

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Elemente des mathematischen Modells der transienten Zweiphasenströmung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Gesetze zur Beschreibung transienter eindimensionaler Zweiphasenströmungen</b>	<b>4</b>
2.1	Gesetz zur Erhaltung der Masse	4
2.2	Gesetz zur Erhaltung des Impulses	6
2.3	Gesetz zur Erhaltung der Energie	9
2.4	Verallgemeinerung: Gesetz zur Erhaltung der Entropie	14
2.5	Gasmassenstromanteil, Geschwindigkeitsquotient (Schlupf) und Massenstromdichte sowie deren Anwendung zur Beschreibung der transienten Zweiphasenströmung	17
2.6	Driftgeschwindigkeit und deren Anwendung zur Beschreibung der transienten Zweiphasenströmung	19
2.7	Relative Phasengeschwindigkeit und ihre Anwendung zur Beschreibung der transienten Zweiphasenströmung	26
<b>3</b>	<b>Grenze zwischen stationärer und transienter Zweiphasenströmung</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>Bestimmung des Typs von Differentialgleichungssystemen zur Beschreibung der transienten Strömung</b>	<b>34</b>
4.1	Mathematischer Standpunkt	34
4.2	Physikalischer Standpunkt	36
4.2.1	Zusammenhang zwischen den Eigenwerten und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Störungen der abhängigen Variablen	37
4.2.2	Zusammenhang zwischen den Eigenwerten und der Ausbreitungsgeschwindigkeit harmonischer Schwingungen der abhängigen Variablen	37
4.2.3	Zusammenhang zwischen den Eigenwerten und der kritischen Strömung	38
<b>5</b>	<b>Die homogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung (HGZS)</b>	<b>39</b>
5.1	Die einfachste mathematische Darstellung der HGZS	39
5.2	Die Anwendung des Modells der HGZS	45
5.3	Die homogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung bei konstantem Druck	46
5.4	Die homogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung in einem Kanal mit plötzlicher Querschnittsänderung	47

<b>6 Die nichthomogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung (NGZS)</b>	<b>50</b>
6.1 Hyperbolisches Differentialgleichungssystem zur Beschreibung der transienten NGZS	50
6.2 Transiente nichthomogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung mit quasikonstantem Schlupf	53
6.2.1 Derzeitiger Zustand des Problems	53
6.2.2 Das Modell	56
6.2.3 Berechnung des stationären Zustandes. Kritische Strömung	64
6.2.4 Nichthomogene Gleichgewichts-Zweiphasenströmung in einem Kanal mit plötzlicher Querschnittsänderung	72
6.2.5 Gleichgewichts-Zweiphasenströmung in einem Kanal mit eingebautem Drosselorgan	73
6.2.5.1 Stationärer Druckverlust bei der Drosselung der Zweiphasenströmung	73
6.2.5.2 Präzisierung der Theorie für die instationäre Drosselung	76
6.3 Die gekoppelte Aufgabe Brennelement eines wassergekühlten Kernreaktors/Kühlmittel als Beispiel für die Anwendung des NGZS-Modells	76
<b>7 Homogene Nichtgleichgewichts-Zweiphasenströmung (HNZS)</b>	<b>81</b>
7.1 Derzeitiger Zustand des Problems	81
7.2 Das Modell	82
7.3 Stationärer Anfangszustand einer transienten homogenen Nichtgleichgewichts-Zweiphasenströmung	86
<b>8 Nichthomogene Nichtgleichgewichts-Zweiphasenströmung (NNZS)</b>	<b>89</b>
8.1 Beschreibung der NNZS mit Hilfe einer einfachen Form eines Systems aus 5-partiellen Differentialgleichungen	90
8.1.1 Das Modell	90
8.1.2 Berechnung des stationären Zustandes. Kritische NNZS	96
8.2 Ein $G,p,x,h$ -Modell der NNZS mit quasikonstantem Schlupf und dessen vielseitige Anwendungsmöglichkeiten	96
8.2.1 Das Modell	99
8.2.2 Die kritische Zweiphasenströmung	103
8.2.3 Die gekoppelte Aufgabe Brennelement eines wassergekühlten Kernreaktors/Kühlmittel	113
8.2.3.1 Das Modell des Brennelements	113
8.2.3.2 Der Wärmeübergangsmechanismus	117
8.2.3.3 Vergleich des NNZS-Modells mit Experimentaldaten	122
<b>9 Stoffübergang an der Phasentrennfläche</b>	<b>134</b>
9.1 Verdampfung überhitzter Flüssigkeit	134
9.1.1 Entstehung der Verdampfungskeime	136
9.1.2 Anwachsen der Blase in überhitzter Flüssigkeit ohne relative Bewegung	139

9.2	Die Kondensation der unterkühlten Gasphase . . . . .	144
9.2.1	Entstehung des Flüssigkeitströpfchens . . . . .	145
9.2.2	Anwachsen der Tröpfchen in unterkühltem Dampf ohne relative Bewegung . . . . .	147
9.3	Einfluß der relativen Bewegung auf die Stoffübertragungsvorgänge an der Phasentrennfläche . . . . .	148
9.4	Verdampfung unterkühlter Flüssigkeit an der beheizten Kanalwand . . . . .	149
9.5	Verdampfung gesättigter Tröpfchen in überhitztem Dampf . . . .	154

