

**KfK 4416
Juli 1988**

Die Berechnung von hydrostatischen Drücken in SIMMER-II und das Problem kommunizierender Gefäße

**P. Schmuck, S. Kleinheins
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 4416

Die Berechnung von hydrostatischen Drücken in SIMMER-II und das
Problem kommunizierender Gefäße

P. Schmuck
S. Kleinheins

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Die Ursache des Auftretens von nichtphysikalischen Bewegungen in kommunizierenden Gefäßen unter Schwerkrafteinwirkung wird für spezielle SIMMER-II Simulationen untersucht. Analytische Ausdrücke zur Berechnung der Ursachen dieses Effektes werden angegeben und dienen als Grundlage für Vorschläge, wie man die Fehler in SIMMER-Rechnungen in kontrollierter Weise klein halten kann. Die Wirksamkeit dieser Vorschläge wird an numerischen Beispielen unter Verwendung des SIMMER-Codes nachgewiesen.

ON THE CALCULATION OF HYDROSTATIC PRESSURES WITH SIMMER-II AND THE PROBLEM OF CONNECTED TUBES

Abstract

SIMMER simulations of flows in connected tubes exhibited non-physical movement of liquid under gravity. Analytical expressions are developed to evaluate the reasons for this effect and are used as a basis for proposals to keep the error small in SIMMER calculations. The effectiveness of the proposals is demonstrated by SIMMER code simulations of some numerical examples.

I N H A L T

	Seite
Einleitung	1
Hydrostatisches Gleichgewicht	2
Kommunizierende Gefäße	16
Zusammenfassung und Schlußfolgerung	21
Referenzen	22
Anhang: SIMMER-II.9 Daten für das Zweikanalmodell mit zwei axialen Maschen im unteren Plenum	23

Einleitung

Anlaß zu den hier dargestellten Untersuchungen waren einige Resultate von SIMMER-II Rechnungen der GRS Köln, die im Rahmen von Analysen zum Verlauf der frühen Übergangsphase im SNR 300 durchgeführt wurden /1/. Die GRS - Rechnungen zeigten, daß hydrostatisches Gleichgewicht in kommunizierenden Gefäßen unter gewissen Umständen von SIMMER-II nicht richtig simuliert wird. Ziel der hier präsentierten Untersuchungen ist es, die Ursachen dafür in analytischer Form darzustellen und Hinweise zu finden, wie man diesen Fehler vermeiden bzw. möglichst klein halten kann. Zur Verifizierung der analytischen Resultate wurden gezielt Rechnungen mit der Version 9 von SIMMER-II /2, 3/ durchgeführt, deren Ergebnisse im vorliegenden Bericht kurz dargestellt und diskutiert werden.

Hydrostatisches Gleichgewicht

Im folgenden betrachten wir die Ausbildung hydrostatischen Gleichgewichts in einem Kanal, d. h. in einer eindimensionalen, senkrechten Anordnung. Um die Diskussion auf das Wesentliche beschränken zu können, nehmen wir an, daß sich nur Flüssigkeit (kein Gas) und Strukturmaterial in dem Kanal befindet und Kompressibilitätseffekte eine untergeordnete Rolle spielen.

Die SIMMER-II Impulsgleichung in z-Richtung lautet für das Flüssigkeitsfeld:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_L V_L) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho}_L V_L V_L) = - \alpha_L \frac{\partial}{\partial z} p - \bar{\rho}_L g \quad (1)$$

- $K_{LS} V_L$
+ andere Wechselwirkungsterme

- $\bar{\rho}_L$ makroskopische Dichte des Flüssigkeitsfeldes
 ρ_L mikroskopische ("theoretische") Dichte des Flüssigkeitsfeldes
 V_L Geschwindigkeit des Flüssigkeitsfeldes
 z Ortskoordinate
 α_L Volumsfraktion des Flüssigkeitsfeldes
 p Druck
 g Schwerebeschleunigung
 K_{LS} Impulsaustauschfunktion Flüssigkeitsfeld/Struktur

Diese instationäre Impulsgleichung wurde unter der Annahme abgeleitet, daß die auftretenden Funktionen hinreichend oft differenzierbar sind. (Im folgenden wird es vor allem um die räumliche Differentiation gehen.) Ändern sich z. B. die Strömungsquerschnitte abrupt, weil die Anteile von Strukturmaterial stark variieren, ist diese Voraussetzung und damit auch die angeschriebene Impulsgleichung nicht mehr gültig.

Hydrostatisches Gleichgewicht wird in SIMMER-II durch die Gleichung

$$- \alpha_L \frac{\partial p}{\partial z} - \bar{\rho}_L g = 0 \quad (2)$$

beschrieben. Diese Gleichung stimmt bei konstanten Volumenanteilen für die Flüssigkeit mit der bekannten Gleichung für hydrostatisches Gleichgewicht

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \rho_L g \quad (3)$$

überein. Unterschiede bestehen jedoch in den diskretisierten Gleichungen, die wir im folgenden skizzieren wollen.

In SIMMER-II wird ein versetztes Maschengitter verwendet, wie es in Abb. 1 dargestellt ist. Drücke, Dichten usw. sind auf Maschenmittelpunkte, Geschwindigkeiten auf Maschenränder bezogen. In Gleichung (2) werden in den Versionen 9 und 10 von SIMMER-II folgende Annahmen gemacht (wir beziehen uns im folgenden auf die Maschen j und $j+1$ und bezeichnen den dazwischen liegenden Rand mit $j+1/2$; vgl. Abb. 1)

$$\bar{\rho}_{L,j+1/2} = \frac{\rho_{L,j} \alpha_{L,j} \Delta z_j + \rho_{L,j+1} \alpha_{L,j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}, \quad (4)$$

$$\alpha_{L,j+1/2} = \text{Min}(\alpha_{L,j}, \alpha_{L,j+1}) \cdot * \quad (5)$$

Gehen wir von einer einheitlichen mikroskopischen Flüssigkeitsdichte aus, so wird

$$\rho_{L,j} = \rho_{L,j+1} = \rho_L,$$

und die Mittelung in Gleichung (4) erfolgt nur für die Volumsfraktionen α . Man sieht aber sofort, daß man aus der diskretisierten Form von Gleichung (2)

$$- \alpha_{L,j+1/2} (p_{j+1} - p_j) = g \rho_L \frac{1}{2} (\alpha_{L,j} \Delta z_j + \alpha_{L,j+1} \Delta z_{j+1}) \quad (2a)$$

nicht direkt die diskretisierte Form von Gleichung (3)

$$p_{j+1} - p_j = - \rho_L g \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) \quad (3a)$$

*Die SIMMER-Definition ist bei Anwesenheit von Gas etwas komplizierter. Falls kein Gas vorhanden ist, stimmt die Definition (5) mit der SIMMER-Definition überein.

