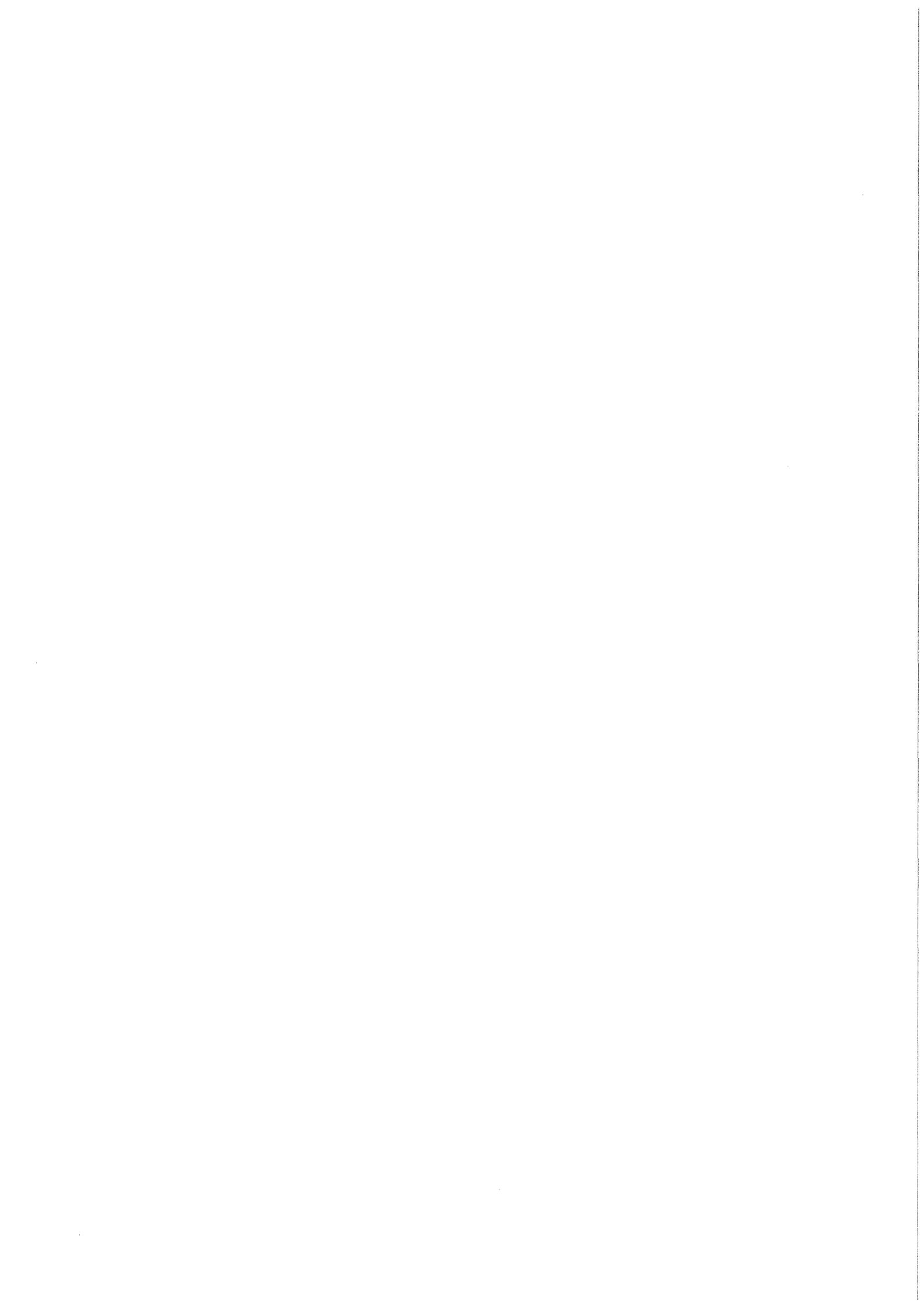


KfK 4493
April 1989

Entwicklung eines Simulatormoduls für das CORA-Experiment zum Einsatz im SFD-Code SCDAP

W. Hering
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projektgruppe LWR-Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



**Kernforschungszentrum Karlsruhe
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projektgruppe LWR-Sicherheit**

KfK 4493

**ENTWICKLUNG EINES SIMULATORMODULS
FÜR DAS CORA-EXPERIMENT
ZUM EINSATZ IM SFD-CODE SCDAP**

W. Hering

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

Hering, Wolfgang:

ENTWICKLUNG EINES SIMULATORMODULS FÜR DAS CORA-EXPERIMENT ZUM EINSATZ IM SFD-CODE SCDAP

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe werden mit dem amerikanischen Störfall-Code SCDAP (Severe Core Damage Analysis Package) Nachrechnungen in Ergänzung zu den CORA-Experimenten /1,2,3/, durchgeführt. Dieser Code wurde am Idaho National Engineering Laboratory (INEL), USA, entwickelt. Ursprünglich war SCDAP nur für In-pile Anwendungen vorgesehen, sodaß wichtige Eigenschaften zur Nachrechnung des Out-of-pile-Experimentes CORA fehlen. Das Rechenprogramm wurde deshalb um ein neues Modul erweitert. Dieses Modul bildet die Wärmequelle der CORA-Anlage, den elektrisch beheizten Brennstab, nach. Das neue Modul "Simulator" enthält Modelle zur Beschreibung der axialen und radialen Materialfolge und zur Nachbildung des axialen temperaturabhängigen Leistungsprofils. Bedingt durch den spezifischen Widerstand des Wolfram muß die damit verbundene autokatalytische Rückkopplung sorgfältig berechnet werden. Ferner wurden für das Simulator-Modul die Randbedingungen zur Berechnung der axialen Wärmeleitung an die kalten Enden des Stabes verlegt, um eine korrekte Bilanzierung der freigesetzten Leistung zu ermöglichen. Das Programm beschreibt nun die Wärmeleitung in der beheizten Zone zweidimensional (R-Z-Geometrie) und in den Elektrodenzonen eindimensional in axialer Richtung. Die freigesetzte Heizleistung entspricht der in den CORA Experimenten beobachteten. Die berechneten Temperaturen stimmen bis zur Eskalation der Oxidation des Zirkalloys gut mit den Meßwerten überein.

Abstract

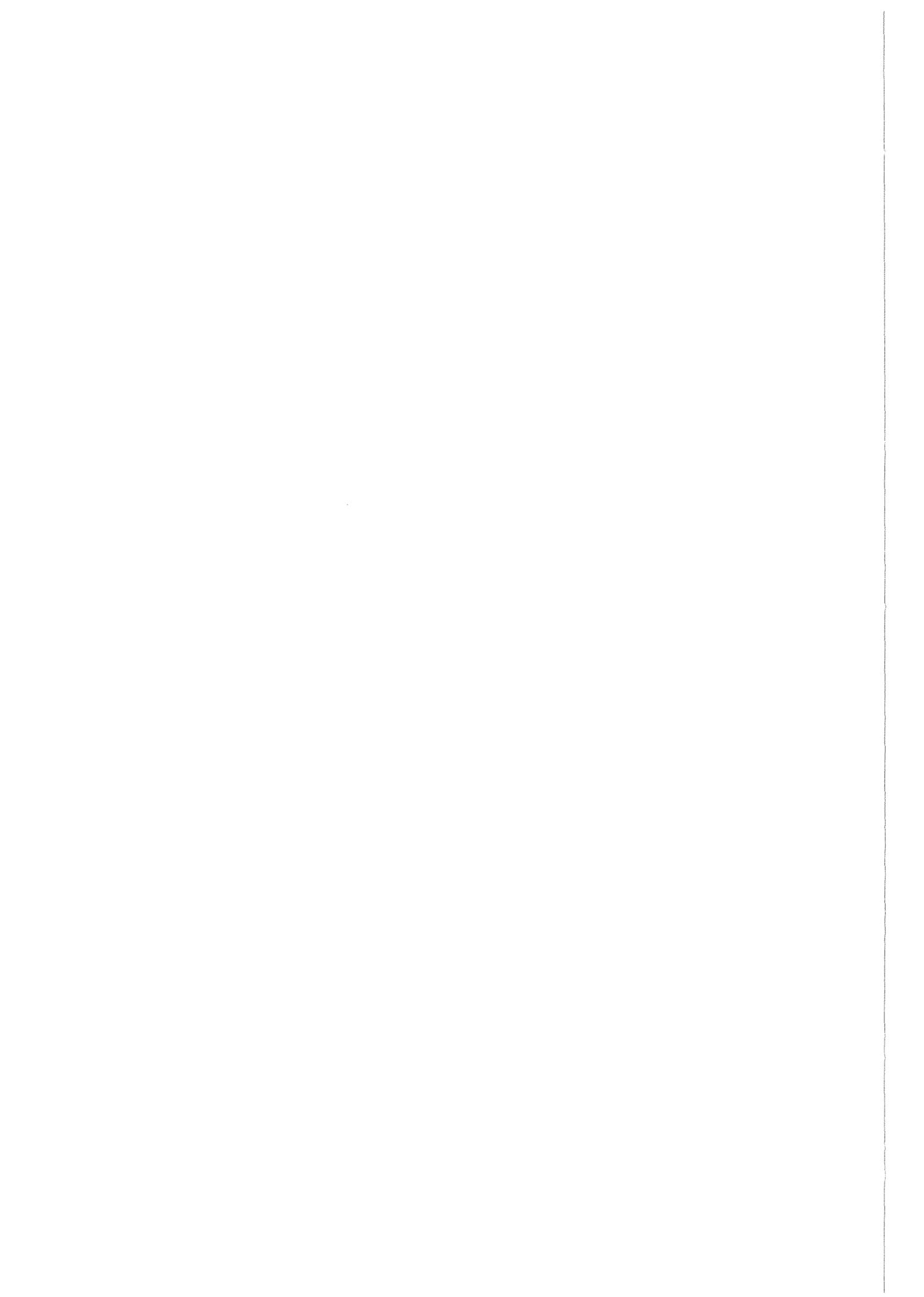
Hering, Wolfgang:

DEVELOPMENT OF A SIMULATOR MODUL FOR THE CORA EXPERIMENT TO BE USED WITHIN THE SFD CODE SCDAP

At the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), out-of-pile experiments on Severe Fuel Damage (SFD) of Light Water Reactor (LWR) fuel elements are performed in the CORA facility. Additionally to the experimental investigations, calculations are done using the Severe Core Damage Analysis Package (SCDAP) developed at the Idaho National Engineering Laboratory (INEL), USA. To calculate CORA experiments with this code, which was originally designed for in-pile use, a new module has been introduced into SCDAP, to simulate the electric heater rod of the CORA test bundle. The new module is composed of features to calculate radial and axial properties and the axial temperature dependent power profile. Especially the autocatalytic feedback of the tungsten heater has been considered carefully. Furthermore, the extension of the axial boundaries to the cold ends of the heater rod was necessary to calculate the power balance observed in the experiment. The extended SCDAP code uses a 2-dimensional heat conduction in the heated section of the bundle and a 1-dimensional model in the non-heated sections in the electrode sections of the bundle. The power release and the temperatures in the heated area are comparable to the results of the CORA tests as far as classical thermohydraulics are involved.

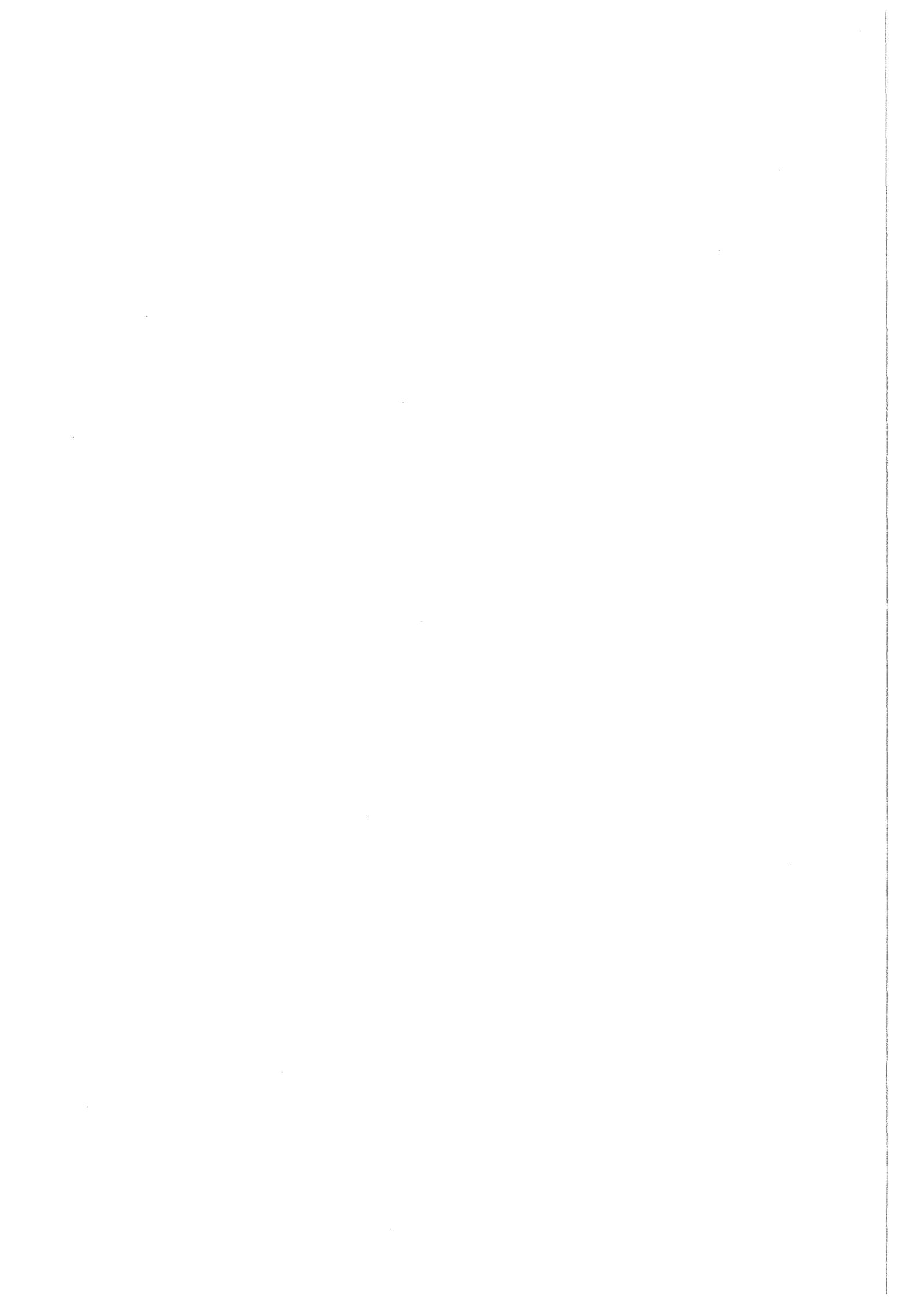
Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Analyse der CORA-Anlage	3
2.1 Analyse eines CORA-Heizstabes	5
2.1.1 Geometrie und Materialien	5
2.1.2 Thermodynamik	9
2.1.3 Leistungssteuerung	10
2.1.4 Axiale Randbedingungen	11
2.2 Resumée	12
3. Der SFD-Code SCDAP	15
3.1 Modellumfang des erweiterten Codes	15
3.2 Programmablauf	17
4. Modellierung	21
4.1 Umfang des Simulator-Moduls	21
4.2 Erweiterung bestehender Modelle	21
4.3 Neue Modelle	23
4.3.1 Leistungsbilanzierung	25
4.3.2 Axiale Wärmeleitung	28
4.3.3 Axiale Randbedingungen	29
4.4 Verifizierung des Modules	31
4.5 Massenbilanz	38
5. Zusammenfassung und Ausblick	41
Anhang A. Literatur	43
Anhang B. Modellparameter	45
Anhang C. Programmlisten	49



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Teststrecke der Versuchsanlage CORA	4
Abbildung 2.	CORA-Bündelkomponenten	7
Abbildung 3.	Blockschaltbild der Heizung	11
Abbildung 4.	Vergleich Heizstab mit "Simulator"	13
Abbildung 5.	Modellumfang aktueller SFD In-vessel-Codesysteme	16
Abbildung 6.	Programmablauf der Out-of-pile-Version von SCDAP	19
Abbildung 7.	Ergebnis der Parameterstudie	27
Abbildung 8.	Flußdiagramm des WOLFHE - Modells	28
Abbildung 9.	Flußdiagramm des HEAR16 - Modells	30
Abbildung 10.	Phasen eines CORA-Versuches	33
Abbildung 11.	Oberflächentemperaturen des Experiments CORA-5	34
Abbildung 12.	Leistungsbilanz der Simulation des CORA-5 Experiments	35
Abbildung 13.	Axiales Temperaturprofil eines Simulators	36
Abbildung 14.	Axiales Leistungsprofil eines Simulators	37
Abbildung 15.	Berechnete Massenverlagerung	38



Tabellenverzeichnis

Tabelle	1. Maße und Befestigungsarten von CORA-DWR-Komponenten	6
Tabelle	2. Geänderte SCDAP-Unterprogramme	22
Tabelle	3. Erweiterte SCDAP-Unterprogramme	22
Tabelle	4. Neue SCDAP-Unterprogramme	24

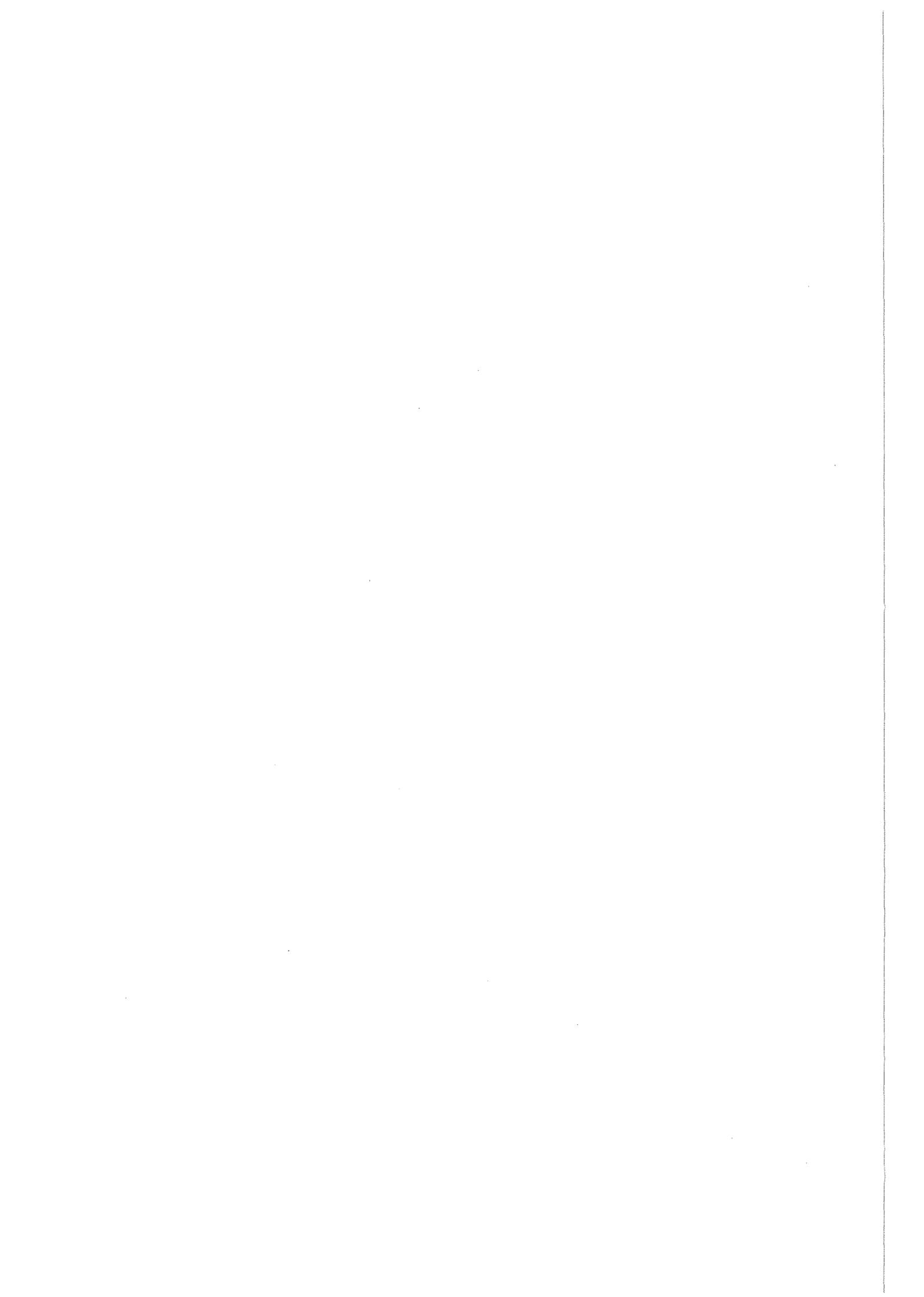
1. Einleitung

Im Rahmen der sicherheitsorientierten LWR-Forschung der Projektgruppe LWR-Sicherheit (PRS) und der internationalen Zusammenarbeit zur Untersuchung des Verhaltens von LWR-Brennelementen unter schweren Störfallbedingungen werden in der CORA-Anlage Versuche durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist ein besseres Verständnis der Vorgänge nach einem Kühlmittelverlust mit s.g. kleinem Leck. Die Ausgangslage ist der Beginn der Aufheizphase eines LWR-Kernes nach dem Absinken des Kühlwasserspiegels unter die Kernunterkante. Ferner soll das Verhalten der Brennelementkomponenten beim Kernnotkühlen, d.h. beim Wiederfluten eines LWR von unten (kalter Strang), nach einer Transiente untersucht werden. Die Versuchsanlage ist so konzipiert, daß On-line-Beobachtungen an verschiedenen Stellen des Testraumes Aussagen über den zeitlichen und räumliche Ablauf des Brennelementeversagens und der Materialverlagerung erlauben. Diese Daten sind wichtig, einerseits zur Bewertung der Phänomene hinsichtlich des Unfallablaufes und andererseits zur Verbesserung und Weiterentwicklung bestehender SFD-Codes.

Um die Ergebnisse eines Out-of-pile-Tests mit den Voraussagen eines Störfall-Codes vergleichen zu können, muß dieser entsprechend erweitert und an die besonderen Bedingungen des Versuches angepasst werden. Gleichzeitig darf jedoch die Allgemeingültigkeit des Codes, d.h. seine Anwendbarkeit auf LWR-Probleme nicht eingeschränkt werden. Die Vermeidung eines speziellen CORA-Codes steht bei der Erweiterung immer im Vordergrund.

Der hier beschriebenen Modellentwicklung liegt die "stand alone"-SCDAP-Version SCDAP/MOD1/VER18 zugrunde. Auf eine Verwendung des umfangreicheren Programmpakets SCDAP/RELAP5 wurde verzichtet, da diese Version bei gleichen Umgebungsbedingungen einen deutlich erhöhten Rechenaufwand benötigt. Ferner sind für die Modellierung der "once through"-Thermohydraulik der CORA-Versuche keinerlei Rückkopplungsmechanismen wie für die Modellierung des Primärkreislaufes eines LWR zu berücksichtigen /10,11/.

Ziel der Erweiterung des Störfallcodes SCDAP ist die Einbindung des neuen Moduls "SIMULATOR" zur Beschreibung des elektrisch beheizten Brennstabes der CORA-Anlage.



