

KfK 5115  
Dezember 1992

**SIMMER-II Simulationen von  
THEFIS-Experimenten  
zum Ausfrierverhalten von  
Thermitschmelzen mit  
und ohne Partikel**

W. Maschek, M. Flad, G. Fieg  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 5115

SIMMER-II Simulationen von THEFIS-Experimenten zum Ausfrierverhalten  
von Thermitschmelzen mit und ohne Partikel

W. Maschek, M. Flad\*, G. Fieg

\* D.T.I. Dr. Trippe Ingenieurgesellschaft mbH

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **SIMMER-II Simulationen von THEFIS-Experimenten zum Ausfrierverhalten von Thermitschmelzen mit und ohne Partikel**

### Kurzfassung

Fließ- und Ausfrierprozesse von heißen Kernmaterialien an kälteren Strukturen stellen Schlüsselphänomene dar, die im Hinblick auf hypothetische kernzerstörende Unfälle (HCDA) in Natriumgekühlten Schnellen Reaktoren untersucht werden müssen. Diese Prozesse entscheiden maßgeblich über mögliche Materialentladungen aus der Kernzone und folglich über das Brennstoffinventar während eines Unfalls. Dadurch wird sowohl der Unfallverlauf wie auch die potentielle Energiefreisetzung bei Exkursionen bestimmt.

Der Fließ- und Gefrierprozeß kann entscheidend durch Partikel, die sich an der Front der Strömung befinden, beeinflusst werden. Generell muß man beim Vorhandensein von Partikeln mit sehr viel kürzeren Eindringtiefen in Strukturen rechnen.

In der THEFIS Anlage wurden Experimente durchgeführt in denen der Einfluß von Partikelblockaden auf die Strömung untersucht wurde. In diesen Experimenten wurde Aluminiumoxid als Schmelze verwendet, wobei feste Aluminiumoxidpartikel gleichzeitig in den Strömungskanal eingebracht wurden. Mit Hilfe des SIMMER-II Codes wurden diese Experimente näher analysiert und interpretiert.

## **SIMMER-II Simulations of THEFIS Experiments for Freezing Behaviour of Thermite Melts with and without Particles**

### **Abstract**

Flowing and freezing processes of hot core material mixtures in colder structures are key phenomena to be analyzed for hypothetical core disruptive accidents (HCDA). Flowing and freezing processes decisively determine possible material discharges from the core and consequently the fuel inventory under accident conditions. In this way both the accident scenario and the energetics potential of the accident are determined.

The flowing and freezing process may be decisively influenced by particles at the leading edge of the flow. Generally with particles much shorter penetration lengths of the liquid fuel into substrate structures must be expected.

An experimental series has been performed in the THEFIS facility to analyze the influence of particle blockages. In these series of experiments liquid alumina was used as the single phase melt penetrating the structures equipped with artificial blockages. These blockages consisted of solid alumina particles. With the help of the SIMMER-II code these experiments were more closely analyzed and interpreted.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1) Einleitung	1
2) SIMMER-Programm-Version, Aufbau des SIMMER-Datensatzes sowie numerische Voruntersuchungen	4
2.1 Zur SIMMER-Programm-Version	4
2.2 Aufbau des SIMMER-Datensatzes	4
2.3 Einfluß des gewählten Maschennetzes auf den Material- dichteverlauf im Rohr	7
3) SIMMER-Rechnungen zum Ausfrierverhalten einer überhitzten Schmelze in einem Quarzrohr	9
3.1 Bestimmung einer Referenzlösung mit SIMMER	9
3.2 Einfluß verschiedener Parameter auf die Referenzlösung	12
3.2.1 Einfluß der Wärmestrahlung	12
3.2.2 Einfluß der Viskosität des $\text{Al}_2\text{O}_3$	12
3.2.3 Einfluß der Ausbildung eines Spalts zwischen Kruste und Quarzrohr auf die radiale Wärmeleitung	14
3.2.4 Einfluß des Druckverlaufs auf die Anlaufströmung der $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze	15
3.3 Einfluß der Überhitzung auf die Eindringtiefe	16
3.4 Kurze Bewertung der SIMMER-Referenzrechnung	19
4) SIMMER-Rechnungen zum Ausfrierverhalten einer überhitzten Schmelze in einem Quarzrohr mit Partikelbetten	20
4.1 Kurze Beschreibung des Viskositätsmodells in SIMMER	20
4.2 Experimentelle Ergebnisse für das Ausfrierverhalten von Strömungen mit Partikelbetten	21
4.3 SIMMER-Rechnungen für die verschiedenen Partikelbetthöhen	26
4.3.1 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 25 mm	28
4.3.2 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 30 mm	29
4.3.3 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 40 mm	30
4.3.4 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 50 mm	31
4.3.5 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 80 mm	32

	Seite
4.3.6 Einfluß der Partikeldichte auf die Eindringtiefe des Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Schmelz/Partikelgemisches	33
4.3.7 Einfluß des Partikeldurchmessers auf die Eindringtiefe des Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Schmelz/Partikelgemisches	34
4.3.8 Einfluß der Viskosität der Schmelze auf die Eindringtiefe des Flüssigkeits/Partikelgemisches	35
4.4 Bewertung der SIMMER Rechnungen für Partikelblockaden	36
5) Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	40
6) Literatur	42

## 1. Einleitung

Fließ- und Ausfrierprozesse von heißen Kernmaterialien an kälteren Strukturen stellen Schlüsselphänomene dar, die im Hinblick auf hypothetische kernzerstörende Unfälle (HCDA) in Natriumgekühlten Schnellen Reaktoren untersucht werden müssen. Diese Prozesse entscheiden maßgeblich über mögliche Materialentladungen aus der Kernzone und folglich über das Brennstoffinventar während eines Unfalls /1/. Dadurch wird sowohl der Unfallverlauf wie auch die potentielle Energiefreisetzung bei Exkursionen bestimmt. Wird zu einem frühen Zeitpunkt genügend Brennstoff aus der Kernzone ausgetragen (etwa 30 - 40 % Prozent des Inventars), so mündet der Unfall nicht in die sogenannte späte Übergangsphase. In dieser Phase kommt es zur Ausbildung eines großen neutronisch aktiven Brennstoffpools, der das Potential für energetische Leistungsexkursionen in sich birgt /2/.

Während des Zusammenschmelzens des Kerns (in der frühen Übergangsphase) bieten sich nach und nach verschiedene Wege zur Brennstoffentladung aus dem Kern an. Zunächst ist die direkte Materialentladung in axialer Richtung durch die Kühlkanäle eines Brennelements möglich. Nach dem Aufschmelzen der Brennelementkästen steht das Spaltensystem zwischen benachbarten Kästen in axialer und radialer Richtung zur Verfügung. In späteren Unfallphasen können sich auch Entladungswege im Bereich der Kontrollstäbe etc. öffnen.

Wegen der Wichtigkeit der Ausfrierphänomene wurde eine Vielzahl von in- und out-of-pile Experimenten durchgeführt. Diese Versuche reichen von Grundlagenexperimenten wie TRAN /3/, THEFIS /4/, ANL /5/, GEYSER /6/, SMP/LMP /7/ etc., in denen hauptsächlich definierte Schmelzmengen in vorbereitete Strukturen injiziert werden, bis hin zu aufwendigen transienten Experimenten wie SIMBATH /8/, CABRI /9/, ANL /10/ oder SCARABEE /11/, in denen der ganze Ablauf vom Aufbrechen des Brennstabs bis zur Blockadebildung und das Zusammenwirken verschiedener Phänomene simuliert wird.

Die umfangreichen Informationen, die aus den Experimenten gewonnen wurden, flossen in verschiedene Rechenprogramme ein, z.B. in spezielle Codes zum Ausfrierverhalten wie PLUGM /12/ oder BUCOGEL /13/ oder in vielseitig anwendbare Programme wie SIMMER-II /14/. Im wesentlichen wurden, basierend auf den gewonnenen experimentellen Ergebnisse, zwei Hauptmodelle entwickelt: Das durch Krustenbildung bestimmte Ausfriermodell (conduction limited freezing

model) und das durch Pfropfenbildung bestimmte Ausfrierverhalten (bulk limited freezing model), oder auch eine Kombination aus beiden /15/.

Besonders die nähere Betrachtung der integralen Experimente, wie SIMBATH oder CABRI, welche die Brennstoffentladung durch die Kühlquerschnitte eines Brennelements untersuchen, zeigt deutlich, daß die Blockadebildung in entscheidendem Maße durch das Vorhandensein von Partikeln und Bruchstücken an der Schmelzfront beeinflußt wird. Das Zusammenwirken dieser Partikel mit den Abstandshaltern ist von weiterer Bedeutung. Feste Brennstoffpartikel stammen in erster Linie von aufgebrochenen Brennstoffpellets. Nach dem Aufbrechen des Brennstabs können diese Partikel (z.B. an den Abstandshaltern) zu frühzeitiger Blockadebildung führen, ehe sich der Hauptteil des flüssigen  $\text{UO}_2$  in den Kühlkanal ergießt. Partikel können sich auch mit der flüssigen Phase fortbewegen und dann Blockaden bilden. Schon Greene /16/ hat gezeigt, daß diese Festkörperpartikel in der Schmelze den Erstarrungsprozeß stark beschleunigen. In diesen Experimenten wurde flüssiges Paraffin mit 10 % Woods-Metall als feste Phase versetzt. Die Zeit bis zur Pfropfenbildung - und damit die ins Versuchsrohr eindringende Mischungsmenge - wurde drastisch reduziert verglichen mit dem Experiment, in dem nur flüssiges Paraffin eingesetzt wurde.

Aus den theoretischen Unfallanalysen /1/ ergibt sich, daß Flüssigkeits/Partikel-Mischungen in der Kernzone vorhanden sind, im besonderen nach einer milden Primärexkursion. Aufgrund der oben erwähnten Versuche muß man mit geringeren Eindringtiefen des flüssigen Brennstoffs in die Kühlkanäle rechnen, wenn sich Partikel in der Strömung befinden. Partikel spielen damit eine wichtige Rolle bei der Blockadebildung.

In den KfK-THEFIS (Thermite Freezing in Structures) Experimenten werden das Ausfrierverhalten einer  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$  Thermiterschmelze in kälteren Stahl/Quarzstrukturen untersucht. Dabei werden Rohr- oder Bündelstrukturen von oben in einen Schmelztiegel getaucht und die um  $\sim 200$  °K überhitzte Schmelze floß unter einer aufgebrachten Druckdifferenz von bis zu 10 bar in die Strukturen hinein. Unter Ausnutzung von Separationsprozessen in der Thermiterschmelze kann dabei sowohl mit reinen Materialien als auch mit einem Materialgemisch gearbeitet werden. Bei den Experimenten zur Bestimmung der Eindringtiefen in Rohr- oder Bündelstrukturen ist die zur Verfügung stehende Schmelzmasse sehr viel höher als die zur Füllung der Strukturen notwendige Thermitmasse. Die Details der THEFIS-Experimente sind in zahlreichen Berichten dokumentiert /17 - 20/.

Die großen gemessenen Eindringtiefen bei den Thefisexperimenten ohne Partikel entsprechen den Verhältnissen bei Vorliegen eines sog. "conduction limited" Ausfrierprozesses /15/. In den Experimenten wurden dementsprechend stets stabile Krusten auf den Substratstrukturen festgestellt.

In weiteren THEFIS-Experimenten wurde auch der Einfluß von Partikelblockaden auf das Strömungs- und Ausfrierverhalten der Thermitschmelze untersucht /21/.

In einer ersten experimentellen Serie wurde ein bewegliches Partikelbett mit verschiedenen Höhen von 2 - 8 cm oberhalb einer Aluminiumfolie angebracht. Nach Aufschmelzen der Folie konnte die Schmelze das Partikelbett durchdringen bzw. dieses aufwärts in das Quarzrohr transportieren.

In einer weiteren Serie wurden Partikelbetten verschiedener Höhe von 1,6 - 8 cm in einem festen Käfig an einer bestimmten Stelle in dem Quarzrohr angebracht und das Durchdringungsverhalten der Schmelze untersucht. Die Experimente mit Partikelblockaden wurden aus Gründen der visuellen Beobachtbarkeit mit Quarzrohren durchgeführt.

Mit Hilfe des SIMMER-II Codes wurden die oben beschriebenen Experimente analysiert. Die grundsätzliche Schwierigkeit bei der Beschreibung von Partikelblockaden stellt dabei die vollständige Kopplung der Flüssigkeit und Partikel in einem Geschwindigkeitsfeld in SIMMER dar. Eine Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Partikel und damit das Durchströmen einer Partikelblockade kann damit nicht direkt dargestellt werden, sondern es können nur über sog. Viskositätsmodelle in SIMMER die globalen Bewegungsvorgänge und Eindringtiefen des Flüssigkeits/Partikelgemisches simuliert werden.

Die vorliegenden Analysen dienen vor allem dazu, die Phänomene beim Ausfrierverhalten von Partikel/Schmelzgemischen besser zu verstehen und zu quantifizieren. Des Weiteren sollte Information bei der Modellierung solcher Blockaden bei Störfallrechnungen gewonnen werden.

Schließlich waren diese Rechnungen als Vorstufe für Vorausrechnungen von Experimenten an der SUSI Anlage /30/ sowohl mit  $Al_2O_3$  und flüssigem  $UO_2$  gedacht. Aus diesem Grunde wurden zahlreiche Parameter, die das Eindringen der Schmelze in die Strukturen beeinflussen können, näher untersucht und variiert. Diese Experimente konnten allerdings nicht mehr durchgeführt werden.

## **2. SIMMER-Programm-Version, Aufbau des SIMMER-Datensatzes sowie numerische Voruntersuchungen**

### **2.1 Zur SIMMER-Programm-Version**

Für die Untersuchungen wurde die SIMMER-II Standard-Version 10 verwendet. Diese Version 10 enthält gegenüber den älteren SIMMER-Versionen das sog. "non equilibrium freezing" Modell /14/.

Zur besseren Beschreibung des Druckverlustes beim Übergang von der Schmelzkammer in das Rohr wurden die in /29/ vorgeschlagenen Korrekturen in der Impulsgleichung berücksichtigt.

In den Thefisexperimenten kommt es durch massives Ausfrieren von Krusten an den kälteren Wandstrukturen zur Verengung des Strömungsquerschnittes. Wie die Analysen in /23/ zeigten, sollte optimalerweise bei jeder Querschnittsänderung (in Form einer Blende) mindestens 2 Rechenmaschen verwendet werden. Dies ist bei der Modellierung der transienten Ausfriervorgänge in SIMMER nicht möglich, da sich der Querschnitt in jeder Einzelmasche durch Gefrierprozesse ändert. Allerdings ist die schrittweise Änderung des Querschnittes nur sehr gering. Eine weitere Änderung in SIMMER betrifft eine konsistente Modellierung der Rohrgeometrie, da die Strukturwand in SIMMER i.a. als Platte behandelt wird.

### **2.2 Aufbau des SIMMER-Datensatzes**

Die SIMMER Analysen für die THEFIS Experimente wurden in quasi-eindimensionaler Geometrie durchgeführt. Diese Geometrie wurde gewählt, um aus den Rechnungen auch Informationen für die Modellierung bei Störfallanalysen zu gewinnen, bei denen die Brennelementstrukturen i.a. auch in axial eindimensionaler Geometrie modelliert werden.