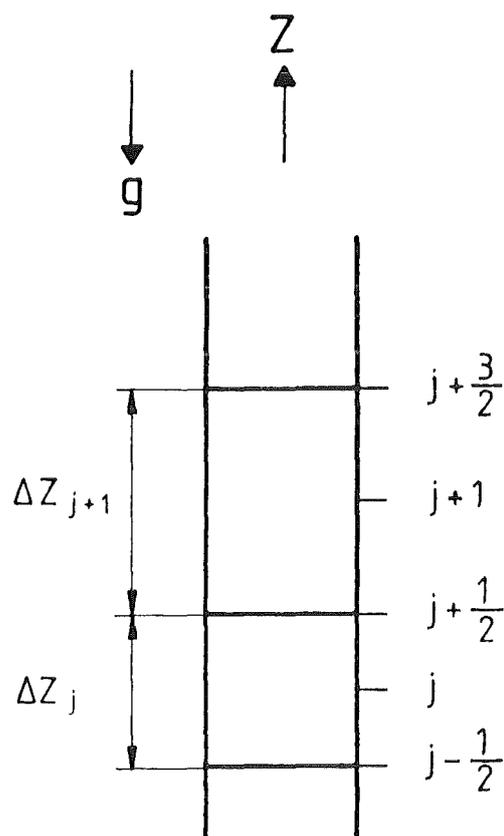


Abb. 1: Versetztes Maschengitter in z -Richtung, wie es in SIMMER-II verwendet wird. Drücke, Dichten, Volumsfraktionen sind an den Maschenzentren (j und $j+1$), Geschwindigkeiten an den Maschengrenzen ($j-1/2$, $j+1/2$, $j+3/2$) definiert.

herleiten kann. Diese Unterschiede können sich bei der Berechnung des hydrostatischen Druckes bemerkbar machen.

Wir wollen untersuchen, unter welchen Umständen Gleichung (2a) mit Gleichung (3a) für kleine Werte Δz_j und Δz_{j+1} kompatibel ist. Der Vergleich der beiden Gleichungen gibt folgende Bedingung

$$R = \frac{\alpha_{L,j} \Delta z_j + \alpha_{L,j+1} \Delta z_{j+1}}{\alpha_{L,j+1/2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \rightarrow 1 \quad (6)$$

Nehmen wir eine plötzliche Erweiterung (nach unten) an der Stelle $j+1/2$ an, so ist

$$\alpha_{L,j+1/2} = \alpha_{j+1}$$

und

$$R = \left(\frac{\alpha_{L,j}}{\alpha_{L,j+1}} + \frac{\Delta z_{j+1}}{\Delta z_j} \right) / \left(1 + \frac{\Delta z_{j+1}}{\Delta z_j} \right)$$

Für differenzierbare Querschnittsänderungen gilt

$$\frac{\alpha_{L,j}}{\alpha_{L,j+1}} \rightarrow 1, \quad \text{falls} \quad \Delta z_j \rightarrow 0$$

und $\Delta z_{j+1} \rightarrow 0$

und damit

$$R \rightarrow 1$$

Bleibt hingegen

$$\frac{\alpha_{L,j}}{\alpha_{L,j+1}} \neq 1 \quad \text{für} \quad \Delta z_j \rightarrow 0, \quad \Delta z_{j+1} \rightarrow 0$$

wie es bei einer plötzlichen Erweiterung der Fall ist, dann kann R irgendeinen Wert annehmen, und die Differenzgleichung (2a) ist nicht mehr kompatibel mit der Differentialgleichung (3). Es ist somit gesichert, daß man z. B. einen konvergenten oder divergenten Kanal, wie er in Abb. 2 skizziert ist, mit SIMMER beschreiben kann, wenn man nur die Δz -Werte klein genug wählt.

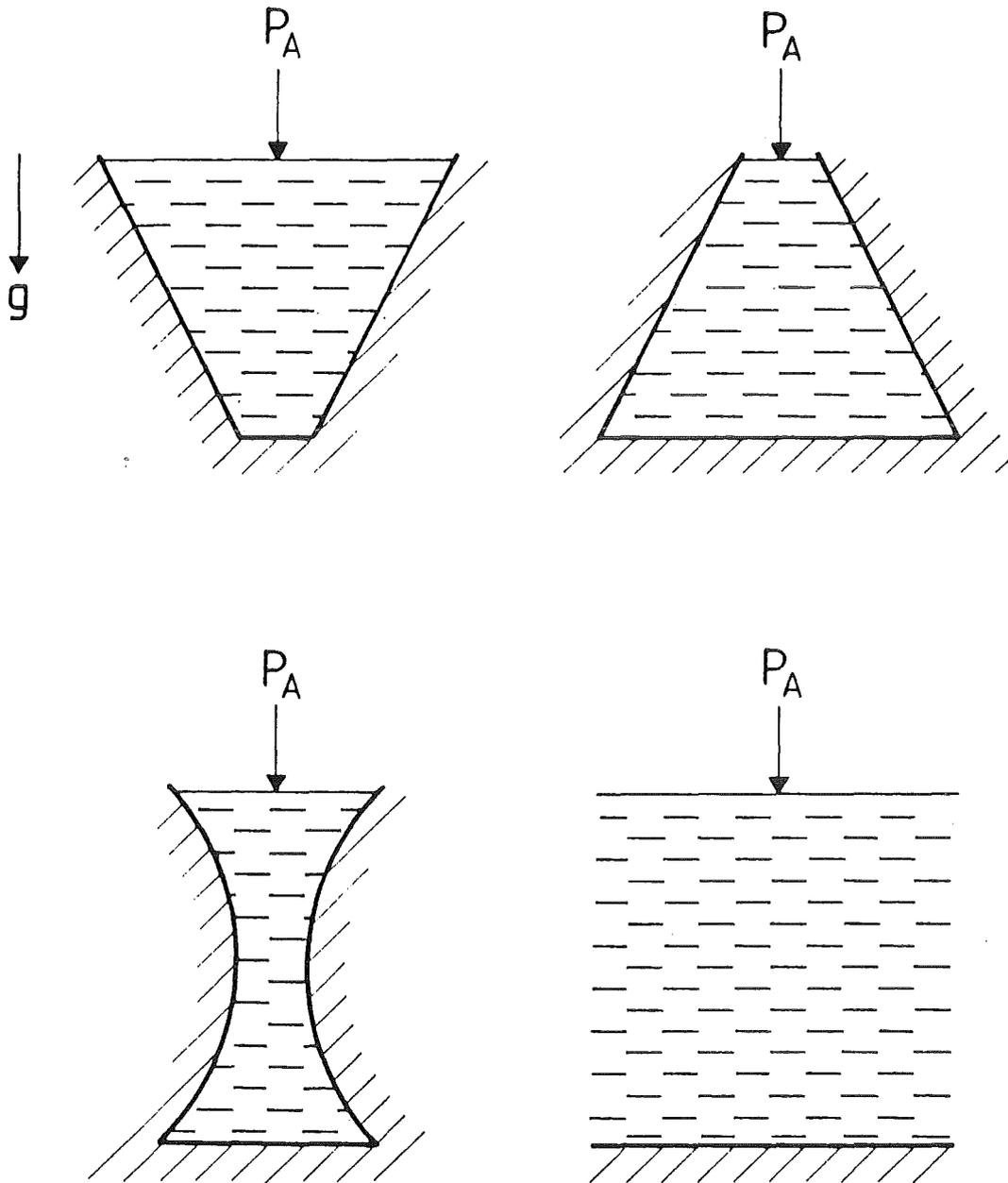


Abb. 2: Skizze von Fällen, bei denen sich bei uniformer Verkleinerung der Maschen der Rechenfehler im hydrostatischen Druck verkleinert

Wir schreiben die diskretisierte Gleichung (3a) um

$$p_j = p_{j+1} + \rho_L g \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}{2}, \quad (3b)$$

und ebenfalls die SIMMER-Gleichung (2a)

$$p_j = p_{j+1} + \rho_L g \frac{\alpha_{L,j} \Delta z_j + \alpha_{L,j+1} \Delta z_{j+1}}{2 \text{ Min}(\alpha_{L,j}, \alpha_{L,j+1})} \quad (2b)$$

