

Dipl.-Ing. Thorsten Klos, Bruchköbel

**Eindimensionale-  
Multikomponenten-  
Raman-Streuung  
zur Messung  
charakteristischer  
Turbulenzeigenschaften**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik Nr. **692**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Turbulente Strömungen</b>	<b>5</b>
2.1	Phänomenologische Beschreibung turbulenter Strömungen . . . . .	5
2.1.1	Klassifikation der Turbulenz . . . . .	6
2.1.2	Wirbelbewegung . . . . .	6
2.1.3	Intermittenz . . . . .	7
2.1.4	Kohärente Strukturen . . . . .	7
2.2	Reynolds- und Favre-Mittelung . . . . .	8
2.3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen . . . . .	9
2.3.1	Eindimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen . . . . .	10
2.3.2	Mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen . . . . .	11
2.4	Statistische Kennwerte . . . . .	12
2.4.1	Momente einer Verteilung . . . . .	12
2.4.2	Turbulenzintensitäten . . . . .	13
2.4.3	Korrelationen . . . . .	13
2.4.3.1	Punktkorrelationen . . . . .	14
2.4.3.2	Zeitkorrelationen . . . . .	14
2.4.3.3	Ortskorrelationen . . . . .	16
2.5	Turbulentes Energiespektrum . . . . .	18
2.6	Dimensionslose Kennzahlen . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Modellierung turbulenter reaktiver Strömungen</b>	<b>24</b>
3.1	Chemische Quellterme . . . . .	24
3.2	Erhaltungsgleichungen . . . . .	28
3.2.1	Navier-Stokes-Bewegungsgleichung . . . . .	28
3.2.2	Massenbilanz . . . . .	29
3.2.3	Energiebilanz . . . . .	31
3.3	Mittelung der Grundgleichungen . . . . .	32
3.4	Modellierung von Korrelationen und höheren Momenten . . . . .	33
3.5	PDF Modellierung . . . . .	35
3.6	Lösungsverfahren . . . . .	37

<b>4 Spontane Raman Streuung</b>	<b>40</b>
4.1 Lichtstreuung durch Moleküle . . . . .	41
4.2 Raman Aktivität von Molekülen . . . . .	42
4.3 Energiezustände und Auswahlregeln . . . . .	44
4.3.1 Rotationsübergänge . . . . .	46
4.3.2 Schwingungsübergänge . . . . .	47
4.4 Signalstärke . . . . .	48
4.5 Raman Schwingungsspektroskopie zur Untersuchung von Verbrennungsprozessen . . . . .	51
<b>5 Experimentelle Grundlagen</b>	<b>54</b>
5.1 Meßprinzip . . . . .	54
5.1.1 Ein-Punkt- und eindimensionale SRS . . . . .	54
5.1.2 Isotherme und reaktive Strömungen . . . . .	56
5.2 Meßstand . . . . .	57
5.2.1 Laborbrenner . . . . .	58
5.2.2 Linearverstelleinrichtung . . . . .	60
5.2.3 Gasdosierung . . . . .	62
5.3 Anregung der SRS . . . . .	62
5.3.1 Excimer-Laser . . . . .	62
5.3.2 Nd-YAG-Laser . . . . .	63
5.4 Detektion der SRS . . . . .	63
5.4.1 Abbildungsoptik . . . . .	63
5.4.2 Gitterspektrograph . . . . .	64
5.4.3 2-dimensionale CCD-Kamera . . . . .	65
5.4.4 Schaltbild der Meßapparatur . . . . .	66
5.4.5 Effizienz der Meßapparatur . . . . .	67
5.5 Datenauswertung . . . . .	69
5.5.1 Kalibrierung . . . . .	69
5.5.2 Basisliniensubtraktion . . . . .	71
5.5.3 Ermittlung statistischer Kenngrößen . . . . .	74
5.6 Fehlerdiskussion . . . . .	75
5.6.1 Güte der Molenbruchbestimmung . . . . .	75
5.6.2 Güte der Temperaturbestimmung . . . . .	77
5.6.3 Güte der statistischen Kennwerte . . . . .	78
5.6.4 Örtliche Auflösung . . . . .	79
5.6.5 Zeitliche Auflösung . . . . .	81
5.6.6 Positionierungsfehler . . . . .	81
5.6.7 Abbildungsfehler . . . . .	82
<b>6 Versuchsergebnisse</b>	<b>84</b>
6.1 Versuchsbedingungen . . . . .	84
6.2 Gegenstrom . . . . .	86
6.2.1 Binäres Stoffsystem bei kleinem Abstand . . . . .	88
6.2.1.1 Mittelwerte . . . . .	88

6.2.1.2	Eindimensionale PDFs . . . . .	90
6.2.1.3	Schwankungsgrößen . . . . .	92
6.2.2	Binäres Stoffsystem bei großem Abstand . . . . .	94
6.2.2.1	Mittelwerte . . . . .	94
6.2.2.2	Eindimensionale PDFs . . . . .	97
6.2.3	Ternäres Stoffsystem . . . . .	99
6.2.3.1	Mittelwerte . . . . .	99
6.2.3.2	Schwankungsgrößen . . . . .	102
6.2.3.3	Ortskorrelationen . . . . .	104
6.2.3.4	Turbulente Makrolängen . . . . .	107
6.3	Freistrah . . . . .	109
6.3.1	Mittelwerte . . . . .	109
6.3.2	Eindimensionale PDFs . . . . .	113
6.3.3	Turbulente Makrolängen . . . . .	115
6.4	Freistrah mit Ringströmung . . . . .	121
6.4.1	Isotherme Strömung . . . . .	121
6.4.1.1	Mittelwerte . . . . .	122
6.4.1.2	Zweidimensionale PDFs . . . . .	125
6.4.1.3	Ortskorrelationen . . . . .	128
6.4.1.4	Turbulente Makrolängen . . . . .	132
6.4.2	Reaktive Strömung . . . . .	136
6.4.2.1	Mittelwerte . . . . .	136
6.4.2.2	Zweidimensionale PDFs . . . . .	147
6.4.2.3	Schwankungsgrößen . . . . .	150
6.4.2.4	Punktkorrelationen . . . . .	153
6.4.2.5	Ortskorrelationen . . . . .	156
6.4.2.6	Turbulente Makrolängen . . . . .	158
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>162</b>
<b>A</b>	<b>Laborbrenner und Linearverstelleinheit</b>	<b>165</b>
<b>B</b>	<b>Aufbau der CCD-Kamera</b>	<b>178</b>
<b>C</b>	<b>Entauschen spektraler Daten</b>	<b>180</b>
<b>D</b>	<b>Weitere Versuchsergebnisse</b>	<b>184</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>191</b>