In dieser quasi-eindimensionalen Modellierung wird dabei der Flüssigkeit, der sich bildenden Brennstoffkruste, sowie dem Quarzrohr je ein Temperaturpunkt zugewiesen und die radialen Wärmeaustauschvorgänge modelliert. Der Außenraum, in den das Quarzrohr abstrahlen kann, wird nicht berücksichtigt.

Mit diesen Näherungen können extrem schnelle Temperaturtransienten im System natürlich nur approximativ beschrieben werden.

Modelliert wird in SIMMER ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Reservoir, welches in eine Quarz-Rohrstruktur mit einem Innen (Außen)-durchmesser von 6 mm bzw. 8 mm übergeht. Das  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Reservoir wird mit einer Druckrampe beaufschlagt, die in SIMMER als Treppenfunktion approximiert wird.

Bei den THEFIS-Analysen wurden jeweils 2 Serien von Rechnungen durchgeführt. Um einen Bezugspunkt für den Einfluß der Partikelblockaden auf die Bewegung der Schmelze zu erhalten, wurde zuerst das Ausfrierverhalten der reinen Schmelze und deren Eindringtiefe in das Quarzrohr untersucht.

Bei den entsprechenden Untersuchungen mit Partikelblockaden wurde eine Partikelblockade von vorgegebener Höhe am Ausgang des Reservoirs angesetzt. Im Experiment wurden durch Sieben aus einer größeren Verteilung Partikeldurchmesser zwischen 0.5 bis 2.5 mm ausgewählt, wobei eine genaue Verteilung der Partikeldurchmesser nicht bekannt war. In SIMMER kann keine Partikelverteilung sondern nur eine vorgegebene Partikelgröße berücksichtigt werden. Als Standarddurchmesser wurde für die Rechnungen 2 mm verwendet. Mittels einer Parametervariation wurde der Einfluß der Partikelgröße abgeschätzt.

Als Rohrreibungsparameter wurden die der Blasiusbeziehung /24/ angesetzt. Ein spezieller Parameter in SIMMER, ALDRG, die Strukturvolumenfraktion, bei der in SIMMER die Rohrreibung extrem hoch wird, wurde mit  $\alpha = 0.99$  sehr hoch angesetzt, um die Strömung nicht künstlich zu unterbinden /14/.

Die bei den Rechnungen verwendeten Zustandsdaten für  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Quarz sowie für Füllgas sind in der Tab. 2.1 zusammengestellt. Sie wurden teilweise aus Konsistenzgründen zu früher durchgeführten PLUGM-Rechnungen von G. Fieg /21/ übernommen.

Wie Untersuchungen zeigten, hängt die Eindringtiefe vom gewählten Wert der Viskosität des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ab. Für die Standard-Rechnungen wurde der von G. Fieg in den PLUGM-Rechnungen benutzte Wert von  $5.01 \cdot 10^{-2}$  Pas übernommen. Dieser Wert ist höher als der von K. Thurnay in /25/ vorgeschlagene Wert (siehe Abb. 2.1).

MATERIAL PROPERTIES AND EQUATION OF STATE DATA

		AL2O3	QUARZ	FUELLGAS
-----SOLID STATE-----				
MICROSCOPIC DENSITY	ROSE	3.95000E+03	2.65000E+03	---
SPECIFIC HEAT	CVS	1.42000E+03	1.27000E+03	---
MELT TEMPERATURE	TMLT	2.10000E+03	2.30000E+03	---
HEAT OF FUSION	HFUS	1.16000E+06	2.00000E+05	---
THERMAL CONDUCTIVITY	THCONS	5.50000E+00	3.50000E+00	---
-----LIQUID STATE-----				
MICROSCOPIC DENSITY	ROLE	3.00000E+03	2.65000E+03	---
SPECIFIC HEAT	CVL	1.42000E+03	1.27000E+03	---
SURFACE TENSION	SIG	6.80000E-01	1.60000E+03	---
THERMAL CONDUCTIVITY	THCONL	6.00000E+00	3.50000E+05	---
VISCOSITY	XMUL	5.01000E-02	5.01000E-02	---
-----VAPOR STATE-----				
VAPOR PRESSURE PARAMETER	PSTAR	---	---	1.00000E+11
VAPOR PRESSURE PARAMETER	TSTAR	---	---	4.00000E+04
HEAT OF VAPORIZATION PARAMETER	HSTAR	---	---	5.00000E+06
CRITICAL TEMPERATURE	TCRIT	---	---	1.26200E+02
HEAT OF VAPORIZATION PARAMETER	ZETA	---	---	3.00000E-01
SPECIFIC HEAT	CVG	---	---	7.27000E+02
SPECIFIC HEAT RATIO	GAM	---	---	1.40400E+00
MOLECULAR DIAMETER	ATOM	---	---	3.79800E+00
CRITICAL ENERGY	ENCRIT	---	---	5.00000E+06
MOLECULAR WEIGHT	WTMOLZ	---	---	2.80130E+01
MOLECULAR FORCE CONSTANT	EPSK	---	---	7.14000E+01
POLY-ATOMIC FLAG	MONO	---	---	1

9

Tab. 2.1: Zustandsdaten für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Quarz und Füllgas [MKS System]

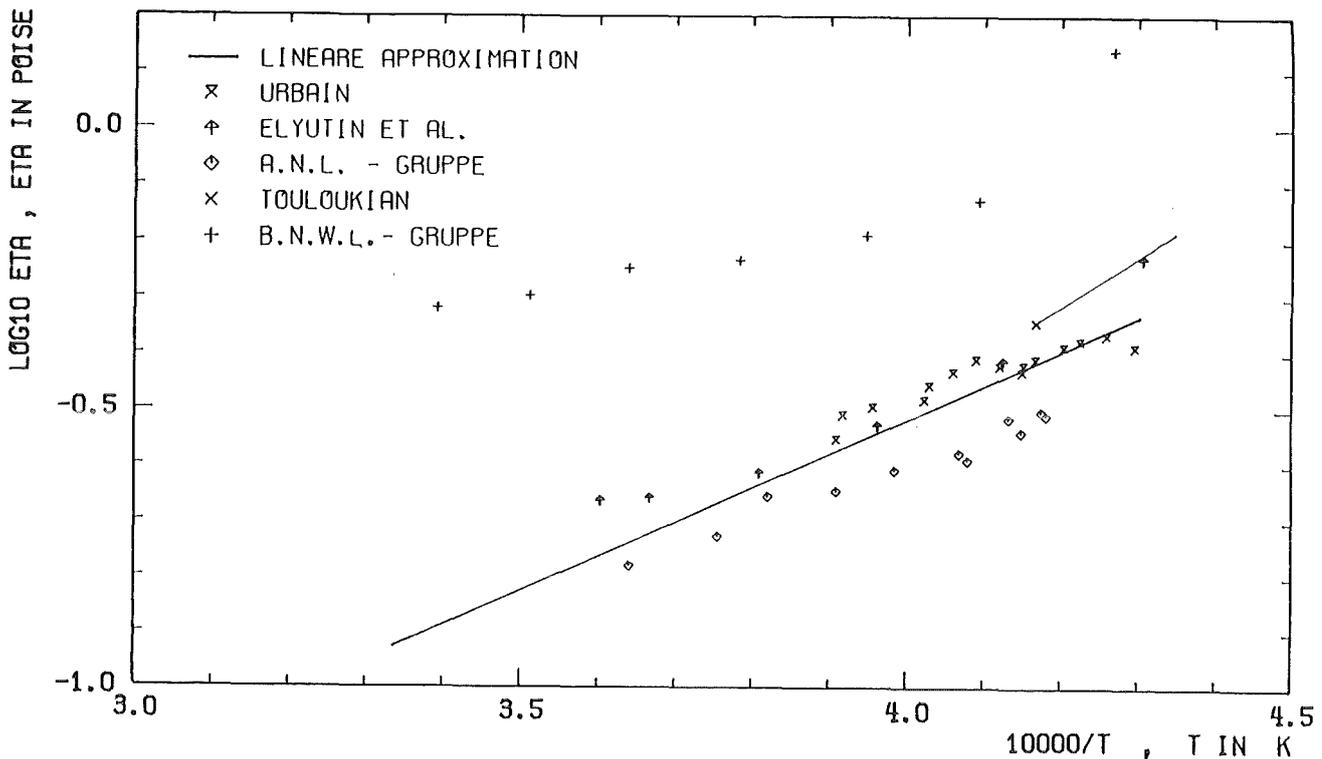


Abb. 2.1: Angaben zur Viskosität des flüssigen Aluminiumoxids aus /25/

### 2.3 Einfluß des gewählten Maschennetzes auf den Materialdichteverlauf im Rohr

Die Größe der Maschenweiten bei der Diskretisierung beeinflusst über die numerische Diffusion die Schnelligkeit des Vordringens der Flüssigkeitsfront in der simulierten Rohrstruktur. Durch derartige numerisch bedingte Verschmierungseffekte werden i.a. zu große Eindringtiefen der Flüssigkeit berechnet.

Vor den eigentlichen SIMMER-Rechnungen für THEFIS wurde daher der Einfluß der Maschengröße auf die Eindringtiefe des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in die Rohrstruktur mit verschiedenen Maschengittern untersucht.

Ein verfeinertes Maschennetz bedeutet erhöhte Rechenzeiten, so daß hier stets ein Kompromiß zwischen Aufwand und Genauigkeit erzielt werden muß.

In der Abb. 2.3 ist der Flüssigkeitsverlauf beim Eindringen in die Rohrstruktur bei den Maschenweiten  $\Delta z = 8 \text{ cm}$ ,  $\Delta z = 4 \text{ cm}$  und  $\Delta z = 2 \text{ cm}$  zu sehen. Aus der Abbildung wird deutlich, daß bei großen Maschenweiten  $\Delta z = 8 \text{ cm}$  Material axial sehr weit verschmiert wird.

Werden kleinere Schrittweiten von 4 cm bzw. 2 cm verwendet, so ergeben sich sehr viel steilere Gradienten der Volumenfraktion über der Ortskoordinate.

Für die Thefis Rechnungen wurde daher ein Basismaschennetz von  $\Delta z = 2$  cm gewählt. Um die Partikelblockagen geometrisch zu modellieren wurden z.T. noch kleinere Schrittweiten gewählt.

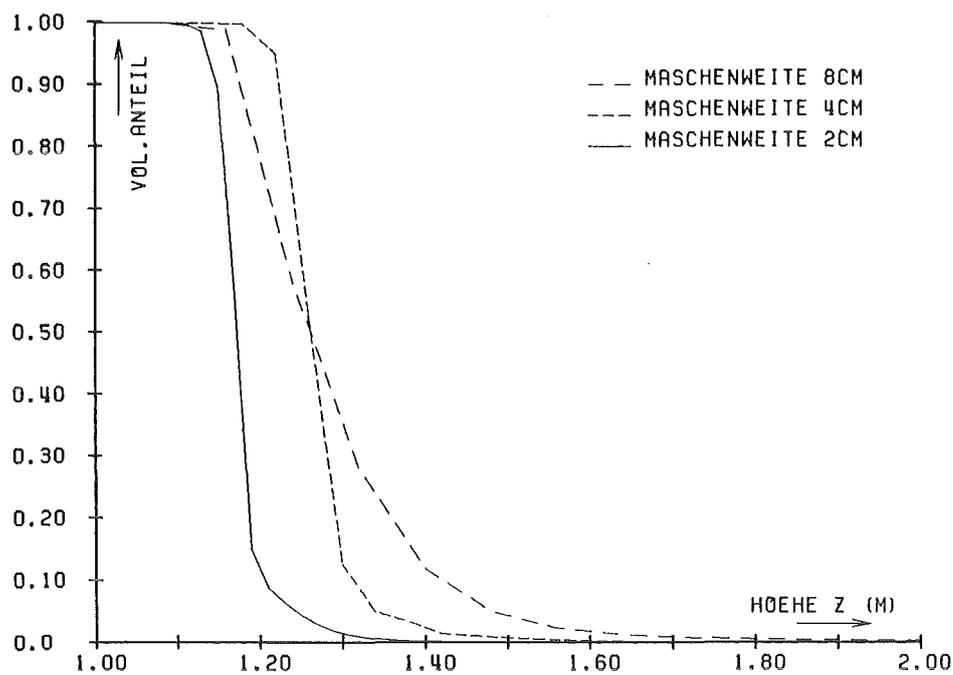


Abb. 2.3: Vergleich der Volumenfraktion des Flüssig-/Festanteils über der axialen Eindringtiefe für verschiedene Rechengitter

### 3. SIMMER-Rechnungen zum Ausfrierverhalten einer überhitzten Schmelze in einem Quarzrohr

Mit dem in Kap. 2 beschriebenen geometrischen Modell des THEFIS-Experimentes sowie mit den angegebenen Eingabedaten/Zustandsdaten wurden zuerst SIMMER-Rechnungen für eine einfache Rohrstruktur ohne Partikelblockaden durchgeführt.

#### 3.1 Bestimmung einer Referenzlösung mit SIMMER

In einem ersten Schritt erfolgte eine SIMMER-Rechnung mit den in Kap. 2 angegebenen Standarddaten. Diese SIMMER-Rechnung diente als Referenzlösung, um später den Einfluß der Partikelblockaden auf die Fließ/Gefriervorgänge zu bestimmen. Die Überhitzung der Schmelze beträgt bei diesen Experimenten/Rechnungen stets 200 K.

In den folgenden Bildern 3.1.1 (Fig. 1 bis 6) ist zuerst die Materialverteilung (Flüssigkeit/Kruste) zu den Zeitpunkten  $t = 0.0 \text{ sec}$ ,  $t = 0.5 \text{ sec}$ ,  $t = 1.0 \text{ sec}$ ,  $t = 1.5 \text{ sec}$ ,  $t = 2.0 \text{ sec}$  und  $t = 2.5 \text{ sec}$  nach Beginn des Einströmens in das Rohr dargestellt, aus der Abb. 3.1.2 ist dann der zeitliche Verlauf des Eindringens der Schmelze in das Rohr zu ersehen.

Dieser zeitliche Verlauf ist typisch für das "conduction limited" Ausfrieren bei dem asymptotisch die maximale Eindringtiefe erreicht wird (im Gegensatz zum "bulk freezing" bei der die Strömung an einem Punkt abrupt stehen bleibt).

Aus den Materialverteilungen zu verschiedenen Zeiten ist das rasche Anwachsen der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kruste ersichtlich, welche schließlich den Strömungskanal ausfüllt und die Strömung zum Stillstand bringt. Dies wird auch deutlich in der Abb. 3.1.2, bei der das Endniveau der eingedrungenen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze bei  $\sim 130 \text{ cm}$  Rohrhöhe stehenbleibt.

Verglichen mit dem Experiment zeigt die sog. Standard-SIMMER-Rechnung, daß

- die Eindringtiefe um weniger als 10 % unterschätzt wird
- der Anstieg des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Niveaus im Rohr etwas zu langsam erfolgt.

Die Ursachen für diese Abweichungen werden im folgenden diskutiert.