2. Analyse der CORA-Anlage

Bevor eine Modellierung in Angriff genommen werden kann, muß eine Analyse der Anlage durchgeführt werden, um den notwendigen Umfang des neu zu erstellenden Moduls zu definieren. Die Beschreibung der CORA-Anlage war bereits Gegenstand einer Vielzahl von Veröffentlichungen, sodaß nicht mehr auf alle Details eingegangen werden soll /1,2,20,21/. Für das Verständnis des neuen Moduls "Simulator" genügt in diesem Sinne eine genaue Betrachtung des CORA-Bündelvolumens wie es in Abbildung 1 wiedergegeben ist.

Der Bündelraum kann in erster Näherung in drei axiale Teilbereiche untergliedert werden.

1. Unbeheiztes Volumen unterhalb des Dampfeinlaßrohres. Vom Dampfeinlaßrohr abwärts sind ca. 0.3 m bis zur Oberfläche der Wasservorlage im Quenchtank zu berücksichtigen.
2. Beheizte Zone, unten begrenzt durch das Dampfeinlaßrohr. Das Fluid, bestehend aus Argon und überhitztem Dampf strömt durch eine Öffnung in der ZrO_2 -Isolation und dem Zirkaloy- Dampfführungsrohr (Shroud) waagrecht in das Bündel (Abbildung 1). Dort wird das Fluid nach oben umgelenkt, und passiert die beheizte Zone des Testbündels mit einer Länge von 1 m.
3. Bereich oberhalb der beheizten Zone. Das Fluid strömt weitere 0.4 m durch die "Elektrodenzone" des Bündels bevor es in das Abgassystem der Anlage gelangt.

Da in beiden Randzonen nur eine vernachlässigbare primäre Heizleistung freigesetzt wird, werden sie als unbeheizte Zonen definiert. Die unbeheizten Zonen sind jedoch durch Wärmeleitung im Heizstab, durch Strahlung und Konvektion im Kühlkanal an die beheizte Zone angekoppelt, sodaß eine genau definierte Grenze nur durch den geometrischen Übergang vom Heizstab (W) auf die Elektroden (Mo) gegeben ist.

Insgesamt steht das Bündel auf ca. 1.7 m Länge in Wechselwirkung mit dem Kühlfluid.

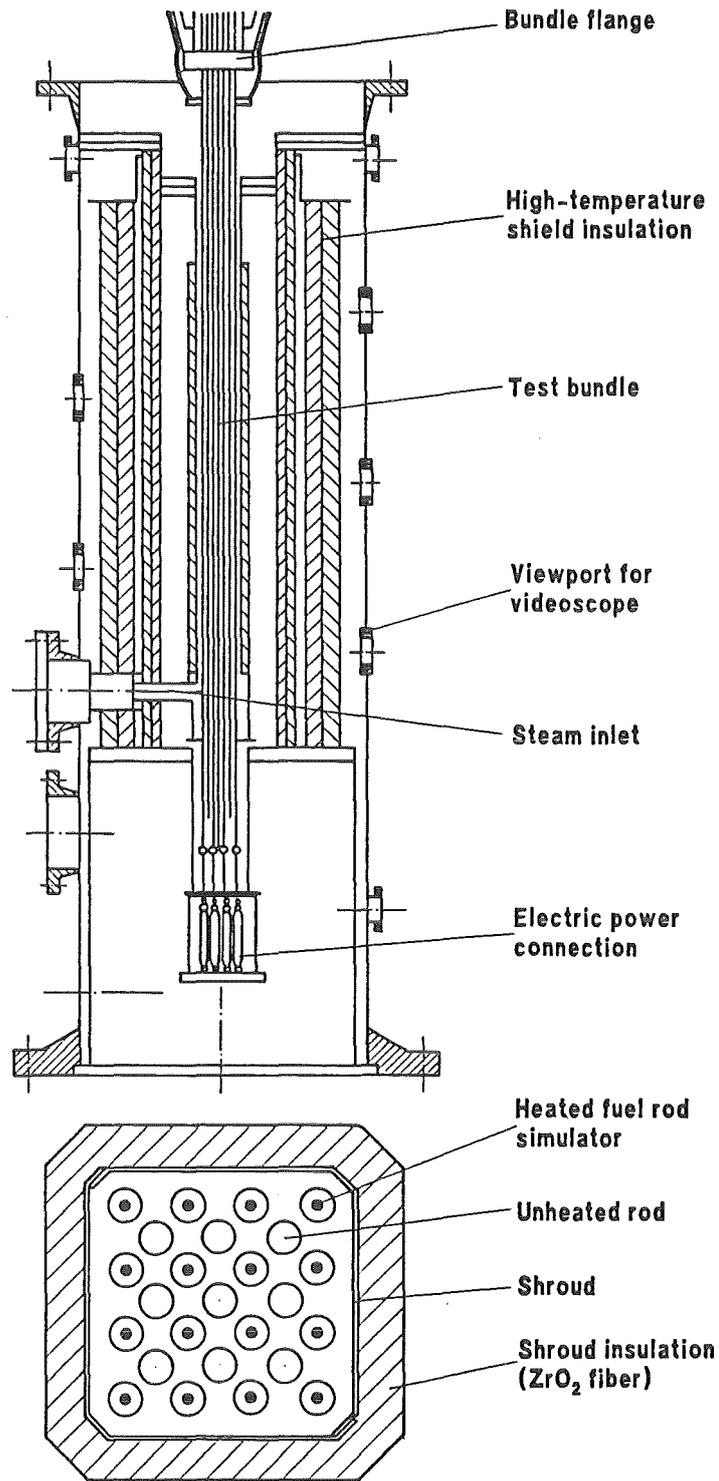


Abbildung 1. Teststrecke der Versuchsanlage CORA: Der überhitzte Dampf strömt von links kommend in das Bündel, durchquert die beheizte Zone und verläßt das Kontrollvolumen durch das Abgassystem. In untere Teil ist die Stabanordnung für DWR-typische Versuche zu sehen.

Die Analyse der Bedingungen im Dampferzeugungs- bzw. Dampfüberheizungssystem sowie die Gaslaufzeiten innerhalb dieser Komponenten sind nicht Themen dieser Arbeit. Die Untersuchung der Randbedingungen und deren Integration in das Simulationsprogramm soll in einer späteren Arbeit diskutiert werden.

2.1 Analyse eines CORA-Heizstabes

Der Modellierung vorangestellt ist die Analyse des zu modellierenden Heizstabes, um die Anforderungen an die Genauigkeit der Repräsentierung bestimmen zu können. Diese Analyse wird des weiteren ergänzt durch Empfindlichkeitstudien zur Bestimmung signifikanter Parameter wie Leistungsbilanzen oder Thermodynamik des Gesamtstabes.

2.1.1 Geometrie und Materialien

Im unteren Teilbild der Abbildung 1 ist ein Querschnitt des CORA-Stabbündels zur Simulation eines DWR-Brennelementes dargestellt. In einem DWR-typischen Gitterabstand von 14,3 mm sind 25 Stäbe innerhalb des Zirkaloy-Shrouds angeordnet. Der Shroud ist zum Ausgleich des radialen Temperaturprofils außen mit einer ca. 20 mm dicken Zirkonoxid-Faserisolation umgeben. Diese Konfiguration kann auf 45 Stäbe, angeordnet in einer 7x7 Matrix, erweitert werden [2,21].

In einem 25-Stab-Bündel sind 16 Stäbe beheizt. Der minimale Wärmequellenabstand G beträgt:

$$G_{CORA} = \sqrt{2} \cdot G_{DWR}$$

Die unbeheizten Stäbe können durch Ag-In-Cd-Absorberstäbe mit Edelstahl-Hüllrohren und Zirkaloy-Führungsrohren ersetzt werden, z.B. ist Test CORA-5 mit einem zentralen Absorberstab bestückt (Abbildung 1 unten). Die unterschiedlichen Stabtypen sind in Tabelle 1 angegeben. Der Aufbau des beheizten ("Heated rod"), des unbeheizten Stabes ("Unheated rod") sowie des Absorberstabes ("Absorber rod") sind in Abbildung 2 dargestellt.

CORA-DWR-Komponenten	unbeheizter Stab "Fuel rod"	beheizter Stab "Simulator"	Absorberstab mit Führungsrohr	Shroud / Shroud isolation
Anzahl	8	16	1	1
Gesamtlänge	2175 mm	1536 mm	1489 mm	1200 mm
Pelletstapel	1500 mm	1000 mm	---	---
Heizstablänge	---	1000 mm	---	---
Elektrodenlänge	0	2x500mm	0	0
Wandstärke	0.725 mm	0.725 mm	0.675mm / 0.8mm	1.2mm / 20 mm
Außen - abmessungen	10.75 mm ϕ	10.75 mm ϕ	10.2 mm ϕ / 13.8 mm ϕ	86 x 86 mm
Befestigungspunkt	oben	oben	oben	unten

Tabelle 1. Maße und Befestigungsarten von CORA-DWR-Komponenten

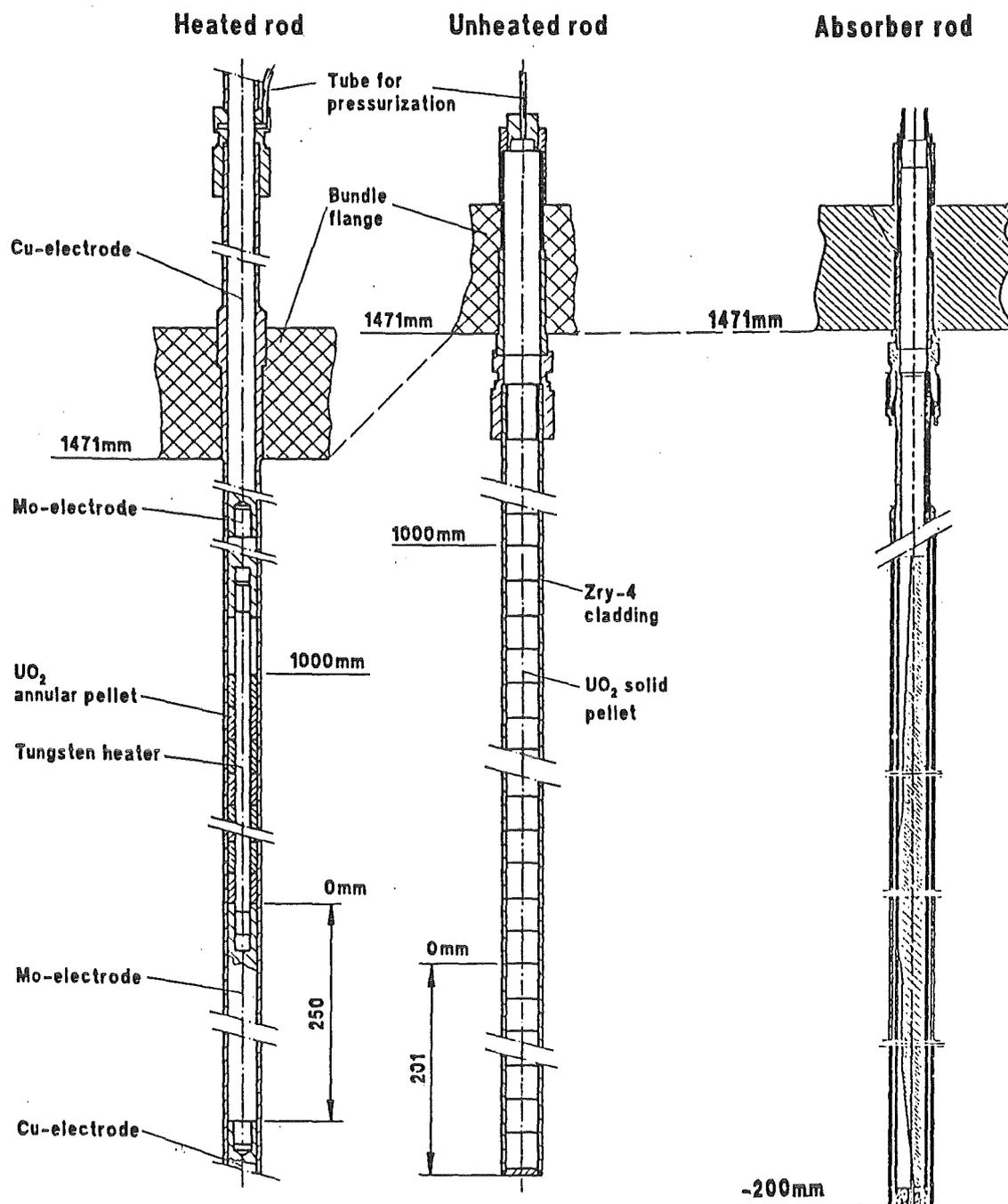


Abbildung 2. CORA-Bündelkomponenten: von links nach rechts: Heizstab, Brennstab (unbeheizt) und Absorberstab

Der Aufbau eines normalen Brennstabes ist sowohl in radialer als auch in axialer Richtung gleichförmig. Sieht man von Materialwechselwirkungen bei hohen Temperaturen einmal ab, so ist der Vollpelletstab in radiale Richtung wie folgt aufgebaut:

1. Vollpellets aus UO_2 . In den CORA-Brennstäben werden abgereicherte UO_2 -Pellets mit 0.2% U^{235} verwendet.
2. Ringspalt, gefüllt mit Argon. Auf eine Simulation von Spaltgas wurde verzichtet, da die Teststäbe sehr früh in der Aufheizphase bersten und das Füllgas freisetzen. (Die Freisetzung von radioaktivem Spaltgas aus dem Brennstab soll im CORA-Versuchsprogramm nicht untersucht werden.)
3. Hüllrohr, gefertigt aus Zirkaloy-4

Diese radiale Materialfolge zieht sich, mit Ausnahme des oberen Plenums über die ganze Stablänge hin (im DWR-Stab bis zu ca. 3.9 m).

Der radiale Aufbau eines CORA-Heistabes ist dagegen abhängig von der axialen Zone. Im folgenden wird die radiale Materialsequenz von innen nach aussen in den unterschiedlichen Zonen dargestellt.

- **Beheizte Zone** mit einer Länge von ca. 1.0m
 1. Wolframheizstab, Simulation der Zerfallswärme durch die ohmschen Verluste des DC-Heizstromes, $\phi = 6$ mm.
 2. UO_2 -Ringpellet, aus abgereichertem UO_2 mit 0.2% U^{235} , entsprechend den Vollpellets $I\phi = 6.1$ mm, $A\phi = 9.1$ mm
 3. Ringspalt, entsprechend dem Vollpelletstab
 4. Zry-Hüllrohr
- **Unbeheizte Zonen** jeweils 0.5m an beiden Seiten.

Der Wolframheizstab ist an beiden Seiten mit Molybdänelektroden verbunden. Die daran anschließenden Kupferelektroden beenden den axialen Aufbau eines elektrisch beheizten Brennstabes.

 1. Molybdän-Kupferelektrode, $A\phi = 8.6$ mm.

Der Heizstrom verursacht auch hier ohmschen Verluste. Diese sind jedoch aufgrund des größeren Querschnittes und der niedrigeren Temperatur kleiner. Sie werden in der Berechnung der Randbedingungen berücksichtigt.

2. ZrO_2 -Schicht, zur elektrischen Isolation der Elektroden.
3. Zry-Hüllrohr

- **Stromzuführungen**

Flexible Kupferbänder bilden die Verbindung zwischen den Kupferelektroden und den Kontakten der Leistungsregelung.

2.1.2 Thermodynamik

In einem LW-Reaktor besitzt jeder Brennstab Wärmequellen in Form der Kernspaltung des U^{235} und des Nachzerfalls der Spaltprodukte. Für die folgende Analyse soll nur die Nachzerfallswärme betrachtet werden. Die Wärmequellendichte ist dabei in erster Näherung gleichmäßig über das Pelletvolumen verteilt.

Bei Out-of-pile-Versuchen wie hier bei der CORA-Anlage sieht die Verteilung der Wärmequellen etwas anders aus. Hier muß zwischen Stäben mit Wärmequellen und quellenfreien Stäben unterschieden werden. Der unbeheizte Brennstab enthält nur Pellets aus abgereichertem Uran (0.2 %). In ihm wird keine Zerfallswärme simuliert, er ist also, sieht man von der Zry-Oxidation einmal ab, quellenfrei. Die Pelletdichte entspricht mit 10.35 g/cm^3 der in DWR-Brennstäben eingesetzten Pellets, Hüllrohr und Strukturelemente wie Abstandshalter sind identisch denen eines kommerziellen deutschen DWR /2,7,9/.

Neben den UO_2 -Pellets wurden auch Al_2O_3 -Pellets zum Test der Anlage und zur Untersuchung des Verhaltens von abbrennbaren Absorberstoffen ("burnable poison rod") verwendet /4,5,6,8/.

Ein wichtiger Unterschied zu einer DWR-Konfiguration ist in diesem Zusammenhang noch zu erwähnen:

Der Heizstab kann recht effektiv Energie abstrahlen, da der quellenfreie Nachbarstab, der unbeheizte Brennstab, als Wärmesenke dient. Weiterhin wird durch die

gute Wärmeleitfähigkeit der Wolframseele ein axialer Wärmestrom vom heißen Zentrum des Bündels zu den kalten Enden ermöglicht.

2.1.3 Leistungssteuerung

Die elektrische Heizleistung wird von einem speziellen Prozessrechner gesteuert. Die Steuerung erfolgt gemäß einer programmierten Leistungstransiente normalerweise vollautomatisch, wobei jederzeit eine manuelle Eingriffmöglichkeit vorhanden ist /2/. Der Prozessrechner steuert drei getrennte DC-Heizkreise mit jeweils maximal 10 Heizstäben an. Diese externe Gleichstromquelle prägt den Heizstäben einen, der gewünschten Heizleistung entsprechenden, Strom ein. Dieser Heizstrom wird zur Regelung und Überwachung an den Enden der flexiblen Kupferzuleitungen gemessen. Die Meßstellen befinden sich oben und unten ca. 0.5 m vom Stabende entfernt. Die reine Heizleistung, d.h. die im Wolframheizstab freigesetzte Leistung, ergibt sich aus der um die Verlustleistungen in den Zuleitungen und den Elektroden reduzierten Gesamtleistung.

Messbar ist jedoch nur die Gesamtleistung. Die Heizleistung kann man aus dem geometrischen Aufbau, der Materialesequenz und dem axialen Temperaturprofil des Heizstabes berechnen. Die Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild der CORA Heizanlage mit den wichtigsten Komponenten.

In folgenden ist die maximale Heizleistung des CORA-5 Testes angegeben:

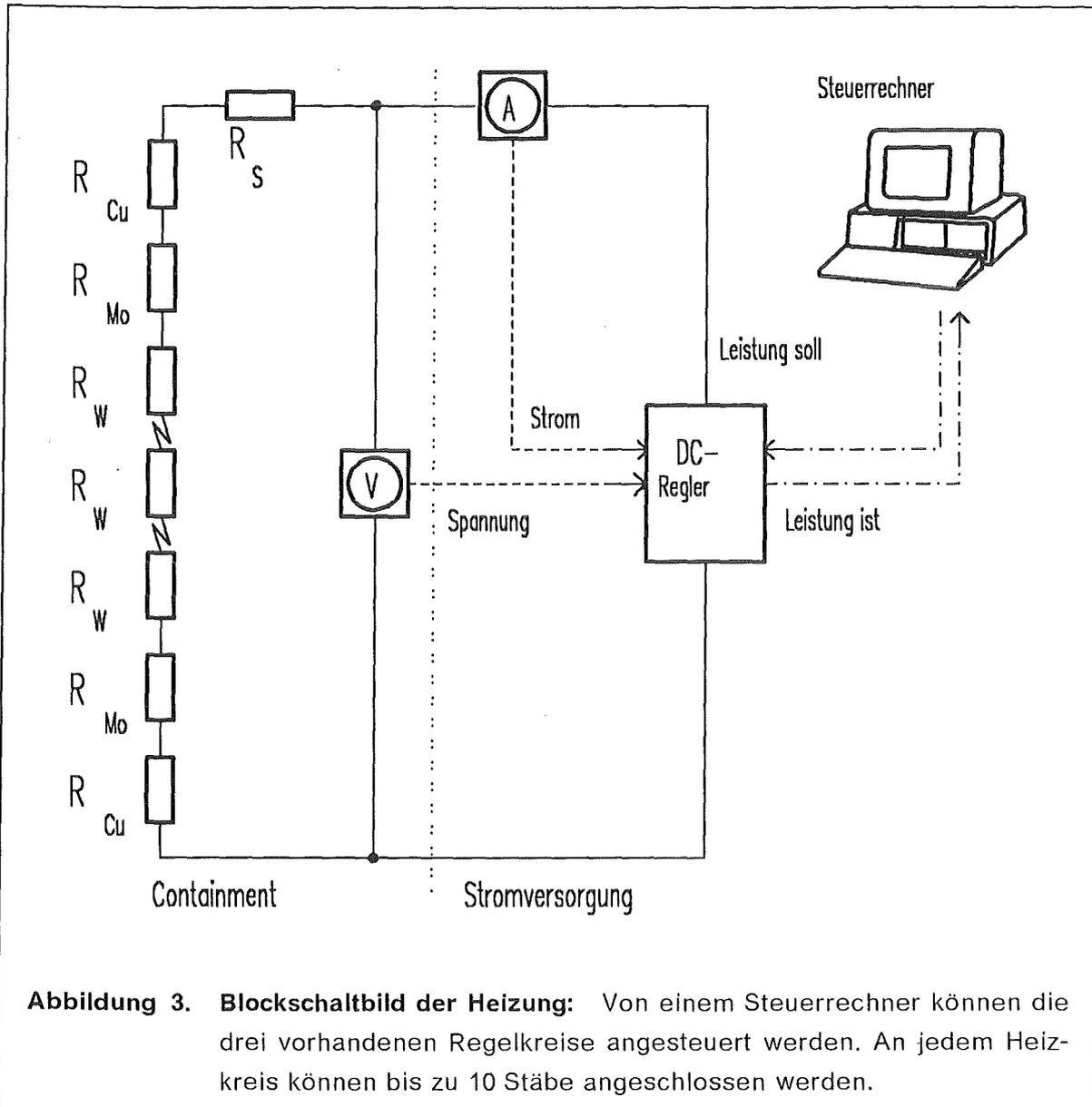
Gesamtleistung:

Die maximale Gesamtleistung von CORA-5 betrug	: ca. 30 kW
diese verteilt sich auf 16 Heizstäbe	: ca. 1.9 kW/Stab
Der Gesamtinnenwiderstand eines Heizstabes	: ca. 10 mΩ
Daraus ergibt sich ein individueller Heizstrom:	ca. 433 A/Stab
und damit bei 6 Stäben pro Heizkreis	: ca. 2.6 kA

Effektive Heizleistung:

Umgesetzt in effektive Heizleistung wird dabei	
bei Starttemperatur der Transiente (ca.800 K)	: ca. 60 %
bei ca. 2400 K	: ca. 80-90 %

Die angegebenen Werte sind nur als Anhaltswerte zu verstehen.



2.1.4 Axiale Randbedingungen

In der CORA Anlage sind die Stäbe gemäß ihrer Aufgabe verschieden montiert, wie in Abbildung 2 zu erkennen ist. Die unbeheizten Stäbe und die Absorberstäbe sind nur am oberen Bündelflansch fixiert und werden durch drei Abstandshalter relativ zu den beheizten Stäben positioniert. Damit ist eine gute axiale Isolation gegeben, da der Pelletstapel nur bis knapp unter den oberen Bündelflansch reicht. Darüber erstreckt sich in den unbeheizten Stäben das "Spaltgas"-

Plenum. Oberhalb des Bündelflansches sind die Stabenden von Wasser umspült. Dieses Wasser wird durch Zwangsumlauf gekühlt und dient der Wärmeabfuhr. Temperaturmessungen während des Versuches ergaben einen Maximalwert von 353 K.

