

Temperaturmessung

Teil 2: Rayleigh- und Raman-Streuung

DIN
51866-2

ICS 17.200.01

Temperature measurement – Part 2: Rayleigh and Raman scattering

Mesurage de la température – Partie 2: Dispersion de Rayleigh et Raman

Vorwort

Die vorliegende Norm wurde vom Arbeitskreis „Temperaturmessung in heißen, reaktiven Gasen“ des Arbeitsausschusses NMP 571/FABERG „Anforderungen an und Prüfung von Brenngasen“ ausgearbeitet.

DIN 51866 „Temperaturmessung“ besteht aus:

- Teil 1: Übersicht über laserspektroskopische Verfahren;
- Teil 2: Rayleigh- und Raman-Streuung.

Der Anhang A ist informativ.

Einleitung

Die physikalische Grundlage für beide Messverfahren, Rayleigh-Streuung und Raman-Streuung, ist die Streuung von Photonen an Molekülen, wie sie bei der Einstrahlung von Photonen aus einer Lichtquelle (z. B. Laser) in ein gasförmiges Medium beobachtet wird. Bei Streuung des Lichts bei der gleichen Wellenlänge, wie sie eingestrahlt wurde (elastische Streuung), spricht man von Rayleigh-Streuung. Wird die Streustrahlung bei einer gegenüber der eingestrahnten Wellenlänge verschobenen Wellenlänge beobachtet (inelastische Streuung), handelt es sich um Raman-Streuung. Beide Prozesse können zur Temperaturbestimmung in Gasen verwendet werden. Dabei haben sie als optische Verfahren besondere Eigenschaften, nämlich:

- berührungsfrei, d. h. ohne Rückwirkung auf das Messobjekt,
- hohe räumliche Auflösung, durch Fokussierung des Lasers bzw. Ortsauflösung des Detektors,
- zeitliche Auflösung, bei Verwendung gepulster Laserlichtquellen und Einzelpulstechnik.

Verfahrensspezifische Vorteile:

Beide Verfahren erfordern eine Laserlichtquelle mit (im Prinzip) beliebiger Wellenlänge, also keine Abstimmbarkeit der Lichtquelle. Spezielle Raman-Verfahren sind selbstkalibrierend.

Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Verfahren nicht generell unter allen beliebigen Versuchsbedingungen angewandt werden können. Vielmehr bedarf es im Vorfeld einer genauen Analyse der experimentellen Parameter, um eine Auswahl des Messverfahrens zu treffen und optimale Ergebnisse zu erzielen.

Für den Einsatz der Rayleigh-Streuung spricht der einfache experimentelle Aufbau, während Raman-Streuung auch in Messsituationen einsetzbar ist, in denen die Gaszusammensetzung stark schwankt.

Fortsetzung Seite 2 bis 8

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Rayleigh-Streuung

Bei der Rayleigh-Streuung wird die Intensität des gestreuten Lichts (Messsignal) durch die Anzahl der im Messvolumen vorhandenen Moleküle bestimmt. Das Messsignal ist somit proportional zur Dichte des untersuchten Gases. Aus der Dichte eines Gases lässt sich bei bekanntem Druck die Temperatur bestimmen. Die Rayleigh-Streuung erfolgt unabhängig von molekularen Resonanzen. Bei Einstrahlung einer beliebigen Lichtwellenlänge tragen alle im Messvolumen beleuchteten Moleküle zum Messsignal bei, allerdings mit molekülspezifischen Streuquerschnitten. Für genaue Temperaturmessungen muss daher die Gaszusammensetzung bekannt sein und bei der Messsignalauswertung berücksichtigt werden. Da die Rayleigh-Streuquerschnitte umgekehrt proportional zur 4. Potenz der eingestrahlten Frequenz des Anregungslichts sind, nehmen die Signalintensitäten bei Anregung im kurzwelligen Spektralbereich zu. Das Messsignal wird resonant mit der Anregungswellenlänge beobachtet. Streulicht, hervorgerufen durch Reflexionen an Fenstern, Gehäusewänden, usw., oder Streulicht von Partikeln im Gasvolumen (Mie-Streuung) kann eine schwerwiegende Verfälschung des Messsignals und damit der zu bestimmenden Temperatur verursachen (siehe [1]).