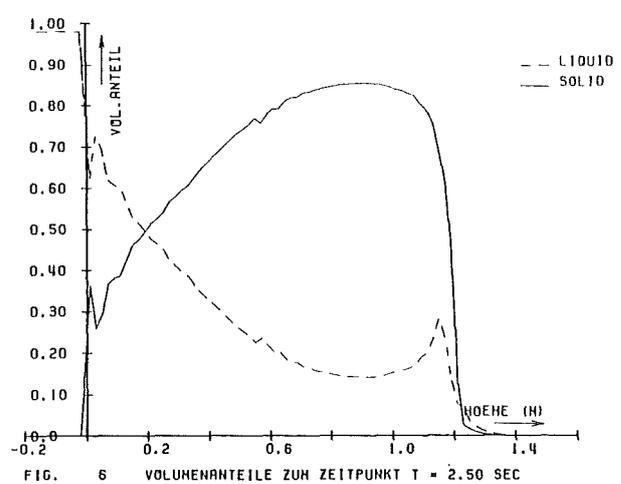
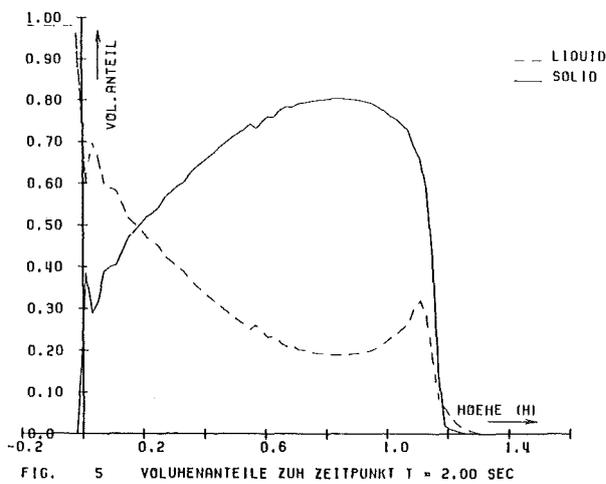
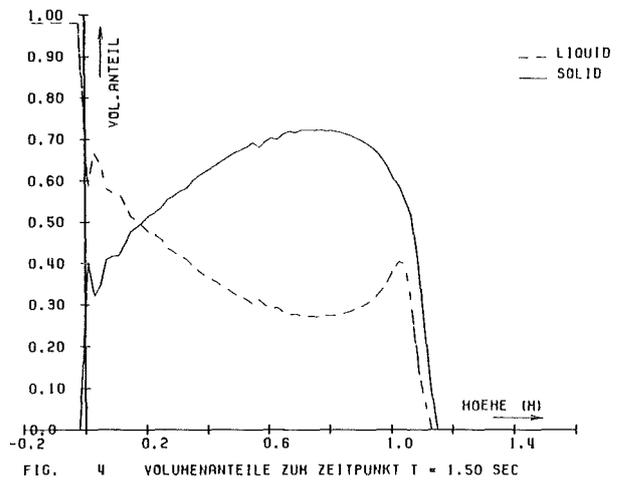
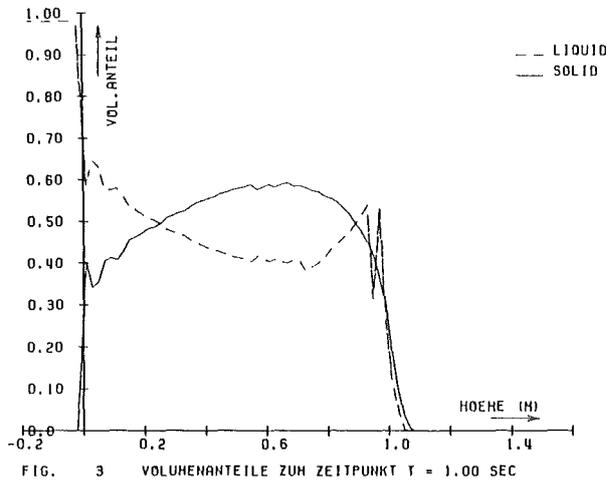
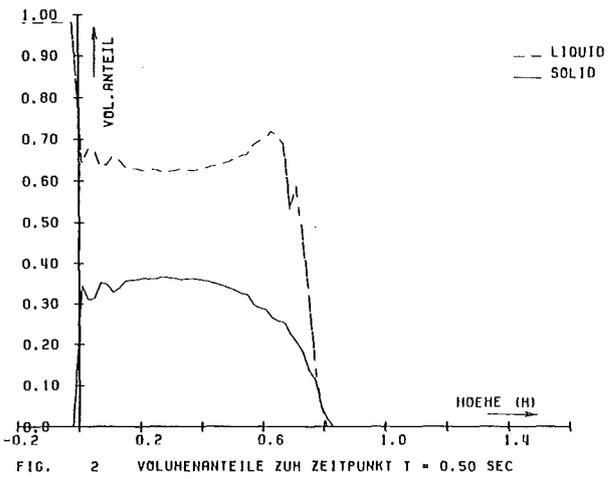
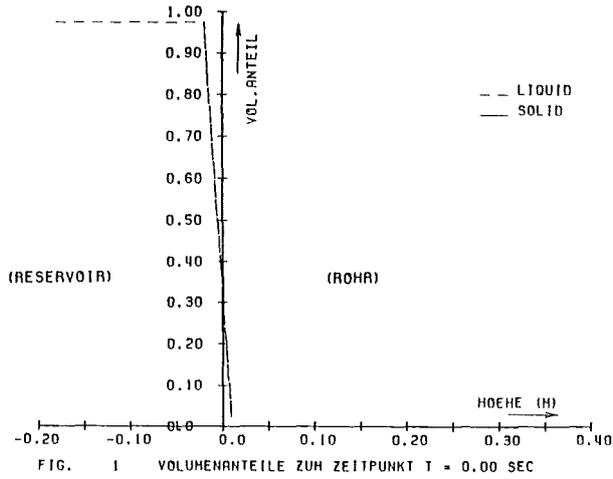


Abb. 3.1.1: Materialverteilung (Flüssigkeit/Kruste) zwischen den Zeitpunkten  $t = 0.0$  sec und  $t = 2.5$  sec für die Referenzlösung

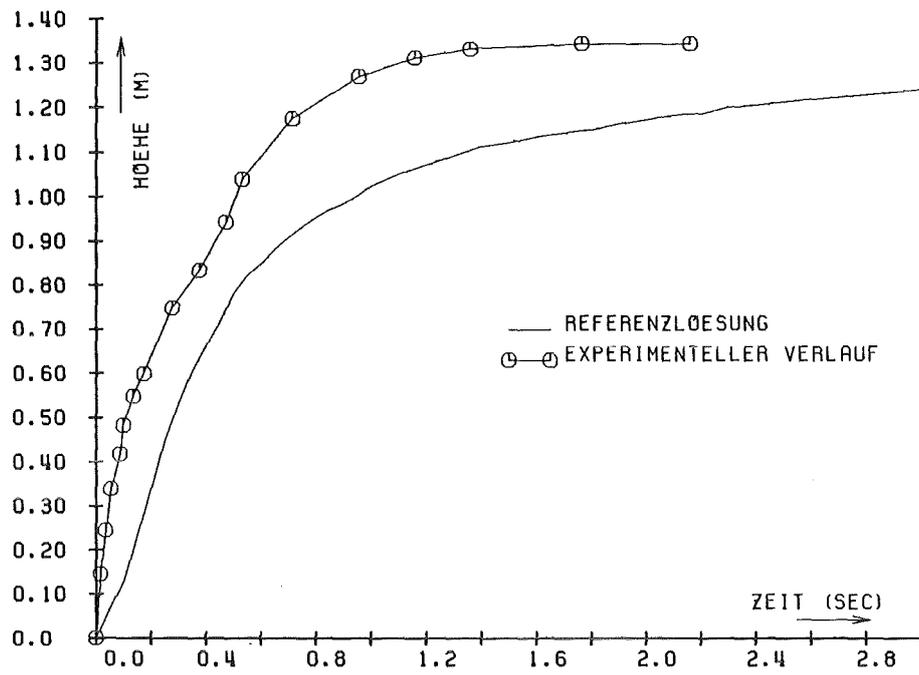


Abb. 3.1.2: Zeitlicher Verlauf der eindringenden Schmelze für die Referenzlösung

## 3.2 Einfluß verschiedener Parameter auf die Referenzlösung

Im folgenden werden verschiedene mögliche Einflußgrößen auf die Referenzlösung näher diskutiert.

### 3.2.1 Einfluß der Wärmestrahlung

Bei der Simulation in SIMMER werden die Strahlungswärmeverluste des Quarzrohrs modellmäßig nicht berücksichtigt. Der Einfluß der Wärmestrahlung während der Eindringphase wurde daher abgeschätzt um über eine modellmäßige Erweiterung zu entscheiden.

Eine erste Abschätzung der Wärmeabfuhr an der Rohraußenwand erfolgte unter der Annahme, daß keine axiale Wärmeleitung wirksam sei und die Rohrwand sich innerhalb vernachlässigbar kurzer Zeit bis zum Schmelzpunkt aufheize. Aus der Auswertung des Zeitintegrals der abgestrahlten Leistung ergab sich, daß der Einfluß der Wärmeverluste durch Strahlung während der Eindringphase nur gering ist und näherungsweise durch eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität von Quarz um 10 % berücksichtigt werden kann.

### 3.2.2 Einfluß der Viskosität des $\text{Al}_2\text{O}_3$

Die THEFIS-Experimente wurden mit einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze durchgeführt, für die bei den Nachrechnungen in Übereinstimmung mit PLUGM Analysen /21/ eine dynamische Viskosität von  $5.01 \cdot 10^{-2}$  Pas angenommen wird. Bei der Thermitreaktion wird das Ausgangsprodukt  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nicht vollständig reduziert und separiert und befindet sich noch teilweise in der Schmelze. Außerdem können Siliziumoxide aus dem Schmelztiiegel freigesetzt werden. In den Thefis-Experimenten wurden in der  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schmelze 5 - 10 % Eisenoxide und 8 - 12 % Si-Oxide festgestellt.

Der Wert der Viskosität der Schmelze und ihre Temperaturabhängigkeit weichen daher von den für reines  $\text{Al}_2\text{O}_3$  angegebenen Werten /25, 31/ ab. Die in der Literatur angegebenen Werte für die Viskosität überhitzten reinen Aluminiumoxids (siehe Thurnay /25/) liegen z.B. bei einer Temperatur von 2300 K bei  $3.16 \cdot 10^{-2}$  Pas und damit niedriger als der verwendete Wert von  $5.01 \cdot 10^{-2}$  Pas. Die oben erwähnten Beimischungen und Verunreinigungen des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  führen

auch zu einer Herabsetzung der Schmelztemperatur um 200 K auf 2100 K (/21/, /22/).

Die Abbildung 3.2.2 zeigt den Einfluß der Viskosität auf den zeitlichen Verlauf der in das Rohr eindringenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze. In SIMMER wird dabei eine temperaturunabhängige Viskosität verwendet. Die Zähigkeit des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wurde zwischen den Werten  $3.16 \cdot 10^{-2}$  Pas und  $5.01 \cdot 10^{-2}$  Pas als Parameter variiert und zeigte einen deutlichen Einfluß auf das Ergebnis. Mit einer Viskosität von  $3.16 \cdot 10^{-2}$  Pas wird die experimentell gemessene Eindringtiefe durch die entsprechende Rechnung um bis zu 15 % übertroffen. Die Viskosität der Schmelze stellt damit einen sensitiven Parameter für die berechnete Eindringtiefe bei den Analysen dar.

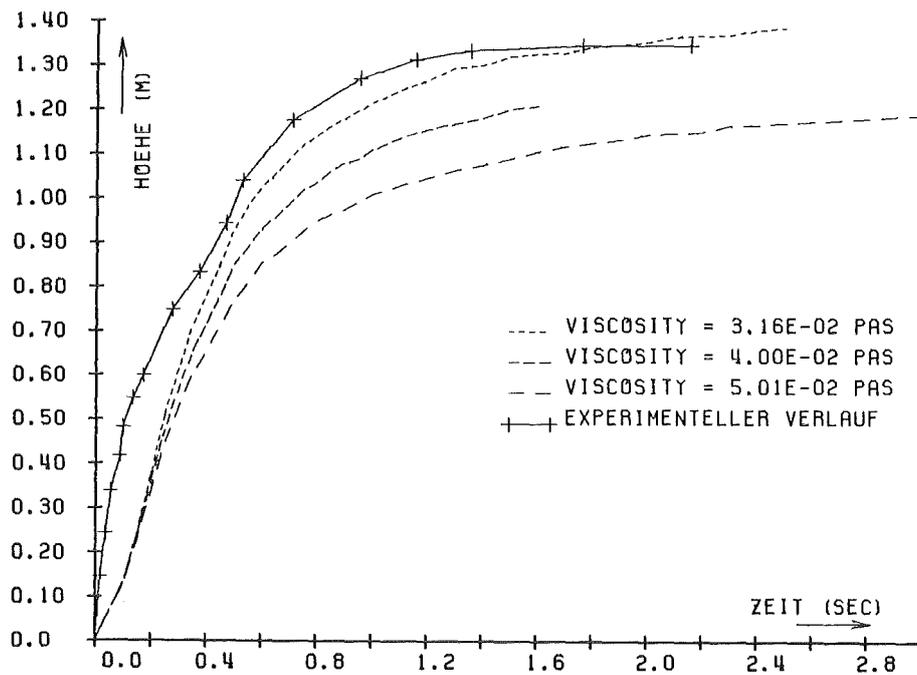


Abb. 3.2.2: Einfluß der Viskosität auf den zeitlichen Verlauf der eindringenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze

### **3.2.3 Einfluß der Ausbildung eines Spalts zwischen Kruste und Quarzrohr auf die radiale Wärmeleitung**

Beim Ausfrieren der heißen Schmelze an der kalten Rohrwand treten hohe Wandwärmeströme auf, die zu einer Aufheizung des Rohrs bei gleichzeitiger Abkühlung der Kruste führen. Durch die gegenläufige Volumenänderung kann es zur Bildung eines isolierenden Luftspalts zwischen Rohr und Kruste kommen.

Die Ausbildung eines Spalts zwischen Kruste und Rohr wurde in den THEFIS-Experimenten mit Stahlrohren festgestellt und auch bei den PLUGM-Nachrechnungen /18/ mitberücksichtigt. Die Modellierung eines Spalts ergab eine etwa 2.5-fach größere Eindringtiefe bei den Stahlrohren. In den Experimenten mit Quarzrohren wurde die Bildung eines Spalts bei den post mortem Untersuchungen nicht beobachtet /21/. Die Möglichkeit einer transienten Spaltbildung wurde auch bei der Materialkombination  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Quarz}$  (bei heißer Geometrie) untersucht und die Größe des Effektes abgeschätzt.

Eine Abschätzung eines möglichen Luftspalts mit aus SIMMER-Rechnungen gewonnenen Daten ergab in erster Näherung eine zur Krustendicke proportionale Spaltweite. Die charakteristische Spaltweite beträgt nach dieser Abschätzung ca. 1 % der Krustendicke; der Luftspalt liegt in einer Größenordnung von  $10\ \mu\text{m}$ . Die Berücksichtigung des Spalts und die daraus folgende reduzierte radiale Wärmeleitung ergibt eine um 8 % reduzierte Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda = 5.5\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kruste.

In dem eindimensionalen SIMMER-Modell kann der Einfluß eines Spalts auf die radiale Wärmeleitung mittels einer Modifizierung des Wärmeleitungskoeffizienten der Kruste berücksichtigt werden.