Die Heizstäbe dagegen sind an beiden Seiten befestigt. Am unteren Ende erlauben flexible elektrische Stromzuführungen den notwendigen Längenausgleich in axialer Richtung. Diese Fixierung ist unter der Oberfläche des Wassers im Quenchtank installiert und damit auf genau definierter Temperatur. Im Mittel werden hier ebenfalls 353 K als Wassertemperatur gemessen, jedoch kann dieser Wert kurzfristig lokal überschritten werden, wenn herabfallende Schmelzmassen zusätzlich Wärme zuführen. In Abbildung 4 ist ein Vergleich des Modells Simulator mit der CORA-Komponente, dem Heizstab dargestellt.

2.2 *Resumée*

Die oben genannten Fakten lassen sich zu einer Aussage zusammenfassen:

Die komplexe Struktur des CORA-Heizstabes, die spezifische Problematik der axialen Wärmefreisetzung und die Definition sinnvoller Randbedingungen weit außerhalb der beheizten, und damit analysierten Zone, machen eine spezielle Modellierung dieser CORA Komponente unumgänglich.

CORA Heizstab

SCDAP Modell

WOLFHE

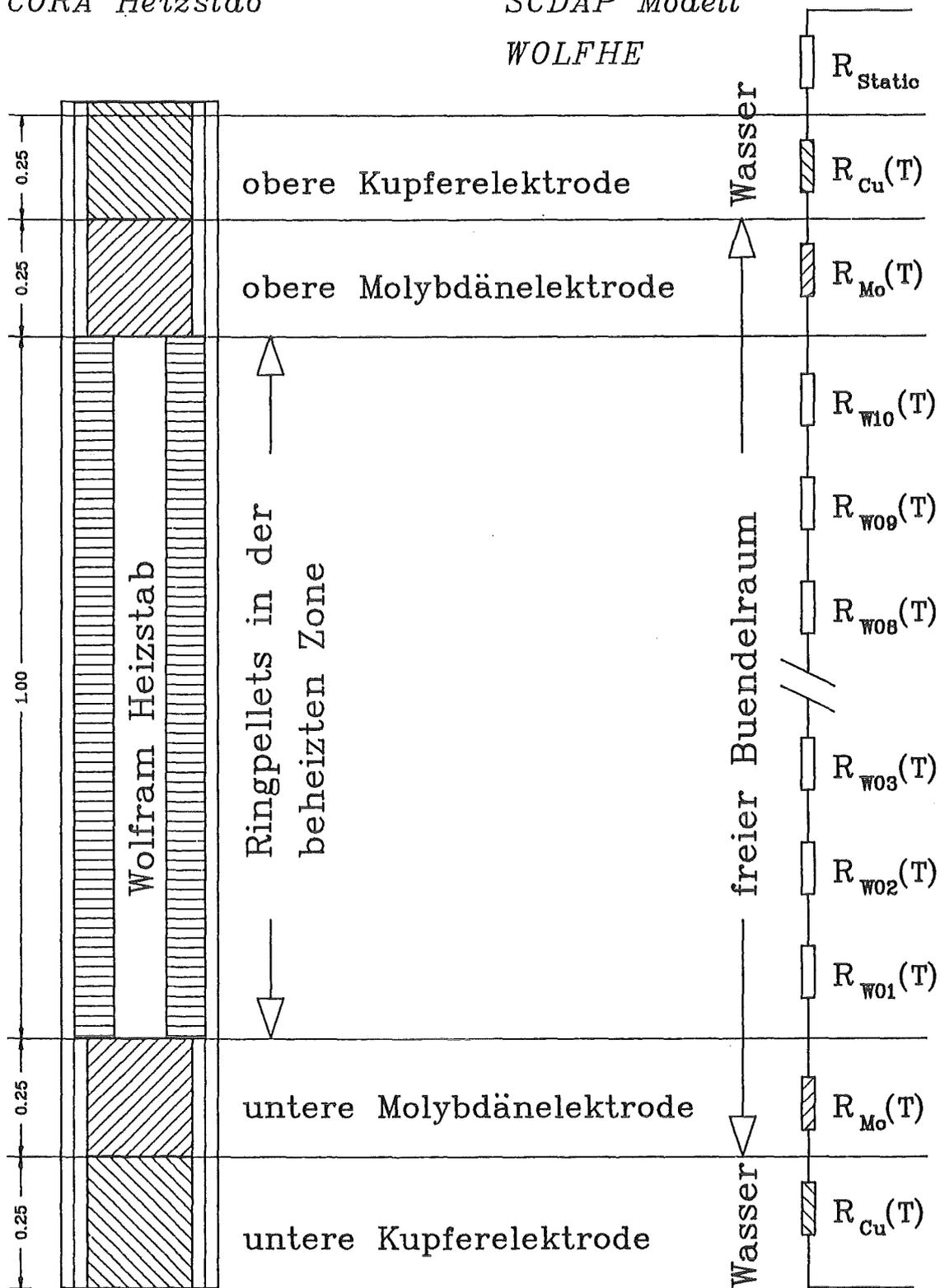
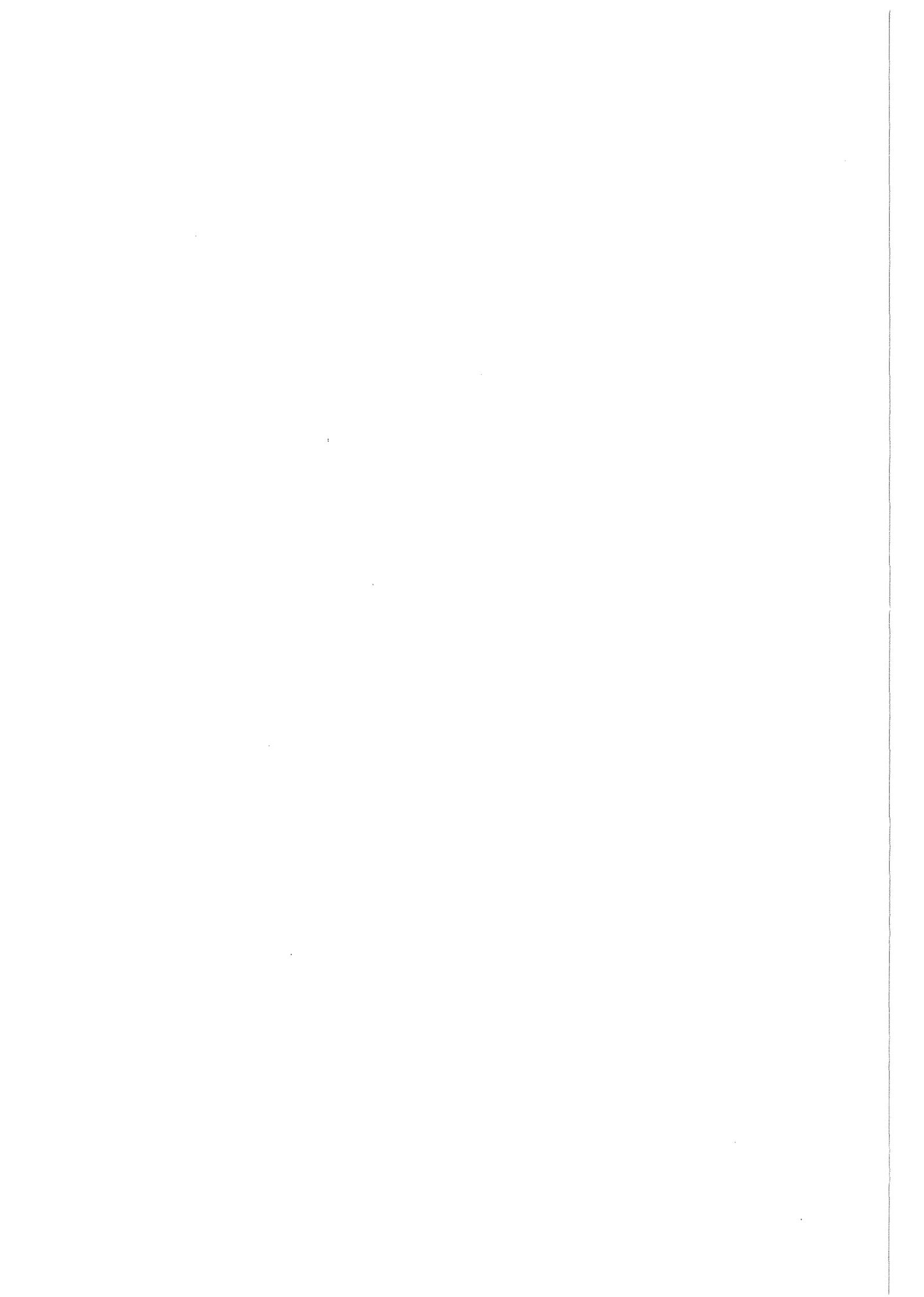


Abbildung 4. Vergleich Heizstab mit "Simulator": Gegenüberstellung des CORA-Heizstab und Diskretisierung im Rahmen des Simulator Modelles WOLFHE



3. Der SFD-Code SCDAP

3.1 *Modellumfang des erweiterten Codes*

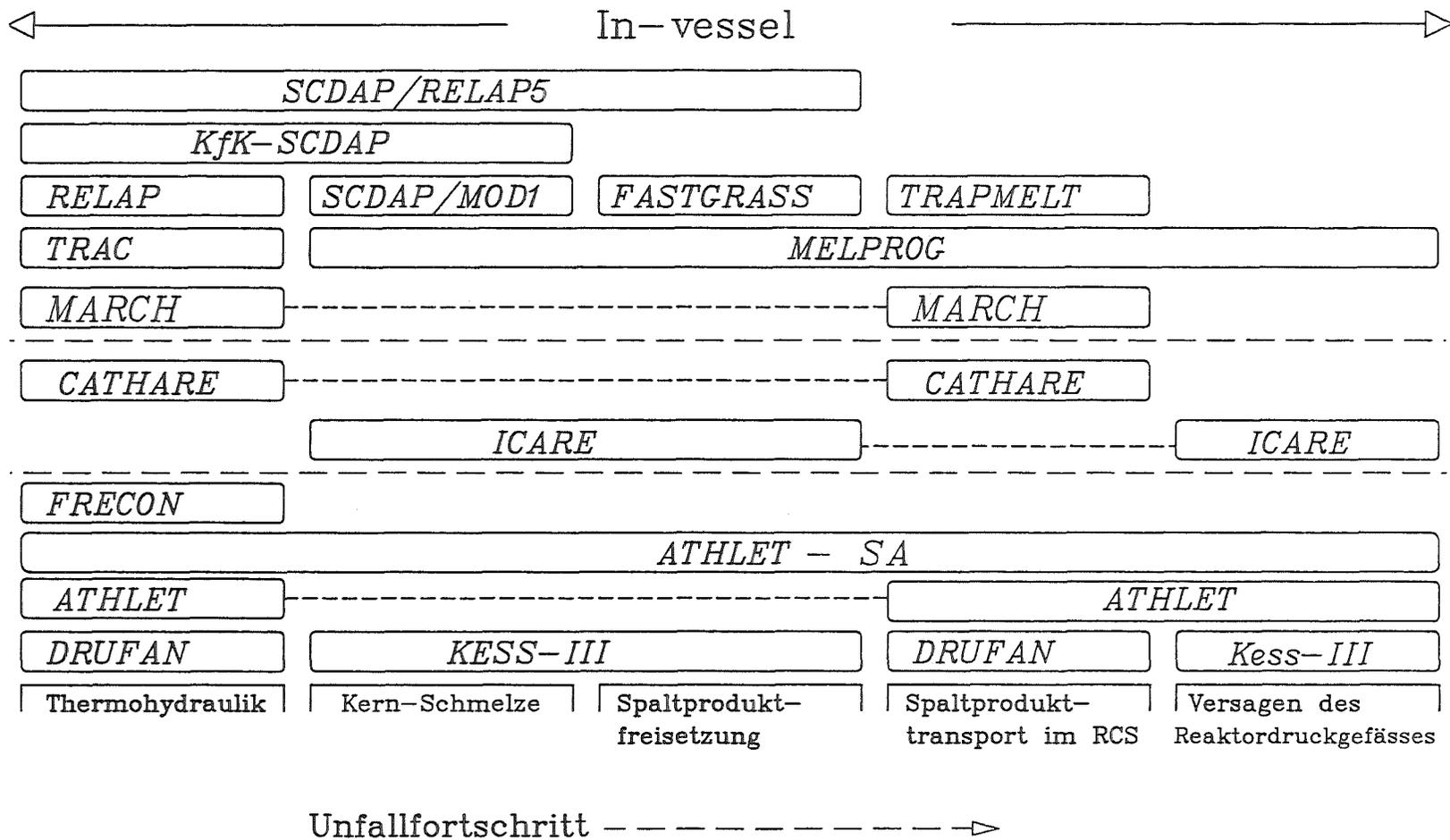
Im allgemeinen werden Programme zur Berechnung von schweren Kernschäden (SFD) unterteilt in "Intergrale Codes" wie den Source Term Code Package (STCP) oder MELCOR und in "Detaillierte Mechanistische Codes".

Die erste Gruppe enthält alle "Modelle" beginnend mit der Thermohydraulik und endet mit den Konsequenzen der Spaltproduktfreisetzung in der näheren Umgebung des Reaktors. Die Modellierungstiefe ist jedoch beschränkt, d.h. viele Phänomene sind nur oberflächlich beschrieben, manche fehlen ganz. Dieser Mangel wird dabei bewußt in Kauf genommen, obwohl damit Aussagen eines derartigen Codes nur bedingt verläßlich sind.

Die zweite Gruppe läßt sich weiter unterteilen in Codes die die Phänomene innerhalb der Reaktordruckbehälters (RDB) beschreiben sog. "in-vessel" und in solche die darüber hinaus noch das Containment berücksichtigen, sog. "ex-vessel". Da hier die Nachrechnungen von CORA-Versuchen mit SCDAP im Mittelpunkt stehen, soll hier nur auf die In-vessel-Codes näher eingegangen werden.

Einige der wichtigsten SFD In-vessel-Codes sind in Abbildung 5 aufgeführt. Die verwendete SCDAP-Version besitzt keine Kopplung zu dem Thermohydraulik-Programm RELAP5. Zur Nachbildung der Thermohydraulik wird ein spezielles schnellaufendes Kühlkanalmodell verwendet /10,12/. Die Liste in Abbildung 5 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Abbildung 5. Modellumfang aktueller SFD In-vessel-Codesysteme: In USA, Frankreich und Deutschland (von oben nach unten) wurden Codes entwickelt um das SFD Verhalten von LWR zu beschreiben



3.2 Programmablauf

Als Rahmen für die folgende Darstellung der neuen Programme wird in Abbildung 6 der Programmablauf der Out-of-pile-Version von SCDAP/MOD1 dargestellt. Die Modelle können anhand ihrer Funktion in drei Kategorien eingeteilt werden :

- **Kopplungsmodelle**

Dazu gehören das Thermohydraulikmodell, das Strahlungsmodell sowie das Modell zur Beschreibung eines einfachen Bündel-Plenums.

Der eigentliche Kühlkanal, d.h. die vom Shroud umschlossene Fläche, läßt sich recht gut mit einem eindimensionalen quasi-stationären Fluidmodell beschreiben, wobei sich das Fluid hier aus Wasserdampf, Wasserstoff und Argon zusammensetzen kann.

Das Strahlungsmodell ist quasi zweidimensional, d.h. die Strahlung wird in einer Ebene gemäß Einstrahlzahlen und Abstand auf die benachbarten Komponenten aufgeteilt.

- **Komponentenmodelle**

Die KfK-SCDAP-Version enthält davon vier Modelle:

1. Unbeheizter Stab, "Fuel rod"
2. Beheizter Stab, "Simulator"
3. Absorberstab, "Control rod"
4. Dampfführungsrohr, "Shroud"

- **Physikalische und chemische Modelle**

Diese dienen der Beschreibung wesentlicher Phänomene wie Oxidation, Brennstoffverflüssigung, Hüllrohr-Deformation, Wärmequellen, 2-dimensionale Wärmeleitung, Brennstoff-Fragmentierung und -Verlagerung /13/. Die bisherigen Wärmequellen, Oxidations- und Nachzerfallswärme, wurden um Simulation der elektrischen Heizung ergänzt. Mit Ausnahme der 2-dimensio-

nen Wärmeleitung blieben diese Modelle weitgehend unverändert, lediglich einige Verbesserungen waren zur Anpassung an CORA nötig /11,12/.

Einige Einschränkungen hinsichtlich der Nodalisierung mußten bei der verwendeten SCDAP-Version aufgrund der Programmtechnik hingenommen werden:

- Eine detaillierte radiale Auflösung mit nur 5 individuellen Komponenten zu verwirklichen ist bei einem Bedarf von 4 Komponenten zur Nachbildung von Simulator, Brennstab, Absorberstab und Shroud unmöglich.
- Zur Nachrechnung des sehr gut instrumentierten CORA Versuches, sollte die maximale Knotenhöhe von 10 cm nicht überschritten werden, da sonst keine zufriedenstellende axiale Diskretisierung erreicht wird. Vorteilhafter wäre jedoch eine variable Nodalisierung mit ca. 24 Knoten verteilt über die gesamte Bündellänge, wobei eine dann maximale Knotenhöhe von 5 cm im Zentralbereich nicht überschritten werden sollte.
Dies scheitert jedoch an der starr definierten oberen Grenze von 10 axialen Knoten.
- Ein Variation der Materialsequenz in axialer Richtung ist nicht möglich, d.h. die Modellierung von Elektrodenzonen ist in der originalen SCDAP-Version unmöglich. Eine derartige Erweiterung ist erst im Rahmen der nächsten Codeüberarbeitung vorgesehen /17/.

Die hier vorgestellte Erweiterung stellt neben der neuen Komponente, dem Simulator, auch noch die Umgebungsbedingungen für den originalen SCDAP-Code bereit, der in unveränderter Weise den Kern des Codes darstellt /18/.

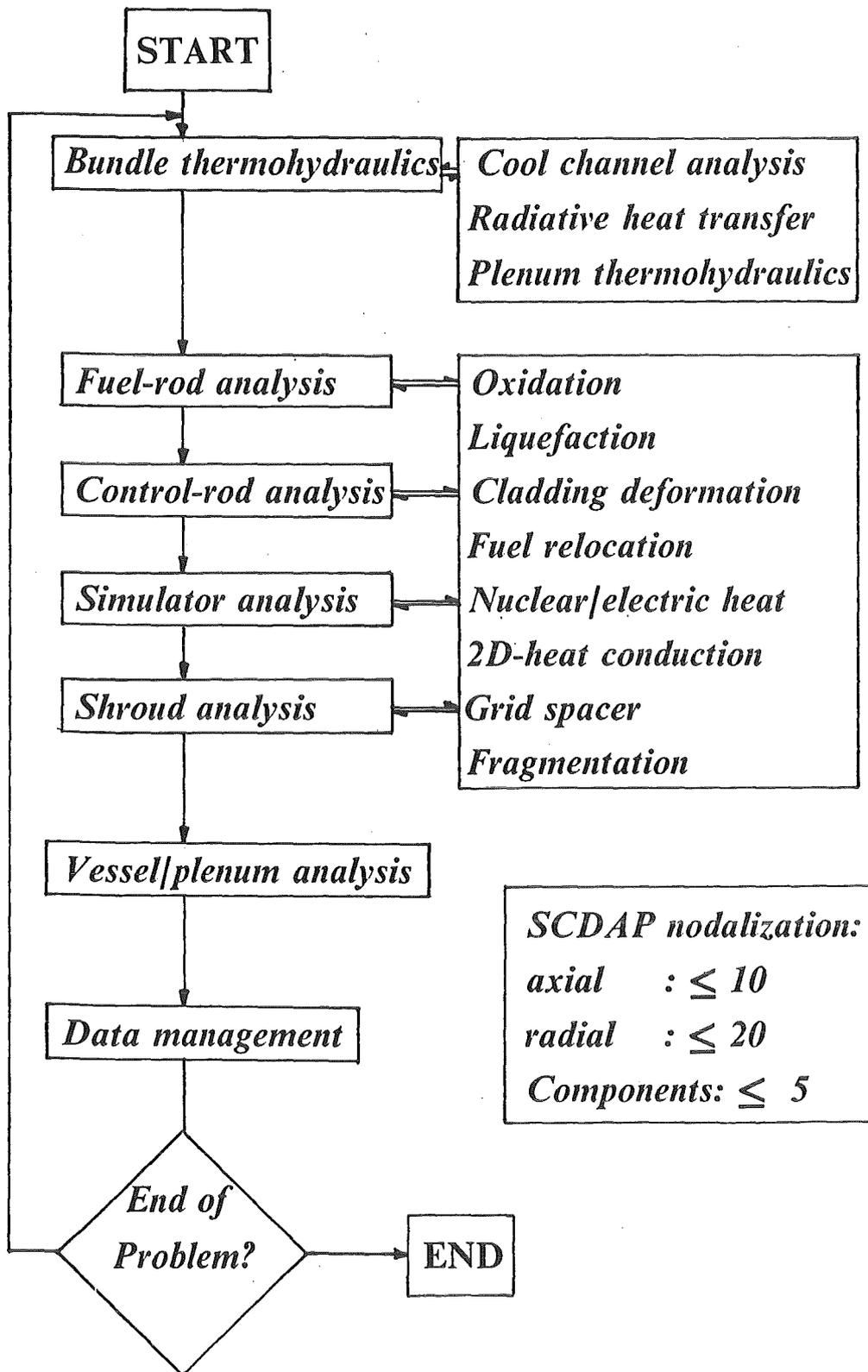
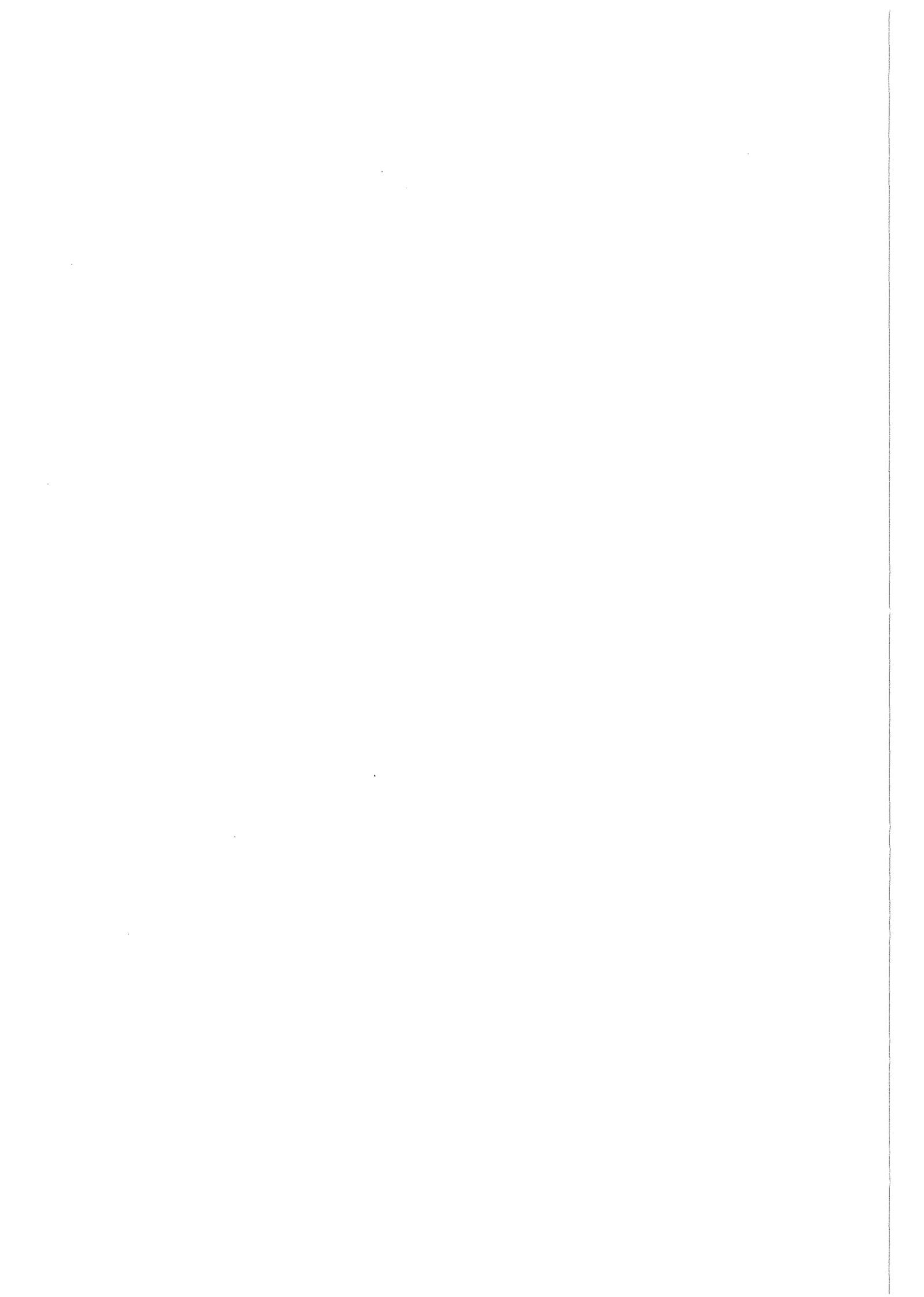


Abbildung 6. Programmablauf der Out-of-pile-Version von SCDAP: In der linken Spalte ist die Modellsequenz dargestellt, daneben die aufgerufenen physikalischen Modelle. Die Werte zur Nodalisierung sind vorgegebene Maximalwerte der Grundversion.



