

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6166

Lösung thermohydraulischer Aufgaben im Rahmen strukturmechanischer Analysen

Stephan Hermsmeyer

Institut für Reaktorsicherheit

Projekt Kernfusion

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung

Die thermomechanische Analyse fluidgekühlter Strukturen benötigt als wesentliche Randbedingung lokale Temperaturen des Kühlmittels. Das gilt besonders für transiente Analysen von Fusionsreaktorblankets, die in leistungszyklierten Reaktoren starken radialen und zeitlichen Leistungsgradienten ausgesetzt sind und hohe thermische Belastungen erfahren. Dieser Bericht befaßt sich mit der thermohydraulischen Modellierung, die zwar integraler Bestandteil der strukturmechanischen Untersuchungen ist, aber wegen unterschiedlicher Anforderungen an FE-Code und Netzdiskretisierung separat behandelt wird.

Im Bericht wird eine vereinfachte thermische Modellierung des Fluides dargestellt, die - wegen des Verzichtes auf die Lösung der Impulsgleichungen - auch bei ausgedehnten und verzweigten Kühlkanälen mit akzeptablem Aufwand zu bewältigen ist. Die Umsetzung des Modelles in den Finite-Element-Codes FIDAP und ABAQUS wird beschrieben; aus dem Vergleich dieser Codes werden Vorteile einer thermohydraulischen Modellierung mit FIDAP abgeleitet, unter dem Hinweis, daß eine CAD-gestützte vereinheitlichte Netzerzeugung wünschenswert wäre.

Anhand zweier Beispiele wird die Methodik der thermohydraulischen Analyse demonstriert. Dazu zählt die Ausnutzung von Symmetriebedingungen bei der Modellierung eines repräsentativen Blanketausschnittes und die Zerlegung in Untermodelle, Modellvereinfachungen zur Reduzierung des Modellierungsaufwandes und das Einbringen thermohydraulischer Ergebnisse als Randbedingungen in der strukturmechanischen Analyse.

Im Anhang wird ein selbsterstelltes Computerprogramm beschrieben, das die Erzeugung dreidimensionaler Modelle in FIDAP dadurch stark vereinfacht, daß es sukzessive Rotationen und Translationen bei geringem Eingabeaufwand automatisch durchführt.

Abstract

Solving thermal-hydraulic tasks in the context of structure-mechanical analysis

The thermomechanical analysis of fluid-cooled structures depends critically on local coolant temperatures. This is particularly true for transient analyses of fusion reactor blankets that are exposed to large radial and temporal power gradients in power cycling reactors and see large thermal-mechanical loads. This report is concerned with the issue of thermal-hydraulic modelling and analysis that is an integral part of structure-mechanical analyses yet has to be treated separately because of differing needs regarding the finite element code and structure discretisation.

The report presents a simplified thermal no-momentum fluid model that poses acceptable computational cost even for extended and branched cooling systems. The implementation of this model in the finite element codes FIDAP and ABAQUS is described. A comparison of the codes finds advantages for thermal-hydraulic modelling in FIDAP, stressing however, that unified computer-aided-design-based grid generation would be desirable.

Two examples serve the purpose of demonstrating the methodology of the thermal-hydraulic analysis. Key parts of this methodology are the use of symmetry conditions when modelling a representative blanket section, the partitioning into submodels, the simplification of geometrical model features and the feeding thermal-hydraulic results into the structure-mechanic analysis.

Part of the appendix is a description and manual for a computer code that has been written to simplify the design of three-dimensional FIDAP models. The code automates the successive rotation and/or translation of surfaces defined in FIDAP.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an das thermohydraulische Modell	2
2.1	Fluidseite	2
2.2	Strukturseite	4
3	Thermohydraulische Modellierung mit Finiten Elementen	5
3.1	Netzerzeugung in FIDAP 7.6	5
3.1.1	Interaktive Netzerzeugung	7
3.1.2	Hilfsprogramm PROJECT	7
3.1.3	Alternative Netzerzeugung	8
3.2	Thermohydraulische Analyse in FIDAP	8
3.3	Thermohydraulische Analyse in ABAQUS	10
3.4	Vergleich von FIDAP und ABAQUS	11
3.4.1	Stationärer Wärmeeintrag	12
3.4.2	Ungekoppelte Kühlkanäle	13
3.4.3	Hintereinandergeschaltete Kühlkanäle	13
3.4.4	Leistungstransiente	13
3.5	Datenübergabe an strukturmechanischen Code	15
4	FIDAP-Analyse: HCPB Testmodul	16
4.1	Modellierung	18
4.2	Ergebnisse	19