Bild 3.2.3 zeigt den Einfluß der Wärmeleitfähigkeit der Kruste auf die zeitliche Eindringtiefe der Schmelze mit der Wärmeleitfähigkeit der Parameter. Wie aufgrund der abgeschätzten kleinen Spaltweite und geringen Modifikation der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda = 5.5\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) zu erwarten war, hat die mögliche Ausbildung eines Spalts zwischen Kruste und Quarzrohr nur einen unwesentlichen Einfluß auf die Eindringtiefe.

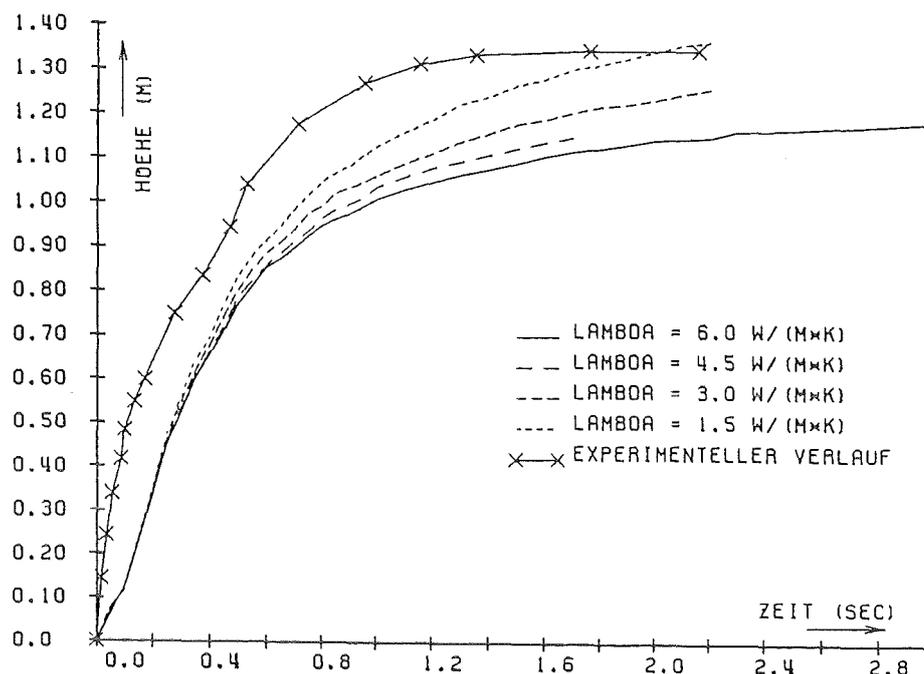


Abb. 3.2.3: Einfluß der Wärmeleitfähigkeit der Kruste auf die zeitliche Eindringtiefe der Schmelze

### 3.2.4 Einfluß des Druckverlaufs auf die Anlaufströmung der $Al_2O_3$ -Schmelze

Wie die SIMMER-Rechnungen ergeben, dringt das  $Al_2O_3$  mit einer gewissen Verzögerung in die Rohrstruktur ein.

Nach Ablauf der Thermit-Reaktion werden in den THEFIS-Experimenten Quarzrohre in den Schmelztiegel getaucht und Druckluft über ein Ventil in den umschließenden Sicherheitsbehälter geleitet. Das anliegende Druckgefälle führt zu einem Ansteigen der  $Al_2O_3$ -Schmelze in die Quarzrohre. Beim Öffnen der pneumatisch gesteuerten Ventile liegen nach 0.5 sec 90 % des Enddruckverhältnisses von 0.1 MPa an.

Die Kennlinie des Ventils - und damit der zeitliche Aufbau des Druckverhältnisses - war nicht detaillierter vorgegeben. In erster Näherung wurde für die Referenzlösung ein parabolischer Verlauf der Kennlinien angenommen. Die Rampe der Druckdifferenz wurde in der SIMMER-Referenzrechnung durch Stufen angenähert.

Für die Ventilkennlinie (1) beträgt die zeitliche Druckänderung im steilen Bereich der Parabel  $\sim 0.25$  MPa/sec. Bei einem doppelt so schnellen Druckanstieg werden die experimentellen Anstiegsdaten erreicht (Kennlinie (2)), wobei die Eindringtiefe der Schmelze in das Rohr etwa gleich bleiben.

Um den Verlauf des Eindringens der Schmelze nachvollziehen zu können muß die Kennlinie der Injektion genau bekannt sein.

Der Einfluß des Druckverlaufs auf die Anlaufströmung der Schmelze wird in der Abb. 3.2.4 dargestellt.

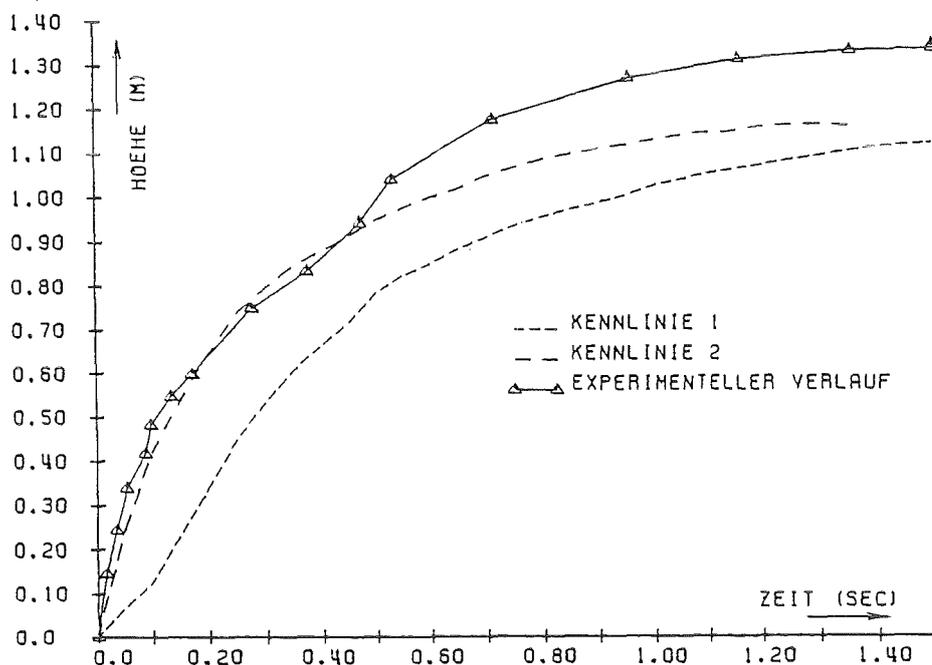


Abb. 3.2.4: Einfluß des Druckverlaufs auf die Anlaufströmung der Schmelze

### 3.3 Einfluß der Überhitzung auf die Eindringtiefe

In den THEFIS Experimenten wird die  $Al_2O_3$  Schmelze mit einer Überhitzung von 200 K in das kalte Quarzrohr eingeschossen. Die Eindringtiefe nimmt dabei mit zunehmender Überhitzung zu und auch das Krustenmaximum, das ohne Überhitzung am Rohreintritt auftritt, verschiebt sich von diesem weiter in das Rohr hinein (siehe Abb.: 3.1.1 und 3.3.1).

Aufgrund einer Untersuchung von Hakim /26/ lassen sich die Eindringtiefen einer Schmelze ohne und mit Überhitzung über die Prandtlzahl und die Überhitzung korrelieren (Verhältniszahl  $\eta$ ).

$$\eta = \frac{(X_p / D)_{m. \text{Überh.}}}{(X_p / D)_{o. \text{Überh.}}} = (1 + E)^{1.433}$$

$$E = 0.092 Pr^{0.569} \left[ \frac{c_{pl} (T_{liq} - T_{Schmelzp.})}{h_f} \right]^{0.625}$$

$X_p$ [m]	Eindringtiefe
$D$ [m]	Hydraulischer Durchmesser
$h_f$ [J/kg]	Schmelzwärme
$c_p$ [J/kg K]	spezifische Wärmekapazität

Für die verwendeten Zustandsdaten und einer Überhitzung von 200 K ergibt sich damit ein Wert von  $\eta = 1.23$ .

Aus der Abb. 3.3.2 kann der Unterschied der Eindringtiefen der überhitzten und nicht-überhitzten Schmelze entnommen werden. Aus den SIMMER-Rechnungen ergibt sich ein  $\eta$ -Wert von 1.21 und damit eine gute Übereinstimmung mit den Beziehungen von Hakim /26/.

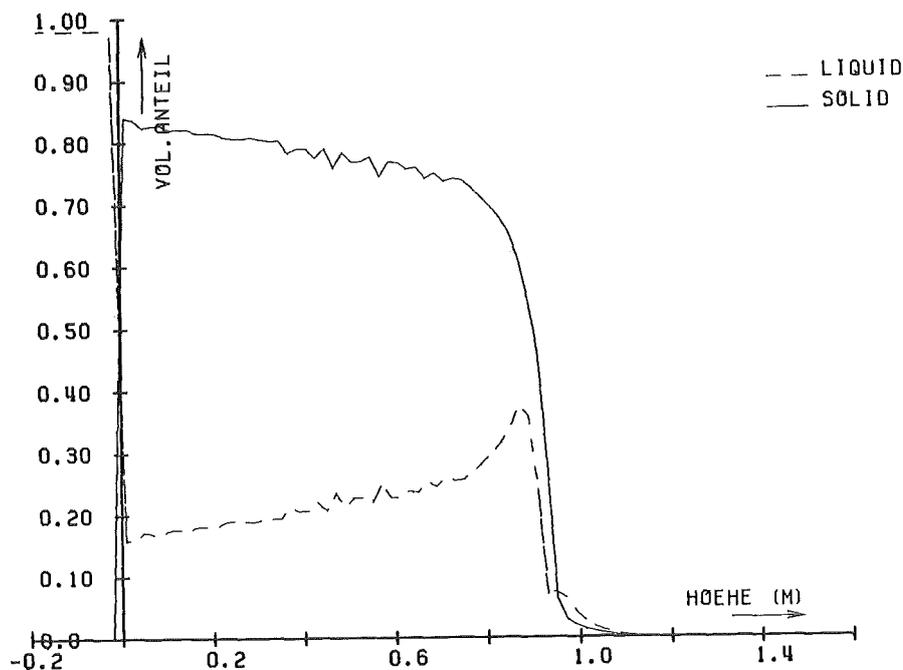


Abb. 3.3.1: Materialverteilung (Flüssigkeit/Kruste) bei einer nicht-überhitzten Schmelze zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec

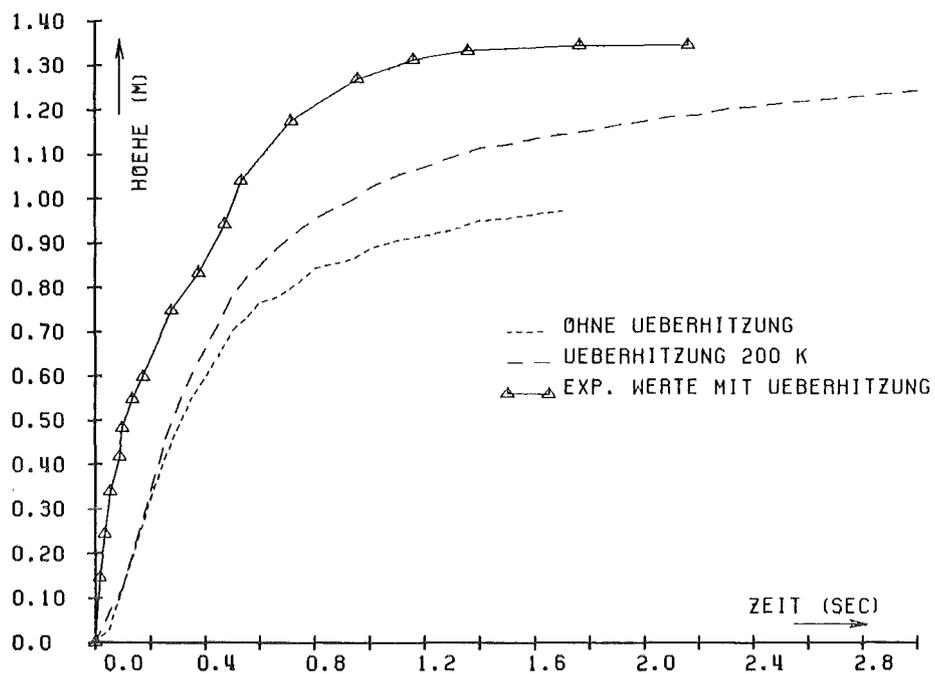


Abb. 3.3.2: Zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe für eine überhitzte und eine nicht-überhitzte Schmelze

### 3.4 Kurze Bewertung der SIMMER-Referenzrechnung

Insgesamt kann festgestellt werden, daß im Rahmen der Modellgenauigkeit das Ausfrierverhalten und die Eindringtiefe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schmelze in Quarzrohre zufriedenstellend beschrieben werden kann. Der Fehler in den experimentellen Daten beträgt  $\pm 10\%$ . Die Abweichung der mit SIMMER-II berechneten Eindringtiefe, bezogen auf die experimentellen Werte, liegt in derselben Größenordnung.

Wie auch im Experiment festgestellt, werden für das Material  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Eindringtiefen berechnet bzw. Krustenaufbauten an den Quarzwänden festgestellt die einem "conduction freezing" /27/ Vorgang entsprechen. Die Reynoldszahl der  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schmelze liegt bei nur etwa  $\text{Re} = 10^3$ .

Wie zu erwarten, hängt die Eindringtiefe von der Viskosität der Schmelze ab. Die experimentell gemessenen Eindringtiefen werden bei Annahme einer etwas geringeren Viskosität der Schmelze erreicht, wobei diese geringere Viskosität im Rahmen der Genauigkeit der Zustandsdaten /25/ liegt.

Die Berücksichtigung der Wärmestrahlung und die Möglichkeit einer transienten Spaltbildung zwischen Kruste und Quarzrohr haben im Rahmen eines sinnvollen Parameterbereiches keinen wesentlichen Einfluß auf die Eindringtiefe der Schmelze.

Der Eindringvorgang der Schmelze wird wesentlich von der Druckkennlinie (Anlaufströmung) mitbestimmt. Die Kennlinie war nicht genauer, als in 3.2.4 spezifiziert, bekannt. Eine steilere Kennlinie zu Beginn des Einströmvorganges reproduziert das zeitliche Eindringverhalten der Schmelze, ohne die Eindringtiefe wesentlich zu verändern.

#### 4. SIMMER-Rechnungen zum Ausfrierverhalten einer überhitzten Schmelze in einem Quarzrohr mit Partikelblockaden

In einer zweiten Serie von SIMMER-Rechnungen wurde der Einfluß von Partikelblockaden auf das Strömungs- und Ausfrierverhalten einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schmelze untersucht. In der SIMMER Modellierung ist die reine Flüssigkeit mit etwaigen Partikeln in der Strömung in einem gemeinsamen Geschwindigkeitsfeld zusammengekoppelt. Eine separate Bewegung zwischen Flüssigkeit und Partikeln, also z.B. ein Durchströmen der Partikelblockade, ist damit nicht möglich. Der Einfluß der Partikel auf das Strömungsverhalten wird in SIMMER über ein parametrisches Viskositätsmodell berücksichtigt. Durch eine erhöhte (vorgegebene) Viskosität kann damit näherungsweise der Einfluß von Partikeln auf den Fließvorgang der reinen Schmelze berücksichtigt werden. Die Wärmeübertragung zwischen Partikeln und Flüssigkeit erfolgt bei den Rechnungen mit Hilfe eines "Kollisionsmodelles" /14/.

