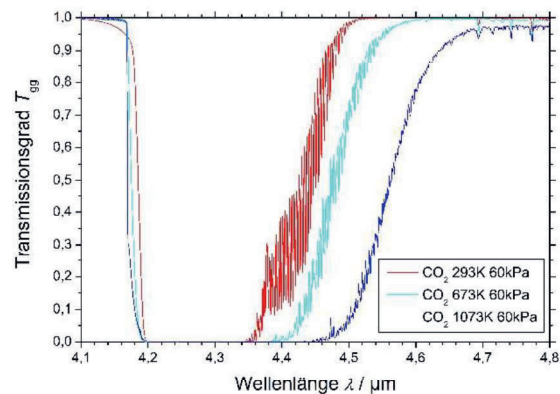


Abb. 10: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$, bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ im Wellenlängenbereich von $4,1\ \mu\text{m}$ bis $4,8\ \mu\text{m}$.

Die Kohlenstoffdioxidbande bei $4,26\ \mu\text{m}$ ist daher unter den hier untersuchten Banden die für die berührungslose Temperaturmessung geeignetste. Das Zentrum der Bande ist bereits bei niedrigen Partialdrücken in Sättigung und die Breite der Bande zeigt einen starken Anstieg mit steigender Temperatur. Wie bereits erwähnt sind diese beiden Eigenschaften besonders bedeutend für die geplante Temperaturmessmethode.

Ein weiterer Vorteil wird in Abb. 12 deutlich, wo diese Absorptionsbande bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$ und bei ihrem niedrigsten Sättigungsdruck – $20\ \text{kPa}$ –

gezeigt wird. Selbst bei diesem niedrigen Druck zeigt die Breite der Bande nahezu den gleichen Anstieg mit steigender Temperatur. Es existiert somit ein weiterer Bereich von Kohlenstoffdioxidpartialdrücken und von geometrischen Weglängen, in welchem Temperaturmessungen möglich erscheinen.

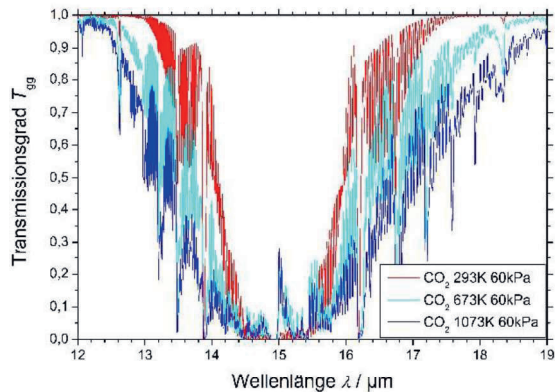


Abb. 11: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 im Wellenlängenbereich von $12\ \mu\text{m}$ bis $19\ \mu\text{m}$ bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ und Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$.

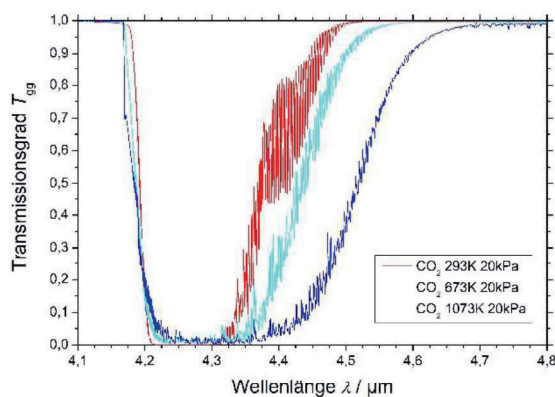


Abb. 12: Spektraler Transmissionsgrad von CO_2 bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und $1073\ \text{K}$, bei einem Druck von $20\ \text{kPa}$ im Wellenlängenbereich von $4,1\ \mu\text{m}$ bis $4,8\ \mu\text{m}$.

Die letztliche Wahl der exakten Messwellenlängenbereiche hängt von Parametern wie geometrischer Weglänge und Kohlenstoffdioxidpartialdruck im konkreten Anwendungsfall ab. Wie oben erläutert, wird für die Gastemperaturmessung in der äußeren Schicht eines Gasstroms ein Wellenlängenbereich benötigt, in welchem die Absorptionsbande in Sättigung ist. Für diesen Zweck kann somit ein Wellenlängenbereich etwa in der Region zwischen $4,20\ \mu\text{m}$ und $4,35\ \mu\text{m}$ gewählt werden. Für die Gastemperaturmessung an inneren Gasschichten des Brenngasstroms wird dagegen ein Wellenlängenbereich benötigt, in welchem der Verlauf

des spektralen Transmissionsgrades von der Gastemperatur abhängt. Für diese Art der Messung kann daher ein Wellenlängenbereich in der Region des langwelligen Randes der Bande, etwa zwischen $4,35\ \mu\text{m}$ und $4,65\ \mu\text{m}$ gewählt werden.

