

**Fraktale Strukturen, deterministisches Chaos und
Strömungsformerkennung in Zweiphasenströmungen**

Von der Fakultät Energietechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Holger Skok

aus Hannover

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. E. Laurien
Tag der mündlichen Prüfung:	30.11.2000

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart
2000

Kurzfassung

Holger Skok

Fraktale Strukturen, deterministisches Chaos und Strömungsformerkennung in Zweiphasenströmungen

Die vorliegende Arbeit behandelt die Frage, ob Methoden, die im Rahmen der Chaostheorie zur Darstellung des Verhaltens chaotischer Prozesse entwickelt wurden, auch zur Strömungsformidentifikation in Zweiphasenströmungen aus gasförmiger und flüssiger Phase geeignet sind.

Die Auswertungsverfahren beruhen auf dem Ansatz, das Verhalten des untersuchten physikalischen Systems geometrisch, in Form einer Bahnkurve oder Trajektorie zu beschreiben. Die Trajektorie verläuft in einem euklidischen Raum, der von den unabhängigen Variablen des Systems aufgespannt wird. Jeder Zustand des Systems wird dann durch genau einen Punkt in diesem sogenannten Zustandsraum repräsentiert. Verhält sich das System stationär, gibt die Form der resultierenden Trajektorie Aufschluß über die Natur des Systemverhaltens. Insbesondere kann zwischen ruhenden, gleichförmig schwingenden und chaotischen Systemen deutlich unterschieden werden.

In dieser Arbeit werden mit Hilfe des Takens'schen Einbettungstheorems aus einzelnen Meßgrößen solche Trajektorien rekonstruiert. Ihre Korrelationsdimension und ihre Rényi-Dimension werden bestimmt. Für niedrigdimensionale Trajektorien wird außerdem der größte Ljapunow-Exponent bestimmt. Mehrere verschiedene Filterungsverfahren aus der Chaostheorie werden eingesetzt, um den Einfluß zufälliger Schwankungen der Meßsignale auf die Ergebnisse zu vermindern.

Das Auswertungsverfahren wird zunächst auf Daten von einer Versuchsanlage angewendet, in der ein Arbeitsmittel in einem von außen beheizten, senkrechten Rohr verdampft. Darin werden geysirartige Schwingungen des Massenstroms erzeugt, die kurz vor dem Übergang zu gleichförmiger Strömung chaotisch werden. Als Meßgrößen dienen der statische Druck im senkrechten Rohr, die Temperatur in der Rohrachse und der Massenstrom am Eintritt. Ihre Eignung für die Rekonstruktion von Trajektorien wird untersucht. Die Dimension der aus ihnen rekonstruierten Trajektorien wird mit Angaben aus der Literatur verglichen. Chaotische Strömungsformen konnten nachgewiesen werden.

In einer zweiten Versuchsanlage werden Rohrströmungen aus Wasser und Luft erzeugt. Die Neigung des Rohrs und der Rohrdurchmesser werden variiert. Mehrere unterschiedliche Strömungsformen treten auf. Im senkrechten Rohr reichen die Strömungsformen von Blasen- bis Schaumströmung. Im horizontalen Rohr werden Strömungsformen von Wellen- bis Schwallströmung eingestellt. Der statische Druck und der lokale, volumetrische Gasgehalt werden gemessen und dem oben skizzierten Auswertungsverfahren unterworfen. Dabei kann nur für einen kleinen Teil der Versuche ein Wert für die Dimension der rekonstruierten Trajektorien bestimmt werden. Die Signale aus der Zweiphasenströmung erweisen sich als zu stark verrauscht, um zuverlässige Werte für die Dimension der aus ihnen rekonstruierten Trajektorien bestimmen zu können. Ein systematischer Zusammenhang zwischen Strömungsform und Dimension wird nicht festgestellt.

Aus den Erfahrungen bei der Auswertung werden Empfehlungen hergeleitet, auf welche Art von Signalen die Rekonstruktions-, Filterungs- und Auswertungsverfahren erfolgreich angewendet werden können. Die Grenzen der verfügbaren Verfahren werden aufgezeigt.

Abstract

Holger Skok

Fractal structures, deterministic chaos and flow regime identification in two-phase flows

The work presented here deals with the question, whether methods used to describe the behavior of chaotic processes can also serve to identify flow patterns in two-phase flows of liquid and gas.

The methods of data analysis are based on representing the behavior of the physical system under consideration geometrically, i.e. as a trajectory. The trajectory lies in an euclidean space, which is defined by the independent variables of the system. Each state of the system can be represented by exactly one point in this so called state space. If the system is in steady state, the shape of the resulting trajectory allows to characterize the nature of its behavior. Systems at rest, oscillating regularly or oscillating chaotically, in particular, can be distinguished easily.

By means of Takens' embedding theorem trajectories are reconstructed from individual quantities. The correlation dimension and the Rényi dimension of these trajectories are calculated. In addition, the largest Lyapunov-exponent is calculated for trajectories of small dimension. Several different filtering methods developed in the context of chaos theory are applied as well with the aim to reduce the effects of stochastic oscillations of the measured signals.

This procedure of data analysis is applied to data from an experimental setup, which allows to create a boiling flow in a vertical tube heated from the outside. Oscillating flows are created in the tube, which become chaotic close to the region of steady flow. The static pressure in the tube, the temperature at the tube axis and the mass flux at the tube entrance are analyzed in order to investigate, how well each of these quantities is suited for the reconstruction of trajectories. The dimensions of the trajectories are calculated and compared to results from the literature. Chaotic flow regimes are found.