Mit diesen Formeln kann man - ausgehend vom gegebenen Druck p_A an der Oberfläche - die Drücke darunter im Kanal berechnen. Während die Integration von (3b) immer den exakten Wert

$$p_j = p_A + \rho g h_j$$

für den Druck in der Masche j (vgl. Abb. 3) ergibt, hängt er in SIMMER vom Verhältnis der Volumsfraktionen $\alpha_{L,j}$ ab! Dies ist zwar physikalisch nicht ganz richtig, stört aber nicht weiter, falls man die Δz -Werte so klein wählen kann, daß $\alpha_{L,j+1}/\alpha_{L,j}$ fast 1 wird. Bei entsprechender Wahl der Maschenweiten ist es möglich, die in Abb. 2 dargestellten Konfigurationen mit SIMMER-II näherungsweise darzustellen. Ein Beispiel soll dies noch eingehend erläutern. Wir berechnen den hydrostatischen Druck unter der Annahme

$$r = \alpha_{L,j} / \alpha_{L,j+1} = \text{const. für alle } j \quad (7)$$

$$\Delta z_j = \Delta z_{j+1} = \Delta z$$

$$\alpha_{L,j+1/2} = \alpha_{L,j+1} \quad (\text{d. h. Kanal wird nach unten weiter})$$

und bekommen in der Höhe j

$$p_j = p_A + \rho g h_j \frac{1}{2} (1 + r)$$

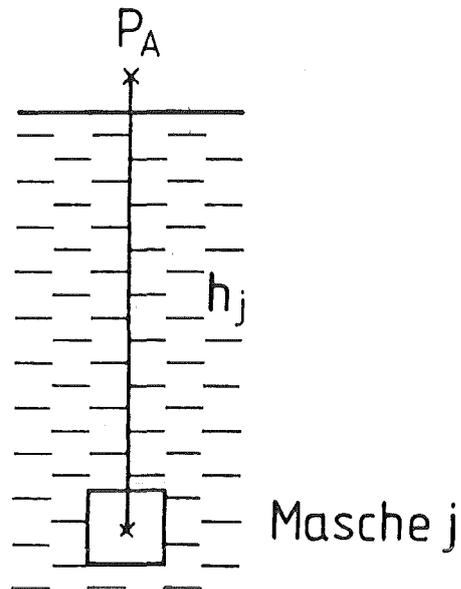


Abb. 3: Definitionsskizze von h_j (der Abstand ist zwischen den Maschenmittelpunkten definiert)

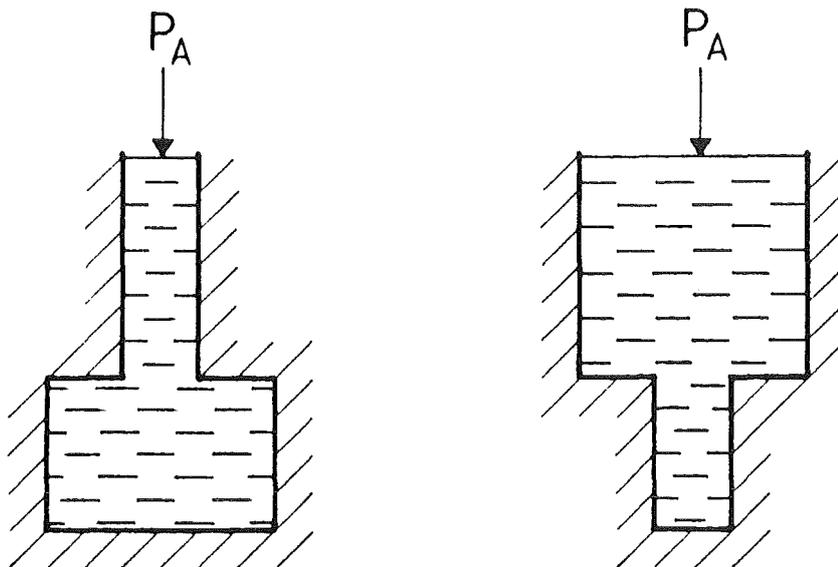


Abb. 4: Skizze von Fällen, bei denen spezielle Maschen an der Sprungstelle verkleinert werden müssen, damit der Fehler im hydrostatischen Druck klein wird.

Bei Verfeinerung der Δz -Intervalle wird

$$r' = \alpha_{L,j'} / \alpha_{L,j'+1} \rightarrow 1 ,$$

und daher

$$\frac{1}{2} (1 + r') \rightarrow 1 ,$$

und damit wird sich die SIMMER-II Lösung bei kleinen Δz -Werten der exakten Lösung nähern.

Im folgenden untersuchen wir noch näher die Fälle von abrupten Querschnittsänderungen, wie sie in Abb. 4 dargestellt sind, der plötzliche Querschnittsprung liegt an der Stelle $j+1/2$. Der Druck in der Masche $j+1$ ist dann

$$p_{j+1} = p_A + \rho g h_{j+1}$$

noch korrekt (bis auf kleine Fehler, die sich durch den SIMMER Druck-Algorithmus ergeben). Gehen wir aber zur Masche j mit Hilfe der Gleichung (2b), so bekommen wir für eine plötzliche Erweiterung nach unten

$$p_j = p_{j+1} + \rho g \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{L,j}}{\alpha_{L,j+1}} \Delta z_j + \Delta z_{j+1} \right) , \quad (8a)$$

da

$$\text{Min}(\alpha_{L,j}, \alpha_{L,j+1}) = \alpha_{L,j+1} ,$$

und für eine plötzliche Verengung nach unten

$$p_j = p_{j+1} + \rho g \frac{1}{2} \left(\Delta z_j + \frac{\alpha_{L,j+1}}{\alpha_{L,j}} \Delta z_{j+1} \right) , \quad (8b)$$

da

$$\text{Min}(\alpha_{L,j}, \alpha_{L,j+1}) = \alpha_{L,j} .$$

Bei einer plötzlichen Erweiterung wird der Fehler gering sein, wenn Δz_j klein ist, bei einer plötzlichen Verengung muß Δz_{j+1} klein gemacht werden,

damit der Fehler klein wird. Folgen mehrere plötzliche Erweiterungen und Verengungen aufeinander, so werden sich die Fehler gemäß Gleichungen (8a) und (8b) addieren.

Neben der Impulsgleichung (1) benötigt man eine Kontinuitätsgleichung für das Flüssigkeitsfeld

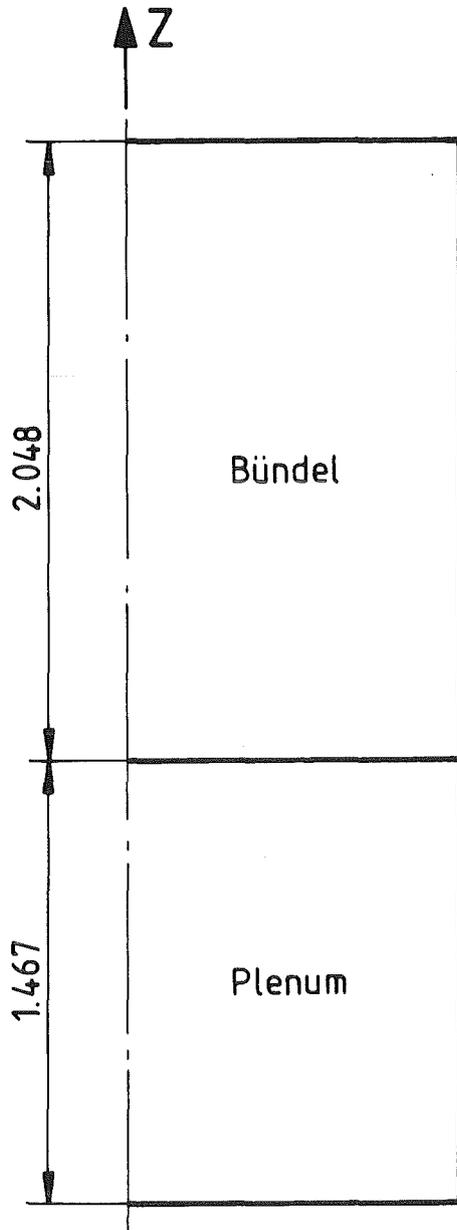
$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho}_L + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho}_L V_L) = 0, \quad (9)$$

um die Ausbildung des hydrostatischen Gleichgewichts in einem nach unten abgeschlossenen Kanal zu berechnen. SIMMER-II verwendet eine diskretisierte Form von Gleichung (9), vgl. auch Abb. 1.