Mit SIMMER kann nur eine vorgegebene Partikelgröße berücksichtigt werden, die auch während der gesamten Simulation konstant bleibt. Partikel können sich demnach nicht durch Ausfriervorgänge/Schmelzvorgänge vergrößern oder verkleinern, sondern derartige Prozesse werden nur über den Volumenanteil der Partikel in der Schmelze berücksichtigt.

Ebenso können keine mechanischen Effekte, wie Verkanten der Partikel etc. direkt simuliert werden. Aus der Nachrechnung der THEFIS-Experimente können daher bei der Simulation von Partikelblockaden nur Parametergrößen für das Viskositätsmodell in SIMMER abgeleitet werden, wobei im Rahmen der experimentellen Unsicherheiten gewisse Bandbreiten angegeben werden können. Als Referenzfall dient jeweils die SIMMER-Rechnung für ein Quarzrohr ohne Partikelblockaden mit den in Kap. 3 angegebenen Standardparametern.

##### 4.1 Kurze Beschreibung des Viskositätsmodells in SIMMER

Der Einfluß von Partikeln auf das Strömungsverhalten wird in SIMMER durch ein Viskositätsmodell berücksichtigt. Die Partikelreibung wird darin durch eine erhöhte effektive Viskosität des Fluids simuliert.

Diese Partikelviskosität geht gemeinsam mit der Viskosität der Flüssigkeit über eine effektive Reynoldszahl in die Reibbeiwerte ein.

Die Partikelviskosität wird als Produkt der dimensionslosen Größen  $\mu_D$  und  $\mu_f$  dargestellt und mit einer Eingabegröße  $F$  (PARVIS) [PA·s] multipliziert.

Die Größe  $\mu_D$  berücksichtigt dabei in einfacher Form, daß Partikel, die größer als der hydraulische Durchmesser sind, die Strömung unterbrechen.

Die Größe  $\mu_f$  berücksichtigt die Begrenzung der Strömung durch ein Anwachsen der Packungsdichte der Partikel und die Größe  $F$  ist ein frei zu wählender Parameter.

$$\mu_p = F \cdot \mu_D \cdot \mu_f$$

$$\mu_p = \frac{1}{\max\left(1 - C_2 \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_s}, 10^{-10}\right)} \quad \text{mit } C_2 = \frac{1}{\text{PKFMAX}}$$

PKFMAX = maximale Packungsdichte (Eingabeparameter)

$\alpha_p$  = Volumenanteil der Partikel

$\alpha_s$  = Volumenanteil des Strukturmaterials.

Aus den dargestellten Beziehungen ist ersichtlich, daß bei einer Annäherung des Partikelanteils an die maximale Packungsdichte die Viskosität des Flüssigkeits/Partikelgemisches stark anwächst und die Strömung damit blockiert wird.

#### 4.2 Experimentelle Ergebnisse für das Ausfrierverhalten von Strömungen mit Partikelblockaden

In der Tab. 4.2.1 sind die experimentellen Ergebnisse verschiedener Versuche mit Partikelbetten aus /21/ zusammengestellt. Es sind dies die Läufe # 1 - 6 aus /21/, bei denen ein mit einer Aluminiumfolie abgeschlossenes Rohr in die  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schmelze eingetaucht wurde. Direkt über dieser Folie befinden sich Partikelbetten verschiedener Höhe von 25 mm bis 80 mm. Nach Aufschmelzen der Folie dringt die Schmelze unter Druck in das Partikelbett ein, nimmt die Partikel mit sich (Versuch # 2 und 3) oder bleibt im Partikelbett stecken (Versuch # 4, 5, und 6).

Lauf #	Partikelbetthöhe [mm]	Eindringtiefe der Schmelze [m]	Kommentar
1	-	1.35	Referenzfall für # 2 - 6
2	25	.99	Partikel werden mitbewegt
3	30	1.05	Partikel werden mitbewegt
4	50	.03	Blockade innerhalb des Partikelbettes
5	40	.04	Blockade innerhalb des Partikelbettes
6	80	.05	Blockade innerhalb des Partikelbettes

Tab. 4.2.1: Experimentelle Parameter und Ergebnisse für verschiedene THEFIS Experimente mit Partikelblockaden (Tabelle aus /21/)

Wie die experimentellen Ergebnisse zeigen, werden die Partikelbetten bis zu einer Höhe von 30 mm durch die Schmelze mitgenommen und etwa 1 m tief in das Quarzrohr transportiert. Verglichen mit der Eindringtiefe ohne Partikelbetten kommt es zu einer Reduktion der Eindringtiefe um etwa 25 %.

Bei einer geringfügigen Erhöhung der Partikelbetten auf 40 mm bleibt die Strömung in dem Partikelbett stecken (ebenso bei allen Versuchen mit größeren Betthöhen) und es kommt zum Ausfrieren des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  im Blockadebereich.

Die Partikelbetten setzen sich aus nicht-sphärischen- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Teilchen (Bruchstücken) mit dem Durchmesser von 0.5 - 2.5 mm zusammen, die manuell in das Rohr eingefüllt aber nicht gesondert festgestampft wurden, um ein starkes Verkanten der Partikel zu vermeiden (Abb. 4.2.2).

Durch die Verwendung von nicht-sphärischen Partikeln könnten jedoch Verkantungsprozesse aufgetreten sein. Dafür sprechen folgende Hinweise:

- Betrachtet man die Experimente # 2 und # 3 so zeigt sich, daß trotz etwas größerer Partikelbetthöhe im Versuch # 3 (30 mm statt 25 mm) die Schmelze etwas weiter vordringt. (Allerdings sind derartige Abweichungen von 6 % im Rahmen der experimentellen Genauigkeit zu sehen)

- Beim Übergang von einer Betthöhe von 30 mm auf 40 mm ändert sich das Strömungsverhalten schlagartig, die Blockade bleibt am Ort und bewegt sich nicht aufwärts.
- Betrachtet man den Verlauf des Experimentes # 2 (Abb.4.2.3) so wird deutlich, daß sich im Zeitraum zwischen 21 - 22 sec zwei temporäre Blockaden in den Höhen 50 cm und 65 cm gebildet haben und den Fließvorgang zeitweise gestoppt haben. Bei einer etwas anderen geometrischen Orientierung der Partikel in der Schmelze (Verkantungsprozeß) hätte sich in der Höhe von 50 - 65 cm u.U. bereits die endgültige Blockade ausbilden können.

Derartig stochastische Prozesse können mit SIMMER nicht modelliert werden, da grundsätzlich ein homogenes Gemisch von Flüssigkeit und sphärischen Partikeln über den Querschnitt des Rohres angenommen wird. Damit können mit SIMMER nur mittlere Eindringtiefen berechnet werden. In der realen Schmelze können sich jedoch Partikelansammlungen sowohl in Richtung der Fließrichtung (erhöhte Eindringtiefe) anordnen, als auch senkrecht dazu (reduzierte Eindringtiefe) ausbilden.

Angaben über die Packungsdichte der Partikel standen nicht direkt zur Verfügung sondern nur über eine theoretische Auswertung der Experimente von G. Fieg /28/ (Packungsdichte  $\sim 0.45$ ).

Zusätzlich zu den in Tab. 4.2.1 dargestellten Experimenten wurden auch Experimente mit fest installierten unbeweglichen Partikelbetten durchgeführt um das evtl. Durchströmen der Blockaden zu simulieren. Die Simulation des Durchströmens eines Partikelbettes könnte mit SIMMER so erfolgen, daß das Partikelbett durch eine poröse Struktur mit entsprechendem Druckverlust ersetzt wird. Da das Hauptinteresse der Blockadebildung bei beweglichen Partikelbetten galt, wurden diese oben erwähnten Experimente nicht nachgerechnet.

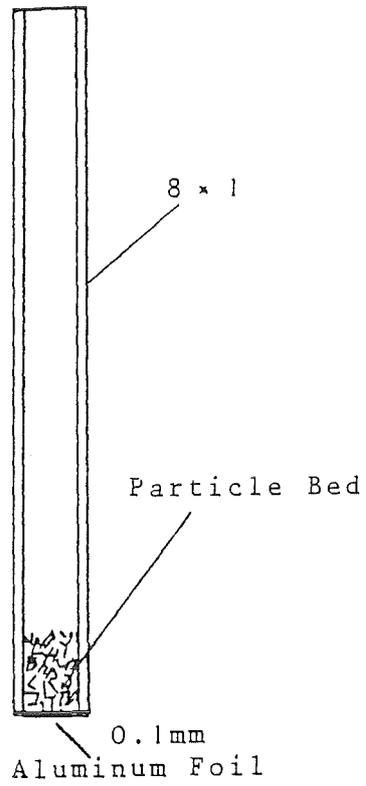


Abb. 4.2.2: Schematische Anordnung der Partikelblockaden für die Experimente # 2 bis # 6 (aus /21/)

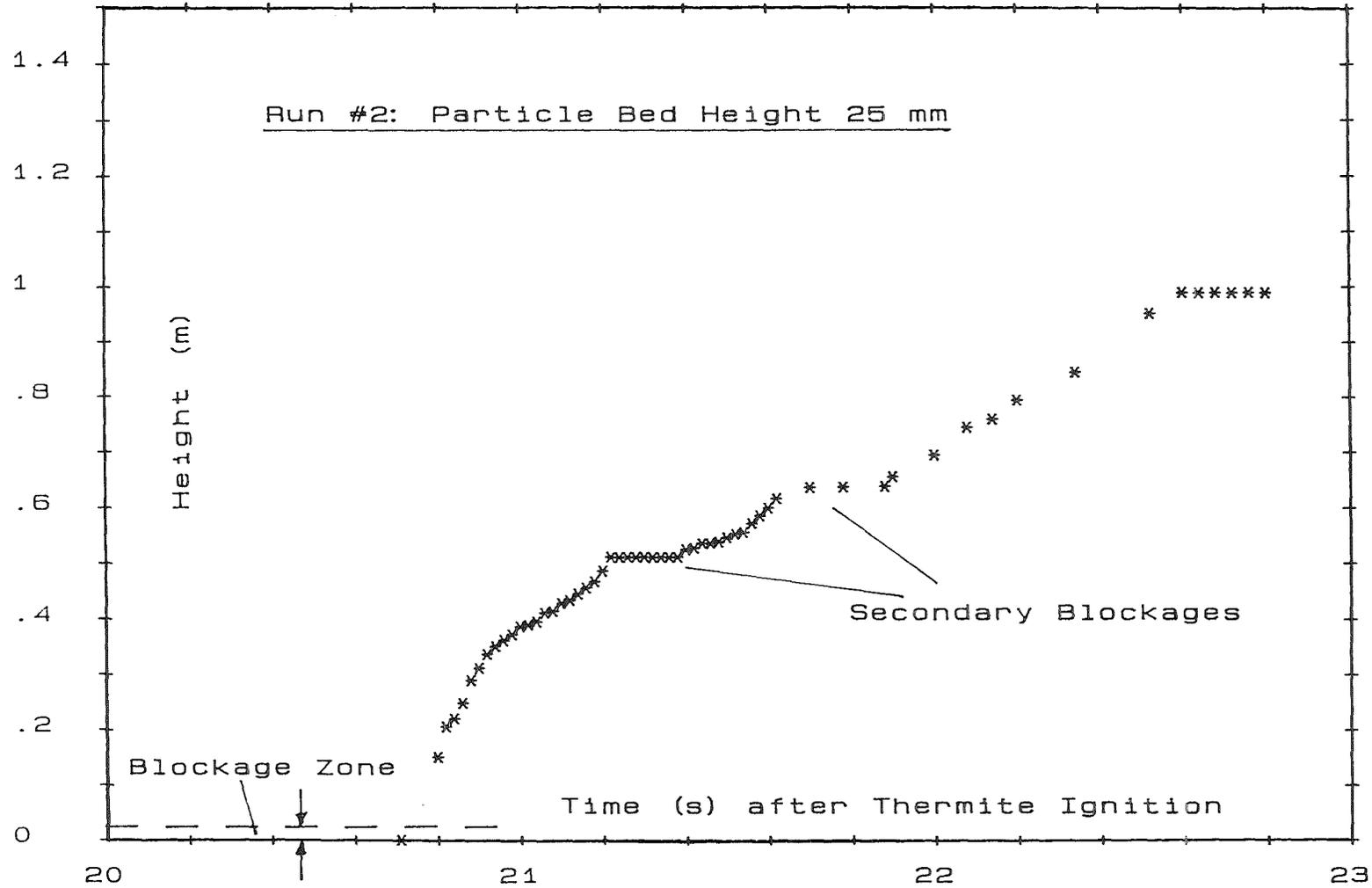


Abb. 4.2.3: Zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze bei einer Partikelbetthöhe von 25 mm aus /21/ Experiment Nr. 2 aus Tabelle 4.2.1)

### 4.3 SIMMER-Rechnungen für die verschiedenen Partikelblockaden

Im folgenden werden die SIMMER Rechenergebnisse für verschiedene Partikelbetthöhen von 25 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm und 80 mm angegeben. Als Parameter diente jeweils die in Kap. 4.2 dargestellte Größe PARVIS, die direkt als multiplikative Größe in die Viskositätsbeziehung in SIMMER eingeht.

Für die geeignete Wahl der Größe von PARVIS liegen für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  noch keine Erfahrungen vor.

Für  $\text{UO}_2$  wurde PARVIS in SIMMER Rechnungen /1/ auf der Basis der ANL Freezing Tests von Spencer /5/ bestimmt, bei denen ein  $\text{UO}_2/\text{Mo}$  Thermitgemisch in Bündelstrukturen eingeschossen wurde. Die Größe von PARVIS hängt dabei von verschiedenen Parametern wie Viskosität, Massenanteil von Flüssigkeit/Partikel, Packungsdichten bis hin zur örtlichen Diskretisierung (numerische Diffusion - siehe Kap. 2.3) ab. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse der  $\text{UO}_2$  Thermit-Bündeltests (mit Anschmelzen der Hüllrohre) auf die hier vorliegenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Thermit-Rohrtests ist nicht möglich. Aus den unterschiedlichen Materialdaten von  $\text{UO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  läßt sich die Größe von PARVIS jedoch ableiten. So ist die Viskosität der Flüssigkeit von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  um eine Größenordnung höher als die von  $\text{UO}_2$  und die Pr-Zahl um etwa einen Faktor 40 größer. Zusätzlich sind die Temperaturniveaus von Schmelze zu Substrat verschieden und die Partikelbetttemperatur bei den THEFIS Experimenten liegt bei Raumtemperatur. Aus Vorrechnungen kann abgeleitet werden, daß der multiplikative Faktor PARVIS um zwei Größenordnungen geringer anzusetzen ist, als etwa im  $\text{UO}_2$  System unter den Bedingungen der ANL Experimente. Um den Einfluß der Parametergröße PARVIS aufzuzeigen, werden in den Ergebnissen jeweils auch Rechnungen gezeigt, bei denen PARVIS um eine Größenordnung nach oben bzw. unten variiert wurde.