4. Modellierung

4.1 Umfang des Simulator-Moduls

Der Umfang des Simulator-Modules ergibt sich aus der Analyse des CORA Heizstabes und seiner Umgebung. Im folgenden wird nun auf die Erweiterungen des SCDAP-Codes zur Integration des neuen Modules detailliert eingegangen.

Die Erweiterungen können grob in Einbindungsänderungen und in Erweiterungen bestehender Modelle zur Berücksichtigung spezieller Simulator-typischer Eigenschaften unterteilt werden. Daneben sind völlig neue Modelle nötig, um die Out-of-pile-Eigenschaften beschreiben zu können.

4.2 Erweiterung bestehender Modelle

Zuerst muß die Einbindung des neuen Moduls in die bestehende SCDAP-Struktur gewährleistet sein. Dazu wird der Inputtreiber CARDIN um den Aufruf des neuen Unterprogrammes SIMINP erweitert. Hier wird das neue Modul initialisiert. Die neue Komponente erhält im Unterprogramm BUNINP eine eigene Identifikationsnummer (Simulator ID=3), die es dem Code erlaubt, gezielt spezielle Modelle für die Komponente zu aktivieren. Das gleiche gilt für den Bündeltreiber DBNTAC. Dieser bestimmt den sequentiellen Aufruf der Komponentenmodelle, gemäß Abbildung 6. Die erweiterte Version ruft jetzt den neuen Komponententreiber SIMUAN auf.

Angepaßte Programme	Zweck	Veränderung
CARDIN	Steuerung des Einlesens der Inputdaten und Initialisierung aller SCDAP-Module	Entsprechend DBNTAC: Erweiterung um den Aufruf von SIMINP
BUNINP	Einlesen und Initialisieren der Bündelkonfiguration	Berücksichtigung der neuen Komponente
DBNTAC	Steuerungsprogramm für den sequentiellen Aufruf der Komponentenmodelle	Erweiterung um die neue Out-of-pile-Komponente, dem "Simulator"

Tabelle 2. Geänderte SCDAP-Unterprogramme: Zur Einbindung des neuen Simulator-Moduls mußten Erweiterungen in die bestehenden Unterprogramme eingebaut werden.

Erweiterte Programme	Zweck	Erweiterung
NHEAT	Bereitstellung der Wärmequellen: nukleare Nachzerfallsleistung oder elektrische Heizleistung	Aufruf des WOLFHE Unterprogrammes für elektrische Wärmequellen
FSTATE	Statusermittlung des Heizstabmodells, Schadenserfassung, Materialbilanz und Steuerung der Modellaktivierungen	Erweiterung der radialen Materialsequenz, um die Wolframseele des Heizstabes berücksichtigen zu können

Tabelle 3. Erweiterte SCDAP-Unterprogramme: Notwendige Erweiterungen zur Beschreibung der spezifischen Eigenschaften eines elektrisch beheizten Stabes repräsentiert durch den neuen Simulator-Modul.

Ferner mußten bestehende Unterprogramme so verändert werden, daß sie der neuen Komponentenstruktur des Simulators gerecht werden. Die Einbindung der

elektrischen Wärmequelle wird parallel zur bestehenden nuklearen Wärmequelle im NHEAT ('Nuclear HEAT') durch Aufruf des neuen Modells WOLFHE erreicht. Dadurch kann das Programm weiterhin In-pile-Konfigurationen nachrechnen. Im FSTATE ('Fuel STATE') Unterprogramm mußte die geänderte radiale Materialsequenz entsprechend der Wolframseele berücksichtigt werden. Dieses Volumen ist damit von allen Materialwechselwirkungen ausgeschlossen. Dies ist gerechtfertigt, da der Schmelzpunkt des Wolframs mit ca. 3680 K weit über den erreichbaren Temperaturen liegt. Weitere Bestätigung dieses Sachverhaltes lieferten die Nachuntersuchungen von CORA Experimenten, bei denen bisher keinerlei Wechselwirkung zwischen Wolfram und UO_2 zu erkennen war.

4.3 Neue Modelle

Als neue Modelle werden solche Entwicklungen bezeichnet, deren Funktion nicht durch Modifikation bisher bestehender Modelle abgedeckt werden kann.

Die Initialisierung wird durch die neue Inputroutine SIMINP durchgeführt. Neben den üblichen Daten für einen unbeheizten Stab werden die Daten für die radiale Materialabfolge in der beheizten Zone und in den Elektrodenabschnitten initialisiert. Ferner werden die notwendigen Daten für das Leistungsbilanzmodell WOLFHE und das Wärmeleitprogramm HEAR16 definiert.

Die Analyse des Simulators wird mit dem Unterprogramm SIMUAN realisiert. Dieses Programm steuert den Ablauf der Komponentenanalyse (siehe Kap. 3.2).

Auf die Modelle WOLFHE, HEAR16 und RATEFU wird im folgenden genauer eingegangen.

Neue Programme	Zweck	Aufbau/Ablauf
SIMINP	Einlesen von Inputdaten und Initialisierung	Einmaliger Aufruf beim Starten des Codes
SIMUAN	Komponentenprogramm zur Steuerung des Simulator-Moduls, vergleichbar dem original SCDAP Programm FUELAN	Wird pro Zeitschritt einmal aufgerufen
HEARAX	Verbesserung der axialen thermischen Kopplung für den unbeheizten Brennstab, Absorberstab und Shroud	Wärmeleitung in axialer Richtung mit der Finite-Differenzen-Methode berechnet
HEAR16	Genauere Berechnung der Heizstabwärmeleitung einschl. der Elektroden für den Simulator	Wärmeleitung in z-Richtung: Finite-Differenzen-Methode
WOLFHE	Simulation der elektrischen Heizung und Bilanzierung der Leistung	Temperaturabhängige Wärmeleitung für Wolfram, Molybdän und Kupfer
RATEFU	Bereitstellung der Randtemperaturen für alle Komponenten	Interpoliert linear zweidimensional zwischen Stützstellen; zeitlich und in radialer Richtung

Tabelle 4. Neue SCDAP-Unterprogramme: zur Simulation des Heizstabes im Out-of-pile-Experiment CORA

4.3.1 Leistungsbilanzierung

Vor dem Beginn der Modellierung der elektrischen Heizung wurde eine Parameterstudie zur Untersuchung der Auswirkung des Detaillierungsgrades auf die Leistungsfreisetzung durchgeführt.

Dabei wurde der Einfluss der Widerstände in den Kupfer- und Molybdän-Elektroden variiert. In Abbildung 7 sind diese Ergebnisse als Funktion der Temperatur am Ende der beheizten Zone dargestellt. Die im Bündel freigesetzte Heizleistung ist hier auf die elektrische Ausgangsleistung der Stromversorgung normiert. Als erster Ansatz wurde nur ein temperaturunabhängiger Widerstand R_s simuliert. Damit erreicht man ein Leistungsverhältnis von 0.9 für Temperaturen über 1400 K. Das bedeutet, daß nur ca. 10% der Leistung in den beiden Elektroden und der Zuleitung freigesetzt wird. 90% können zur Heizung des Bündels verwendet werden.

Damit ergibt sich eine Heizleistung P_{Wi} im Knoten i zu :

$$P_{Wi}(T) = P_{el} \cdot \frac{R_{Wi}(T)}{R_s + R_W(T)}$$

mit:

$$R_W(T) = \sum_{i=1}^{NAZ} \frac{\rho_W(T) \cdot l_i}{F_i}$$

mit P_{el} als Ausgangsleistung der Stromversorgung. Das Leistungsverhältnis der Modellierung des einfachen Vorwiderstandes ist in Abbildung 7 als Kurve R_V wiedergegeben.

Wie jedoch Vergleiche mit der Aufheizrate in den CORA-Versuchen zeigten, liegt bei diesem Modell die Leistungsfreisetzung zu hoch. Deshalb wurden als nächstes die beiden Elektrodenwiderstände als Funktion der Temperatur berechnet. Bei niedrigen Temperaturen liegen beide im gleichen Bereich, erst oberhalb von 600 K bewirkt die Temperaturerhöhung eine deutliche Reduktion der freigesetzten Heizleistung. Diese Berücksichtigung führte zu untenstehender Formulierung. Das entsprechende Leistungsverhältnis ist als Kurve R_{V2} in Abbildung 7 dargestellt.

$$P_{Wi}(T) = P_{el} \cdot \frac{R_{Wi}(T)}{R_{Cu}(T) + R_{Mo}(T) + R_W(T)}$$

Temperaturabhängige Widerstände:

R_{Cu} = Kupfer-Elektrode [Ω]

R_{Mo} = Molybdän-Elektrode [Ω]

R_W = Wolfram-Heizstab [Ω]

Die Temperaturabhängigkeiten der spezifischen Widerstände findet man gemäß /22/:

$$\rho_W = -1.99 \cdot 10^{-2} + 2.47 \cdot 10^{-4} \cdot T_W + 2.24 \cdot 10^{-8} \cdot T_W^2$$

$$\rho_{Mo} = 2.249 \cdot 10^{-2} + 5.36 \cdot 10^{-5} \cdot T_{Mo} + 1.38 \cdot 10^{-7} \cdot T_{Mo}^2 - 2.22 \cdot 10^{-11} \cdot T_{Mo}^3$$

$$\rho_{Cu} = -7.89 \cdot 10^{-3} + 9.90 \cdot 10^{-5} \cdot T_{Cu} - 5.49 \cdot 10^{-8} \cdot T_{Cu}^2 + 3.16 \cdot 10^{-11} \cdot T_{Cu}^3$$

Wie allen drei Gleichungen zu entnehmen ist, besitzen die spezifischen Widerstände einen positiven Temperaturkoeffizienten.

Wird nun durch lokale Freisetzung exothermer Leistung (Oxidation des Zirkalloys-Hüllrohres) eine Temperaturerhöhung erzeugt, so erhöht sich aufgrund des positiven Temperaturkoeffizienten auch die freigesetzte Heizleistung. Die Oxidation verstärkt den Temperaturanstieg weiter, da die Oxidationskinetik des Zirkons ebenfalls einen positiven Temperaturkoeffizienten besitzt. Ein derartiges Verhalten wird als positive Rückkopplung oder auch als "autokatalytische Reaktion" bezeichnet.

Die dritte Kurve, in Abbildung 7 als R_{V3} dargestellt, zeigt das Leistungsverhältnis unter zusätzlicher Berücksichtigung der Widerstände in den flexiblen Kupferleitungen. Diese werden durch einen statischen, d.h. temperaturunabhängigen Widerstand R_s repräsentiert. Somit erhält man für die Heizleistung pro Knoten :

$$P_{Wi}(T) = P_{el} \cdot \frac{R_{Wi}(T)}{R_s + R_{Cu}(T) + R_{Mo}(T) + R_W(T)}$$

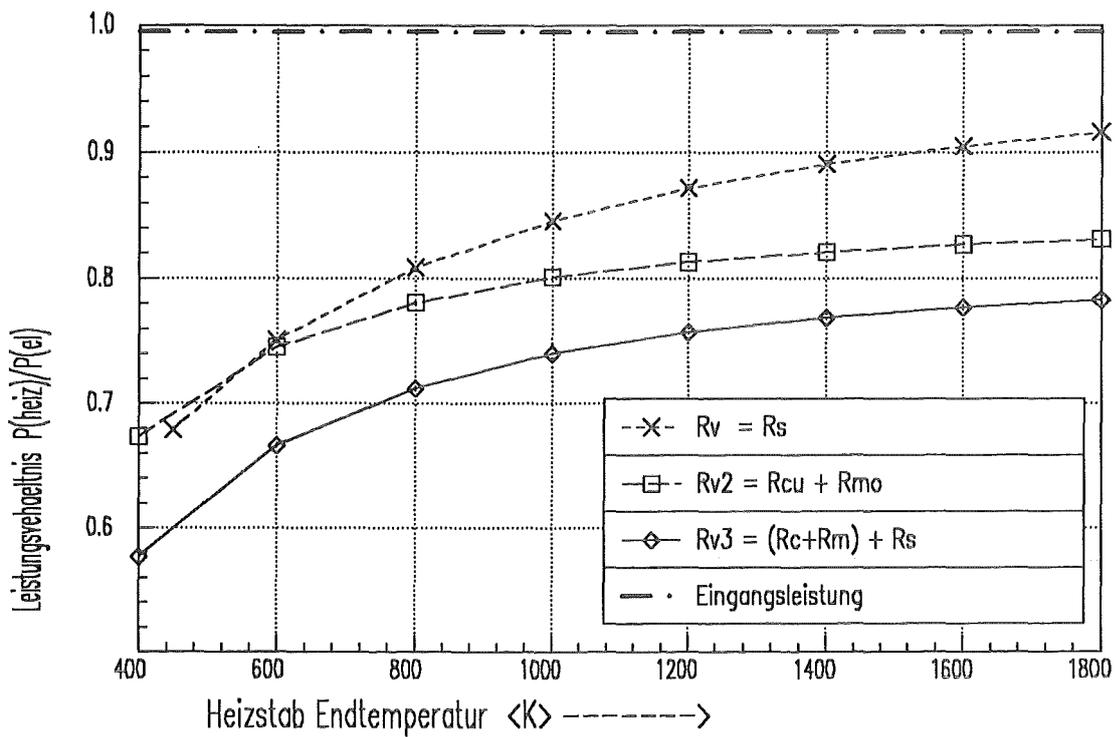
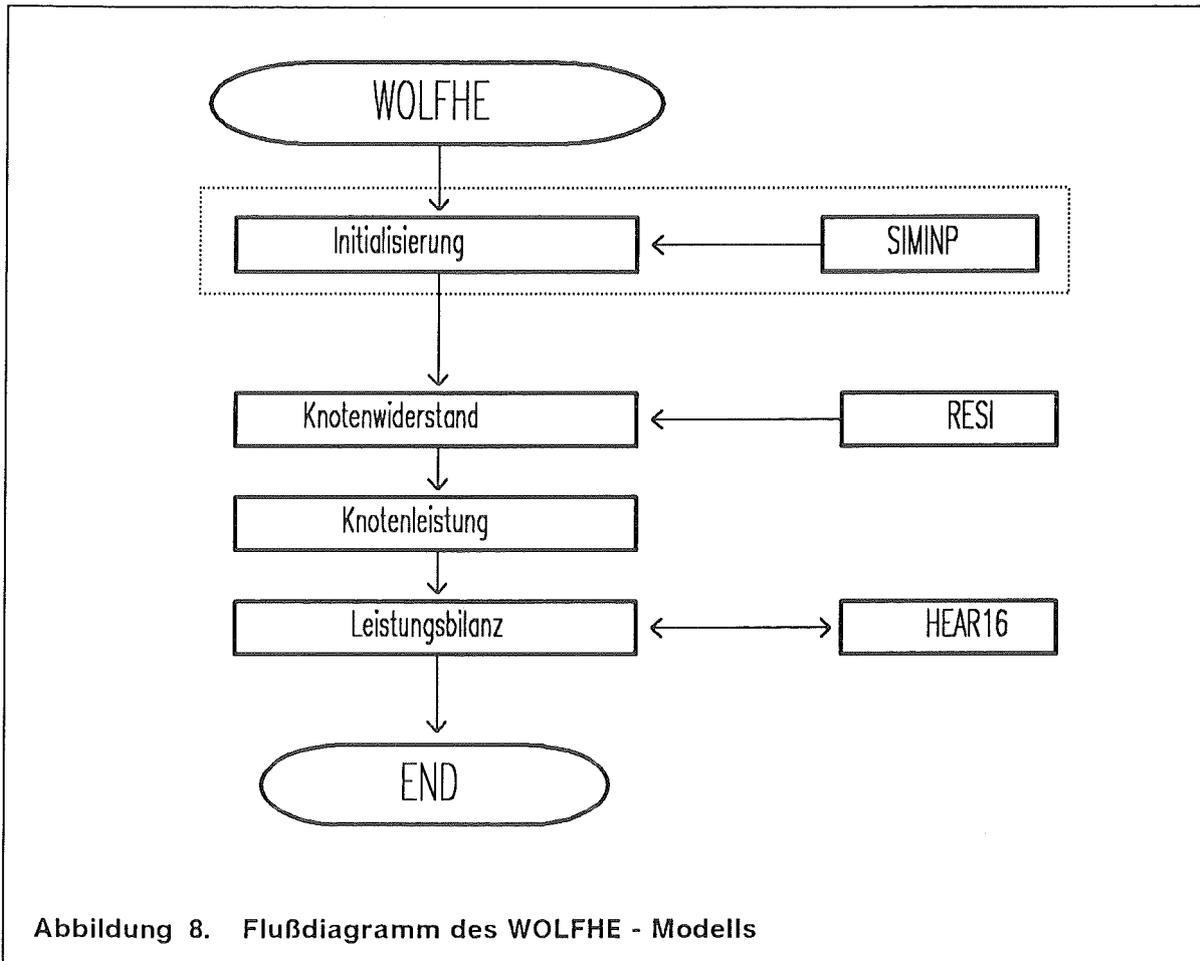


Abbildung 7. Ergebnis der Parameterstudie: Einfluss der Elektrodenwiderstände als Funktion der Stab-Endtemperatur für verschiedene Modellierungen.

Durch eine Querverbindung vom Modell der erweiterten axialen Wärmeleitung (HEAR16) werden die Temperaturen für die Molybdän- und Kupferelektroden bereitgestellt. Im Gegenzug erhält das Wärmeleitungsmodell die Verlustleistungen in den Molybdän - Elektroden P_{Mo} . Die ohmschen Verluste in den Kupferelektroden und Kupferzuleitungen sind demgegenüber vernachlässigbar klein.

Dies ergibt eine zusätzliche Wärmequelle an den Bündelenden :

$$P_{Mo}(T) = P_{el} \cdot \frac{R_{Mo}(T)}{R_s + R_{Cu}(T) + R_{Mo}(T) + R_W(T)}$$



Die Ergebnisse dieser Studie führten zu dem detaillierten WOLFHE (WOLFRam-HEizer) Modell, dessen Struktur in Abbildung 8 wiedergegeben ist. In der Initialisierungsphase werden die Geometrie- und Nodalisierungsdaten vom Unterprogramm SIMINP übernommen. Die spezifischen Widerstände werden von der Materialdatenbank RESI geliefert. Die Temperaturen des Wolframstabes werden durch Kopplung an HEAR16 bereitgestellt. Es zeigt sich deutlich, daß der Detaillierungsgrad des Modells ausschlaggebend ist für die Modellierung der Leistungsfreisetzung.

4.3.2 Axiale Wärmeleitung

Im Original-SCDAP wird nur eindimensionale Wärmeleitung berechnet und zwar in radialer Richtung für alle Komponenten, wobei das Dampfführungsrohr als fla-

che Struktur angesehen wird. Die Kopplung zwischen zwei benachbarten Zonen in axialer Richtung wird über das Kühlkanalmodell (hier COOLQ3) erreicht.

Für eine erfolgreiche Nachbildung des Heizstabes ist darüber hinaus auch die Berechnung der axialen Wärmeleitfähigkeit notwendig. Zum einen ist die Wärmeleitfähigkeit des Wolframs ca. 130 mal größer als die des UO_2 , zum anderen ist der Stab an beiden Enden zur Abfuhr der Verlustwärme wassergekühlt. Deshalb wird in der erweiterten SCDAP-Version die Wärmeleitung in der beheizten Zone zweidimensional in R-Z-Geometrie gerechnet.

Die Berechnung der Wärmeleitung in radialer Richtung wird nach wie vor im Unterprogramm HEATCN transient nach dem Prinzip der "gewichteten Residuen" durchgeführt /13/, während in axialer Richtung die Wärmeleitung nach dem Prinzip der finiten Differenzen implizit erfolgt. Dazu wird der Gleichungslöser LEQT2B für das tridiagonale lineare Gleichungssystem aus dem IMSL Package verwendet.