In a second experimental setup two-phase flows of water and air are created in a simple plexiglass tube of circular cross section. The tube inclination and the diameter are varied. For the vertically oriented tube the flow regimes range from bubbly to froth flow. For the horizontal position the flow regimes range from stratified to slug flow. The static pressure and the local void fraction are subjected to the data analysis described above. The data are too noisy to allow a reliable determination of the dimension. No systematic dependence of the dimension on the flow regime has been found.

The experience gained in the data analysis allows recommendations to be made, which kind of signals are amenable to the methods of reconstruction, filtering and analysis. The limitations of the available techniques are described.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Liste der Formelzeichen	VII
1. Einleitung	1
2. Einführende Bemerkungen, Definitionen	3
2.1 Empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen	3
2.2 Geometrische Darstellung des Systemverhaltens - Trajektorie, Attraktor, Zustandsraum	3
2.2.1 Das starre Pendel	3
2.2.2 Zustandspunkt, Trajektorie, Attraktor und Zustandsraum	5
2.2.3 Der Lorenz-Attraktor	6
2.3 Größen zur Charakterisierung von Trajektorien	8
2.3.1 Ein verallgemeinerter Begriff der Dimension	8
2.3.2 Ljapunow-Exponenten λ_i	9
2.4 Rekonstruktion von Trajektorien	10
2.5 Poincaré-Schnitte	11
2.6 Zusammenfassende Folgerungen	12
3. Literaturübersicht	13
3.1 Strömungsformerkennung	13
3.2 Rekonstruktion, Auswertungsverfahren, Filterung	15
3.2.1 Die mathematische Darstellung dynamischer Systeme	15
3.2.2 Lokale Linearisierung des Entwicklungsoperators, Bestimmung der Lja- punow-Exponenten	18
3.2.3 Natürliches Maß und Dimension	19
3.2.4 Messung physikalischer Größen als Abbildung des \mathbb{R}^n auf \mathbb{R}	21
3.2.5 Die Bestimmung der Einbettungsverzögerung Δt_e	22
3.2.6 Die Wahl der Einbettungsdimension D_e Bestimmung der Korrelationsdimension D_K	24
3.2.7 Filterung	26
3.2.8 Ljapunow-Exponenten	30
3.3 Chaos in der Zweiphasenströmung	32
3.3.1 Der fallende Flüssigkeitsfilm	32
3.3.2 Zweiphasenströmung aus Flüssigkeit und Gas in horizontalen Kanälen	33
3.4 Chaos im senkrechten Verdampferrohr	35
3.4.1 Naturumlaufströmung im senkrechten Verdampferrohr	35
3.4.2 Erzwungene Strömung im senkrechten Verdampferrohr	37
3.5 Folgerungen	39
4. Versuchsanlagen und Versuchsbeschreibungen	40
4.1 Die Naturumlauf-Anlage	40
4.1.1 Aufbau und Funktionsweise	41

4.1.2	Die Bestimmung der Heizleistung	42
4.1.3	Meßdatenerfassung	43
4.1.4	Versuchsdurchführung	44
4.2	Die Versuchsanlage zur Strömungsformidentifikation (Wasser-Luft-Anlage)	44
4.2.1	Aufbau und Funktionsweise	44
4.2.2	Meßgrößen und Meßwertaufnehmer	46
4.2.3	Meßdatenerfassung und -speicherung	48
4.2.4	Versuchsdurchführung	49
4.2.5	Meßfehler des zeitlich veränderlichen Drucksignals $p_M(t)$	49
4.2.6	Meßfehler der Volumenströme \dot{V}_W und \dot{V}_L	50
5.	Meßergebnisse und Datenauswertung	52
5.1	Grundsätzliche Überlegungen	52
5.2	Meßergebnisse an der Naturumlauf-Anlage.....	53
5.2.1	Allgemeine Beobachtungen	53
5.2.2	Veränderung der Signalverläufe	57
5.2.3	Die Temperatur am Verdampferaustritt	58
5.2.4	Weitere Signalverläufe	58
5.2.5	Einphasige Schwingung	58
5.2.6	Sonstige Beobachtungen.....	60
5.3	Anwendung der Auswertungsverfahren für die Naturumlauf-Anlage	61
5.3.1	Bestimmung der Einbettungsverzögerung	61
5.3.2	Bestimmung der Korrelationsdimension	63
5.3.3	Vergleich der Ergebnisse	71
5.3.4	Bestimmung von Ljapunow-Exponenten.....	73
5.3.5	Fazit.....	74
5.4	Meßergebnisse an der Wasser-Luft-Anlage	76
5.4.1	Visuelle Einschätzung der Strömungsformen	76
5.4.2	Allgemeine Beobachtungen	76
5.4.3	Darstellung in Strömungsbilderkarten	80
5.5	Anwendung der Auswertungsverfahren für die Wasser-Luft-Anlage	83
5.5.1	Die Bestimmung der Einbettungsverzögerung	83
5.5.2	Dimensionsbestimmung für das senkrechte Rohr	84
5.5.3	Dimensionsbestimmung für das horizontale Rohr	87
5.5.4	Fazit	90
6.	Zusammenfassung und Ausblick	93
6.1	Strömungsformidentifikation	93
6.2	Ergebnisse von der Naturumlauf-Anlage	94
6.3	Folgerungen	94
7.	Literaturverzeichnis	96
8.	Anhang	102
Anhang A	Ergebnisse der Dimensionsbestimmung für die Naturumlauf-Anlage	102
Anhang B	Ergebnisse der Dimensionsbestimmung für die Wasser-Luft-Anlage.....	105
Anhang C	Glossar	109