Um die erzielten Ergebnisse zu verifizieren, wurden diese schließlich noch mit entsprechenden HITRAN-Simulationen verglichen. Die HITRAN-Datenbank beinhaltet eine Sammlung von hochaufgelösten linienbasierten Spektren bzgl. der Absorptionskoeffizienten einer großen Menge verschiedener Gase [23], [24], [25]. Die hier gezeigten Simulationen des spektralen Transmissionsgrades wurden mittels des Systems „HITRAN on the web“ erstellt [16]. Dieses simuliert das Transmissionsspektrum eines bestimmten Gases für ein zuvor gewähltes Parameterset, bestehend z. B. aus Temperatur, Druck und geometrischer Weglänge auf Grundlage der HITRAN-Datenbank [26].

Abb. 13 zeigt den Vergleich des gemessenen spektralen Transmissionsgrades von Kohlenstoffdioxid bei Raumtemperatur und bei einem Druck von $60\ \text{kPa}$ mit einer entsprechenden HITRAN-Simulation im Wellenlängenbereich von $4,1\ \mu\text{m}$ bis $4,8\ \mu\text{m}$. Das gemessene Spektrum ist als blaue Linie und die Simulation in grün dargestellt. Im gesamten untersuchten Wellenlängenbereich kann eine gute Übereinstimmung beobachtet werden. Abweichungen zwischen Simulation und Messung bei höheren Temperaturen zeigen jedoch die Notwendigkeit der Erhebung von experimentellen Daten.

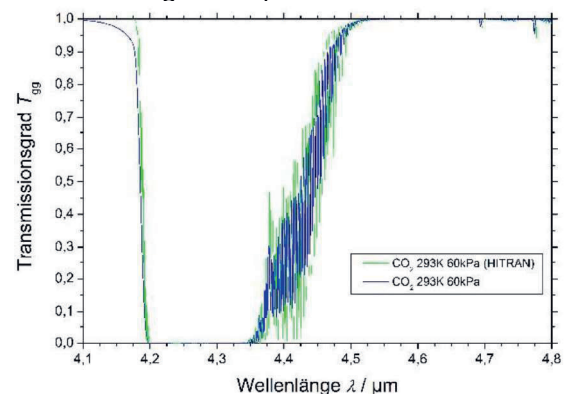


Abb. 13: Vergleich einer HITRAN-Simulation [16] (grün) mit der entsprechenden Messung des spektralen Transmissionsgrades (blau) von CO_2 im Wellenlängenbereich zwischen $4,1\ \mu\text{m}$ und $4,8\ \mu\text{m}$ bei Raumtemperatur und einem Druck von $60\ \text{kPa}$.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die Entwicklung einer neuen berührungslosen Methode der Brenngastemperaturmessung in arbeitenden stationären Gasturbinen sind

einige Vorarbeiten nötig. Das Ziel dieser Arbeit war es daher, eine für diese Messung geeignete Absorptionsbande des Kohlenstoffdioxids zu identifizieren.

Um entsprechende Wellenlängenregionen auszuwählen, wurde der spektrale gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad von Kohlenstoffdioxid im Wellenlängenbereich zwischen 1,5 µm und 20 µm gemessen. Dabei wurden Kohlenstoffdioxidrucke zwischen 5 kPa und 600 kPa und Gastemperaturen zwischen Raumtemperatur und 1073 K untersucht. Die Messergebnisse wurden durch entsprechende HITRAN-Simulationen verifiziert. Als Folge dieser Experimente konnte die Kohlenstoffdioxidbande bei 4,26 µm für künftige Gastemperaturmessungen gewählt werden. Insbesondere ist die Wellenlängenregion zwischen 4,20 µm und 4,35 µm im Zentrum der Bande für Temperaturmessungen in äußeren Schichten eines Brenngasstroms geeignet während die Region zwischen 4,35 µm und 4,65 µm für Messungen im Inneren des Gasstroms genutzt werden können.

Die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung der neuen berührungslosen Methode zur Brenngastemperaturmessung werden der Entwurf eines Pyrometers für die oben definierten Wellenlängenbereiche und die Durchführung von Testmessungen im Labor sowie danach in einer arbeitenden Gasturbine sein.