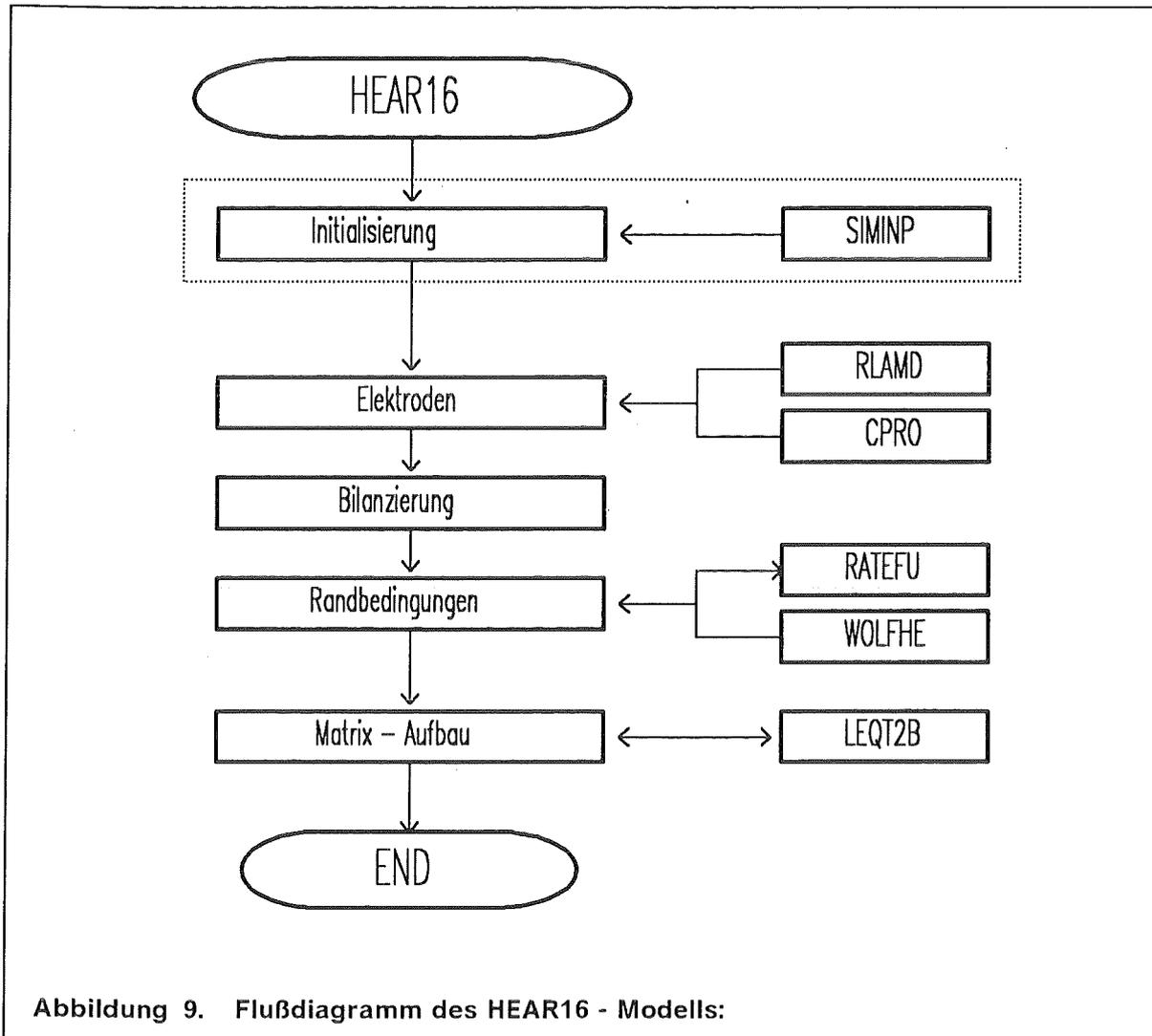
Da die Nodalisierung in der beheizten Zone unverändert beibehalten werden soll, wurde eine spezielle erweiterte Wärmeleitungsroutine entwickelt. Die zentrale Zone wird dabei um jeweils drei axiale Zonen nach oben und unten erweitert.

Analysen mit einem expliziten zweidimensionalen Wärmeleitprogramm zeigten, daß die Wärmeleitung bevorzugt in axialer Richtung erfolgt. Dies wird offensichtlich, wenn man die Temperaturen des Kühlfluids mit denen des Heizstabes im Bereich der Elektroden vergleicht. Die erforderlichen Materialdaten für die Elektrodenmaterialien Molybdän und Kupfer werden einer erweiterten Materialdatenbank (RLAMD, CPRO) entnommen. Diese stellt auch die spezifischen Widerstände (RESI) bereit, wie aus dem Programmablaufplan in Abbildung 9 entnommen werden kann.

Diese Vereinfachung erleichtert auch die Ankopplung des Stabes an die radialen Randbedingungen. Als axiale Randbedingungen werden die Temperaturen der Wasservorlagen im Quenchtank und im Bündelkopf verwendet.

4.3.3 Axiale Randbedingungen

Wie schon in Kap. 2 dargelegt, sind die Komponenten eines CORA-Bündels unterschiedlich montiert. Die radiale Positionierung innerhalb des Bündels wird



durch die Bündelkopfplatte am oberen Ende und durch verschiedene Abstandshalter innerhalb der Teststrecke erreicht. Die axiale Befestigung der einzelnen Komponenten unterscheidet sich jedoch. Aufgrund der axialen Materialsequenz der Elektroden müssen die Heizstäbe an den Enden gekühlt werden. Durch die Wasserkühlung an den Enden ergeben sich speziell für den Simulator extreme axiale Temperaturgradienten, wie sie auch der Abbildung 13 zu entnehmen sind.

Dieser Aspekt wird durch das HEAR16 Programm modelliert, das an beiden axialen Stabenden durch die dem Programm RATEFU (RAnd TEMperatur FUNKtion) entnommenen Randtemperaturfelder begrenzt wird. Diese Randtemperaturen sind an den axialen Enden, im wassergekühlten Endbereich des Heizstabes, jeweils 0.5 m von der beheizten Zone definiert. Für die anderen Bündelkomponenten wie unbeheizter Stab, Absorber-Stab und Shroud liegen diese Temperaturfelder am Ende der beheizten Zone.

Das Programm RATEFU stellt für alle Komponenten und für jeden Zeitschritt ein radial interpoliertes Temperaturfeld zur Verfügung. Damit sind für die axialen Wärmeleitprogramme HEARAX und HEAR16 genau definierte Randwerte gegeben. Als Daten für das Temperaturfeld des Heizstabes können direkt die Meßwerte des Experimentes verwendet werden. Bei den anderen Komponenten ist die Anordnung der Thermoelemente zu berücksichtigen.

4.4 Verifizierung des Modules

Um das Modul zu verifizieren, ist eine vergleichende Analyse mit den Ergebnissen des Experimentes durchzuführen. Als Referenzdaten liegen jedoch pro Versuch nur die elektrische Inputleistung, die Oberflächentemperaturen und die axialen Randbedingungen vor. Eine gute Verifizierung ist demnach nur durch die Ausnutzung mehrerer Experimente erreichbar. Am Beispiel des "relativ" einfachen Experimentes CORA-5 soll die Verifizierung dargestellt werden.

DAS EXPERIMENT KANN IN VIER PHASEN UNTERTEILT WERDEN:

1. 0-3000 s, Gasvorheizphase,
keine elektrische Heizung,
Kühlfluid: reines Argon.
2. 3000-3500 s, Transferphase,
Start der elektrische Heizung,
Kühlfluid: Argon, mit zunehmendem
Wasserdampfgehalt
3. 3500-4800 s, transiente Phase,
Oxidation setzt zusätzliche Leistung frei,
Kühlfluid: Argon, Wasserdampf und Wasserstoff.
4. 4800-9000 s, Abkühlphase, Heizung abgeschaltet,
Kühlfluid: reines Argon.

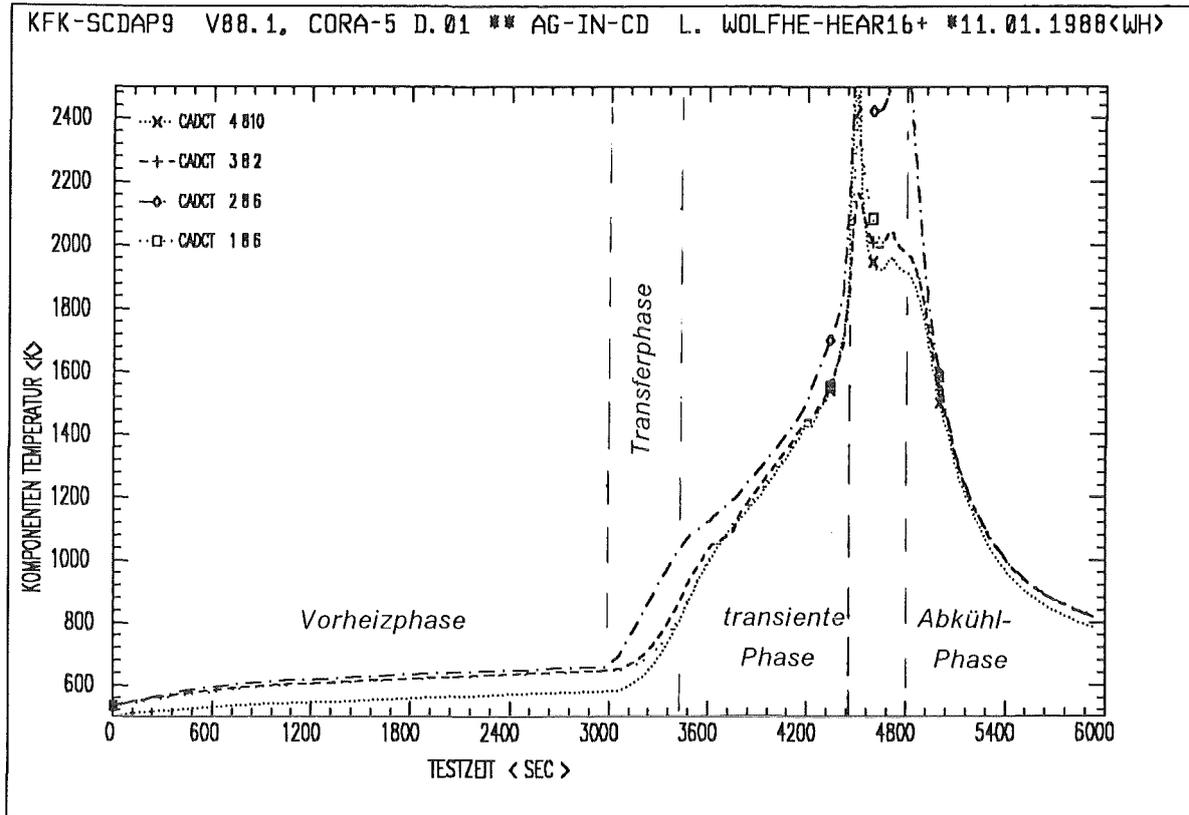


Abbildung 10. Phasen eines CORA-Versuches: Berechnete Oberflächentemperaturen von Simulator (Strichpunkt), Brennstab (gestrichelt), Absorberstab (Doppelpunkt) sowie Shroud (gepunktet) als Funktion der Zeit

Diese Phasen und die dazugehörigen Temperaturverläufe können der Abbildung 10 entnommen werden. Wie Abbildung 10 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Temperaturen von Brennstab, Absorberstab und Shroud in der transienten Phase nur unwesentlich. Deshalb wird für die nachfolgenden Abbildungen nur noch die Simulatoroberflächentemperatur als obere und die Shroudtemperatur als untere Grenze der Temperaturen im Bündel dargestellt.

In der Abbildung 11 ist für CORA-5 ein Vergleich der Staboberflächentemperaturen dargestellt. Die vier Teilbilder geben den Temperaturverlauf in 150 mm, 350 mm, 550 und 750 mm von der SCDAP-Rechnung (durchgezogen) und vom CORA Experiment (gestrichelt) wieder. Dabei entsprechen die oberen Linien den Oberflächentemperaturen der Simulatoren, die darunterliegenden denen der unbeheizten Stäbe bzw. der Temperatur des Shrouds.

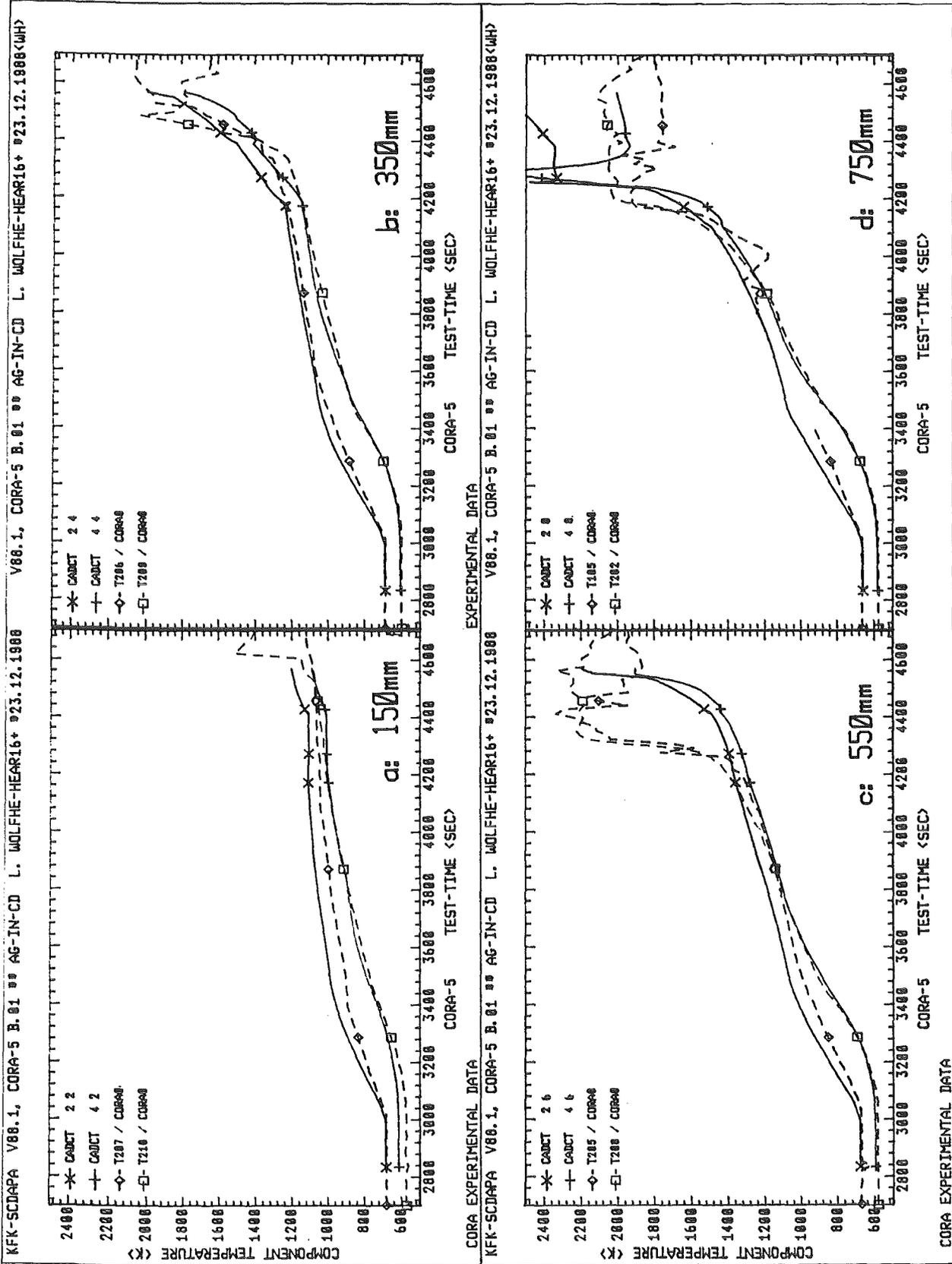


Abbildung 11. Oberflächentemperaturen des Experiments CORA-5: Vergleich der Thermoelementmeßwerte (gestrichelt) mit den Ergebnissen des erweiterten SCDAP-Codes (durchgezogen).

Die betrachteten axialen Höhen werden durch die Anordnung der Thermoelemente in CORA Bündel definiert, d.h. Vergleiche an anderen axialen Höhen sind nicht vollständig möglich.

Der Vergleich zeigt aber, daß sich die berechneten Temperaturen innerhalb der Fehlergrenzen des Meßsystemes bewegen. Lediglich bei 150 mm sieht man die Auswirkungen des waagrecht bei 0.0 mm einströmenden Kühlfluids. Dies ist jedoch Gegenstand einer weitergehenden Analyse und soll hier nicht diskutiert werden.

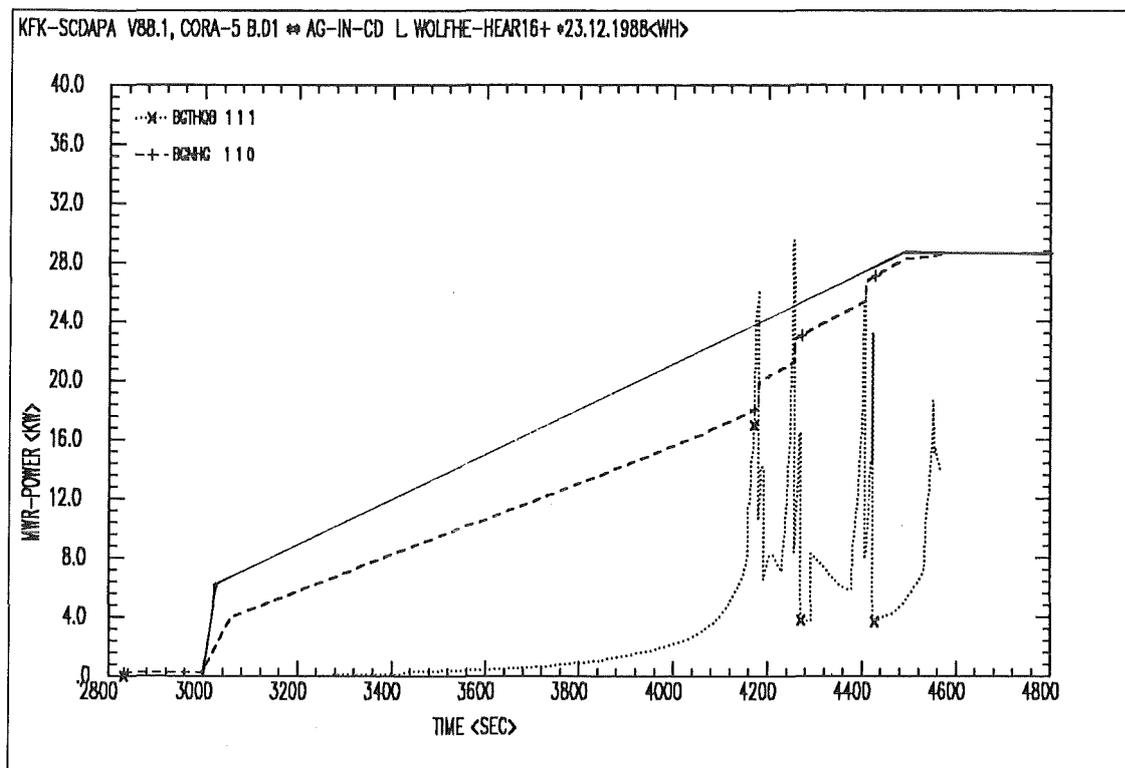


Abbildung 12. Leistungsbilanz der Simulation des CORA-5 Experiments: Umsetzung der eingespeisten Leistung (ausgezogene Linie) in freigesetzte Heizleistung innerhalb der Teststrecke und Vergleich mit der exothermen Leistung der Zry-Oxidation

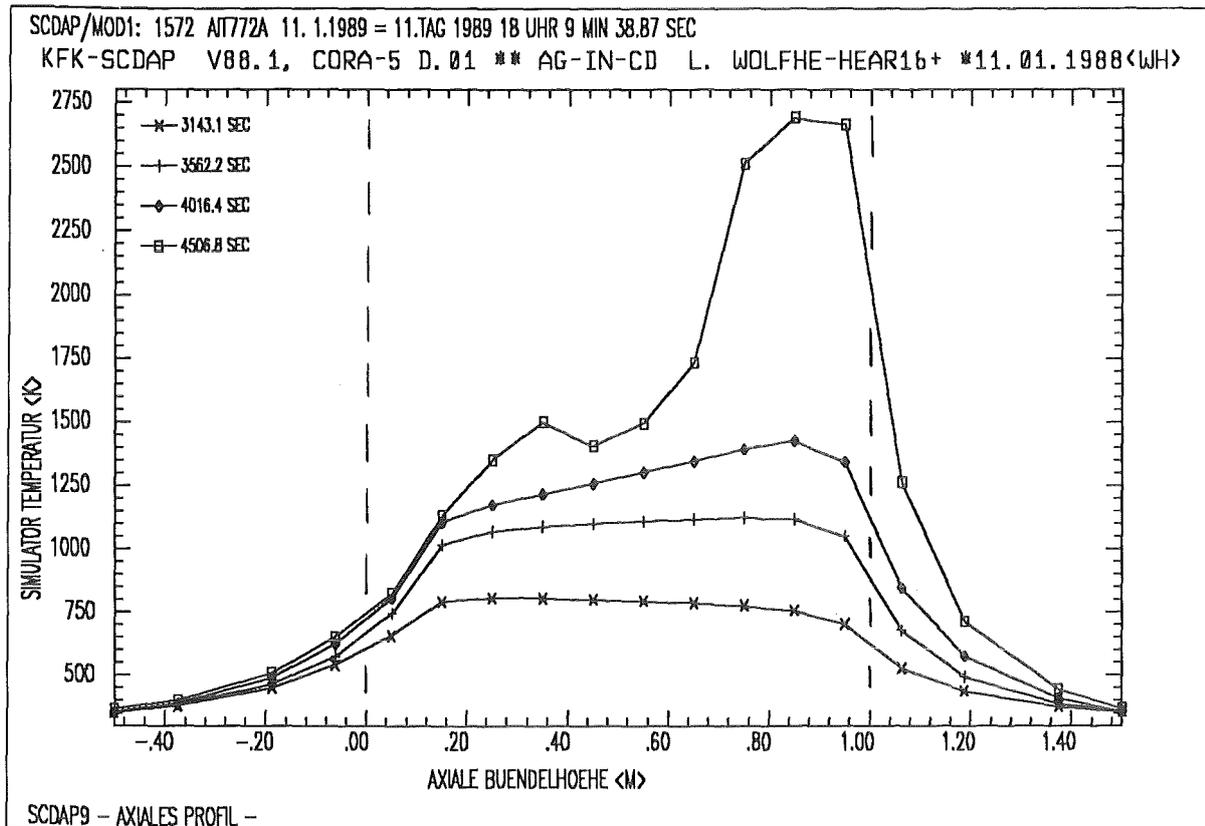


Abbildung 13. Axiales Temperaturprofil eines Simulators: Berechnete Oberflächentemperaturen innerhalb der axialen Stabbefestigungen

Ein weiteres Kriterium für die Verifizierung ist die Verteilung der eingespeisten elektrischen Leistung auf die axialen Länge des Simulators anzusehen. Ausgehend von der vorgegebenen elektrischen Leistung kann man der Abbildung 12 das Verhältnis von eingespeister Leistung (durchgezogen) zu Heizleistung (gestrichelt) entnehmen. Bedingt durch die hohen Vorwiderstände wird erst bei höheren Temperaturen annähernd die Eingabeleistung erreicht. Zum Vergleich ist in der Abbildung 12 zusätzlich die freigesetzte exotherme Leistung der Zirkon-Wasserdampfreaktion (gepunktet) eingetragen, so wie sie in SCDAP/MOD1 berechnet wird.

