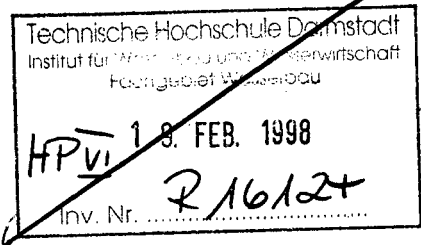


Heft 92

Numerische Modellierung  
nichtisothermer Gas-Wasser  
Systeme in porösen Medien

von Dr.-Ing.  
Martin Emmert



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Ziel und Gliederung der Arbeit . . . . .	3
1.3 Literaturübersicht . . . . .	9
<b>2 Grundlagen zur Modellbildung</b>	<b>11</b>
2.1 Phasen und Komponenten . . . . .	11
2.2 Verdampfung und Kondensation in porösen Medien . . . . .	12
2.3 Phasenwechsel und Phasenübergang . . . . .	13
2.4 Mehrphasen-Mehrkomponentensystem . . . . .	13
2.5 Mikro- und makroskalige Betrachtungsweise . . . . .	15
2.6 Thermodynamisches Gleichgewicht . . . . .	16
2.7 Zustandsgrößen und Zustandsgleichung . . . . .	17
<b>3 Konstitutive Beziehungen</b>	<b>19</b>
3.1 Wahl der Primärvariablen (Phasenregel nach Gibbs) . . . . .	19
3.2 Systemeigenschaften bei mikroskaliger Betrachtung . . . . .	22
3.2.1 Das $p - v - T$ Diagramm . . . . .	23
3.2.2 Massen- und Molenanteile . . . . .	26
3.2.3 Dichte . . . . .	29

3.2.4	Dynamische Viskosität . . . . .	32
3.2.5	Grenzflächenspannung . . . . .	34
3.2.6	Spezifische Enthalpie, spezifische innere Energie . . . . .	35
3.2.7	Spezifische Wärmekapazität, spezifische Volumenwärme . . . . .	37
3.2.8	Diffusionskoeffizient für ein binäres Gasgemisch . . . . .	38
3.2.9	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	38
3.3	Systemeigenschaften bei makroskaliger Betrachtung . . . . .	39
3.3.1	Stark nichtlineare Systemeigenschaften . . . . .	39
3.3.2	Schwach nichtlineare Systemeigenschaften . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Physik nichtisothermer Mehrphasen-Mehrkomponentenprozesse</b>	<b>51</b>
4.1	Advektive Flüsse . . . . .	51
4.2	Konvektive Flüsse . . . . .	52
4.3	Diffusive Flüsse . . . . .	52
4.4	Dispersive Flüsse . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Mathematische Beschreibung</b>	<b>55</b>
5.1	Allgemeine Bilanzgleichung . . . . .	55
5.2	Massenbilanzgleichungen . . . . .	56
5.3	Energiebilanzgleichung . . . . .	59
5.3.1	Erster Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	59
5.3.2	Energiegleichung bei mikroskaliger Betrachtungsweise . . . . .	60
5.3.3	Energiegleichung bei makroskaliger Betrachtungsweise . . . . .	61

<b>6</b>	<b>Numerisches Modell</b>	<b>65</b>
6.1	Wahl der Diskretisierungsmethode . . . . .	65
6.2	Räumliche Diskretisierung . . . . .	66
6.3	Zeitliche Diskretisierung . . . . .	67
6.4	Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	69
6.5	Globalalgorithmus . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Verifikation des numerischen Modells</b>	<b>77</b>
7.1	Vorgehensweise . . . . .	77
7.2	Zweiphasen-Einkomponentensystem Wasser-Wasserdampf . . . . .	78
7.2.1	Systembeschreibung . . . . .	78
7.2.2	Semi-analytische Lösung . . . . .	80
7.2.3	Numerische Simulation . . . . .	82
7.3	Zweiphasen-Zweikomponentensystem: Der <i>Heatpipe</i> Effekt . . . . .	86
7.3.1	Prozeßablauf . . . . .	87
7.3.2	Semi-analytische Lösung . . . . .	90
7.3.3	Numerische Simulation . . . . .	92
7.4	Überprüfung des Diffusionsansatzes . . . . .	97
7.4.1	Modellbeschreibung . . . . .	97
7.4.2	Analytische Lösung . . . . .	97
7.4.3	Numerische Simulation . . . . .	98

<b>8 Untersuchung des Einflusses einzelner Modellparameter</b>	<b>100</b>
8.1 Einfluß der konstitutiven Beziehungen . . . . .	100
8.1.1 Relative Permeabilität – Sättigungsbeziehung . . . . .	101
8.1.2 Kapillardruck – Sättigungsbeziehung . . . . .	107
8.2 Einfluß von Matrixeigenschaften . . . . .	110
8.3 Einfluß der Randbedingungen . . . . .	116
<b>9 Numerische Simulation von VEGAS-Experimenten</b>	<b>120</b>
9.1 Simulation von Säulenexperimenten (1D) . . . . .	121
9.1.1 Dampfinjektion in Grobsand . . . . .	126
9.1.2 Dampfinjektion in Feinsand . . . . .	128
9.1.3 Luftinjektion in Grobsand . . . . .	131
9.1.4 Heißluftinjektion in Grobsand . . . . .	137
9.2 Voruntersuchungen zu Küvettenexperimenten (2D) . . . . .	141
<b>10 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>152</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>160</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>