Neben dem Parameter PARVIS beeinflußt vor allem der Wärmeübergang aus der Schmelze in die Partikel und die Bildung neuer Partikel das Eindringen in die Strukturen. Durch die neu gebildeten Partikel wird auch die Viskosität über die Packungsdichte erhöht. Die maximale Packungsdichte wurde mit  $\text{PKFMAX} = 0.6$  angesetzt, wobei die tatsächliche Packungsdichte der Partikel zu Beginn der Rechnung in der Blockade 0.48 betrug. In einer Variation wird der Einfluß der Packungsdichte kurz aufgezeigt. Als einheitlicher Partikeldurchmesser in der Blockade wurde  $\varnothing = 2$  mm gewählt. In einer Parametervariation wird auch der Einfluß der Partikelgröße auf den Strömungsverlauf im Rohr dargestellt.

Aus Gründen der einfacheren Simulation wurde zu Beginn der Rechnungen auch in den Partikelbetten ein Flüssigkeitsanteil angenommen. Von den tatsächlich erreichten Eindringtiefen ist dann die Betthöhe abzuziehen.

Die numerischen Größen wie Zeitschrittweiten und Ortsschrittweiten mußten zuerst an die Problemstellung angepaßt werden (siehe 2.3). So wurde die Zeitschrittweite auf  $\leq 10^{-5}$  reduziert. Die Ortsschrittweite mußte so gewählt werden, daß zwischen Blockade und nachfolgendem freien Rohr kein Schrittweitenwechsel stattfindet, da durch Übergang einer bestimmten Menge Material  $\Delta m$  (Partikel) die Packungsdichte in der benachbarten Zelle je nach ihrer Größe verschieden beeinflußt wird.

#### 4.3.1 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 25 mm (Experiment # 2)

Die Abb. 4.3.1 zeigt die experimentell gemessene zeitliche Eindringtiefe der Schmelze in das Rohr für eine Betthöhe von 25 mm. Die Eindringtiefe beträgt dabei 99 cm. Zusätzlich ist das gerechnete Eindringverhalten der Schmelze/Partikelmischung mit der Parametergröße PARVIS = 0.1 Pas, sowie die beiden Parametervariationen von PARVIS um eine Größenordnung dargestellt.

Wie schon in Kap. 4.2 diskutiert, wurden im THEFIS-Experiment # 2 die Ausbildung von temporären Blockaden in ca. 0.50 und 0.65 m Höhe beobachtet, die nach kurzer Zeit wieder aufgeschmolzen bzw. aufgebrochen wurden [21]. Verkantungsprozesse der Partikel und dadurch ausgelöste temporäre Blockaden können naturgemäß mit SIMMER nicht simuliert werden. Der detaillierte zeitliche Verlauf des Eindringens der Schmelze in das Rohr weicht daher nach dem Zeitpunkt von 0.5 sec zwischen Rechnung und Experiment stark ab.

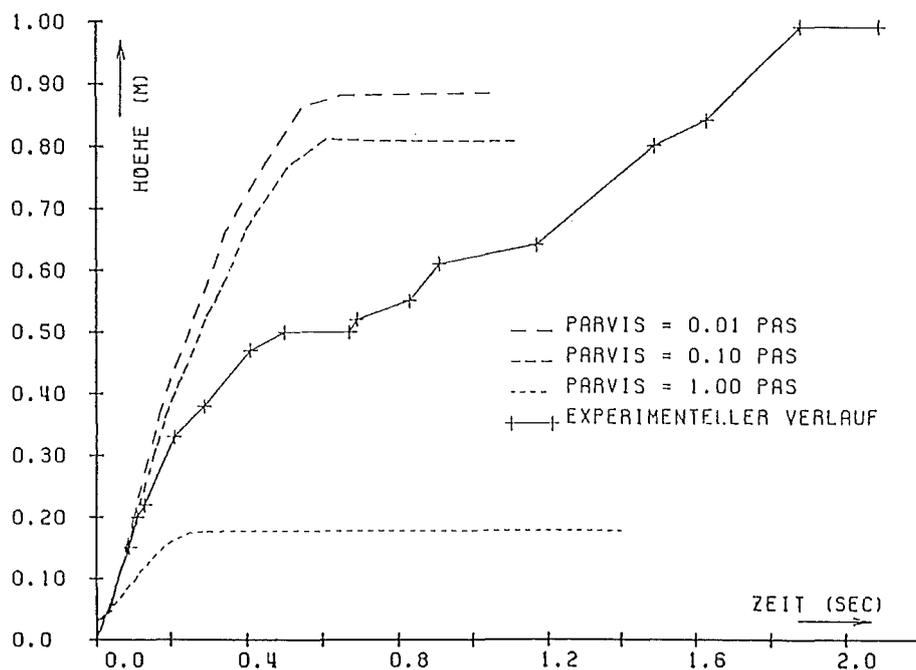


Abb. 4.3.1: Einfluß der Partikelviskosität auf die zeitliche Eindringtiefe der Schmelze für Partikelbetthöhe 25 mm

### 4.3.2 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 30 mm (Experiment # 3)

In Abb. 4.3.2 ist der zeitliche Verlauf des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Niveaus für eine Partikelbetthöhe von 30 mm dargestellt. Mangels detaillierter experimenteller Daten für den zeitlichen Verlauf des Eindringvorganges der Schmelze wird zum Vergleich in der graphischen Darstellung der Verlauf des Experiments # 2 das etwa eine ähnliche Eindringtiefe zeigte, herangezogen. Für die Standard-Partikelviskositäten von 0.1 Pas hat eine Vergrößerung der Betthöhe von 25 auf 30 mm nur geringe Auswirkungen auf das erzielte Endniveau (hier 105 cm).

Verglichen zu den experimentellen Werten wird aber die Eindringtiefe der Schmelze unterschätzt. Es gilt allerdings dieselbe Einschränkung bei der Bewertung der Eindringtiefen wie im Experiment # 2. Mit SIMMER werden mittlere Eindringtiefen berechnet während je nach Orientierung und Anhäufung der nicht-sphärischen Partikel im Experiment sehr frühzeitig Blockaden auftreten können oder die Strömung von den Partikeln nur wenig beeinflusst wird.

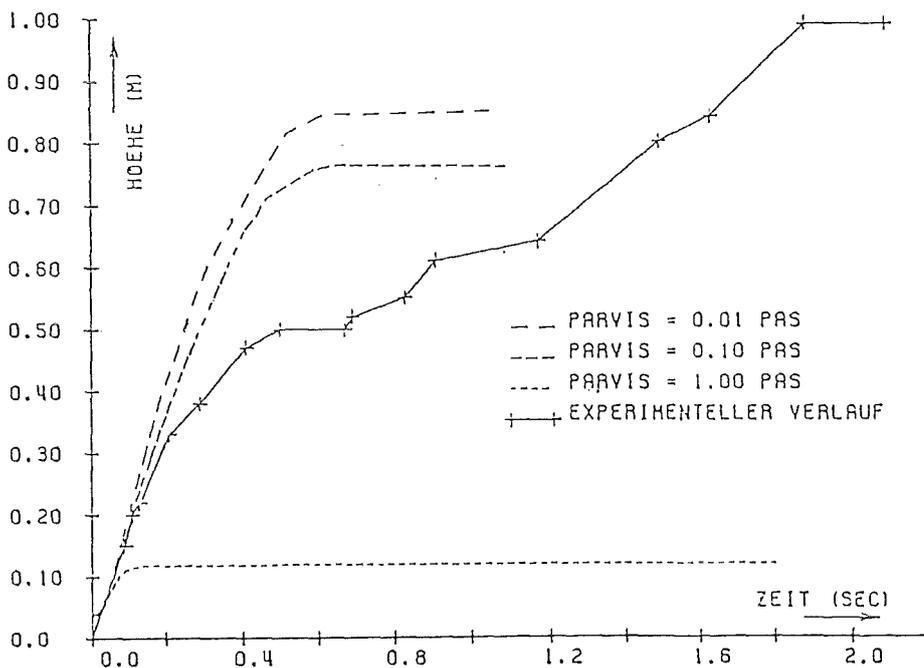


Abb. 4.3.2: Einfluß der Partikelviskosität auf die Eindringtiefe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze für die Partikelbetthöhe 30 mm

### 4.3.3 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 40 mm (Experiment # 5)

Abb. 4.3.3 zeigt die zeitliche Eindringtiefe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze für eine Partikelbetthöhe von 40 mm. Diese Schüttguthöhe erwies sich in den Experimenten als undurchdringlich für die Schmelze und es kam erstmals zum Ausfrieren, ohne daß eine Anhebung der Blockade erfolgte. Die Rechnungen mit kleinen Partikelviskositäten zeigen weiterhin ein tiefes Eindringen in die Rohrstruktur, während die Schmelze für  $\text{PARVIS} = 1.0 \text{ Pas}$  innerhalb der Blockade ausfriert.

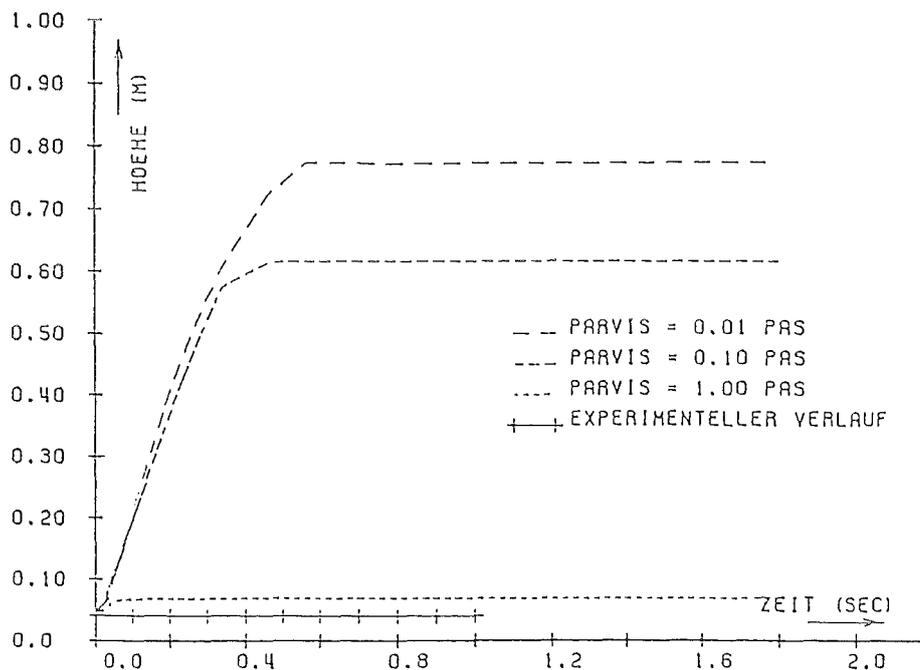


Abb. 4.3.3: Einfluß der Partikelviskosität auf die Eindringtiefe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze für die Partikelbetthöhe 40 mm

#### 4.3.4 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 50 mm (Experiment # 4)

In Bild 4.3.4 ist die Eindringtiefe der Schmelze für eine Partikelbetthöhe von 50 mm zu erkennen. Im Experiment dringt Schmelze in das Partikelbett ein, das sich aber wie bei Experiment # 5 nicht bewegt. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Steighöhe in der SIMMER-Rechnung ist gegenüber kleineren Partikelbetthöhen deutlich zurückgegangen.

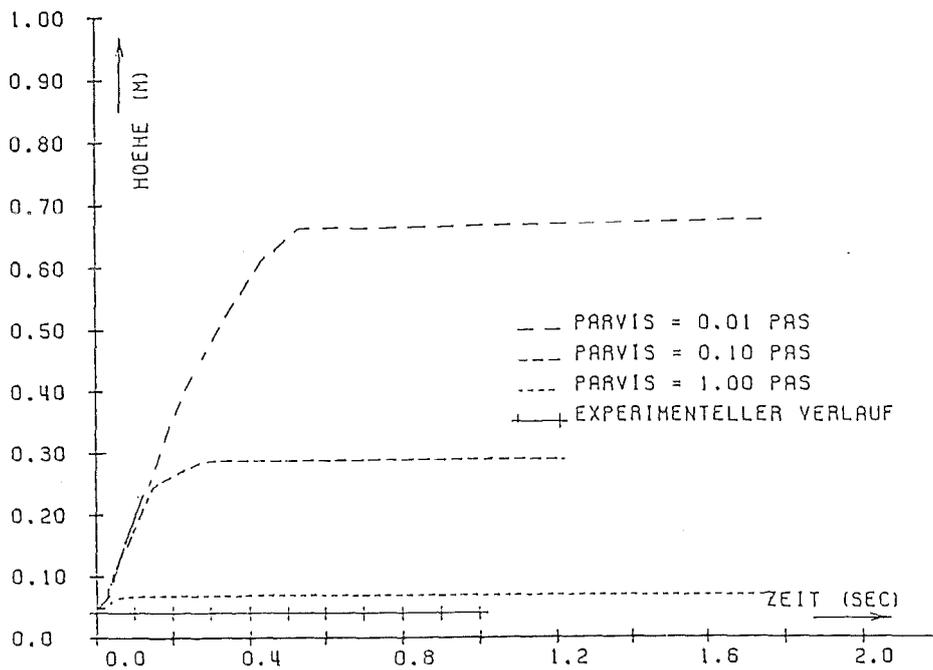


Abb. 4.3.4: Einfluß der Partikelviskosität auf die zeitliche Eindringtiefe der Schmelze für die Partikelbetthöhe 50 mm

#### 4.3.5 Ergebnisse für Partikelbetthöhe 80 mm (Experiment # 6)

Abb. 4.3.5 zeigt den Verlauf des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Niveaus für eine Partikelbetthöhe von 80 mm. Auch hier wird im Experiment die Blockade nicht mit der Strömung mitbewegt. Die Berechnung der maximalen Eindringtiefe der Schmelze führt für alle Werte von PARVIS zu gleichwertigen Ergebnissen. Es kommt zum Ausfrieren der Schmelze im Partikelbett ohne eine wesentliche Anhebung der Blockade.