Die Heizleistung wird nun in der beheizten Zone entsprechend dem axialen Temperaturprofil auf die einzelnen Knoten verteilt. Dazu ist in Abbildung 13 die Entwicklung eines axialen Temperaturprofils als Funktion der Zeit dargestellt. Aus

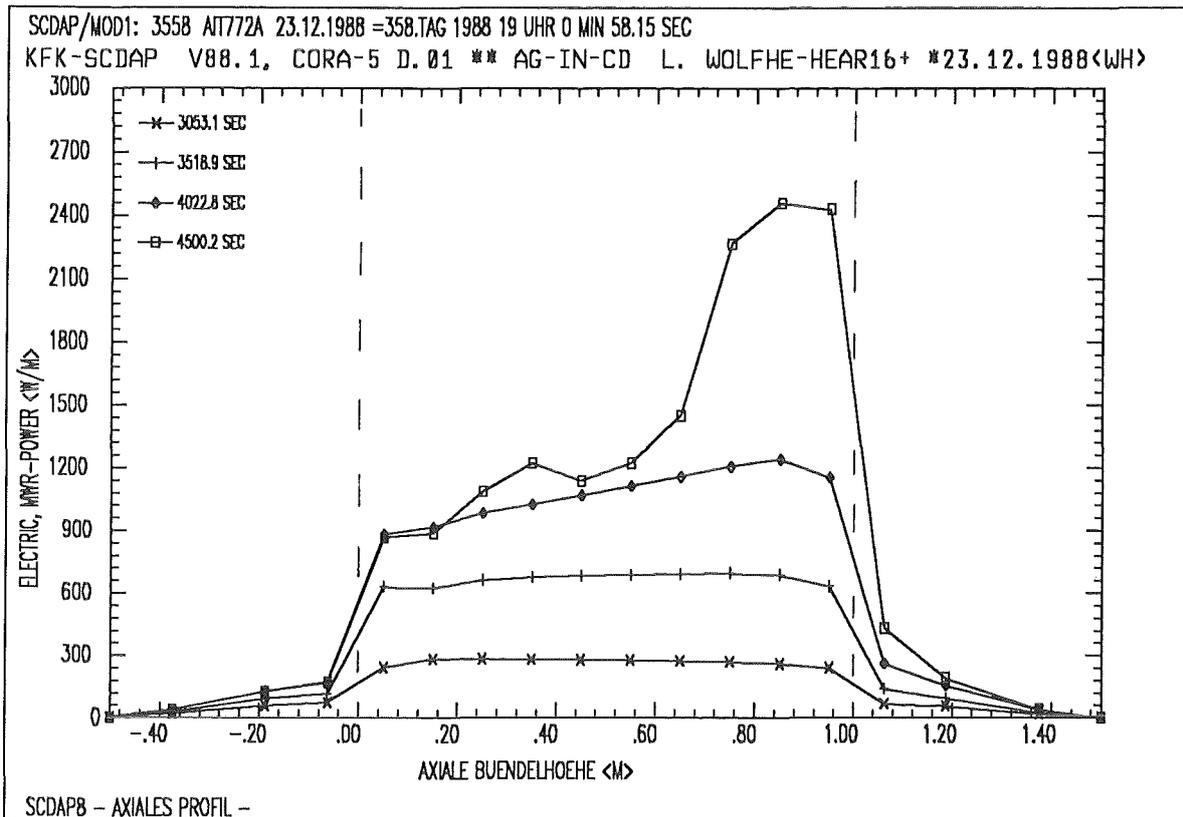


Abbildung 14. Axiales Leistungsprofil eines Simulators: Verteilung der eingespeisten Leistung in axialer Richtung zu verschiedenen Zeitpunkten der Nachrechnung

einem relativ flachen plateauartigen Profil bis ca. 4000 s erhebt sich 500 s später eine steile Temperaturspitze. Hervorgerufen durch die Oxidationswärme wird in diesem Bereich noch zusätzliche elektrische Leistung freigesetzt, somit findet sich dieser Peak auch in Abbildung 14.

Da zwischen Temperatur und Leistung aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Wolfram eine Korrelation besteht, haben beide Profile das gleiche Aussehen. Die autokatalytische Reaktion (siehe Kap. 4.3.1) ist ein Unterschied zwischen dem Out-of-pile-Experiment CORA und In-pile-Experimenten.

Diese Unterschiede werden deshalb im Rahmen einer umfangreicheren Arbeit analysiert.

4.5 Massenbilanz

Als letzter Aspekt des Simulator-Moduls ist die Massenbilanz zu erwähnen. Bedingt durch den 6 mm starken Wolfram-Heizstab im Zentrum des Stabes entspricht der UO_2 -Gehalt eines Simulators etwa 57 % eines unbeheizten Brennstabes.

Axiale Materialverlagerung CORA-5

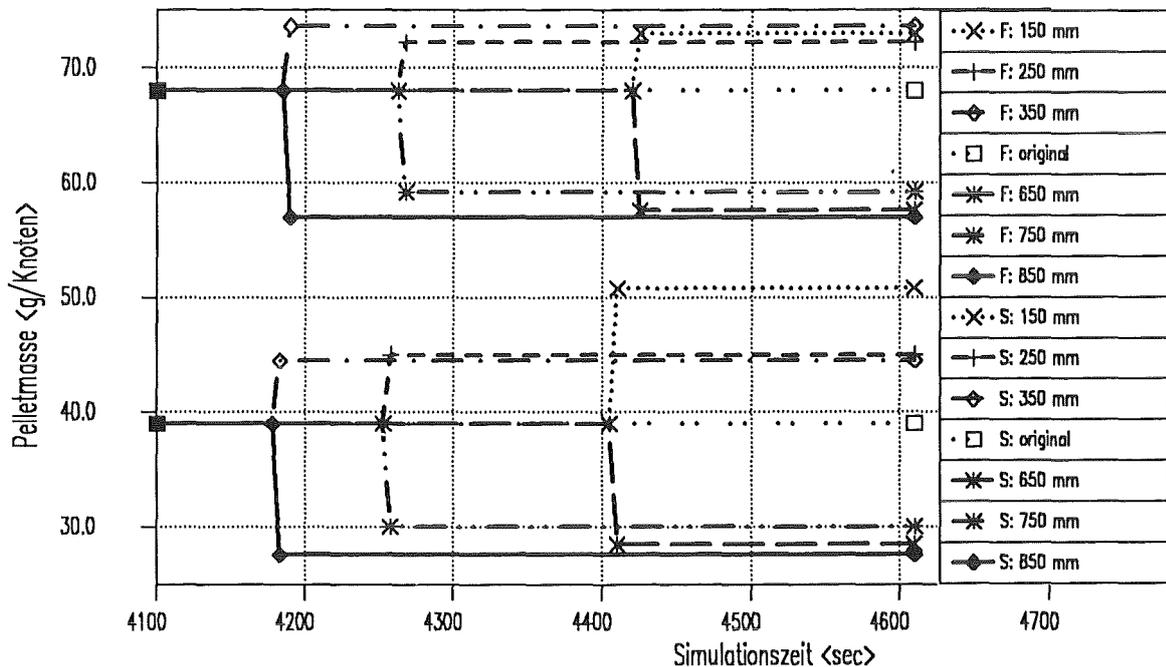


Abbildung 15. Berechnete Massenverlagerung: des unbeheizten Brennstabes (Vollpellets, F = "Fuel rod", obere Hälfte) und des Heizstabes (Ringpellets, S = "Simulator", untere Hälfte) für einige axiale Knoten (Höhenangabe gem. Legende).

Dies drückt sich hauptsächlich in der axialen Massenverlagerung aus, die in Abbildung 15 für beide Komponenten gegen die Simulationszeit aufgezeichnet ist. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit der Darstellung, wurden nicht alle axialen Knoten dargestellt. Um Blockaden innerhalb eines Bündels richtig berechnen zu können, ist die Massenbilanz wichtig. Insbesondere bei Hochtemperaturversuchen wird sehr viel (U-Zr-O)-Schmelze erzeugt. In dieser Simulation wird ab ca. 4180s geschmolzenes Material von 500 - 800 mm in tiefere Niveaus des Bündels

(unterhalb 250 mm) verlagert /19/. Wie man der Abbildung 15 entnehmen kann, werden unabhängig von der Pelletgeometrie etwa gleiche axiale Massenverlagerungen berechnet.

Eine Validierung an einem Experiment allein ist, wie schon dargelegt, unbefriedigend. Dazu ist, wie o.g. die experimentell verfügbare Datenbasis eines Experimentes zu gering. Erst die Nachrechnungen mehrerer Experimente ergeben eine breite Datenbasis, die eine zufriedenstellende Validierung des Simulator-Moduls zulassen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die detaillierte Modellierung des CORA-Heizstabes erlaubt dem Benutzer des erweiterten KfK-SCDAP-Codes die qualitative Analyse eines SFD-Experimentes.

Das Simulator-Modul umfaßt alle wichtigen Eigenschaften eines elektrisch beheizten Brennstabes. Dazu gehören :

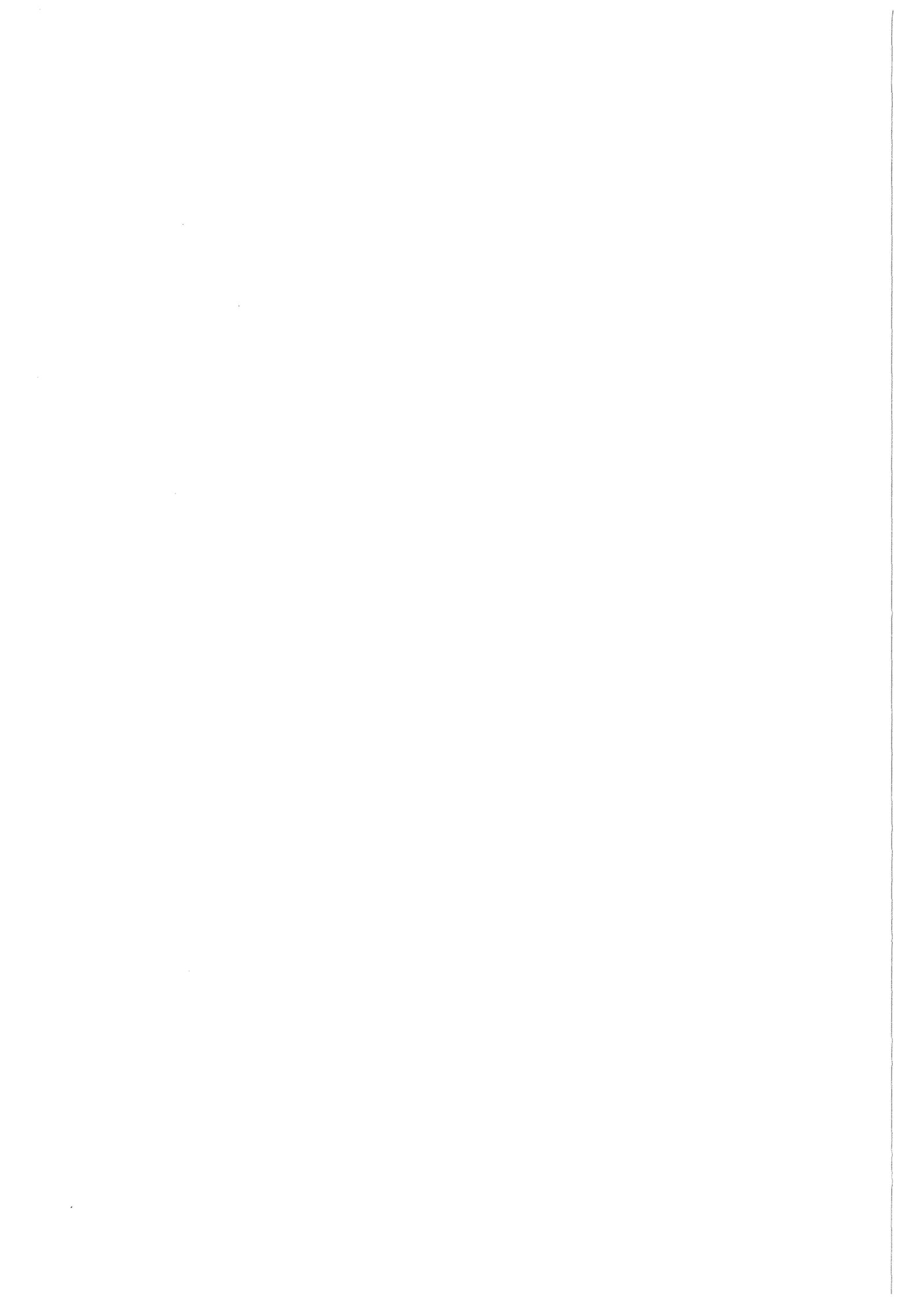
- Modellierung der Wärmequelle und exakte Leistungsbilanzierung
- Beschreibung der individuellen axialen Randbedingungen für jede Komponente getrennt
- Modellierung der axialen Wärmeleitung in den Elektrodenzonen
- Simulation der radialen und axialen Materialsequenzen

Wie Vergleiche mit den CORA-Meßergebnissen zeigen, liegen die Voraussagen des Codes innerhalb der Fehlergrenzen der Temperaturmessung mit Hochtemperatur-Thermoelementen. Das Modell kann das Experiment ergänzen, da das Experiment bezgl. der Leistungsbilanzierung keine axiale Auflösung aufweist.

Bei der Auslegung von CORA-Experimenten ist der Code ferner ein hilfreiches Werkzeug, um die Zusammensetzung des Kühlfluids, die Leistungseinspeisung sowie den Beginn des Stabversagens vorherzubestimmen.

Eine Erweiterung des Moduls im Rahmen des CORA-Programms ist in Moment noch nicht absehbar, da das Modul die gestellten Ansprüche voll erfüllt. Das Modell ist portierbar, d.h nicht nur in Verbindung mit dem SCDAP Code zu verwenden.

Eine Einbindung der hier beschriebenen Erweiterung in den SFD-Code SCDAP/RELAP ist z. Zt. bei EG&G, Idaho, USA, in Arbeit /17/.



Anhang A. Literatur

- /1/ Fiege, A.; Severe Damage Investigations of KfK/PNS; KfK 3431B, 1983
- /2/ Hagen,S., Hain,K.; Out-of-pile Bundle Experiments on Severe Fuel Damage; CORA-Program, KfK 3677, 1986
- /3/ Hagen,S., Hofmann,P.; Physical and Chemical Behavior of LWR Fuel Elements up to very High Temperatures, KfK 4104, 1987
- /4/ Hagen,S., Hering,W., Vogel,K.; CORA-Scoping Test-B, Test Results Report, KfK 4171, 1988
- /5/ Hagen,S., Hering,W., Vogel,K.; CORA-Scoping Test-C, Test Results Report, KfK 4312, 1989
- /6/ Hagen,S.,Hofmann,P.,Schanz,G.,Sepold,L.; Interactions between Zry-Cladding and Al₂O₃-pellets, Post Test Results of Test CORA-B and CORA-C, KfK 4313, 1988
- /7/ Hagen,S.,Hofmann,P.,Schanz,G.,Sepold,L.; Interactions in Zry-UO₂ Fuel Rod Simulator Bundles with Inconel Spacers at High Temperatures; (Posttest Results of Test CORA-2 and CORA-3); KfK 4378, 1989
- /8/ Hagen,S. et al.; Out-of-pile Experiments on LWR Fuel Damage Behavior(Tests CORA-C and CORA-2); KfK 4404, 1988
- /9/ Hagen,S.,Hofmann,P.,Schanz,G.,Sepold,L.; Behavior of Ag-In-Cd Absorber Material in Zry-UO₂ Fuel Rod Simulator Bundles at High Temperatures (Posttest Results of Test CORA-5 and CORA-12); KfK 4419, in Vorbereitung
- /10/ Hering,W.,Meyder,R.; Evaluation of CORA-Experiments Using SCDAP; IAEA-SM-296/31, International Symposium on Severe Accidents in Nuclear Power Plants, Sorrento, 21.-25.03.1988

- /11/ Meyder,R.; unveröffentlichter Bericht des KfK, 1985
- /12/ Hering,W.,Meyder,R.; Evaluation of CORA Experiments Using the SCDAP computer code; Kerntechnik 53 (1988), S.21
- /13/ Allison,C.M. et al.; SCDAP/MOD1 Theory and Models, Draft preliminary report; Idaho National Engineering Laboratory (INEL), January 1985
- /14/ Hagrman,D.L., Reymann,G.A., Mason,R.E.; MATPRO-Version 11, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reaktor Fuel Rod Behavior; EG&G Idaho Report No. NUREG/CR-0479, TREE-12800, Revision 2, August 1981
- /15/ Meyder,R., Nassini,H.; unveröffentlichter Bericht des KfK, 1988
- /16/ Hassan,M.A., Rehme,K.; Heat Transfer Near Spacer Grids in Gas-cooled Rod Bundles; Nuclear Technology, Vol.52,3/81,S.401
- /17/ Allison,C.M.; Private Communications, Sept.88
- /18/ Hering,W., Unveröffentlichter Bericht des KfK, 1988
- /19/ Hering,W., Nagase,F., Unveröffentlichter Bericht des KfK, 1988
- /20/ Hagen,S., Hofmann,P., Schanz,G., Sepold,L., CORA Experiments on the Behavior of LWR Fuel Rod Bundles under Sever Fuel Damage Conditions, Kerntechnik 53 (1988), S.15
- /21/ Sepold,L., Hagen,S., Hering,W., Hofmann,P., Schanz,G., CORA-Bündelexperimente zu Schweren Kernschäden. Atomwirtschaft 34 (1989), S.43
- /22/ Wagner,K.,Vollmer,T., Zusammenstellung von Stoffwerten für Wärmerechnungen an LWR-Brennstäben und deren Simulatoren, KfK-Ext. 15/77-2 (1977)

Anhang B. Modellparameter

WOLFHE

Für die Start-Inputleistung von 100.0 W (Variable PPTIM) ergibt sich am Anfang einer Nachrechnung, d.h. bei relativ niedrigen Temperaturen folgende Situation:

Knotenwiderstände

I _{ax} , IM,	TC,	DZCOND	R Knoten	R vorwid	R heiz	
<K>	<m>	< Ω >	< Ω >	< Ω >	< Ω >	
1	2	378.0	0.250	0.101E-03	0.110E-02	0.000E+00
2	3	436.3	0.125	0.151E-03	0.125E-02	0.000E+00
3	3	478.0	0.125	0.166E-03	0.142E-02	0.000E+00
4	4	603.0	0.100	0.485E-03	0.142E-02	0.485E-03
5	4	613.0	0.100	0.495E-03	0.142E-02	0.980E-03
6	4	603.0	0.100	0.485E-03	0.142E-02	0.147E-02
7	4	600.0	0.100	0.482E-03	0.142E-02	0.195E-02
8	4	588.0	0.100	0.471E-03	0.142E-02	0.242E-02
9	4	573.0	0.100	0.456E-03	0.142E-02	0.287E-02
10	4	553.0	0.100	0.437E-03	0.142E-02	0.331E-02
11	4	533.0	0.100	0.418E-03	0.142E-02	0.373E-02
12	4	503.0	0.100	0.389E-03	0.142E-02	0.412E-02
13	4	483.0	0.100	0.370E-03	0.142E-02	0.449E-02
14	3	478.0	0.125	0.166E-03	0.158E-02	0.449E-02
15	3	436.3	0.125	0.151E-03	0.174E-02	0.449E-02
16	2	378.0	0.250	0.101E-03	0.184E-02	0.449E-02

Materialindex : 2 = Molybdän	R vorwid : 0.184E-02 Ω
3 = Kupfer	R Heizer : 0.449E-02 Ω
4 = Wolfram	R flex.Wid: 0.100E-02 Ω

	R gesamt : 0.632E-02 Ω

Damit ist die Verteilung der Leistung auf die einzelnen Knotenebenen definiert und man findet für Heiz und Verlustleistung untenstehende Werte.

Knotenleistungen

Iax, IM,	Tc,	Aelectr.	P Knoten	P Vor	P Heiz	
	<K>	<mm²>	<W/m>	<W/m>	<W/m>	
1	2	378.0	58.1	6.3	6.37	0.0
2	3	436.3	58.1	19.1	25.47	0.0
3	3	478.0	58.1	21.0	46.47	0.0
4	4	603.0	28.3	76.7	0.0	76.7
5	4	613.0	28.3	78.3	0.0	155.0
6	4	603.0	28.3	76.7	0.0	232.7
7	4	600.0	28.3	76.3	0.0	308.0
8	4	588.0	28.3	74.4	0.0	382.4
9	4	573.0	28.3	72.1	0.0	454.5
10	4	553.0	28.3	69.1	0.0	524.6
11	4	533.0	28.3	66.1	0.0	590.7
12	4	503.0	28.3	61.5	0.0	651.2
13	4	483.0	28.3	58.5	0.0	709.7
14	3	478.0	58.1	21.0	67.5	0.0
15	3	436.3	58.1	19.1	86.7	0.0
16	2	378.0	58.1	6.3	93.1	0.0

Strom pro Stab = 125.7 A

Strom²= 15811.5 A²

mit: PPTIM = 100.00 W
PAXV = 93.05 W/m
PAXH = 709.66 W/m

HEAR16

1. Nodalisierung

Für Testzwecke wurde die radiale Nodalisierung der Elektrodenzonen von der beheizten Zentralzone übernommen. Diese wurde leicht modifiziert um die Materialgrenzen beider Bereiche einhalten zu können. Die momentane Beschränkung auf 6 radiale Knoten liegt in der CPU-Zeit-Ökonomie begründet. Eine Erweiterung auf 8 radiale Knoten ist beabsichtigt.

Axiale Erweiterung

Knoten rad. Abst. Zentralb. - Material - Elektroden

1	0.00 mm			
		Wolfram		Molybdän, Kupfer
2	3.00 mm			
		Uranoxid-Pellets		Molybdän, Kupfer
3	4.30 mm			
		Uranoxid-Pellets		Zirkon - Oxid
4	4.60 mm			
		Gap gef. Helium		Zirkon - Oxid
5	4.655 mm			
		Zirkaloy Hüllrohr		Zirkoloy-Hüllrohr
6	5.375 mm			

mit 2 zusätzlichen radialen Knoten:

7	3.70 mm	Uranoxid-Pellets		Molybdän, Kupfer
8	5.02 mm	Zirkaloy Hüllrohr		Zirkoloy-Hüllrohr

2. Wärmeleitung in der Elektrodenregion

Die Elektrodenzonen sind in 3 axiale Abschnitte unterteilt, deren Aufbau in untenstehender Tabelle angegeben ist. Da Molybdän etwas schlechtere Wärmeleiteigenschaften als Kupfer besitzt, wurden im Bereich der Molybdän-elektroden zwei Wärmeleitknoten vorgesehen.

Knoten- Nummer	ax. Abst.<mm>		Elektroden- Material	Bemerkung
	unten	oben		
0	-50.0	1500.0	Randtemperatur	Temperatur aus
			im Wasserbereich	RATEFU
1	-37.7	1375.0	Kupfer	
	-25.0			Materialgrenze
2	-18.75	1187.5	Molybdän	
	-12.5			
3	-62.5	1062.5	Molybdän	
				Materialgrenze
4	50.0	950.0	Randknoten der	Temperaturniveau
=1			beheizten Zone	1 von SCDAP

3. Materialdaten

Zirkaloy:

$$\begin{aligned} \text{RLAMD} &= 7.848 + 2.2\text{E-}2*\text{TK} - 1.676\text{E-}5*\text{TK}^{**2} + 8.712\text{E-}9*\text{TK}^{**3} \\ \text{CP} &= 286.0 + 9.286\text{E-}2*\text{TC} && \text{TC} < 800 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{CP} &= -3341.0 + 4.626*\text{TC} && 800 < \text{TC} < 907 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{CP} &= 6611.0 - 6.346*\text{TC} && 907 < \text{TC} < 985 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{CP} &= 360.0 && \text{TC} > 985 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{RHO} &= 6.57\text{E}3 \end{aligned}$$

Kupfer:

$$\begin{aligned} \text{RLAMD} &= 399.1 - 4.484\text{E-}2*\text{TC} - 1.779\text{E-}5*\text{TC}^{**2} \\ \text{CP} &= 378.2 + 1.473\text{E-}2*\text{TC} - 2.968\text{E-}6*\text{TC}^{**2} \\ \text{RHO} &= 8.93\text{E}3 \end{aligned}$$

Molybdän:

$$\begin{aligned} \text{RLAMD} &= 154.188 - 4.258\text{E-}2*\text{TK} + 3.443\text{E-}6*\text{TK}^{**2} - 2.713\text{E-}10*\text{TK}^{**3} \\ \text{CP} &= 2.3748\text{E}2 + 3.846\text{E-}2*\text{TK} + 1.453\text{E-}5*\text{TK}^{**2} \\ \text{RHO} &= 10.2\text{E}3 \end{aligned}$$

Wolfram:

$$\begin{aligned} \text{RLAMD} &= 130.39 - 1.9506\text{E-}2*\text{TC} + 2.117\text{E-}6*\text{TC}^{**2} \\ \text{CP} &= 137.37 + 3.8839\text{E-}2*\text{TC} - 4.5758\text{E-}6*\text{TC}^{**2} \\ \text{RHO} &= 19.6\text{E}3 \end{aligned}$$

Diese Daten sind der KfK-HIT Stoffdatensammlung entnommen /21/.