5 FIDAP Analyse: ITER Abschirmblanket	24
5.1 Modellierung	24
5.2 Ergebnisse	27
6 Schlußfolgerungen	31
A Projektionshilfe PROJECT	33
A.1 Beschreibung	33
A.2 Programmaufruf	33
A.3 Beispiel einer Projektion	37
B Inputdecks zum Vergleich FIDAP - ABAQUS	40
B.1 ABAQUS Eingabedatei	40
B.2 FIDAP-Eingabedatei	46

Abbildungsverzeichnis

2.1	Geschwindigkeits- bzw. Temperaturprofil im Kühlkanal	2
3.1	FIDAP: Erzeugung eines geometrischen Modelles	6
3.2	FIDAP: Erzeugen von Projektionen	8
3.3	FIDAP/ABAQUS: FE-Vergleichsmodell	12
3.4	FIDAP/ABAQUS: Vergleich transienter Temperaturverläufe	14
4.1	HCPB-Testblanketmodul für ITER	17
4.2	HCPB: Lage der FE-Modelle im Testblanketmodul	17
4.3	HCPB: FE-Modell der Ersten Wand	19
4.4	HCPB: Reduktion der Kühlzonenmodelle auf 2D	20
4.5	HCPB: Berechnete Fluidtemperaturen im Testmodul	21
4.6	HCPB: Stationäre Temperaturen in der 2. Kühlzone	22
4.7	HCPB: FE-Modell für die strukturmechanische Analyse	23
4.8	HCPB: Umrechnung von Kühlzonentemperaturen	23
5.1	Modul des ITER-Abschirmblankets (inboard #4)	25
5.2	ITER: Aufbau des Abschirmblanketmodelles	26
5.3	ITER: Stationäre Kühlmitteltemperaturen im Abschirmblanket	29
5.4	ITER: Transiente Kühlmitteltemperaturen im Abschirmblanket	30

Tabellenverzeichnis

3.1	FIDAP/ABAQUS: Heliumaufheizspannen und Maximaltemperaturen bei stationärem Betrieb	13
3.2	FIDAP/ABAQUS: Vergleich der transienten Rechnungen . .	15

Kapitel 1

Einleitung

Im Bereich der Fusionsforschung werden im Forschungszentrum Karlsruhe Entwicklungsarbeiten zu Fusionsreaktorblankets durchgeführt, die sich schwerpunktmäßig mit dem Helium Cooled Pebble Bed (HCPB), teilweise aber auch mit ITER Blankets befassen ([1], [2]). Das Institut für Reaktorsicherheit trägt zu diesen Arbeiten u.a. Festigkeitsanalysen bei, die der Bewertung und konstruktiven Auslegung der Blankets dienen. Dabei stellt es sich heraus, daß Blanketspannungen durch die im Betrieb auftretenden thermischen Spannungen dominiert werden.

Die thermohydraulische Analyse mit Finiten Elementen (FE) ermittelt die fluidseitigen Randbedingungen des Blankets während des Betriebes. Dieses Kenntnis ist eine Voraussetzung dafür, daß die strukturmechanische Analyse den Grad an Genauigkeit erreichen kann, der für die Arbeit an einem konkreten Design notwendig ist.

Dieser Bericht beschreibt die bei thermohydraulischen Rechnungen verwendeten Methoden und Werkzeuge. Die vereinfachte Modellierung des Kühlmittels als zentraler Ansatz für ein Modell mit handhabbarer Größe wird ausführlich dargestellt. Grundzüge der Modellierung im FE Code FIDAP 7.6 werden erläutert und Optionen zur Übergabe von Ergebnissen an den strukturmechanischen FE Code beschrieben. Zwei kürzlich durchgeführte Arbeiten - eine zum heliumgekühlten HCPB-Konzept, die andere zum wassergekühlten ITER-Abschirmblanket - illustrieren die Anwendung der beschriebenen Verfahren.