**10 Verfahren zur numerischen Integration der Systeme von partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung transients Zweiphasenströmungen . . . . . 157**

10.1	Charakteristikenverfahren . . . . .	159
10.1.1	Explizites Charakteristikenverfahren . . . . .	159
10.1.2	Implizites Charakteristikenverfahren . . . . .	161
10.2	Pseudocharakteristisches Verfahren . . . . .	162
10.2.1	Explizites pseudocharakteristisches Verfahren . . . . .	162
10.2.2	Implizites pseudocharakteristisches Verfahren . . . . .	164
10.3	Andere explizite Verfahren . . . . .	165
10.4	Andere implizite Verfahren . . . . .	172
10.4.1	Newton-Rapsonsches Verfahren . . . . .	172
10.4.2	Turnersches Verfahren . . . . .	173
10.4.3	Godunovsches Verfahren . . . . .	174
10.4.4	Möglichkeiten zur Beschleunigung der impliziten Verfahren . . .	175
10.5	Berechnung der kritischen Strömung . . . . .	176
10.5.1	Kritische Strömung in langen Rohren . . . . .	176
10.5.2	Kritische Strömung in Lavaldüsen, kurzen Rohrstücken und Blenden . . . . .	177

**11 Die Multinodalmethode . . . . . 179**

11.1	Gesetze zur Erhaltung der Masse und der Energie für Volumina, die Zweiphasengemische enthalten . . . . .	180
11.1.1	Homogenes Gleichgewichtsvolumen . . . . .	183
11.1.1.1	Die Massen des Dampfes bzw. der Flüssigkeit und der Druck als abhängige Variablen bei der Beschreibung des homogenen Gleichgewichtsvolumens . . . . .	183
11.1.1.2	Die Masse, die spezifische Enthalpie des Gemisches und der Druck als abhängige Variablen bei der Beschreibung des homogenen Gleichgewichtsvolumens . . . . .	185
11.1.2	Homogenes Nichtgleichgewichtsvolumen . . . . .	187
11.1.3	Nichthomogenes Nichtgleichgewichtsvolumen . . . . .	191
11.2	Modellierung der Strömung in den Verbindungselementen zwischen den Zentren zweier benachbarter Volumina . . . . .	197
11.2.1	Nichtkompressible homogene Zweiphasenströmung . . . . .	197
11.2.2	Nichtkompressible nichthomogene Zweiphasenströmung . . . .	198

11.2.3	Homogene kompressible Strömung . . . . .	198
11.2.4	Nichthomogene kompressible Strömung . . . . .	199
<b>12</b>	<b>Zweiphasen-Zweikomponentenströmung . . . . .</b>	<b>200</b>
<b>13</b>	<b>Transiente Zustandsänderung in Wasser-Wasserdampf-Luft enthaltenden Volumina . . . . .</b>	<b>202</b>
13.1	Transiente Zustandsänderung des Wasser-Wasserdampf-Luft enthaltenden Volumens unter den Bedingungen des thermodynamischen Gleichgewichtes . . . . .	202
13.2	Transiente Zustandsänderung des Wasser-Wasserdampf-Luft enthaltenden Volumens unter den Bedingungen des thermodynamischen Nichtgleichgewichtes . . . . .	208
<b>14</b>	<b>Transiente nichthomogene Nichtgleichgewichts-Dreiphasen-Dreikomponenten-Strömung (NNDDS) . . . . .</b>	<b>211</b>
14.1	Modell Nr. 1 . . . . .	212
14.1.1	Voraussetzungen . . . . .	212
14.1.2	Definitionen . . . . .	212
14.1.3	Zustandsgleichungen . . . . .	213
14.1.4	Das die NNDDS beschreibende partielle Differentialgleichungssystem . . . . .	215
14.1.5	Untersuchung des Types des Systems . . . . .	218
14.2	Modell Nr. 2 — homogene Strömung . . . . .	221
14.3	Modell Nr. 3 — nichthomogene Strömung mit quasikonstantem Schlupf . . . . .	224
	Anhang 14.1 . . . . .	227
	Anhang 14.2 . . . . .	231
	Anhang 14.3 . . . . .	232
	Anhang 14.4 . . . . .	233
	Anhang 14.5 . . . . .	234
	Anhang 14.6 . . . . .	234
<b>15</b>	<b>Transiente nichthomogene Gleichgewichts-Dreiphasen-Dreikomponenten-Strömung (NGDDS) . . . . .</b>	<b>236</b>
15.1	Zustandsgleichungen . . . . .	236
15.2	Allgemeine Form des Differentialgleichungssystems . . . . .	239
15.3	Modell der NGDDS . . . . .	243
15.4	Modell der homogenen Gleichgewichts-Dreiphasen-Dreikomponenten-Strömung (HGDDS) . . . . .	246
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>255</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>269</b>