Anhang C. Programmlisten

SIMINP

```
SUBROUTINE SIMINP ( IAXALL, NDAX1 , NDRD1 , NDMATR,  
+                 DENUO2, DZCOND, NAZ , ZCOND ,  
+                 AFUEL , HOOP , RL ,  
+                 IMATER, NMATER, NRCLDI, NRCOND, NRODES, NSIGL ,  
+                 NUMELM, PITCH , PLLNTH, QCLAD , QOUT , RADMAT,  
+                 RCI , RCII , RCOI , RCO , RCOS , RDLNTH,  
+                 RPEL , TCLAD , TCOND , TEFF , TSUR1 , TFUEL ,  
+                 VFUEL , VFUELI, VEVOD , VEVODI, VPLEN , VPLENI,  
+                 WUOBNG, WZOBNG, WZRBNG, XCOND , ZOXDEN, ZRDEN )
```

C-----

C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER

C AUTHOR : WOLFGANG HERING

C ZWECK : BEREITSTELLUNG DER MATERIAL- UND GEOMETRIEDATEN

C FUER DEN HEIZSTAB

C incl. Elektrodenzonen

C KOMPONENTEN ID=3, NGEOM=2

C

C-----

C LETZTE AENDERUNG : 14.11.88

C-----

PARAMETER (IPLUS=3, IPLUS2=6,NDAX=10,NDRD=20)

IMPLICIT INTEGER (I-N) , REAL (A-H , O-Z)

DIMENSION XCOND(NDRD,NDAX) , DZCOND(NDAX), ZCOND (NDAX),

```
+ AFUEL( NDAX ) , HOOP (NDAX), VEVODI(NDAX),  
+ IMATER( NDMATR,NDAX ), RPEL (NDAX), WZOBNG(NDAX),  
+ NMATER( NDAX ) , NRCOND(NDAX), WZRBNG(NDAX),  
+ NRCLDI( NDAX ) , NRODES(NDAX), RCOI (NDAX),  
+ NUMELM( NDAX ) , QCLAD (NDAX), QOUT (NDAX),  
+ RADMAT( NDMATR+1,NDAX ), RCI (NDAX), RCO (NDAX),  
+ TCOND( NDRD,NDAX ) , TEFF (NDAX), TSUR1 (NDAX),  
+ VFUEL( NDAX * 2 ) , VEVOD( NDAX), WUOBNG(NDAX),
```

+ ZCOND1(NDAX + IPLUS2)
LOGICAL FLAG

COMMON / FGINVC / XMWXE, XMWKR , XMWCS, XMWI , RCSFG, RIFG
COMMON / CONS / PI , E , PISQ , TWOPI, PIOVR2 , PIOVR4 ,
+ SQRTPI, SQRT2P, SQRT2
COMMON/RANDAT/ TCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2),DZCON1(NDAX + IPLUS2),
+ XCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2), IMATAX(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+ AHEIZ(NDAX + IPLUS2), QUP, QDOWN, BOTZ, TOPZ, PI2(2)
DATA FLAG /.TRUE./

IF (NDAX1.NE. NDAX .OR. NDRD1.NE.NDRD) STOP'ERROR IN SIMINP'

READ (5,*) NSIGL , PITCH
IF (IAXALL .EQ. 0) THEN
READ (5,*) NAZ
READ (5,*) (DZCOND(I) , I = 1,NAZ)
CALL ZELVF (DZCOND, NAZ, NDAX, ZCOND)
ENDIF
READ (5,*) RL , RPEL(1) , RCO(1), RCI(1)
READ (5,*) PLLNTH , VPLENI

C----- NEUE INITIALISIERUNG

NTOT = NAZ + IPLUS2
PI2(1) = 1.0
PI2(2) = 3.141592654
TRAND = 353.0
BOTZ = -0.5
TOPZ = 1.5
RPELI = 0.0030
RELEC = 0.0043

C

DO 123 I = 1,IPLUS
AHEIZ(I) = PI2(2) * (RELEC * 1.0E3)**2
AHEIZ(NTOT-I + 1) = AHEIZ(I)
123 CONTINUE
DO 234 I = IPLUS + 1,NAZ + IPLUS
AHEIZ(I) = PI2(2) * (RPELI * 1.0E3)**2

234 CONTINUE

C----- ORIG INITIALISIERUNG

VPLEN = VPLENI
RDLNTH = RL + PLLNTH
QCLAD(1) = 0.0
QOUT(1) = 0.0
HOOP(1) = 0.0
TFUEL = 0.0
TCLAD = 0.0
TEFF(1) = RCI(1) - RPEL(1)
RCOS = RCO(1)
RCOI(1) = RCOS
RCII = RCI(1)

READ (5,*) IRALL
READ (5,*) NRODES(1)

NMATER(1) = 4
IMATER(1,1) = 4
IMATER(2,1) = 6
IMATER(3,1) = 9
IMATER(4,1) = 1

READ (5,*) (XCOND(J,1) , J = 1,NRODES(1))
READ (5,*) (TCOND(J,1) , J = 1,NRODES(1))

RADMAT(1,1) = 0.0
RADMAT(2,1) = RPELI
RADMAT(3,1) = RPEL(1)
RADMAT(4,1) = RCI (1)
RADMAT(5,1) = RCO (1)

CALL RNODES(XCOND,RPEL,RCI,NRCOND(1),
+ NRCLDI(1), NRODES(1), NDRD)

TSUR1(1) = TCOND(NRODES(1),1)
NUMELM(1) = NRODES(1) - 1
DO 50 I = 2 , NAZ

```
IF ( IRALL .EQ. 0 ) THEN
  READ ( 5,* ) NRODES( I )
  READ ( 5,* ) ( XCOND( J,I ) , J = 1,NRODES(I))
  READ ( 5,* ) ( TCOND( J,I ) , J = 1,NRODES(I))

  CALL RNODES( XCOND(1,I),RPEL(I),RCI(I),NRCOND(I),
+           NRCLDI(I), NRODES(I), NDRD)
ELSE IF ( IRALL .EQ. 2 ) THEN
  NRODES( I ) = NRODES( 1 )
  READ ( 5, * ) ( TCOND( J,I ) , J = 1,NRODES( 1 ))
  DO 18 J = 1,NRODES( 1 )
    XCOND( J,I ) = XCOND( J,1 )
18  CONTINUE
  NRCLDI(I) = NRCLDI(1)
  NRCOND(I) = NRCOND(1)
ELSE
  NRCOND( I ) = NRCOND( 1 )
  NRODES( I ) = NRODES( 1 )
  NRCLDI( I ) = NRCLDI( 1 )
  DO 20 J = 1 , NRODES( 1 )
    XCOND( J,I ) = XCOND( J,1 )
    TCOND( J,I ) = TCOND( J,1 )
20  CONTINUE
ENDIF
NMATER(I) = NMATER( 1 )
DO 15 J = 1,NMATER(1)
  IMATER( J,I ) = IMATER( J,1 )
  IMATAX(J,I+IPLUS) = IMATER (J,I)
15  CONTINUE
DO 30 K = 1 , NMATER( I ) + 1
  RADMAT( K,I ) = RADMAT( K,1 )
30  CONTINUE
HOOP(I) = HOOP(1)
NUMELM(I) = NRODES(I) - 1
RCO(I) = RCO(1)
RCI(I) = RCI(1)
RCOI(I) = RCOI(1)
```

```
RPEL(I) = RPEL(1)
TEFF(I) = TEFF(1)
TSUR1(I) = TCOND( NRODES(I),I )
QCLAD(I) = QCLAD(1)
QOUT(I) = QOUT(1)
```

```
50 CONTINUE
```

```
C ----- AXIAL CONDITIONS
```

```
DZCON1(1) = 0.25
DZCON1(2) = 0.125
DZCON1(3) = 0.125
```

```
DO 5 J=1,NRODES(1)
```

```
DO 4 I=1,NAZ
```

```
  XCOND1(J,I+IPLUS) = XCOND (J,I)
  DZCON1(I+IPLUS) = DZCOND(I)
  TCOND1(J,I+IPLUS) = TCOND(J,I)
  IMATAX(J,I+IPLUS) = IMATER(J,I)
```

```
4 CONTINUE
```

```
  TCOND1(J,2) = (TCOND(J,1) + 2*TRAND)/3
  TCOND1(J,3) = (TCOND(J,1) + TRAND)/2
  TCOND1(J,1) = (TCOND(J,1) + 9*TRAND)/10
  IF (XCOND(J,1) .LT. RCI(1)) THEN
```

```
    IMATAX(J,1) = 2
    IMATAX(J,2) = 3
    IMATAX(J,3) = 3
```

```
  ELSE
```

```
    DO 6 I=1,IPLUS
      IMATAX(J,I) = 1
```

```
6 CONTINUE
```

```
  ENDIF
```

```
DO 7 I=1,IPLUS
```

```
  TCOND1(J,NTOT-I+1) = TCOND1(J,I)
  XCOND1(J,I) = XCOND(J,1)
  XCOND1(J,NTOT-I+1) = XCOND(J,NAZ)
  DZCON1(NTOT-I+1) = DZCON1(I)
  IMATAX(J,NTOT-I+1) = IMATAX(J,I)
```

```
7 CONTINUE
```

5 CONTINUE

C ----- PRINTOUT CONDITIONS

IF (JDEBUG.GT.0 .OR. FLAG) THEN

WRITE(6,1001)

ZCOND1(1) = -0.5 + DZCON1(1)/2

DO 91 J=2,NTOT

ZCOND1(J) = (DZCON1(J-1)+DZCON1(J))*0.5 + ZCOND1(J-1)

91 CONTINUE

WRITE(6,'(1X,18F7.1)')

& TRAND,(TCOND1(1,II),II = 1,NTOT),TRAND

WRITE(6,'(1X,18F7.3)') BOTZ,(DZCON1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

WRITE(6,'(1X,18F7.3)') BOTZ,(ZCOND1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

C DO 92 JJ = 1,NRODES(1)

C WRITE(6,'(A,16I7)') ' IMAT',(IMATAX(JJ,II),II = 1,NTOT)

C WRITE(6,'(A,16F7.4)') ' XCOND',(XCOND1(JJ,II),II = 1,NTOT)

C92 CONTINUE

WRITE(8,*) BOTZ,(ZCOND1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

WRITE(9,*) BOTZ,(ZCOND1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

FLAG = .FALSE.

ENDIF

C ----- END OF AXIAL LOOP

WRITE (6,1000) 'NUMBER OF SIMULATORS IN BUNDLE',NSIGL

WRITE (6,1020) 'PITCH IS', PITCH, '(M)'

WRITE (6,1000) 'NUMBER OF AXIAL NODES IS', NAZ

WRITE (6,1020) 'FUEL LENGTH IS', RL, '(M)'

WRITE (6,1020) 'FUEL PELLETT INNER RADIUS IS', RPELI, '(M)'

WRITE (6,1020) 'FUEL PELLETT OUTER RADIUS IS', RPEL(1), '(M)'

WRITE (6,1020) 'PLENUM LENGTH IS', PLLNTH, '(M)'

WRITE (6,1020) 'PLENUM VOLUME IS', VPLENI, '(M3)'

WRITE (6,1020) 'CLADDING ORIGINAL OUTER RADIUS', RCOS, '(M)'

WRITE (6,1020) 'CLADDING INNER RADIUS IS', RCI(1), '(M)'

WRITE (6,1020) 'CLADDING HOOP STRAIN IS', HOOP(1),

IF (IAXALL .EQ. 0) THEN

WRITE (6,1010) 'AXIAL NODES',

+ ('NODE', 'ELEVATION', 'NODE HT.', K = 1,3),

+ (('M)', K = 1,6) ,

```
+          (I, ZCOND1(I), DZCON1(I), I = 1,NTOT )
ENDIF
WRITE (6,1020) 'HEAT FLUX FROM THE FUEL TO THE CLADDING IS',
+          QCLAD(1) , ' (W/M2-S)'
WRITE (6,1000) 'NUMBER OF RADIAL NODES IN THE FUEL IS ' ,
+          NRCOND( 1 )
WRITE (6,1000) 'TOTAL NUMBER OF RADIAL NODES IS ',NRODES(1)
DO 60 I = 1,NAZ
  WRITE (6,1050) 'INITIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION (K)' ,
+          ( J , TCOND( J,I ) , J = 1,NRODES(I))
  WRITE (6,1050) 'INITIAL RADIAL MESH (M)' ,
+          ( J , XCOND( J,I ) , J = 1,NRODES(I))
  IF ( IRALL .EQ. 1 .AND. I .EQ. 1 ) GO TO 70
60 CONTINUE
70 CONTINUE
VFUELI = 0.0
DO 100 I = 1,NAZ
  VVOD(I) = (RCI(I) ** 2 - RPEL(I) ** 2 ) * PI * DZCOND(I)
  AFUEL(I) = PI * (RPEL( I)**2 - RPELI**2)
  VFUEL(I) = AFUEL(I) * DZCOND(I)
  VFUEL(NDAX + I) = VFUEL( I )
  WUOBNG(I) = VFUEL(I) * DENUO2
  WZRBNG(I) = (RCO(I)**2 - RCI(I)**2) * PI * ZRDEN*DZCOND(I)
  WZOBNG(I) = 0.0
  VVODI( I ) = VVOD( I ) / DZCOND( I )
  VFUELI = VFUELI + VFUEL(I)
100 CONTINUE
WRITE(6,1050)'INITIAL FUEL VOID VOLUME PER UNIT LENGTH (M2)',
+          (I,VVODI( I ) , I = 1,NAZ )
WRITE(6,1050)'INITIAL VOID VOLUME (M2)',(I,VVOD(I),I = 1,NAZ)
WRITE(6,1050)'INITIAL FUEL VOLUME (M2)',(I,VFUEL(I),I = 1,NAZ)
WRITE(6,1050)'INITIAL UO2 MASS (KG) ',(I,WUOBNG(I),I = 1,NAZ)
WRITE(6,1050)'INITIAL ZR MASS (KG) ',(I,WZRBNG(I),I = 1,NAZ)
RETURN
1001 FORMAT (/ ,30('-'), ' SIMINP02 INITIALISIERUNG ' ,30('-'))
1010 FORMAT ( //T8, A// 3(3X,A,5X,A,5X,A,2X) / 3(15X,A,10X,A,5X)/
+          (3( 4X,I2,2X,2F12.4,3X )))
1000 FORMAT ( T5 , A , I3, /)
```

```
1020 FORMAT ( T5 , A , E10.4 , A )
1030 FORMAT ( /T8, A/ (6( 5X,I2,5X,I2,4X )))
1050 FORMAT ( /T8, A/ (6( I6,2X,D12.6)))
      E N D
```

HEARAX

```
      SUBROUTINE HEARAX(ZEFROC,ZEFFK,DZCOND,XCOND,NGEOM,ICOMP,
+          TCOND, DELTC,TIMEC,NRT,NAZ)
```

```
C-----
C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER
C AUTHOR  : WOLFGANG HERING
C ZWECK   : IMPLIZITE LOESUNG DER WAERMELEITGLEICHUNG IN AXIALER
C          RICHTUNG FUER FLACHE UND CYLINDRISCHE GEOMETRIEN
C          OHNE BERUECKSICHTIGUNG VON RANDEFFEKTEN (ELEKTRODEN)
C
C LETZTE AENDERUNG : 14.11.88
C-----
C
C STAND 11.11.88 ANPASSUNG AUF FLACHE UND CYLINDRISCHE GEOMETRIE
C          NGEOM = 1 : FLACH , NGEOM = 2 : ZYLINDRISCH
C
C-----
C RAD(21,10)   : MITTENABSTAENDES DER RADIALEN ZONEN
C ZEPV(20,10)  : WAERMEKAPAZITAETDICHTE (PRO ZEITSCHRITT)
C FL(20,11)   : RADIAL GEMITTELTE WAERMELEITFAEHIGKEIT
C XL(20,11)   : GEWICHTETE WAERMELEITFAEHIGKEITK
C A(10,3),B(10) : INPUT/OUTPUT MATRIX FUES LEQT2B (CL.ROESNER)
C UU(10,5),WORKA(20) LEQT2B STEUERMATRIX
C
C-----
C
C XCOND(NDRD,NDAX) : RANDRADIEN DER MATERIALIEN PRO KNOTEN IN M
C ZEFROC(20,NDAX) : RHO*CP EFFEKTIVE SPEZIFISCHE WAERMEKAPAZITAET
C DZCOND(NDAX),   : KNOTENABSTAND AXIAL IN M
C ZEFFK(20,NDAX) : EFFEKTIVE WAERMELEITFAEHIGKEIT IN W/M/K
C TCOND(NDRD,NDAX) : TEMPERATURWERTE AN DEN KNOTEN XCOND ( IN K )
C
C-----
```

```
PARAMETER ( IPLUS = 0,IPLUS2 = 0, NDAX = 10, NDRD = 20)
REAL  RAD(NDRD + 1,NDAX + IPLUS2), ZEPV(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+     FL(NDRD,NDAX + 1 + IPLUS2), XL(NDRD,NDAX + 1 + IPLUS2),
+     A(NDAX + IPLUS2,3), B(IPLUS2 + NDAX),UU(NDAX + IPLUS2,5)
REAL  XCOND(NDRD,NDAX),ZEFROC(NDRD,NDAX),DZCOND(NDAX),
+     ZEFFFK(NDRD,NDAX),TCOND(NDRD,NDAX),WORKA(2*NDAX + NDRD)
REAL  TRAU(NDRD),TRAO(NDRD),PI2(2)
LOGICAL FLAG
DATA PI2 /1.0, 3.141592654/, FLAG /.TRUE./

C
C ----- TEST OB AXIALE WAERMELEITUNG GERECHNET WERDEN SOLL
C
      IF(NAZ.LT.3 .OR. NGEOM.GT.2) RETURN
C ----- RANDTEMPERATUREN
      CALL DEBUGA ('HEARAX',JDEBUG)
      CALL RATEFU (ICOMP,NRT,NAZ,XCOND,TIMEC,TRAU,TRAO)

      IF (JDEBUG.GT.0 .OR. FLAG) THEN
        WRITE ( 6,1001 )
        WRITE(6,*) ' NEW HEARAX MODEL : '
        WRITE(6,'(A,/,7X,4I6,3F8.2)') ' HEARAX: GEOM,ICOMP,NRT,NAZ,
& TIME, DTIME ',NGEOM,ICOMP,NRT,NAZ,TIMEC,DELTC,PI2(NGEOM)
        WRITE(6,'(A,15F8.5)') ' HEARAX X: ',(XCOND(J,1),J = 1,NRT)
        WRITE(6,'(A,15F8.1)') ' HEARAX T: ',(TCOND(J,1),J = 1,NRT)
CWH  WRITE(6,'(A,15F8.1)') ' TRAU: ',(TRAU(JJ),JJ = 1,NRT)
CWH  WRITE(6,'(A,15F8.1)') ' TRAO: ',(TRAO(JJ),JJ = 1,NRT)
        FLAG = .FALSE.
      ENDIF

1001 FORMAT (/,30('-'),' HEARAX INITIALISIERUNG ',30('-'))
C ----- AXIALE GRENZEN FUER LAUFVARIABLE
      NTOT = NAZ + IPLUS2
      NAZP = NTOT + 1
      NAZM = NTOT - 1
C ----- RADIALE GRENZEN FUER LAUFVARIABLE
      NRTM = NRT - 1
      NRTP = NRT + 1
C
```

```
C----- RADIIEN IN MATERIALMITTE = GEOMETRISCHE MITTE KEIN SCHWERPUNKT
C
  DO 10 J = 1,NAZ
    RAD(1,J) = XCOND(1,J)
    DO 11 I = 2,NRT
      RAD(I,J) = 0.5*(XCOND(I,J) + XCOND(I-1,J))
C    RAD(I,J) = 0.5*(XCOND(I,J) + XCOND(I-1,J))
  11 CONTINUE
    RAD(NRTP,J) = XCOND(NRT,J)
  10 CONTINUE
C
C----- MITTLERE WAERMEKAPAZITAET RHO*CP
C
  DO 20 J = 1,NAZ
    FV = PI2(NGEOM) * (RAD(2,J)**NGEOM - RAD(1,J)**NGEOM)
    ZEPV(1,J) = FV*DZCOND(J)*ZEFROC(1,J)/DELTC
    FL(1,J) = FV*ZEFFK(1,J)
    DO 30 I = 2,NRTM
      FV = PI2(NGEOM) * (RAD(I+1,J)**NGEOM - XCOND(I,J)**NGEOM)
      FH = PI2(NGEOM) * (XCOND(I,J)**NGEOM - RAD(I,J)**NGEOM)
      FL(I,J) = FV*ZEFFK(I,J) + FH*ZEFFK(I-1,J)
      ZEPV(I,J) = (FV*ZEFROC(I,J) + FH*ZEFROC(I-1,J))*DZCOND(J)
    &      /DELTC
  30 CONTINUE
    FH = PI2(NGEOM) * (XCOND(NRT,J)**NGEOM - RAD(NRT,J)**NGEOM)
    FL(NRT,J) = FH*ZEFFK(NRTM,J)
    ZEPV(NRT,J) = FH*ZEFROC(NRTM,J)*DZCOND(J)/DELTC
  20 CONTINUE
C
C----- AXIAL GEMITTELTE LAMDA*EFF/ESS
C
  DO 40 I = 1,NRT
    XL(I,1) = 2.*FL(I,1)/DZCOND(1)
    DO 50 J = 2,NAZ
      XL(I,J) = FL(I,J)*FL(I,J-1)*2./(FL(I,J)*DZCOND(J-1)
+      + FL(I,J-1)*DZCOND(J))
  50 CONTINUE
    XL(I,NAZP) = 2.*FL(I,NAZ)/DZCOND(NAZ)
```

40 CONTINUE

C

C ----- GLEICHUNGSSYSTEM AUFBAUEN

C A(IAXIAL,K): WAERMELEITWERTE

C B(IAXIAL): WAERMEKAPAZITAETEN

DO 60 I=1,NRT

C -----RANDBEDINGUNGEN UNTEN IAXIAL = 1

A(1,1)=0.