Zur Verifikation der analytischen Betrachtungen wurden SIMMER-Rechnungen mit zwei verschiedenen Einkanal-Modellen KI und KII durchgeführt. KI soll dabei den unteren Teil eines SNR-Brennelements repräsentieren (d.h. unteres Natriumplenium und Bündel), während KII eine Eintrittsleitung mit wenig Strukturmaterial darstellt. Genauere Angaben über Dimensionen und Volumenanteile werden in Abb. 5 gemacht. In Abb. 6 sind die in der Nähe der Querschnittsprünge verwendeten Maschennetze dargestellt. Zwei verschiedene Netze (a) und (b) wurden verwendet, um deren Auswirkung auf die Druckberechnung zu untersuchen.

Als Randbedingung am oben offenen Kanal nehmen wir einen festen Druck von 1.95 bar an und lassen dort Flüssigkeit frei aus- und einströmen. Der Kanal sei zu Beginn mit flüssigem Natrium der Temperatur 1235 K und der Dichte $\rho_L = 705 \text{ kg/m}^3$ gefüllt, das sich in Sättigung mit seinem Dampf befindet. Der in der Randbedingung genannte Druck entspricht gerade dem Sättigungsdruck. Drücke, Temperaturen und Dichten sind zum Zeitpunkt null in jeder Masche gleich. Die Ausbildung des hydrostatischen Gleichgewichts erfolgt unter diesen Umständen isotherm. Die Rechnung wurde mit der SIMMER-Version II.9 durchgeführt, wobei als Grenze zwischen Ein- und Zweiphasenströmung $\alpha_0 = 0.05$ angenommen wurde.

Die Ausbildung des mechanischen Gleichgewichts in SIMMER-Rechnungen erfolgt dabei in folgender Weise: Die Flüssigkeit fällt unter dem Einfluß der Schwerkraft als kompressibles Fluid. Zuerst ist die Fallbewegung gleichmäßig, nach etwa vier Millisekunden zeigt sich in der untersten Masche eine geringe Dichteerhöhung, die mit einer deutlichen Druckerhöhung gekoppelt ist. Durch diese Erhöhung des Druckes wird die Fallbewegung in



		KI	KII
Bündel	α_S	0.486	0.0137
	α_L	0.488	0.937
	α_G	0.0256	0.0493
Plenum	α_S	0.0	
	α_L	0.95	
	α_G	0.5	

Abb.5: Geometrie und Volumensfraktionen der Einkanalmodelle KI und KII

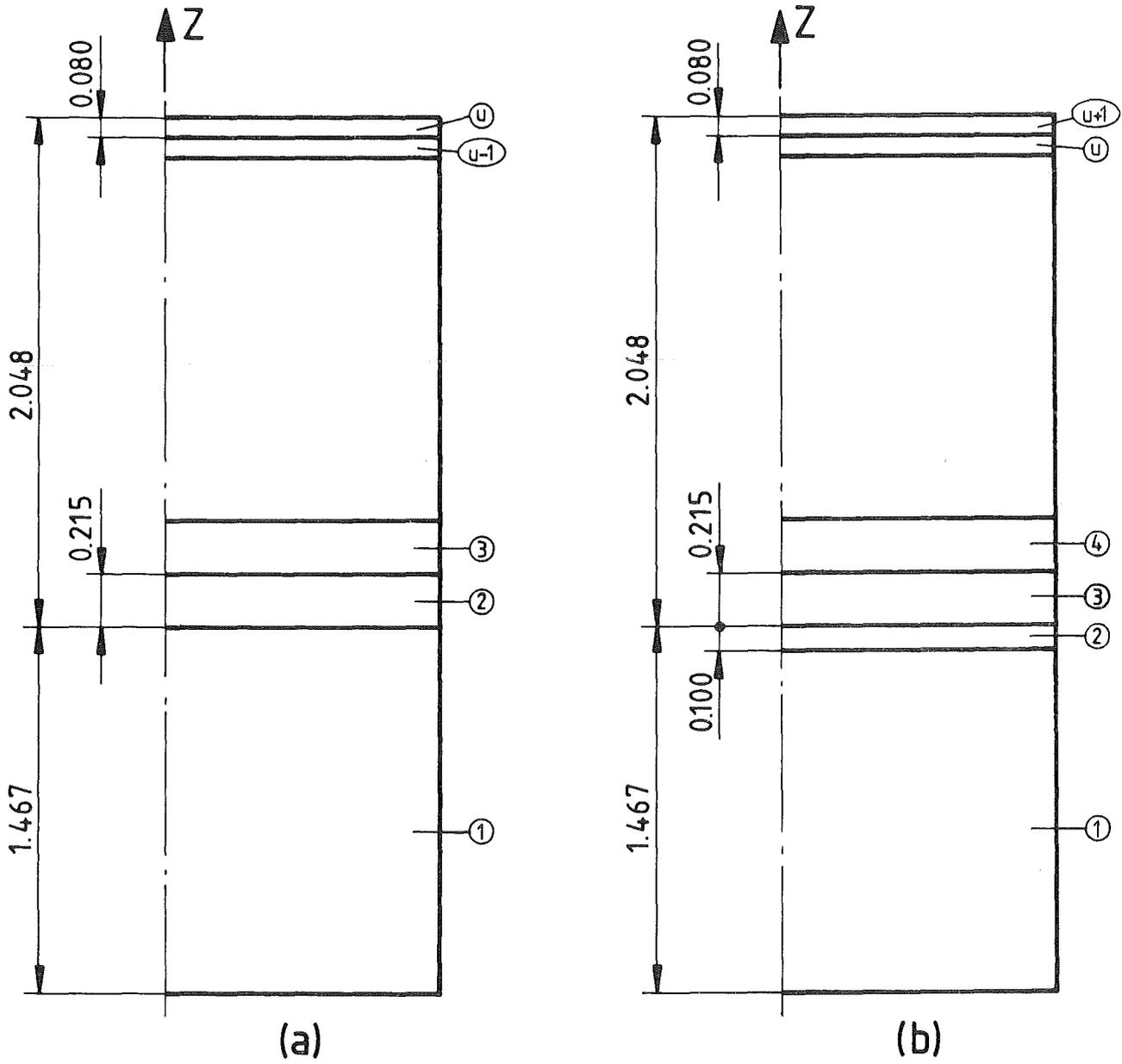


Abb. 6: Maschengitter (a) und (b) für die Einkanalmodelle KI und KII

den oberen Maschen gestoppt. Es handelt sich um einen kompressiblen Vorgang, der zu kleinen Schwingungen des Natriums führt, welche zwischen 20 - 30 ms bei Erreichen der endgültigen hydrostatischen Drücke durch Wirkung von Reibungskräften aufhören. Die dann erreichten Gleichgewichtsdrücke werden durch die inkompressiblen Formeln, wie sie oben entwickelt wurden, gut dargestellt.