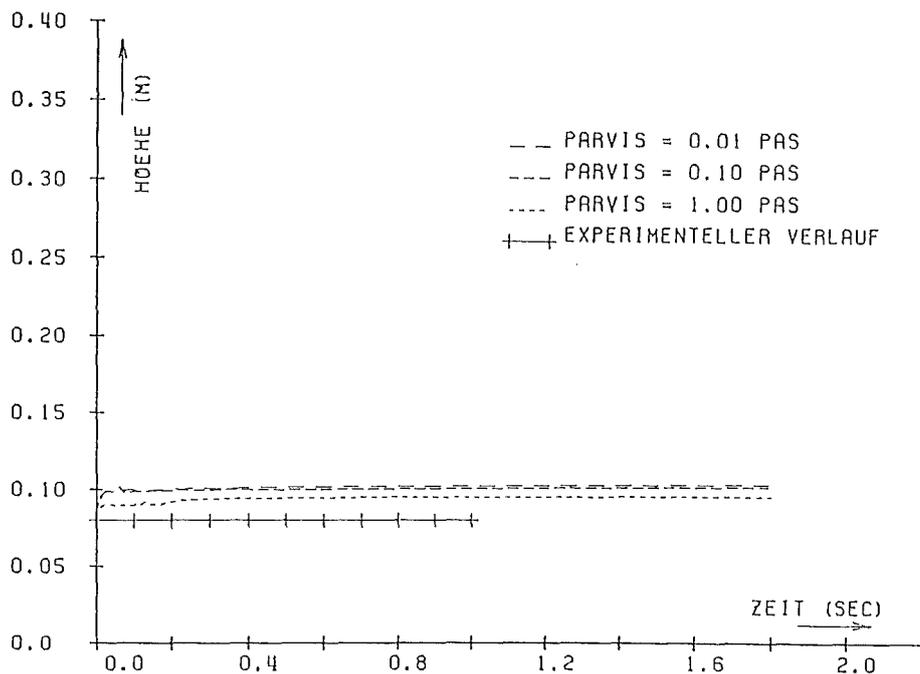


Abb. 4.3.5: Einfluß der Partikelviskosität auf die Eindringtiefe der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze für die Partikelbetthöhe 80 mm

#### 4.3.6 Einfluß der Partikeldichte auf die Eindringtiefe des $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelz/Partikelgemisches

Der Einfluß der Packungsdichte auf die Eindringtiefe wurde mit einer Parametervariation untersucht, da aus dem Experiment kein direkter Wert ableitbar war. Konstant gehalten wurden die Partikelviskosität ( $\text{PARVIS} = 0.1$ ), die Blockadehöhe ( $h = 30 \text{ mm}$ ) und die maximale Packungsdichte ( $\text{PKFMAX} = 0.60$ ). Zu Beginn der Rechnung wurde für die Packungsdichte 0.36, 0.48 und 0.54 und damit 60 %, 80 % und 90 % der maximalen Packungsdichte PKFMAX angenommen. In Abb. 4.3.6 ist der erwartete Einfluß der Packungsdichte - erhöhte Eindringtiefe bei Reduzierung der Packungsdichte - dargestellt. Der Einfluß dieses Parameters ist wie gezeigt gering, da eine 30-prozentige Reduktion nur ein zusätzlicher Anstieg der Eindringtiefe von 10 % gegenüberstellt.

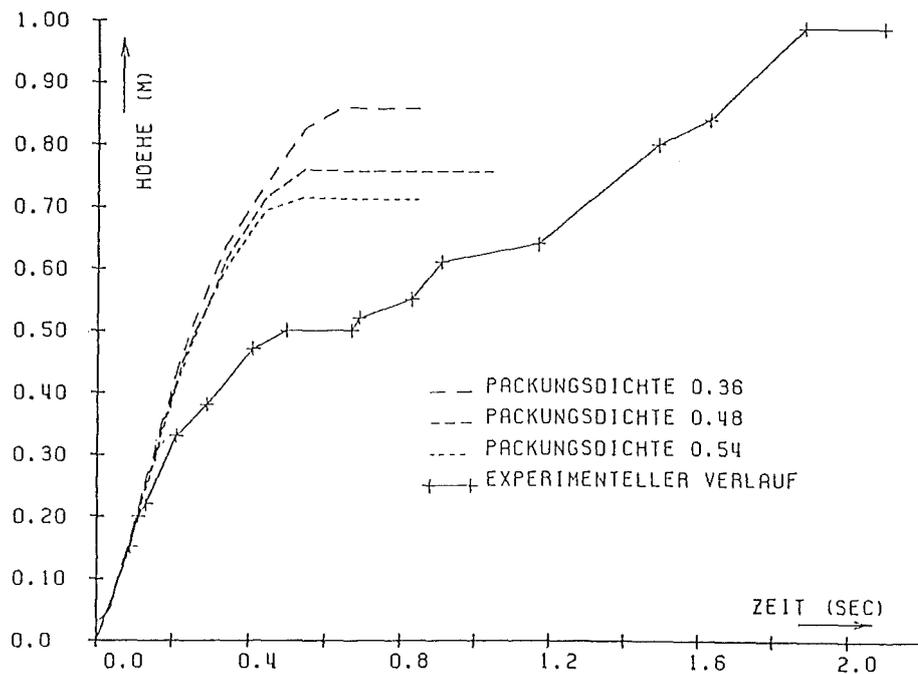


Abb. 4.3.6: Einfluß der Partikeldichte auf die Eindringtiefe des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelz/Partikelgemisches

#### 4.3.7 Einfluß des Partikeldurchmessers auf die Eindringtiefe des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schmelz/Partikelgemisches

Der Partikelradius  $r_{\text{part}}$  des Partikelbettes geht als beeinflussender Parameter vor allem in die Wärmeübergangsrate  $q$  zwischen der Flüssigkeit und den Partikeln ein. Die Flüssigkeit wird in SIMMER als Tröpfchenströmung (mit entsprechendem Tröpfchenradius  $r_{\text{liq}}$ ) simuliert.

$$q \sim \text{const} \frac{r_{\text{liq}}^2 + r_{\text{part}}^2}{r_{\text{liq}}^3 + r_{\text{part}}^3} \cdot \Delta T_{\text{liq,part}}$$

Verkleinert man den Partikelradius, so erhöht sich der Wärmeübergang in das Partikelfeld und die flüssige Schmelze kühlt sich ab. Es können dabei neue Partikel entstehen. Andererseits können die Partikel auch selbst wieder aufschmelzen. Bei den gegebenen Temperaturverhältnissen überwiegt der erste Effekt. Der Partikelanteil in der Schmelze wird höher, das Gemisch aus Flüssigkeit/Partikel wird viskoser und die Eindringtiefe reduziert sich entsprechend.

In der Abb. 4.3.7 ist die relativ geringe Abhängigkeit der Eindringtiefe dargestellt, wobei für zwei verschiedene Partikelgrößen  $\varnothing = 2 \text{ mm}$  und  $\varnothing = 1 \text{ mm}$  bei einer Blockadehöhe von 30 mm und  $\text{PARVIS} = 0.1$  die Ergebnisse gezeigt werden.

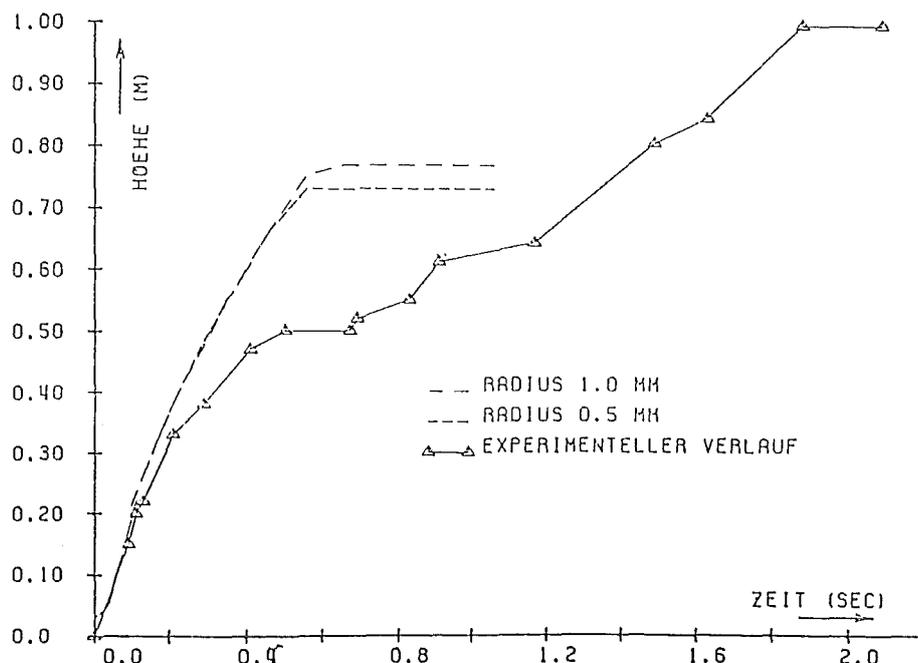


Abb. 4.3.7: Abhängigkeit der Eindringtiefe der Schmelze für verschiedene Partikelgrößen bei einer Partikelblockade von 30 mm Höhe (Experiment #3)

#### 4.3.8 Einfluß der Viskosität der Schmelze auf die Eindringtiefe des Flüssigkeits/Partikelgemisches

In diesem Unterpunkt soll nochmals der schon in Kap. 3 aufgezeigte Einfluß der Viskosität der flüssigen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schmelze auf die Eindringtiefe des Schmelzgemisches aufgezeigt werden.

Dabei wird die schon in Kap. 3.2.2 verwendete reduzierte Viskosität der Schmelze von  $\eta = 3.16 \cdot 10^{-2}$  Pas angesetzt. Der Einfluß und die Wechselwirkung dieser Viskosität mit den Partikelviskositäten  $\text{PARVIS} = 0.1$  wird in der Abb. 4.3.8 dargestellt. Die Partikelbetthöhe beträgt 25 mm.

Es ergibt sich eine Zunahme der Steighöhe mit Reduktion der Viskosität der reinen Schmelze. Wegen der an sich hohen Schmelzviskosität des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  überwiegt der Einfluß dieses Parameters den der Partikelviskosität (vor allem bei kleinen Werten von  $\text{PARVIS}$ ). So erhöht sich die Eindringtiefe für die Rechnungen mit  $\text{PARVIS} = 0.1$  Pas unter Benutzung der geringeren Schmelzviskosität um  $\sim 20\%$  gegenüber den in Abb. 4.3.1 dargestellten Eindringtiefen.

Bei der Blockadehöhe von 80 mm ist kein Einfluß der Flüssigkeitsviskosität auf die Schmelzbewegung sichtbar. Auch bei reduzierter Viskosität bewegt sich das Schmelz/Partikelgemisch nicht.

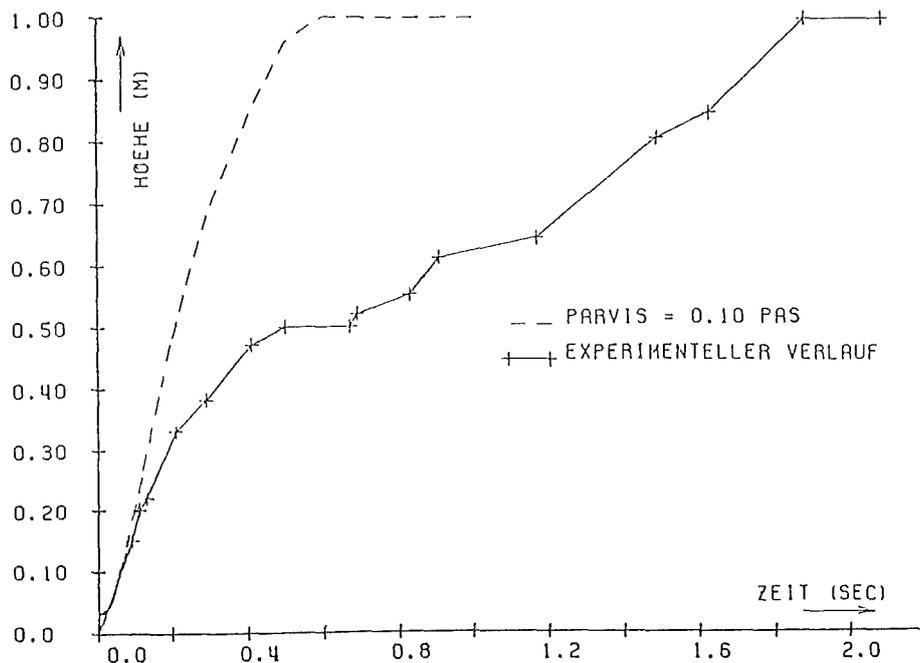


Abb. 4.3.8: Einfluß der Partikelviskosität auf die zeitliche Eindringtiefe der Schmelze für eine Schmelzviskosität von  $3.16 \cdot 10^{-2}$  Pas

#### 4.4 Bewertung der SIMMER-Rechnungen für Partikelbetten/-blockaden

Die Rechnungen ohne Partikelbetten zeigen für das System  $\text{Al}_2\text{O}_3$  das typische Verhalten des "conduction freezing" /27, 15/. Durch den Aufbau einer Kruste wird der Strömungskanal langsam verschlossen und dadurch die Strömung unterbrochen. In einer Darstellung wie in Abb. 3.1.2 - Eindringtiefe über der Zeit - ergibt sich ein parabolischer Zusammenhang.

Bei den Rechnungen mit Partikelbetten ändert sich diese Eindringcharakteristik. Die Eindringtiefe nimmt linear mit der Zeit zu und stoppt dann plötzlich. Dieses Verhalten ist charakteristisch für ein sogenanntes "bulk freezing" /27, 15/, bei dem die Strömung durch das Ausfrieren an der vordersten Schmelzfront zum Stillstand kommt. Mit Partikeln in der Strömung ist damit ein geändertes Ausfrierverhalten zu erwarten mit reduzierten Eindringtiefen in die Strukturen.

Die Ergebnisse der THEFIS Experimente mit beweglichen Partikelbetten sowie deren Nachrechnungen mit SIMMER-II sind in der Abb. 4.4.1 zusammengefaßt, wobei die Eindringtiefe des Schmelz/Partikelgemisches über die Partikelbetthöhen aufgetragen ist. Als zusätzliche Datenpunkte sind die Eindringtiefen einer Schmelze ohne Partikelbetten dargestellt.

Charakteristisch für die experimentellen Werte ist, daß für Partikelbetthöhen  $\leq 30$  mm eine Eindringtiefe von  $\sim 100$  cm gemessen wurde - das Partikelbett also mit der Schmelze wegtransportiert wird -, während für Partikelbetten mit einer Höhe  $\geq 40$  mm diese unbewegt bleiben und auch nicht vollständig durchdrungen werden.

Gegenüber den Eindringtiefen in das Quarzrohr ohne Partikelbetten ergibt sich für kleine Partikelbetten  $\leq 30$  mm eine Reduktion von  $\sim 35$  % der Eindringtiefe. Die Experimente geben den Anschein von stark nichtlinearer Abhängigkeit der Eindringtiefe des Schmelz/Partikelgemisches von der Blockadehöhe. Flache Partikelbetten führen sofort zu einer ersten Reduktion der Eindringtiefe gegenüber dem Fall ohne Partikel, eine weitere Erhöhung des Partikelbettes führt dann sprunghaft zu einem totalen Anhalten der Strömung.

Mit SIMMER wurden neben den vorhandenen experimentellen Datenpunkten zusätzliche Partikelbetthöhen gerechnet um den möglichen Verlauf der Eindringtiefe über der Partikelbetthöhe genauer zu bestimmen.