Ein weiteres wichtiges Ziel künftiger Arbeiten in diesem Bereich besteht im Aufnehmen zusätzlicher experimenteller Transmissionsspektren z. B. von Wasserdampf, dem zweiten infrarot-aktiven Bestandteil der Turbinenbrenngase, zur Identifizierung möglicher weiterer nutzbarer Messwellenlängenbereiche. Darüber hinaus sollen auch Transmissionsspektren beider infrarotaktiver Gase (Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid) in Kombination mit den übrigen Verbrennungsgasen (vgl. Tab. 1) untersucht werden, um die Transmissionsgrade unter den realen Anwendungsbedingungen zu ermitteln und um mögliche Einflüsse des Gesamtdrucks und der Gesamtteilchenzahl auf die Absorptionsbanden zu erfassen.

Literaturnachweis

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2017*, Paris: IEA Publications (2017)
- [2] Siemens, <https://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/2016/power-gas/pr2016010135pgde.htm> (18.10.2018)
- [3] N. Armaroli, V. Balzani, *Energy & Environmental Science* 4, 3193-3222 (2011); doi: 10.1039/C1EE01249E
- [4] C. Lechner, J. Seume, *Stationäre Gasturbinen*, Berlin: Springer Verlag (2010); doi: 10.1007/978-3-540-92788-4
- [5] J. H. Perepezko, *Science* 326, 1068-1069 (2009); doi: 10.1126/science.1179327
- [6] J. Manara, M. Zipf, T. Stark, M. Arduini, H.-P. Ebert, A. Tutschke, A. Hallam, J. Hanspal, M. Langley, D. Hodge, J. Hartmann, *Infrared Physics & Technology* 80, 120-130 (2017); doi: 10.1016/j.infrared.2016.11.014
- [7] M. Zipf, J. Manara, T. Stark, M. Arduini, H.-P. Ebert, J. Hartmann, *High Temperatures High Pressures* 47, 3-21 (2018)
- [8] F. Bernhard, *Handbuch der technischen Temperaturmessung* 2nd Edition, Berlin: Springer Verlag (2014); doi: 10.1007/978-3-642-24506-0
- [9] H. Haken, H. C. Wolf, *Molekülphysik und Quantenchemie* 5th Edition, Berlin: Springer Verlag (2006); doi: 10.1007/3-540-30315-4
- [10] H. Günzler, H.-U. Gremlich, *IR-Spektroskopie – Eine Einführung* 4th Edition, Weinheim: Wiley-VCH (2003); doi: 10.1002/9783527662852
- [11] W. Demtröder, *Experimentalphysik 3 – Atome, Moleküle und Festkörper* 5th Edition, Berlin: Springer Verlag (2010); doi: 10.1007/978-3-642-03911-9
- [12] J. M. Flaud, C. Camy-Peyret, *Molecular Physics* 26, 811-823 (1973); doi: 10.1080/00268977300102121
- [13] P. Varanasi, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 40, 169-157 (1988); doi: 10.1016/0022-4073(88)90110-0
- [14] C. P. Rinsland et. al., *NASA Technical Memorandum* 85764, 1-467 (1984)
- [15] R. Paso, J. Kauppinen, R. Anttila, *Journal of Molecular Spectroscopy* 79, 236-253 (1980); doi: 10.1016/0022-2852(80)90304-5
- [16] Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CFA), Cambridge, MA, USA, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IAO), Tomsk, Russia, <http://hitran.iao.ru/> (30.01.2019)
- [17] J. T. Houghton, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 117, 29-58 (2013); doi: 10.1002/qj.49709540302
- [18] J. Tennyson et. al., *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 117, 29-58 (2013); doi: 10.1016/j.jqsrt.2012.10.002
- [19] P. R. Griffiths, J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry* 2nd Edition, Hoboken: John Wiley & Sons (2007); doi: 10.1002/047010631X
- [20] Korth Kristalle GmbH, <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/15.html> (06.02.2019)
- [21] A. Michels, J. Hamers C.s.s.R., *Physica* 4, 995-1006 (1937); doi: 10.1016/S0031-8914(37)80197-4
- [22] P. E. Martin, E. F. Barker, *Physical Review* 41, 291-303 (1932); doi: 10.1103/PhysRev.41.291
- [23] R. A. McClatchey et. al., *AFCRL Environmental Research Papers* 434 (1973)
- [24] L. S. Rothman et. al., *Applied Optics* 26, 4058-4097 (1987); doi: 10.1364/AO.26.004058
- [25] I. E. Gordon et. al., *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 203, 3-69 (2017); doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038
- [26] Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CFA), Cambridge, MA, USA, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IAO), Tomsk, Russia., <http://hitran.iao.ru/home.sim-theory> (30.01.2019)