A(1,2)=ZEPV(I,1)+XL(I,2)+XL(I,1)

A(1,3)=-XL(I,2)

B(1)=ZEPV(I,1)*TCOND(I,1)+XL(I,1)*TRAU(I)

DO 70 J=2,NAZM

A(J,1)=-XL(I,J)

A(J,2)=ZEPV(I,J)+XL(I,J+1)+XL(I,J)

A(J,3)=-XL(I,J+1)

B(J)=ZEPV(I,J)*TCOND(I,J)

70 CONTINUE

C -----RANDBEDINGUNGEN OBEN IAXIAL = NAZ

A(NAZ,1)=-XL(I,NAZ)

A(NAZ,2)=ZEPV(I,NAZ)+XL(I,NAZ)+XL(I,NAZP)

A(NAZ,3)=0.

B(NAZ)=ZEPV(I,NAZ)*TCOND(I,NAZ)+XL(I,NAZP)*TRAO(I)

C

C ----- IMSL ROUTINE

CALL LEQT2B(A,NTOT,1,1,NTOT,B,1,NTOT,0,UU,NTOT,WORKA,IER)

C

DO 80 J=1,NAZ

C ----- UMSPEICHERN DER TEMPERATUREN

TCOND(I,J)=B(J)

80 CONTINUE

60 CONTINUE

RETURN

E N D

HEAR16

SUBROUTINE HEAR16 (ZEFROC,ZEFFK,DZCOND,XCOND,NGEOM,ICOMP,TCOND,

+ DELTC,TIMEC,NRT,NAZ)

C -----

```
C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER
C AUTHOR  : WOLFGANG HERING
C ""     : JUERGEN SCHAEFER, ERWEITERUNG AUF ndax + nplus2 AX. KNOTEN
C ZWECK  : IMPLIZITE LOESUNG DER WAERMELEITGLEICHUNG IN AXIALER
C         RICHTUNG FUER FLACHE UND CYLINDRISCHE GEOMETRIEN
C         MIT BERUECKSICHTIGUNG VON RANDEFFEKTEN ( ELEKTRODEN )
C
C LETZTE AENDERUNG : 14.11.88
C-----
C RAD(NDRD + 1,NDAX) : MITTENRADIEN EINES MATERIALZYLINDERS
C ZEPV(NDRD,NDAX)   : WAERMEKAPAZITAETDICHTE (PRO ZEITSCHRITT)
C FL(NDRD,NDAX + 1) : RADIAL GEMITTELTE WAERMELEITFAEHIGKEIT
C XL(NDRD,NDAX + 1) : GEWICHTETE WAERMELEITFAEHIGKEITK
C A(NDAX,3),B(NDAX) : INPUT/OUTPUT MATRIX FUES LEQT2B (--> CL.ROESNER)
C UU(10,5),WORKA(2*NDRD) LEQT2B STEUERMATRIX
C _____
C
C XCOND(NDRD,NDAX) : RANDRADIEN DER MATERIALIEN PRO KNOTEN IN M
C ZEFROC(NDRD,NDAX): RHO * CP EFFEKTIVE SPEZIFISCHE WAERMEKAPAZITAET
C DZCOND(NDAX),    : KNOTENABSTAND AXIAL IN M
C ZEFFK(NDRD,NDAX) : EFFEKTIVE WAERMELEITFAEHIGKEIT IN W/M/K
C TCOND(NDRD,NDAX) : TEMPERATURWERTE AN DEN KNOTEN XCOND ( IN K )
C QUP,QDOWN       : WAERMESTROEME
C _____
C
PARAMETER ( IPLUS = 3,IPLUS2 = 6, NDAX = 10, NDRD = 20)
REAL  RAD(NDRD + 1,NDAX + IPLUS2), ZEPV(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+     FL(NDRD,NDAX + 1 + IPLUS2), XL(NDRD,NDAX + 1 + IPLUS2),
+     A(NDAX + IPLUS2,3), B(IPLUS2 + NDAX), UU(NDAX + IPLUS2,5)
REAL  XCOND(NDRD,NDAX),ZEFROC(NDRD,NDAX),DZCOND(NDAX),
+     ZEFFK(NDRD,NDAX),TCOND(NDRD,NDAX),WORKA(2*NDAX + NDRD)
REAL  ZEFRO1(NDRD,NDAX + IPLUS2), ZEFFK1(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+     TRAU(NDRD),TRAO(NDRD)
LOGICAL FLAG

COMMON / RANDAT/ TCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2),DZCON1(NDAX + IPLUS2),
+     XCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2), IMATAX(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+     AHEIZ(NDAX + IPLUS2), QUP, QDOWN, BOTZ, TOPZ, PI2(2)
```

DATA FLAG /.TRUE./ , IFLAG / 0 /

C

C----- TEST OB AXIALE WAERMELEITUNG GERECHNET WERDEN SOLL

C

IF(NAZ.LT.3 .OR. NGEOM.GT.2) RETURN

C

CALL DEBUGA ('HEAR16',JDEBUG)

CALL RATEFU (ICOMP,NRT,NAZ,XCOND,TIMEC,TRAU,TRAO)

C

C----- INITIALISIERUNG

QUP = 0.

QDOWN = 0.

C

NTOT = NAZ + IPLUS2

NAZP = NTOT + 1

NAZM = NTOT - 1

C

NRTM = NRT - 1

NRTP = NRT + 1

C

C-----
IF (JDEBUG.GT.0 .OR. FLAG) THEN

WRITE(6,1001)

WRITE(6,'(A,/,7X,5I6,3F8.2)') ' D1 GEOM, ICOMP, NRT, NAZ,
& NTOT TIME DTIME',NGEOM,ICOMP,NRT,NAZ,NTOT,TIMEC,DELTC,PI2(NGEOM)

WRITE(6,'(A,16F8.4)') ' HE16-AX5:',(XCOND1(J,5),J = 1,NRT)

WRITE(6,'(A,20F8.1)') ' HE16-TEMP',(TCOND(J,1),J = 1,NRT)

C WRITE(6,'(A,20F8.1)') ' TRAO: ',(TRAO(JJ),JJ = 1,NRT)

C WRITE(6,'(A,20F8.1)') ' TRAU: ',(TRAU(JJ),JJ = 1,NRT)

WRITE(6,'(1X,18F7.3)') BOTZ,(DZCON1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

WRITE(6,'(1X,18F7.1)') TRAU(1),(TCOND1(1,II),II = 1,NTOT),TRAO(1)

C DO 1 JJ = 1,NRT

C 1 WRITE(6,'(1X,18I7)') JDEBUG,(IMATAX(JJ,II),II = 1,NTOT)

ENDIF

1001 FORMAT (/,30('-',) ' HEAR16 INITIALISIERUNG ',30('-',))

C----- UMSPEICHERN DER UEBERGABEVARIABLEN, IN DIE

C AUF NAZ + IPLUS2 (= 16) ERWEITERTEN VARIABLEN

DO 2 I = 1,NRT

```
      DO 3 J=1,NAZ
        ZEFRO1(I,J+IPLUS)=ZEFROC(I,J)
        ZEFFK1(I,J+IPLUS)=ZEFFK(I,J)
        TCOND1(I,J+IPLUS)=TCOND(I,J)
3     CONTINUE
2     CONTINUE
C
C ----- BERECHNUNG DER ZUSAETZLICHEN WERTE FUER ZEFRO1,ZEFFK1
C
      DO 9 J=1,IPLUS
        DO 9 I=1,NRT
          ZEFFK1(I,J)      = RLAMD(IMATAX(I,J),TCOND1(I,J))
          ZEFRO1(I,J)      = CPRO (IMATAX(I,J),TCOND1(I,J))
          ZEFFK1(I,NTOT-J+1) = RLAMD(IMATAX(I,J),TCOND1(I,NTOT-J+1))
          ZEFRO1(I,NTOT-J+1) = CPRO (IMATAX(I,J),TCOND1(I,NTOT-J+1))
9     CONTINUE
C
C ----- RADIIEN IN MATERIALMITTE = GEOMETRISCHE MITTE KEIN SCHWERPUNKT
C
      DO 10 J=1,NTOT
        RAD(1,J)=XCOND1(1,J)
        DO 11 I=2,NRT
          RAD(I,J)=0.5*(XCOND1(I,J)+XCOND1(I-1,J))
11    CONTINUE
        RAD(NRTP,J)=XCOND1(NRT,J)
10   CONTINUE
C
C ----- MITTLERE WAERMEKAPAZITAET RHO*CP
C
      DO 20 J=1,NTOT
        FV = PI2(NGEOM) * (RAD(2,J)**NGEOM-RAD(1,J)**NGEOM)
        ZEPV(1,J)=FV*DZCON1(J)*ZEFRO1(1,J)/DELTC
        FL(1,J)=FV*ZEFFK1(1,J)
        DO 30 I=2,NRTM
          FV=PI2(NGEOM) * (RAD(I+1,J)**NGEOM - XCOND1(I,J)**NGEOM)
          FH=PI2(NGEOM) * (XCOND1(I,J)**NGEOM- RAD(I,J)**NGEOM)
          FL(I,J)=FV*ZEFFK1(I,J)+FH*ZEFFK1(I-1,J)
          ZEPV(I,J)=(FV*ZEFRO1(I,J)+FH*ZEFRO1(I-1,J))*DZCON1(J)/DELTC
```

30 CONTINUE

FH = PI2(NGEOM) * (XCOND1(NRT,J)**NGEOM - RAD(NRT,J)**NGEOM)

FL(NRT,J) = FH*ZEFFK1(NRTM,J)

ZEPV(NRT,J) = FH*ZEFRO1(NRTM,J)*DZCON1(J)/DELTC

20 CONTINUE

C

C----- AXIAL GEMITTELTE LAMDA*EFF/ESS

C

DO 40 I = 1,NRT

XL(I,1) = 2.*FL(I,1)/DZCON1(1)

DO 50 J = 2,NTOT

XL(I,J) = FL(I,J)*FL(I,J-1)*2./(FL(I,J)*DZCON1(J-1)

+ + FL(I,J-1)*DZCON1(J))

50 CONTINUE

XL(I,NAZP) = 2.*FL(I,NTOT)/DZCON1(NTOT)

40 CONTINUE

C

C----- BERECHNUNG DER WAERMESTROEME QUP UND QDOWN

C

DO 45 I = 1,NRT

QUP = XL(I,16)*(TCOND1(I,15)-TCOND1(I,16))*DELTC + QUP

QDOWN = XL(I,2)*(TCOND1(I,2)-TCOND1(I,1))*DELTC + QDOWN

45 CONTINUE

IF (FLAG) THEN

WRITE(6,111) 'HE16-D2 :',

\$ TIMEC,DELTC,QUP,QDOWN,(TCOND1(2,JJ),JJ = 1,NTOT)

111 FORMAT(1X,A,F7.1,F7.1,' Q + ,Q-',2F7.2,/, ' T = ',18F7.0)

FLAG = .FALSE.

ENDIF

C

C----- GLEICHUNGSSYSTEM AUFBAUEN

C

DO 60 I = 1,NRT

C

A(1,1) = 0.

A(1,2) = ZEPV(I,1) + XL(I,2) + XL(I,1)

A(1,3) = -XL(I,2)

```
B(1) = ZEPV(I,1)*TCOND1(I,1) + XL(I,1)*TRAU(I)
C
DO 70 J = 2,NAZM
  A(J,1) = -XL(I,J)
  A(J,2) = ZEPV(I,J) + XL(I,J + 1) + XL(I,J)
  A(J,3) = -XL(I,J + 1)
  B(J) = ZEPV(I,J)*TCOND1(I,J)
70 CONTINUE
C
A(NTOT,1) = -XL(I,NTOT)
A(NTOT,2) = ZEPV(I,NTOT) + XL(I,NTOT) + XL(I,NAZP)
A(NTOT,3) = 0.
B(NTOT) = ZEPV(I,NTOT)*TCOND1(I,NTOT) + XL(I,NAZP)*TRAO(I)
C ----- IMSL ROUTINE
CALL LEQT2B(A,NTOT,1,1,NTOT,B,1,NTOT,0,UU,NTOT,WORKA,IER)
C
DO 80 J = 1,NTOT
C
  TCOND1(I,J) = B(J)
  IF (J .GT. IPLUS .AND. J .LE. NAZ + IPLUS) TCOND(I,J-IPLUS) = B(J)
80 CONTINUE
60 CONTINUE
IF (IFLAG .EQ. 0) THEN
  WRITE(8,*) TIMEC,TRAU(2),(TCOND1(2,JJ),JJ = 1,NTOT),TRAO(2)
  IFLAG = 201
ENDIF
IFLAG = IFLAG - 1
RETURN
E N D
```

WOLFHE

```
      SUBROUTINE WOLFHE(ICOMP,NAZ,TIMEC,PPTIM,UNUC,UNUCD)
C-----
C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER
C AUTHOR  : WOLFGANG HERING
C ZWECK: SIMULATION DER LEISTUNGSBILANZ DES WOLFRAM-HEIZSTABES
C      MIT BERUECKSICHTIGUNG DER AXIALEN ELEKTRODEN AUS
C      MOLYBDAEN AND KUPFER
```

C

C LETZTE AENDERUNG : 14.11.88

C-----

PARAMETER (IPLUS = 3,IPLUS2 = 6, NDAX = 10, NDRD = 20)

REAL RAX(NDAX + IPLUS2),FLXWID,HEIZER,VORWID,PPTIM,PAXH,PAXV,
+ PAX(NDAX + IPLUS2),UNUC(NDAX),UNUCD(NDAX)

LOGICAL FLAG

COMMON / RANDAT/ TCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2),DZCON1(NDAX + IPLUS2),
+ XCOND1(NDRD,NDAX + IPLUS2), IMATAX(NDRD,NDAX + IPLUS2),
+ AHEIZ(NDAX + IPLUS2), QUP, QDOWN, BOTZ, TOPZ, PI2(2)

DATA REFFL /2.5367E-2/, FLAG /.TRUE./, IFLAG /0/

DATA PREFAC /8.6E-3/, FLXWID /0.0016/

C

CALL DEBUGA ('WOLFHE',JDEBUG)

C

NTOT = NAZ + IPLUS2

C----- AXIALE WIDERSTAENDE

HEIZER = 0.0

VORWID = FLXWID

DO 10 I = 1, IPLUS

J = NTOT - I + 1

RAX(I) = RESI(IMATAX(1,I),TCOND1(1,I)) * DZCON1(I) / AHEIZ(I)

RAX(J) = RESI(IMATAX(1,J),TCOND1(1,J)) * DZCON1(J) / AHEIZ(J)

VORWID = VORWID + RAX(I) + RAX(J)

10 CONTINUE

DO 11 I = IPLUS + 1, NTOT - IPLUS

RAX(I) = RESI(IMATAX(1,I),TCOND1(1,I)) * DZCON1(I) / AHEIZ(I)

HEIZER = HEIZER + RAX(I)

11 CONTINUE

WISUM = VORWID + HEIZER

C----- AXIALE WIDERSTAENDE

IF (FLAG .OR. JDEBUG.GT.0) THEN

WRITE(6,1001)

WRITE(6,'(1X,18F7.1)') QUP,(TCOND1(1,II),II = 1,NTOT),QDOWN

WRITE(6,'(1X,18F7.3)') BOTZ,(DZCON1(II),II = 1,NTOT),TOPZ

WRITE(6,910) VORWID,HEIZER,FLXWID,WISUM

```
ENDIF
1001 FORMAT (/,30('-'),' WOLFHE INITIALISIERUNG ',30('-'))
910  FORMAT(' SOPHISTICATED TUNGSTEN HEATER MODEL',/, ' RIGID.:',E11.3
# , ' HEIZER:',E11.3, ' FLEX.RES.:',E11.3, ' TOTAL:',E11.3,/)
C----- AXIALE HEIZLEISTUNG
      STSQ = PPTIM / WISUM
      STROM = SQRT(STSQ)
      PAXH = 0.0
      PAXV = 0.0
      DO 20 I = 1, IPLUS
        J = NTOT - I + 1
        PAX(I) = STSQ * RAX(I) / DZCON1(I)
        PAX(J) = STSQ * RAX(J) / DZCON1(J)
        PAXV = PAXV + PAX(I) + PAX(J)
20  CONTINUE
      DO 21 I = IPLUS + 1, NTOT - IPLUS
        PAX(I) = STSQ * RAX(I) / DZCON1(I)
        PAXH = PAXH + PAX(I)
        UNUC(I - IPLUS) = PAX(I)
        UNUCD(I - IPLUS) = 0.0
21  CONTINUE
C----- AXIALE LEISTUNG
C
      IF (JDEBUG .GT. 0 .OR. FLAG) THEN
        WRITE(6,*) ' WOLFHE OUTPUT VALUES '
        WRITE(6,920) ICOMP,PPTIM,PAXV,PAXH,STROM,STSQ
920  FORMAT(' ICOMP = ',I3, ' PPTIM = ',F9.2, ' PAXV = ',F9.2,
# ' PAXH = ',F9.2, ' STROM,2 = ',2F9.1)
        WRITE(6,'(A,16I7)') ' IAX:',(JJ,JJ = 1,NTOT)
        WRITE(6,'(A,16F7.1)') ' TC :',(TCOND1(1,JJ),JJ = 1,NTOT)
        WRITE(6,'(A,16F7.4)') ' RAX:',(RAX(JJ),JJ = 1,NTOT)
        WRITE(6,'(A,16F7.2)') ' PAX:',(PAX(JJ),JJ = 1,NTOT)
        WRITE(6,*) ' OUTPUT W/M '
        WRITE(6,'(A,21X,10F7.2,/)' ) ' UNUC',(UNUC(JJ),JJ = 1,NAZ)
        FLAG = .FALSE.
      ENDIF
C
      IF (IFLAG .EQ. 0) THEN
```

```
WRITE(9,*) TIMEC,QUP,(PAX(JJ),JJ = 1,NTOT),QDOWN
```

```
IFLAG = 201
```

```
ENDIF
```

```
IFLAG = IFLAG - 1
```

```
C
```

```
RETURN
```

```
END
```

RATEFU

```
SUBROUTINE RATEFU(ICOMP,NRT,NAZ,XCOND,TIMEC,TRAU,TRAO)
```

```
PARAMETER (NDRD = 20, NDAX = 10, NCOMP = 5, NZEIT = 20)
```

```
REAL TRAND(NCOMP,NCOMP,NZEIT),ZEIT(NZEIT),F(NZEIT + 1),
```

```
+ TRAU(NDRD),TRAO(NDRD),XCOND(NDRD,NDAX),
```

```
+ GRADUL,GRADUR,GRADOL,GRADOR,GRADU,GRADO
```

```
LOGICAL FLAG
```

```
DATA FLAG /.TRUE./, ICE /0/
```

```
C-----
```

```
C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER
```

```
C AUTHOR : WOLFGANG HERING
```

```
C ZWECK : STELLT DIE RANDTEMPERATUREN IN RADIALER RICHTUNG BEREIT
```

```
C
```

```
C LETZTE AENDERUNG : 14.11.88
```

```
C-----
```

```
C EINLESEN DER TEMPERTUREN 1. KOMPONENETE 1...5, 2.ANZAHL DER WERTE
```

```
C DANN: ZWEITE STELLE = 1 ZEIT
```

```
C           = 2 RAND UNTEN LINKS
```

```
C           = 3 RAND UNTEN RECHTS
```

```
C           = 4 RAND OBEN LINKS
```

```
C           = 5 RAND OBEN RECHTS
```

```
C   DRITTE STELLE ZEITLICHER FUNKTIONSWERT
```

```
C-----
```

```
C
```

```
IF(FLAG)THEN
```

```
FLAG = .FALSE.
```

```
OPEN(UNIT = 50)
```

```
READ(50,*)ICO,IPU
```

```
WRITE(6,901)
```

```
IF( ICO .LT. NCOMP .OR. IPU .GT. 20 )THEN
  WRITE(6,*)'***** FEHLER IN RATEFU *****'
  WRITE(*,*)'ABMESSUNGEN DER FELDER NICHT RICHTIG ! ',ICO,IPU
  WRITE(*,*)'ICO =',ICO,' ANZAHL DER KOMPONENTEN =',NCOMP
  STOP 'RATEFU'
ENDIF
IEND=ICO*4+1
DO 10 I=1,IPU
  READ(50,*) ZEIT(I),((TRAND(K,L,I),L=2,5),K=1,ICO)
  WRITE(6,900) ZEIT(I),((TRAND(K,L,I),L=2,5),K=1,ICO)
10 CONTINUE
ENDIF
900 FORMAT (' ZEIT :',F6.0,2(' T= ',3(4F7.1,2X)),/,13X)
901 FORMAT (/,30('-'),' RATEFU INITIALISIERUNG ',30('-'))
```

```
INACH=2
DO 100 I=1,IPU
  IF(ZEIT(I).GT.TIMEC )THEN
    INACH=I
    GOTO200
  ENDIF
100 CONTINUE
200 IVOR=INACH-1
C ----- ZEITLICHES DT
  GRADUL=(TRAND(ICOMP,2,INACH)-TRAND(ICOMP,2,IVOR))/
+ (ZEIT(INACH)-ZEIT(IVOR))
  GRADUR=(TRAND(ICOMP,3,INACH)-TRAND(ICOMP,3,IVOR))/
+ (ZEIT(INACH)-ZEIT(IVOR))
  GRADOL=(TRAND(ICOMP,4,INACH)-TRAND(ICOMP,4,IVOR))/
+ (ZEIT(INACH)-ZEIT(IVOR))
  GRADOR=(TRAND(ICOMP,5,INACH)-TRAND(ICOMP,5,IVOR))/
+ (ZEIT(INACH)-ZEIT(IVOR))

  TRAU(1)= TRAND(ICOMP,2,IVOR)+GRADUL*(TIMEC-ZEIT(IVOR))
  TRAU(NRT)=TRAND(ICOMP,3,IVOR)+GRADUR*(TIMEC-ZEIT(IVOR))
  TRAO(1)= TRAND(ICOMP,4,IVOR)+GRADOL*(TIMEC-ZEIT(IVOR))
  TRAO(NRT)=TRAND(ICOMP,5,IVOR)+GRADOR*(TIMEC-ZEIT(IVOR))
C ----- RADIALES DT
```

```
GRADU = (TRAU(NRT)-TRAU(1))/(XCOND(NRT,1)-XCOND(1,1))
GRADO = (TRAO(NRT)-TRAO(1))/(XCOND(NRT,NAZ)-XCOND(1,NAZ))
DO 300 J=2,NRT-1
  TRAU(J) = GRADU * (XCOND(J,1)-XCOND(1,1)) + TRAU(1)
  TRAO(J) = GRADO * (XCOND(J,NAZ)-XCOND(1,NAZ)) + TRAO(1)
```

```
300 CONTINUE
```

```
C ----- OUTPUT
```

```
IF (ICE .LE. NCOMP) THEN
  WRITE(6,'(A,F8.1,2I4)') ' RATEFU T,ICO,RAD: ',TIMEC,ICOMP,NRT
  WRITE(6,'(A,20F6.1)') ' TRAO: ',(TRAO(JJ),JJ=1,NRT)
  WRITE(6,'(A,20F6.1)') ' TRAU: ',(TRAU(JJ),JJ=1,NRT)
  ICE = ICE + 1
ENDIF
```

```
RETURN
```

```
E N D
```

```
C ----- Ende
```

Danksagung

Für die sorgfältige und konstruktive Durchsicht danke ich den Herren Dr. H. Kapulla und L. Sepold, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT). Für die Überlassung der CORA-Meßdaten danke ich Herrn Dr. S. Hagen, HIT.