Raman-Streuung

Bei der spontanen Raman-Streuung (kurz: Raman-Streuung) wird die Intensität des gestreuten Lichts (Messsignal) durch die Anzahl der im Messvolumen vorhandenen Moleküle bestimmt, jedoch werden die Messsignale bei unterschiedlichen, molekülspezifischen Wellenlängen beobachtet. Zur Anregung kann ebenfalls eine (im Grundsatz) beliebige Lichtwellenlänge benutzt werden. Es sollte aber eine molekülresonante Anregung vermieden werden. Aufgrund der sehr niedrigen Raman-Streuquerschnitte, die auch hier mit der 4. Potenz der Frequenz der Anregungswellenlänge zunehmen, empfiehlt sich jedoch die Verwendung von Laserlichtquellen, die im kurzwelligen bis tiefen UV-Bereich emittieren.

Die Temperaturbestimmung mit Raman-Streuung kann nach zwei Methoden geschehen:

- aus der Gesamtdichte bei konstantem Druck im Messvolumen, indem die mit Raman-Streuung simultan bestimmten Molenbrüche aller im Messvolumen vorhandenen Gasarten ausgewertet werden (siehe [2]),

und

- aus der Bestimmung der Besetzungsdichten molekularer Energiezustände, deren Besetzung im thermodynamischen Gleichgewicht eine eindeutige Funktion der Temperatur ist (Boltzmann-Besetzung) (siehe [3]).

Bei der letztgenannten Methode können verschiedene spektrale Übergänge zur Temperaturbestimmung herangezogen werden, nämlich:

- das reine Rotations-Spektrum (siehe [4])

und

- das Rotations-Schwingungs-Spektrum (siehe [5]).

Dabei liefert das Rotations-Schwingungs-Spektrum die gewünschte Temperaturinformation aus der spektralen Struktur [5] oder aus dem Verhältnis der integrierten Intensitäten der Stokes- und anti-Stokes-Übergänge (siehe [6]). Diese unterschiedlichen Varianten stellen unterschiedliche Anforderungen an die apparative Anordnung, z. B. hinsichtlich der spektralen Auflösung. Als Indikatormoleküle eignen sich bevorzugt zweiatomige Gase wie N_2 , O_2 und H_2 , in Verbrennungssystemen in erster Linie N_2 .

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gibt die Vorschriften für die Laserspektroskopische Temperaturmessung mittels Rayleigh- oder Raman-Streuung in heißen, reaktiven Gasen. Als erprobten Druckbereich lässt sich 0,1 MPa bis 4,0 MPa angeben. Beide Messverfahren sind für den Einsatz im Temperaturbereich von 300 K bis 3 000 K erprobt. Durch geeignete Wahl des Lasersystems kann sowohl eine hohe zeitliche als auch räumliche Auflösung erreicht werden. Während die Raman-Streuung auf punktförmige oder eindimensionale Messungen beschränkt ist, lassen sich mit Hilfe der Rayleigh-Streuung auch zweidimensionale Temperaturverteilungen im Einzelpulsverfahren messen. Allerdings sind den Verfahren Grenzen ihrer Genauigkeit und Anwendbarkeit gesetzt durch niedrige Signalintensitäten bei geringen (Partial-) Gasdrücken. Bei der Raman-Streuung muss die Querempfindlichkeit gegenüber gleichzeitig induziertem Fluoreszenzlicht berücksichtigt werden; im Falle der Rayleigh-Streuung kann dies insbesondere bei hohen Temperaturen zu Verfälschungen des Messsignales führen.