## Results of SIMMER calculation

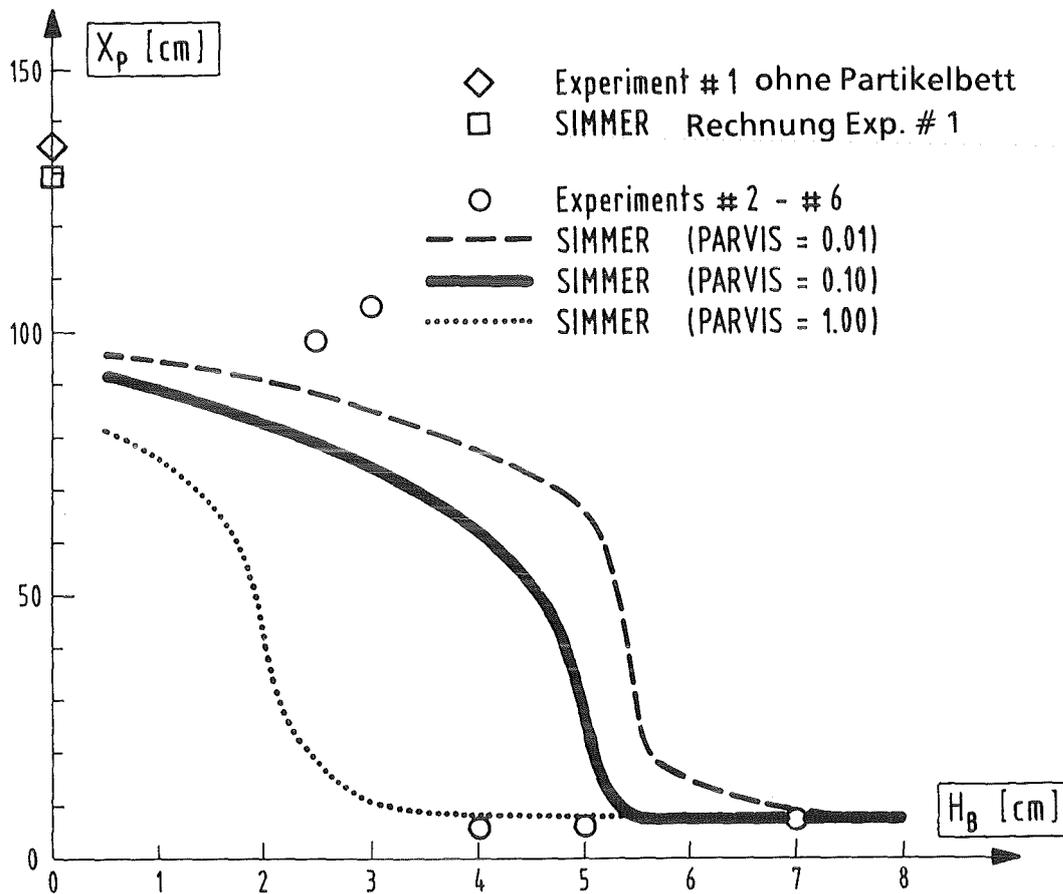


Abb. 4.4.1: Vergleich der Ergebnisse der THEFIS Experimente mit Partikelblockaden und SIMMER-II Nachrechnungen

Aus den Ergebnissen und dem Verlauf der SIMMER Rechnungen läßt sich ebenso wie im Experiment der beschriebene nichtlineare Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Betthöhe herleiten.

Schon geringe Partikelbetthöhen führen zu einer Reduktion der Eindringtiefe gegenüber reiner Flüssigkeit und ab einer gewissen Betthöhe wird der Weitertransport von Schmelze in das Rohr unterbunden.

Wie tief die Mischung aus Flüssigkeit und Partikel in das Quarzrohr eindringen kann, hängt von der zeitlichen Dominanz der Reibungs- bzw. Ausfrierprozesse

ab. Bei geringen Betthöhen mit rasch einsetzender Bewegung spielen Reibungsvorgänge und damit die erhöhte Viskosität in der ursprünglichen Partikelschicht die wesentliche Rolle. Das Partikelbett wird etwas verschmiert und vor der Schmelze hergeschoben. Bei größeren Betthöhen und verzögerter Beweglichkeit dominieren die Wärmeübergangsprozesse in der Partikelschüttung und die Bewegung der Schmelze wird immer stärker behindert.

Das oben beschriebene Verhalten wird auch durch Rechnungen bestätigt, bei denen höhere Druckniveaus als im Experiment angenommen wurden. Wird der erreichte Enddruck von 2 bar auf 3 bar im Reservoir hochgesetzt, so zeigen die Rechnungen (mit  $PARVIS = 0.1$ ), daß bei kleinen Partikelbetthöhen die Schmelze tiefer eindringt als bei den ursprünglichen Rechnungen. Die Eindringtiefe bei höheren Partikelbetten ändert sich jedoch nicht.

Ein weiterer Hinweis kann durch Variation des Wärmeüberganges von der Flüssigkeit in das Partikelfeld gewonnen werden. Nimmt man als Basis die im Experiment # 6 undurchdringliche Blockade von 80 mm, so zeigt sich, daß bei einer Reduktion des Wärmeüberganges die Blockade in der Simulationsrechnung wieder mit der Strömung mitbewegt werden kann.

Wie schon erwähnt kann SIMMER nur ein homogenes Gemisch von Fluid/Partikel und damit nur mittlere Eindringtiefen beschreiben. Ein Verschmieren der Partikel axial in Strömungsrichtung (insbesondere bei kleinen Partikelbetten) würde gegenüber dem SIMMER Modell eine größere Eindringtiefe bedeuten, eine senkrecht zur Strömung sich bildende Anhäufung und u.U. Verblockung würde eine Reduktion der Eindringtiefe bewirken.

Verglichen mit den Experimenten unterschätzt SIMMER die Eindringtiefen für kleine Betthöhen mit einem aus Rechnungen für  $UO_2$  Blockaden in Bündeln abgeleiteten Wert von  $PARVIS = 0.1$  um 20 %.

Im einzelnen zeigt die Abb. 4.4.1, daß gegenüber den Experimenten auch noch bei einer Partikelbetthöhe von 40 mm ein Eindringen der Schmelze in das Rohr auftreten sollte. Daß dies im Experiment nicht auftrat, könnte an frühen Verkanntungsprozessen liegen.

Für größere Betthöhen stimmen die SIMMER Ergebnisse mit den Experimenten unabhängig von dem Parameter  $PARVIS$  überein, so daß, gemessen an den Einschränkungen des SIMMER-Modelles (1 Geschwindigkeitsfeld für Fluid/Partikel

etc.) sowie den Unsicherheitsbereich verschiedener experimenteller Parameter, von einer akzeptablen Übereinstimmung gesprochen werden kann.

Aus den durchgeführten Parameterstudien zu Packungsdichte, der Partikelgröße in der Blockade, der Eigenviskosität der Schmelze sowie zum Wärmeübergang zwischen Schmelze und Partikel ist ersichtlich, daß der Wärmeübergang den dominanten Einfluß besonders bei hohen Partikelbetten hat.

Bei kleinen Partikelbetthöhen beeinflussen Parameter wie Packungsdichte, Partikeldurchmesser und Viskosität der Schmelze die Eindringtiefe. Der Einfluß einer Variation der Packungsdichte bzw. des Partikeldurchmessers auf die Eindringtiefe der Schmelze liegt für die analysierten Fälle im 10 % Bereich.

## 5. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Die THEFIS Experimente mit Partikelbetten und die Nachrechnungen mit SIMMER-II zeigen, daß Ausfriervorgänge einer Flüssigkeit durch Partikel in der Strömung stark beeinflußt werden. Die wirksamen Effekte an der vorderen Strömungsfront bestimmen dominant die Tiefe des Eindringens der Schmelze in eine Struktur. So werden in den einphasigen THEFIS Experimenten mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sehr große Eindringtiefen, die typisch für das sogenannte "conduction freezing" sind, erreicht. Der Strömungskanal wird dabei langsam durch sich aufbauende Krusten an den Kanalwänden verschlossen. Befinden sich Partikel in der Strömung oder an der vorderen Schmelzfront so ändert sich die Charakteristik des Ausfrierens und es tritt das sogenannte "bulk freezing" auf. Der Strömungskanal wird hierbei durch das Ausfrieren der vordersten Strömungsfront verschlossen. Dieses "bulk freezing" bedeutet eine drastische Verkürzung der Eindringtiefe der Schmelze in einen Kanal.

Durch die Nachrechnungen mit SIMMER-II konnten die Zusammenhänge und Mechanismen beim Ausfrieren einer Strömung mit Partikelbetten besser verstanden werden. Die durchgeführten Rechnungen dienten vor allem auch zur Bestimmung der für das Ausfrierverhalten sensitiven Modell-Parameter. Dies geschah vor allem im Hinblick auf die Erweiterung der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -THEFIS Experimente auf das System  $\text{UO}_2$  in der projektierten SUSI Anlage /30/.

In dieser Anlage sollten noch ungeklärte Fragen beim Ausfrierverhalten von Kernbrennstoff sowie auch Unterschiede des Verhaltens von Thermit und  $\text{UO}_2$  geklärt werden. Diese SUSI-Experimente konnten bedauerlicherweise jedoch nicht durchgeführt werden.

Vesucht man die mit Hilfe der THEFIS Experimente gewonnenen Erkenntnisse auf Reaktorverhältnisse zu übertragen, so bedeuten sie, daß bei partikelbeladenen Strömungen, wie sie während des Störfallablaufs zu erwarten sind, nur sehr geringe Eindringtiefen zu erwarten sind. Damit werden mögliche Entladepfade früh blockiert und auch das Aufnahmepotential der Brutmäntel für Kernbrennstoff wird eingeschränkt. Damit wird eine mögliche frühe nukleare Abschaltung verhindert und auch späte Störfallphasen mit erhöhten Energetikpotentialen sind u.U. erreichbar /1, 15/. Wie jedoch in /22/ gezeigt wurde, können während des Zusammenschmelzens eines Kerns aufgrund der aufeinanderfolgenden Leistungsexkursionen diese Partikelblockaden auch wieder aufgeschmolzen und neuer Raum für zusätzliche Materialentladungen geschaffen werden.

Dieses komplexe und transiente Wechselspiel zwischen Ausfrieren, Aufschmelzen der Blockaden und erneuter Materialentladung sowie die Rückwirkung dieser Prozesse auf die Vorgänge im Inneren des Kerns kann ebenso mit dem SIMMER Code beschrieben werden.

## 6. Literatur

- /1/ W. Maschek, E.A. Fischer, and M.W. Asprey  
"Transition Phase and Recriticality Analyses for a SNR-Type Homogeneous Core with the SIMMER-II Code"  
Int. Topl. Mtg. Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, July 19 - 23, 1982, Lyon, France, Vol. III, p. 357, European Nuclear Society (1982)
- /2/ W. Maschek, C.D. Munz, L. Meyer  
An Assessment of Liquid Sloshing Phenomena in Pools Based on AFDM/SIMMER Code Calculations and Experiments  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. IV, 395, Aug. 12 - 16 (1990)
- /3/ R.O. Gauntt, D.A. McArthur et al.  
Analysis of the TRAN-in-pile fuel freezing penetration experiments  
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. II, p. 849
- /4/ G. Fieg, M. Möschke, I. Schub, H. Werle  
Penetration and Freezing Phenomena of Ceramic Melts into Pin Bundles  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. II, 387, August 12 - 16 (1990)
- /5/ B.W. Spencer, R.E. Henry, H.K. Fauske, G.T. Goldfuss, and R.L. Roth  
"Summary and Evaluation of Reactor Material Fuel Freezing Tests"  
Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, Washington, August 19 - 23, 1979, Vol. IV, p. 1766, American Nuclear Society (1979)
- /6/ P. Soussan, M. Schwarz, D. Moxon, B. Berthet (CEA)  
Propagation and Freezing of Molten Material Interpretation of Experimental Results  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. II, 223, August 12 - 16 (1990)
- /7/ R.B. Tattersall, R.J. Maddison, K. Miller  
Experiments at AEE Winfrith on the Penetration of Molten Fuel into Pin Arrays and Tubes  
AEEW-R 2480 (1989)
- /8/ W. Pepler, H. Will, St. Misu, G. Grötzbach  
Investigation of Material Relocation Phenomena during Severe Accidents in Fast Breeder Reactors  
Nucl. Eng. Dgn. 100, 409 (1987)
- /9/ M. Cranga (CEN), D. Struwe, W. Pfrang (KfK), D. Brear (UKAEA), N. Nonaka (PNC)  
Transient Material Behaviour in CABRI-1 Experiment Failure Under Fully and Semi-Restrained Fuel Pin Conditions  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. I, 431, August 12 - 16 (1990)

- /10/ B.W. Spencer, L.J. Wilson et al.  
Results of recent reactor material tests on dispersal of oxide fuel from a disrupted core  
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. II,  
p. 877
- /11/ M. Livolant, J. Dadillon, G. Kayser, D. Moxon  
SCARABEE: A test reactor and programme to study fuel melting and propagation in connexion with local faults. Objectives and results  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. II,  
p. 177
- /12/ M. Pilch, P. Mast  
"PLUGM, A coupled Thermal-Hydraulic Computer Model for Freezing Melt Flow in a channel"  
NUREG/CR 3190 (1987)
- /13/ M. Schwarz, P. Soussan, M.C. Stansfield, U. Miller  
Interpretation of Out-of-Pile Experiments on the Propagation and Freezing of Molten Fuel  
13<sup>th</sup> Mtg. LMBWG, Winfrith, 27 - 29. Sept. 1988
- /14/ W.R. Bohl, L.B. Luck  
SIMMER-II: A Computer Program for LMFBR Disrupted Core Analyses  
LA-11415-MS (1990)
- /15/ W. Maschek  
A Brief Review of Transition Phase Technology  
KfK 3330 (1982)
- /16/ G.A. Greene  
Freezing of Multiphase Mixtures Flowing Downward in Circular Tubes  
BNL-NUREG-28301 (1980)
- /17/ D. Kuhn, M. Möschke, H. Werle  
"Freezing of Aluminium Oxide and Iron Flowing Upward in Circular Quartz Glas Tubes",  
KfK 3592 (1983)
- /18/ G. Fieg, P. Henkel, M. Möschke, I. Schub, H. Werle  
"Freezing Phenomena of Flowing Melts in Nonmelting and Melting Tubes",  
BNES Conference on Science and Technology of Fast Reactor Safety, Guernsey, 1986
- /19/ G. Fieg, M. Möschke, I. Schub, H. Werle  
Interner Bericht (1985)
- /20/ G. Fieg, M. Möschke, H. Werle  
Interner Bericht (1985)
- /21/ G. Fieg, M. Möschke, H. Werle  
Interner Bericht (1985)

- /22/ W. Maschek, G. Fieg, M. Flad  
Experimental Investigations of Freezing Phenomena of Liquid/Particle Mixtures in the THEFIS Facility and Their Theoretical Interpretation  
The 1990 Int. Conf. on Fast Reactor Safety Snowbird, Utah, USA, Vol. I, 519, August 12 - 16 (1990)
- /23/ S. Hentschel, W. Maschek  
"Einfluß der Gitterschrittweite auf die Berechnung von Druckverlustkennzahlen in den Codes SIMMER-II und AFDM",  
KfK 4617 (1989)
- /24/ J.R. Welty et al.  
Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer  
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969
- /25/ K. Thurnay  
Interner Bericht (1985)
- /26/ S.J. Hakim  
"Analyses of a Prototypic and a Simulant Experiment Related to Freezing in Flow Channels",  
Los Alamos Scientific Laboratory report LA-7938-C (March 1979)
- /27/ M. Epstein  
Transient Freezing of a Flowing Ceramic Fuel in a Steel Channel  
Nucl. Sci. Eng. 61 (310) (1976)
- /28/ G. Fieg, persönliche Mitteilung
- /29/ J. Foit  
Analysis of Expansion Phase Experiments with Improved Approximation Schemes  
KfK 4245 (1987)
- /30/ G. Fieg, H. Werle, P. Babiak, D. Perinic, B. Stuka  
Interner Bericht (1986)
- /31/ Y.S. Touloukian  
"Thermophysical Properties of Matter"  
The TPRC Data Series  
The Macmillan Company, New York 1967