Die Ergebnisse für die Einkanalmodelle KI und KII, Fall (a), mit nur einer Masche im unteren Plenum sind, in Tab. 1 dargestellt und zeigen, daß für KI die von SIMMER berechneten Druckdifferenz von 0.101 bar zwischen der ersten und zweiten unteren Masche wesentlich größer als der exakte Wert von 0.058 bar ist. Tab. 1 zeigt auch, daß diese Druckdifferenz recht genau durch die Gleichung (8a) dargestellt wird. Für Kanal KII liegen die Verhältnisse ähnlich, die Abweichungen sind aber - wegen der geringeren Änderung im Strömungsquerschnitt - wesentlich geringer. Druckverteilungen aus SIMMER-Rechnungen werden neben den Fehlern, die durch abrupte Querschnittsänderungen verursacht werden, auch andere numerische Fehler und systematische Abweichungen (kompressible Rechnung in SIMMER!) enthalten. Diese Differenzen sind jedoch recht klein und sollen im folgenden nicht näher diskutiert werden. In Tab. 1 sind auch die von SIMMER in der Basismasche berechneten Drücke enthalten. Sie werden im nächsten Abschnitt zur Erklärung des Auftretens von Bewegungen in gekoppelten Zweikanalsystemen herangezogen.

Um die Wirksamkeit der oben angegebenen Vorschrift zur Verringerung von Fehlern an plötzlichen Querschnittsänderungen zu überprüfen, wurde im Plenumsbereich eine weitere Masche eingezogen, wobei die Gesamtdimension des Plenums konstant gehalten wurde (Fall (b)). Die erste Masche wurde dabei in zwei Maschen unterteilt, mit den Dimensionen $\Delta z_1 = 1.367$ m und $\Delta z_2 = 0.1$ m. Die in Tab. 2 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die Fehler tatsächlich wesentlich kleiner sind als beim Einmaschenmodell des Plenums und daß die Druckdifferenzen auch hier durch die Gleichung (8a) gut dargestellt werden.

Im nächsten Abschnitt werden wir näher untersuchen, wie sich - wegen der anfänglich unterschiedlichen Drücke - eine Bewegung in zwei durch das Plenum radial gekoppelten Kanälen entwickelt.

Berechnungs- art Druck- differenz (bar)	Exakt Formel (3b)	KI		KII	
		SIMMER-II.9	Formel (2b)	SIMMER-II.9	Formel (2b)
$P_1 - P_2$	0.058	0.101	0.106	0.056	0.059
Druck (p_1) bar in Basismasche (Plenum)	-	2.181	-	2.136	-

Tab. 1: Vergleich von Druckdifferenzen der zwei untersten Maschen für das Einkanal-Modell, Fall (a), mit einer Masche im unteren Plenum (vgl. Abb. 5 und Abb. 6) nach Erreichen von hydrostatischen Gleichgewicht. Zur Diskussion der in Tab. 3 dargestellten Ergebnisse sind auch die Drücke in der Basismasche für die SIMMER-II.9 Rechnungen angegeben.

Berechnungsart	Exakt Formel (3b)	KI		KII	
		SIMMER-II.9	Formel (2b)	SIMMER-II.9	Formel (2b)
Druckdifferenz (bar)					
$P_2 - P_3$	0.011	0.014	0.014	0.010	0.011
$P_1 - P_2$	0.051	0.048	0.051	0.049	0.051
Druck p_1 (bar) in Basismaschine (liegt tiefer als in Tab. 1) (Plenum)	-	2.141	-	2.139	-

Tab. 2: Vergleich von Druckdifferenzen der drei untersten Maschen für das Einkanalmodell, Fall (b), mit zwei Maschen im unteren Plenum (vgl. Abb. 5 und Abb. 6) nach Erreichen von hydrostatischen Gleichgewicht. Zur Diskussion der in Tab. 4 dargestellten Ergebnisse sind auch die Drücke in der Basismaschine für die SIMMER-II.9 Rechnungen angegeben.

Kommunizierende Gefäße

Wir nehmen nun die zwei Kanäle KI und KII und koppeln sie wie folgt: Wir stellen KI zentral auf und fügen KII direkt benachbart an (vgl. Abb. 7, in welcher auch die Größen der jeweiligen radialen Maschen aus gewiesen sind.) Sodann stellen wir eine Kopplung der Kanäle über das Plenum her, in dem radiale Bewegung erlaubt ist. Die oberen Randbedingungen sind für beide Kanäle dieselben wie früher, nämlich konstanter Druck von 1.95 bar und kontinuierliches Ein/Ausfließen. Wegen der unterschiedlichen hydrostatischen Drücke, die sich sehr rasch ausbilden, wird es, ausgehend von der radialen Anfangsbeschleunigung im Plenum, zu Bewegungen kommen. Schon in der Einschwingphase von 20 - 30 ms, bei der die Druckdifferenzen z. T. durch den Einschwingvorgang gegeben sind, wird es zu Bewegungen durch die falschen Druckgradienten kommen.

Die radialen Druckdifferenzen im Plenum werden schließlich durch die Bewegung ausgeglichen. Es kommt zu einer stationären Strömung, indem sich die Wirkung der dissipativen Kräfte (z. B. Reibungskräfte an den Wänden, Druckverluste an abrupten Querschnittsänderungen) mit den falschen hydrostatischen Drücken kompensiert.

In Tab. 3 und 4 sind die Drücke und Geschwindigkeiten für die Gleichgewichtssituation des Zweikanalmodells dargestellt. Das Gleichgewicht wird dabei, falls das Plenum nur durch eine axiale Masche dargestellt wird (Fall (a), Abb. 7), in etwa 2 Sekunden erreicht. Bei der Zweimaschen-Modellierung des Plenums (Fall (b), Abb. 7) beobachtet man - wegen der komplizierteren dynamischen Impulsequilibrierung an plötzlichen Querschnittsänderungen - erst nach etwa 12 Sekunden Systemzeit annähernd ein Gleichgewicht. Für den Gleichgewichtszustand erreichen die axialen Geschwindigkeiten maximale Beträge.

Wir betrachten nun die in Tab. 3 dargestellten Gleichgewichtsergebnisse für das Zweikanalmodell (a) mit einer axialen Masche im unteren Plenum. Entsprechend den anfänglichen Druckunterschieden entwickelt sich eine Bewegung von innen nach außen. In KI fließt das Natrium mit einer Geschwindigkeit von - 0.66 m/s nach unten, die übrigen angegebenen Geschwindigkeiten ergeben sich aus der Kontinuitätsgleichung, d. h. aus den Strömungsquerschnitten. Die Radialgeschwindigkeit im unteren Plenum ist 0.13 m/s an der radialen Grenze zwischen den Kanälen ($r = 1.1$ m), und die Drücke sind im Plenum sind ausgeglichen.