Zudem wird bei der Rayleigh-Streuung ein bekannter oder in-situ bestimmbarer Streuquerschnitt vorausgesetzt. Insbesondere die Temperaturmessung durch Rayleigh-Streuung ist empfindlich gegenüber Reflexionen von Wänden oder Partikeln. Beide Verfahren sind anfällig gegenüber starkem Streulicht, verursacht durch Partikel, wie Staub oder Ruß.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN 51866-1:2000-04, *Temperaturmessung – Teil 1: Übersicht über laserspektroskopische Verfahren*.

3 Begriffe, Abkürzungen und Kurzzeichen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die in DIN 51866-1 angegebenen und die folgenden Begriffe:

3.1.1

Raman-Verschiebung

molekülspezifische spektrale Verschiebung des Messsignals gegenüber der Anregungswellenlänge, gemessen in Wellenzahlen (inverse Wellenlänge, in cm^{-1})

3.1.2

Stokes-Raman-Verschiebung

spektrale Verschiebung des Messsignals gegenüber der Anregungswellenlänge um den Betrag der Raman-Verschiebung zu längeren Wellenlängen

3.1.3

anti-Stokes-Raman-Verschiebung

spektrale Verschiebung des Messsignals gegenüber der Anregungswellenlänge um den Betrag der Raman-Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen

3.2 Abkürzungen und Kurzzeichen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Abkürzungen und Kurzzeichen nach DIN 51866-1.

4 Kurzbeschreibung der Verfahren

4.1 Rayleigh-Streuung

Zur Anregung der Rayleigh-Streuung werden bevorzugt Festfrequenzlaser verwendet, wie frequenzvervielfachte Nd:YAG-Laser bei den Wellenlängen 532 nm, 355 nm und 266 nm oder Excimer-Laser, die bei 193 nm, 248 nm, 308 nm oder 351 nm emittieren. Die Laserstrahlung mit typischen Pulsdauern von 10 ns wird über eine Optik in das Untersuchungsvolumen eingekoppelt. Je nach Anwendungsfall kann fokussiert werden (punktförmige Auflösung) oder das Messsignal längs des Laserstrahls beobachtet werden (1D-Auflösung). Rayleigh-Streuung eignet sich aber auch besonders für flächenhafte Messungen (2D-Anordnung), wobei dann der Laserstrahl über eine Zylinderoptik zu einem Lichtband geformt wird. Üblicherweise wird das Rayleigh-Signal unter einem Winkel von 90° beobachtet. Eine Optik bildet das Messvolumen auf einen Detektor (Photomultiplier oder CCD-Kamera) ab, wobei entsprechende Filter verwendet werden, um unerwünschtes Streulicht aus anderen Wellenlängenbereichen (z. B. Eigenleuchten einer Flamme) auszublenden. Ein Rechner dient zur Steuerung des Lasers, zur Synchronisation des Lasers mit instationären Vorgängen des Messobjekts, für die Aufnahme der Messdaten und ihre Auswertung, wobei üblicherweise problemorientierte Auswerteprogramme verwendet werden.

4.2 Raman-Streuung

Das Prinzip einer Raman-Messung ist weitgehend identisch mit dem einer Rayleigh-Messung. Die Anregung erfolgt mit den gleichen Lasersystemen. Da bei der Raman-Streuung das Messsignal jedoch molekulartabhängig spektral verschoben (Raman-Verschiebung) beobachtet wird, erfordert die Raman-Messung in einem Gasgemisch die spektrale Trennung der Messsignale durch ein Spektrometer vor dem Detektor. In einfachen Gasgemischen (2 bis 3 Komponenten) können anstelle des Spektrometers schmalbandige Interferenzfilter eingesetzt werden. Photomultiplier oder CCD-Kameras mit Bildverstärker werden zur Signalerfassung verwendet. Aufgrund der sehr niedrigen Raman-Streuquerschnitte können 2D-Messungen mit diesem Verfahren nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden, z. B. bei hohen Dichten. Im Gegensatz zum Rayleigh-Verfahren liefert eine Raman-Messung eine spektral aufgelöste Information, die entsprechende Routinen zur Datenauswertung erfordert.