

Dipl.-Ing. Peter Wulf, Dietzenbach

# **Untersuchungen zum laminar-turbulenten Übergang im konzentrischen Kugelspalt**

Reihe **7**: Strömungstechnik

Nr. **333**

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                        | Seite     |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Problemstellung .....                                              | 3         |
| 1.2 Zielsetzung .....                                                  | 4         |
| <b>2. Stand der Forschung</b>                                          | <b>5</b>  |
| 2.1 Konzentrische Kugelspaltströmung .....                             | 5         |
| 2.1.1 Grundgleichungen .....                                           | 6         |
| 2.1.2 Literaturübersicht .....                                         | 7         |
| <b>3. Zeitreihenanalyse experimenteller Daten</b>                      | <b>14</b> |
| 3.1 Grundlagen der Theorie dynamischer Systeme .....                   | 14        |
| 3.1.1 Dynamisches System, Zustandsraum, Phasenfluß, Flußabbildung .... | 14        |
| 3.1.2 Poincaré-Abbildung .....                                         | 16        |
| 3.1.3 Dissipation und Attraktoren .....                                | 17        |
| 3.1.4 Ergodenhypothese und invariantes Wahrscheinlichkeitsmaß .....    | 19        |
| 3.2 Lineare Analysemethoden .....                                      | 20        |
| 3.2.1 Zeitserien .....                                                 | 20        |
| 3.2.2 Fourierspektren .....                                            | 21        |
| 3.2.3 Autokorrelationsfunktion .....                                   | 22        |
| 3.3 Rekonstruktion des Zustandsraums .....                             | 23        |
| 3.4 Ermittlung optimaler Einbettungsparameter .....                    | 26        |
| 3.4.1 Füllfaktorbestimmung .....                                       | 27        |
| 3.4.2 Integrale Lokale Deformation (ILD) .....                         | 30        |
| 3.4.3 Singulärwertzerlegung .....                                      | 33        |
| 3.5 Quantitative Charakterisierung von Attraktoren .....               | 36        |
| 3.5.1 Lyapunov-Exponenten .....                                        | 36        |
| 3.5.2 Fraktale Dimensionen .....                                       | 44        |
| 3.5.3 Entropien .....                                                  | 52        |
| 3.5.4 Recurrence-Plots .....                                           | 54        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6 Verzweigungstheorie .....                                            | 57         |
| 3.6.1 Verzweigungstypen .....                                            | 57         |
| 3.6.2 Routen ins Chaos .....                                             | 62         |
| 3.6.3 Experimentelle Methoden .....                                      | 63         |
| 3.7 Filterung experimenteller Zeitserien .....                           | 66         |
| 3.7.1 Diskretisierung der Zeitserie .....                                | 66         |
| 3.7.2 Filterverfahren .....                                              | 67         |
| <b>4. Das konzentrische Kugelspaltexperiment</b> .....                   | <b>71</b>  |
| 4.1 Mechanischer Aufbau .....                                            | 71         |
| 4.2 Sensorik und Regelung .....                                          | 73         |
| 4.3 LDA-Meßtechnik .....                                                 | 77         |
| 4.4 Strömungssichtbarmachung und Bildverarbeitung .....                  | 80         |
| <b>5. Experimentelle Untersuchungen</b> .....                            | <b>81</b>  |
| 5.1 Laminar-turbulenter Umschlag beim konzentrischen Zylinderspalt ..... | 81         |
| 5.1.1 Visualisierung .....                                               | 81         |
| 5.1.2 Bifurkationsverhalten .....                                        | 83         |
| 5.2 Laminar-turbulenter Umschlag im konzentrischen Kugelspalt .....      | 86         |
| 5.2.1 Visualisierung der Strömungsstrukturen .....                       | 86         |
| 5.2.2 Laminar-turbulenter Umschlag für $\beta=0,33$ .....                | 90         |
| 5.2.3 Laminar-turbulenter Umschlag für $\beta=0,5$ .....                 | 107        |
| <b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b> .....                             | <b>122</b> |
| <b>Anhang</b> .....                                                      | <b>124</b> |
| <b>Literaturübersicht</b> .....                                          | <b>127</b> |