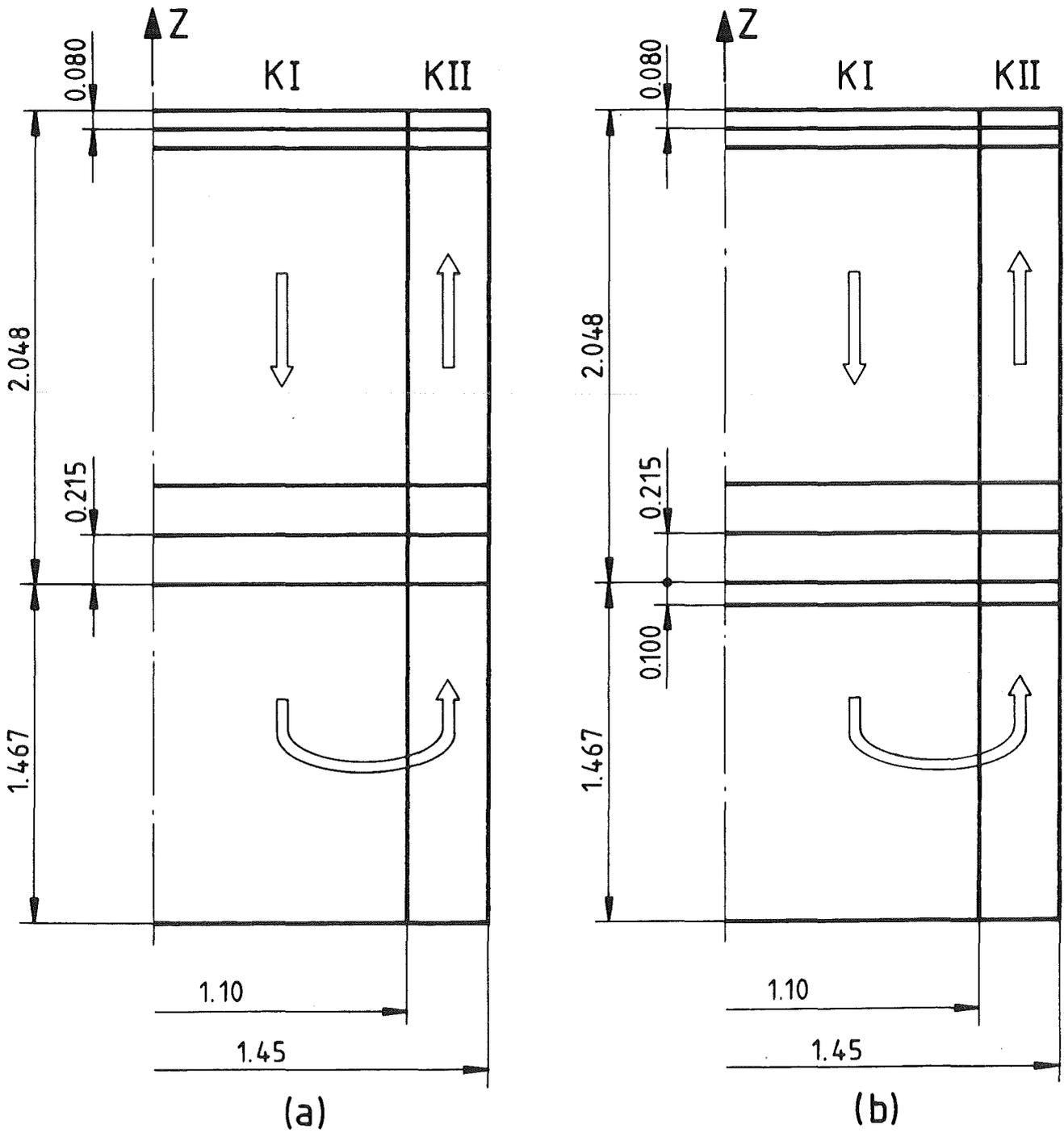


Abb. 7: Maschengitter (a) und (b) für das Zweikanalmodell

Die Ergebnisse für das Zweimaschenmodell (b) des Plenums sind in Tab. 4 dargestellt und zeigen für den Gleichgewichtszustand ebenfalls ausgeglichene Drücke im Plenum. Wegen der anfänglich geringeren radialen Druckdifferenzen im Plenum wird das Natrium weniger beschleunigt als im Einmaschen-Modell. Die stationären Geschwindigkeiten betragen nur etwa $1/5$ der Geschwindigkeiten beim Einmaschen-Modell des Plenums.

Vergleicht man die Ergebnisse von Tabellen 1, 2, 3 und 4, so sieht man, daß die Gleichgewichtsdrücke in den untersten Maschen der Zweikanalmodelle den hydrostatischen Drücken der untersten Maschen im Kanal KII sehr nahe kommen. Radiale Beschleunigung des Natriums im Plenum wird nur solange stattfinden, bis der radiale Druckgradient null ist. Die axialen Geschwindigkeiten an den abrupten Querschnittsänderungen werden dann im Gleichgewicht sein, wenn die mit den jeweiligen Geschwindigkeiten verbundenen Druckänderungen mit dem stationären Impulsstromterm auf der linken Seite der Impuls-Gleichung (1) im Gleichgewicht sind. Gerade hier neigt SIMMER zu größeren Fehlern, wie an anderer Stelle /4/ ausführlicher dargestellt wurde. Man muß also davon ausgehen, daß bei korrekter Berechnung des Impulsstromterms ein anderer Gleichgewichtszustand als der in den Tab. 3 und 4 beschriebene erreicht wird. Die Drücke am Rande bleiben gemäß den verwendeten Randbedingungen immer konstant und stellen somit einen festen Bezugspunkt für die Ausbildung der Gleichgewichtsdrücke dar.

Vertauscht man die Kanäle KI und KII in ihren radialen Positionen und verwendet dieselben Größen der radialen und axialen Maschen, so wird sich nach den dargestellten Überlegungen die Bewegungsrichtung umkehren. Eine SIMMER-II.9 Rechnung für das Einmaschen-Modell des unteren Plenums zeigte tatsächlich dieses Verhalten, wobei der Betrag der Geschwindigkeiten etwa den in Tab. 3 dargestellten Verhältnissen entsprach.

Schließlich wurde auch nachgeprüft, ob der Fehler in der Berechnung der hydrostatischen Drücke auch in der Version 10 von SIMMER-II eine Rolle spielt, wie es nach Überprüfung des Codes selbst naheliegend erschien. Tatsächlich wird in der Version 10 auch die Gleichung (2) zur Berechnung der hydrostatischen Drücke herangezogen, so daß man ein ähnliches Verhalten erwarten muß. In dem durchgeführten Testlauf zeigte sich dann eine Entwicklung der Bewegung in ähnlicher Größenordnung wie bei Rechnungen mit Version 9.

Masche	Drücke (bar) in gekoppelten Kanälen	
	KI	KII
2	2.039	2.080
1	2.138	2.138

Radialgeschwindigkeit (Plenum): 0.13 m/s

Axialgeschwindigkeiten (Masche 2 und darüber): KI: -0.66 m/s

KII: 0.46 m/s

Tab. 3: SIMMER-II.9 Ergebnisse für das Zweikanalmodell (a) mit einer axialen Masche im unteren Plenum; dargestellt sind die langfristigen Gleichgewichtsdrücke für die zwei unteren Maschen, die sich nach etwa zwei Sekunden Einlaufzeit einstellen, und die dazu gehörenden Geschwindigkeiten.

Masche	Drücke (bar) in gekoppelten Kanälen	
	KI	KII
3	2.077	2.080
2	2.090	2.090
1	2.139	2.139

Radialgeschwindigkeit (Plenum): 0.026 m/s

Axialgeschwindigkeiten (Masche 2 und darüber): KI: -0.14 m/s
KII: 0.097 m/s

Tab. 4: SIMMER-II.9 Ergebnisse für das Zweikanalmodell (b) mit zwei axialen Maschen im unteren Plenum; dargestellt sind die Gleichgewichtsdrücke für die drei unteren Maschen, die sich nach etwa zwölf Sekunden Einlaufzeit einstellen, und die dazu gehörenden Geschwindigkeiten.

Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Hydrostatische Gleichgewichtsdrücke werden in SIMMER-II.9 nur recht unvollkommen beschrieben, da diese Drücke von der Anwesenheit von Strukturen beeinflußt werden (was in der Natur bekanntlich nicht der Fall ist). Dieser Fehler fällt vor allem ins Gewicht, wenn sich die Anteile von Struktur von einer Masche zur nächsten stark ändern. Ein Vorschlag, wie man durch spezielle Wahl der Maschen die Fehler und ihre Auswirkung klein halten kann, wurde ausgearbeitet und anhand spezieller Beispiele anhand von SIMMER-Rechnungen verifiziert.

Eine befriedigende Behandlung von Fluidstatik und Fluiddynamik in SIMMER-II erfordert eine verbesserte Formulierung der Impulsgleichung. Insbesondere sollten an plötzlichen Querschnittsänderungen auch Beschleunigungseffekte und die Impulsströme hinreichend genau berechnet werden.

Referenzen

- /1/ H. Löffler, GRS Köln: persönliche Mitteilung (Januar 1986)
- /2/ L.L. Smith: SIMMER-II: A Computer Program for LMFBR Disrupted Core Analysis , NUREG/CR-0453 , LA-7515 , Rev. (June 1980)
- /3/ S. Kleinheins : SIMMER-II.9: Fluid Dynamic and Point Kinetics Structuring, Flowcharts , Tables and Equations unveröffentlicht (August 1984)
- /4/ P. Schmuck: An Efficient Method to Improve Flow Representation Across Abrupt Changes of Cross-Sectional Areas , Nucl. Technol. 71, p. 314 (1985)

Anhang: SIMMER-II.9 Daten für das Zweikanalmodell mit zwei axialen Maschen im unteren Plenum

Auf den folgenden Seiten sind die verwendeten Eingabedaten für das Zweikanalmodell mit zwei axialen Maschen im unteren Plenum (vgl. Abb. 6, Fall (b)) aufgelistet.

*****00000000111111112222222233333333444444445555555566666666777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C 1	0	-105Q07WRB										00000101	C 1
C 2	9	1	0	0	0	3	1	1	0	1		00000201	C 2
C 3	XXX											00000300	C 3
C 3	XXX	SIMMER II										00000400	C 3
C 3	XXX											00000500	C 3
C 3	XXX											00000601	C 3
C 3	XXX											00000700	C 3
C 3	XXX											00000801	C 3
C 3	XXX											00000901	C 3
C 3	XXX											00001000	C 3
C 3	XXX											00001100	C 3
C 4	10.000		-1.0			.99						00001201	C 4
C 5	2	16										00001301	C 5
C201	FLUID DYNAMICS											00009100	C201
C202	3	16	0	-2	1	0	9	0	0	0		00009200	C202
C203	0											00009300	C203
C204	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	00009400	C204
C205	1	1	1	2	1	3	1	4	1	5	1	600009410	C205
C205	2	1	2	2	2	3	2	4	2	5	2	600009420	C205
C206	15	100	200	10	50	5	0	-1	0	6	6	100009500	C206
C208	PROBLEM DIMENSIONS											00009600	C208
C209	1.100000		1		0.35000		2					00009700	C209
C210	1.367		1		0.1		2	0.215				400010200	C210
C210	0.3275		6		0.1608		8	0.080233				1600010300	C210
C211	0.5		0.0		-9.8							00010500	C211
C212	0.0001		1.0E-06		0.0001		0.001					00010600	C212
C213	1.0E-08		1.0E-10		1.0E-10		1.0E-05		0.1			00010700	C213
C214	0.05		0.90		0.5		100.		1.0E+5		100.	00010800	C214
C215	EDIT CONTROLS											00010900	C215
C216	0.0		0.0									00011000	C216

*****00000000111111112222222233333333444444445555555566666666777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C217	1.00		0.2									00011100	C217
C217												00011200	C217
C218	100.0		8.0									00011300	C218
C218												00011400	C218
C219	0.005		0.005									00011500	C219
C219	0.00000		0.000									00011600	C219
C220	1.		8.									00011700	C220
C220	0.0											00011800	C220
C221	40.		40.									00011900	C221
C221	0.0											00012000	C221
C222	400.		800.									00012100	C222
C222	0.0											00012200	C222
C223	0.0											00012300	C223
C223	0.0											00012400	C223
C224	0.0											00012500	C224
C224	0.0											00012600	C224
C225	0.0											00012700	C225
C226	0.0											00012800	C226
C227	0.0											00012900	C227
C228	VIEW FACTORS											00013000	C228
C229												00013100	C229
C230	TIME STEP CONTROLS											00013200	C230
C231	0.0		1.0E-04		1.0E-08		0.45					00013300	C231
C232	5.0E-03		0.50		10.0		1.0		1.0		1.000013400	00013400	C232
C233	762.0E+06		0.10		0.02		0.02		0.0		1.0E-1000013410	00013500	C233
C234	STRUCTURE PARAMETERS											00013600	C234
C235	0.5		0.0		0.0		0.0		0.0		0.000013600	00013700	C235
C235	0.0											00013800	C235
C236	0.5001		1.0		1.0		1.0					00013900	C236
C237	1.0E+12		1.0E+12		1.0E+12		1.0E+12		1.0E+12		1.0E+1200013900	00014000	C237

*****0000000011111111222222223333333333444444445555555566666666777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C238	1.0E+12	1.0E+12	1.0E+12					00014000	C238
C238A	0							00014010	C238A
C239	FUEL							00014100	C239
C240	9890.0	638.0	2977.3	2.76000E+05	2.0			00014200	C240
C241	8580.0	504.0	0.45	2.5	4.30000E-03			00014300	C241
C242	1.44000E+11	5.17080E+04	0.0	2.62000E+06	8400.0	0.597		00014400	C242
C243	511.0	1.05		4.4	0.000000000	270.0	6468.	00014500	C243
C244								00014600	C244
C239	STEEL							00014700	C239
C240	7365.0	639.0	1673.2	2.60000E+05	25.0			00014800	C240
C241	6100.0	750.0	1.6	20.0	5.36000E-03			00014900	C241
C242	1.33800E+11	4.33700E+04	0.0	8.17000E+06	10000.0	0.360		00015000	C242
C243	492.0	1.26		1.64	0.000000000	56.0	7700.	00015100	C243
C244								00015200	C244
C239	SODIUM							00015300	C239
C240	0.0							00015400	C240
C241	705.0	1300.0	0.1	50.0	1.50000E-04			00015500	C241
C242	3.27600E+09	1.20230E+04	10.0	4.81600E+06	2509.0	0.341		00015600	C242
C243	543.4	1.665		3.567	4.53500E+06	23.0	1375.	00015700	C243
C244	214.10	46.7						00015800	C244
C239	CONTROL							00015900	C239
C240	2520.0	1893.0	2623.0	2.50000E+05	83.74			00016000	C240
C241	2520.0	1890.0	1.0	80.0	1.00000E-03			00016100	C241
C242	4.28600E+14	8.36800E+04	0.0	5.00000E+06	7107.0	0.350		00016200	C242
C243	500.0	1.50		1.46	0.000000000	55.3	5472.	00016300	C243
C244								00016400	C244
C239	FISSION GAS							00016500	C239
C240	0.0	0.0	0.0	5.0E+6	0.0			00016600	C240
C241	1.							00016700	C241
C242	1.0E+12	4.0E+03	0.0	0.0	1.0		0.300016800	00016800	C242

*****0000000011111111222222223333333333444444445555555566666666777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C243	95.1	1.667	4.047	0.0E+00	131.0	231.000	16900		C243
C244							00017000		C244
C245	COMPONENT PROPERTIES						00017100		C245
C246	9890.0	9890.0	9890.0	9890.0	7365.0	7365.0	00017200		C246
C246	2520.0	0.0					00017300		C246
C247	8580.0	8580.0	6100.0	705.0	2520.0	9890.0	00017400		C247
C247	9890.0	7365.0	0.0				00017500		C247
C248	2.00000E+03	2.00000E+03	2.00000E+03	2.00000E+03	2.00000E+03	2.00000E+03	00017600		C248
C248	2.00000E+03	2.00000E+03	2.00000E+03				00017700		C248
C249	HEAT TRANSFER						00017800		C249
C250	0.2	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.000017900		C250
C251	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.00018000		C251
C252	1.	1.	1.				00018100		C252
C253	0.023	0.8	0.4	0.0			00018200		C253
C254	0.025	0.8	0.8	5.0			00018300		C254
C255	0.025	0.8	0.8	5.0			00018400		C255
C256	0.023	0.8	0.4	0.0			00018500		C256
C257	0.023	0.8	0.4	0.0			00018600		C257
C258	0.370	0.6	0.33	2.0			00018700		C258
C259	DRAG CORRELATION						00018800		C259
C260	1.0	22.0	2.0E-4	9.2E-7	1.0		00018900		C260
C261	2.5	1.0	0.5	1.	.60		00019000		C261
C262	0.096	-0.2	0.001	0.096	-0.2	0.00100019100			C262
C263	PRESSURE CONDITIONS						00019200		C263
C264	1.950E+05	1.950E+05					00019300		C264
C265	0.0	8.0					00019400		C265
C271	REGION PARAMETER SET 1						00019800		C271
C272	7.0	0.0	1.0E+05	0.0	0.0	0.000019900			C272
C273	0.0	0.0	32.	0.0	0.0	0.000020000			C273
C274	1000.	1000.	1000.	0.0	0.0	1.79E+400020100			C274

*****00000000111111112222222222333333333344444444445555555555666666666677777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300020200	C275
C275	1.0E-05	1.0				00020300	C275
C271	REGION PARAMETER SET 2					00020400	C271
C272	5.0	0.0	1.0E+05	0.0	0.0	1.2700020500	C272
C273	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.87100020600	C273
C274	1000.	1000.	1000.	0.0	0.0	0.500020700	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300020800	C275
C275	1.0E-05	1.0				00020900	C275
C271	REGION PARAMETER SET 3					00021000	C271
C272	3.0	0.2386	1.0E+05	0.0	0.003	0.002800021100	C272
C273	236.	278.	0.105	0.0	0.1199	0.129900021200	C273
C274	0.00533	0.00789	0.105	0.0	1.32E+5	1.79E+400021300	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300021400	C275
C275	1.0E-05	1.0				00021500	C275
C271	REGION PARAMETER SET 4					00021600	C271
C272	5.0	0.0	1.0E+05	0.0	0.0	0.0500021700	C272
C273	0.0	0.0	32.	0.0	0.0	0.799900021800	C273
C274	0.0025	0.0025	0.0025	0.0	0.0	1.79E+400021900	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300022000	C275
C275	1.0E-05	1.0				00022100	C275
C271	REGION PARAMETER SET 5					00022200	C271
C272	5.0	0.0	1.0E+05	0.0	0.0	0.0500022300	C272
C273	0.0	0.0	32.	0.0	0.0	0.013700022400	C273
C274	0.60	0.60	0.60	0.0	0.0	0.0000100022500	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300022600	C275
C275	1.0E-05	1.0				00022700	C275
C271	REGION PARAMETER SET 6					00022800	C271
C272	1.0	0.0	1.0E+5	5.15E-3	5.8E-3	0.001800022900	C272
C273	170.22	191.71	31.414	0.4668	0.118	0.06200023000	C273
C274	4.8396E-3	6.9484E-3	0.10516	1.29E+3	7.27E+4	2.22E+400023100	C274

*****00000000111111112222222222333333333344444444445555555555666666666677777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300023200	C275
C275	1.0E-05	1.0				00023300	C275
C271	REGION PARAMETER SET 7					00023400	C271
C272	3.0	0.08	1.0E+5	0.0	1.5E-4	0.0100023500	C272
C273	0.0	16.	24.	0.0	0.218	.10500023600	C273
C274	0.054	0.090	0.09	0.0	5000.	5000.00023700	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300023800	C275
C275	1.0E-05	100.				00023900	C275
C271	REGION PARAMETER SET 8					00024000	C271
C272	3.	0.2	1.0E+5	0.0	0.1	0.002800024100	C272
C273	0.0	16.	16.	0.0	0.055	0.05500024200	C273
C274	0.105	0.105	0.105	0.0	1.79E+4	1.79E+400024300	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300024400	C275
C275	1.0E-05	1.0				00024500	C275
C271	REGION PARAMETER SET 9					00024600	C271
C272	1.0	0.0	1.0E+5	0.002545	0.003	0.002800024700	C272
C273	236.	278.	32.	0.2386	0.1199	0.1299 00024800	C273
C274	0.00533	0.00789	0.105	2620.	1.32E+5	1.79E+400024900	C274
C275	1950.	0.68	1.0E+5	2.3E-5	1.0E-17	1.0E-0300025000	C275
C275	1.0E-05	1.0				00025100	C275
C276	LOWER BOUNDARY VELOCITIES					00025200	C276
C277	0.0	0.0	0.0			00025300	C277
C278	0.0	0.0	0.0			00025400	C278
C279	MESH POINT SET 1					00025900	C279
C280	3 16 1 1 1 0 0 9					00026000	C280
C282	2360.	0.0	0.0	0.0	883.	957.00026100	C282
C282	0.0	0.0	0.0			00026200	C282
C283	1235.	0.0	1235.	1235.	0.0	00026300	C283
C284	0.0	0.0	0.0	355.	0;0	0.000026400	C284
C284	0.0	0.0				00026500	C284

```
*****0000000011111111222222223333333333444444445555555566666666777777778*****
*****1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*****

C285      0000.0      0.0      1235.      0.0      0.0      0000.00026600      C285
C287      0.0      0.0      0.0      .43690      0.0      00026700      C287
C288      1235.      0.0      0.0      0.0      0.0      00026800      C288
C289      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0001      0.000100026900      C289
C279      MESH POINT SET 3 OUTER NA ANNULUS
C280      3      16      2      2      1      1      0      0      5      00028100      C279
C282      0000.      0.0      0.0      0.0      0.0      000.      101.00028200      C280
C282      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      00028300      C282
C283      000.      0.0      000.      1235.      0.0      00028400      C282
C284      0.0      0.0      0.0      694.      0.0      0.00028500      C283
C284      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.00028600      C284
C285      0000.0      0.0      1235.      0.0      0.0      0000.00028700      C284
C285      0000.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0000.00028800      C285
C287      0.0      0.0      0.0      .43690      0.0      00028900      C287
C288      1235.      0.0      0.0      0.0      0.0      00029000      C288
C289      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0001      0.000100029100      C289
C279      MESH POINT SET 4 NA INLET
C280      1      2      1      2      1      1      0      0      1      00029200      C279
C282      0000.      0.0      0.0      0.0      0.0      000.      000.00029300      C280
C282      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      00029400      C282
C283      000.      0.0      000.      000.      0.0      00029500      C282
C284      0.0      0.0      0.0      672.      0.0      00029600      C283
C284      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.00029700      C284
C285      0000.0      0.0      1235.      0.0      0.0      0000.00029800      C284
C285      0000.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0000.00029900      C285
C287      0.0      0.0      0.0      .43690      0.0      00030000      C287
C288      1235.      0.0      0.0      0.0      0.0      00030100      C288
C289      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0001      0.000100030200      C289
```