Kapitel 2

Anforderungen an das thermohydraulische Modell

Ziel der thermohydraulischen Analyse in der Blanketauslegung ist es, diejenigen Eigenschaften von Fluid und Struktur zu modellieren, die die transiente Temperatur des Fluides bestimmen; die Tatsache, daß ein erheblicher Teil der Blanketstruktur und des Kühlsystems abgebildet werden muß, zwingt dabei zum sparsamen Umgang mit Knoten. Insbesondere ist es nicht möglich, das Netz im Fluid so fein zu machen, daß die Bewegungsgleichungen der turbulenten Strömung dort gelöst werden können.

2.1 Fluidseite

Das verwendete Fluidmodell lehnt sich an das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil turbulenter Strömungen an, das typischerweise in einer dünnen wandnahen Grenzschicht stark ansteigt bzw. fällt und im übrigen Bereich des Kanalquerschnittes nahezu konstant ist, siehe Abb. 1(a). Diesem Profil ist das FE-Netz im Fluid angepaßt, Abb. 1(b), das im Fluid große Maschen

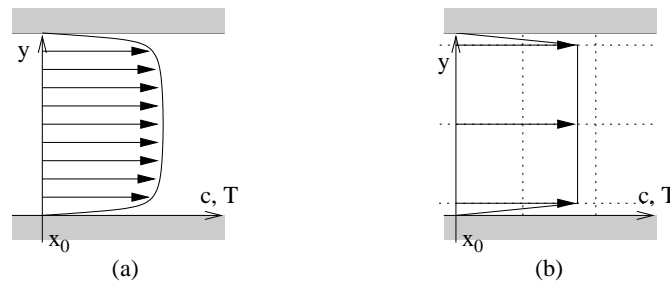


Abbildung 2.1: Geschwindigkeits- bzw. Temperaturprofil im Kühlkanal.

aufweisen darf, während dünne Interface-Elemente den Übergang zur Wand bilden. Es sei aber betont, daß die Dicke der Interface-Elemente frei wählbar ist und in keinem Zusammenhang mit der physikalischen Grenzschichtdicke steht. Das Geschwindigkeitsprofil wird in der Analyse durch einen vorgegebenen Massenstrom definiert; bei vorausberechneter gemittelter Dichte ρ , bekannten Gesamtstömungsquerschnitt A und Kernströmungsquerschnitt A_{kern} und Annahme eines Trapezprofils führt das zu Fluidgeschwindigkeiten

$$c_{trapez} = \frac{\dot{m}}{\rho \frac{A+A_{kern}}{2}} \quad (2.1)$$

in Abb. 1(b).

Der Wärmeübergang von der Struktur zum Fluid an einer Position x wird beschrieben durch

$$\dot{q}_s(x, t) = \alpha(Nu(T, Re))(T_{Wand}(x, t) - T_{Fluid}(x, t)) \quad (2.2)$$

wobei der konstante Wärmeübergangskoeffizient α aus einer Nusseltbeziehung für einen mit konstanter Reynoldszahl durchströmten Kanal folgt. T_{Wand} ist die in x gemittelte Wandtemperatur, T_{Fluid} die über den Querschnitt gemittelte Fluidtemperatur, die in der turbulenten Strömung praktisch dem breiten Temperaturminimum in der Kanalmitte entspricht. Ein Profil mit konstanten Querschnittstemperaturen wird im Rechenmodell dadurch erzielt, daß die Wärmeleitung quer zur Strömungsrichtung sehr groß gesetzt wird, während in Strömungsrichtung die physikalische Wärmeleitfähigkeit λ herrscht. Dadurch liegen am Interface-Element tatsächlich T_{Fluid} und T_{Wand} an, und Gl. (2.2) gibt die Wärmeübertragung korrekt wieder.

Das einzusetzende Fluidodynamikprogramm soll die 1D-Energiegleichung des Kühlmittels entlang der Strömungsrichtung lösen, d.h.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + c \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) - \dot{q}_s(x, t) + \dot{q}_v(x, t), \quad (2.3)$$

mit c_p der spezifischen Wärmekapazität des Kühlmittels und \dot{q}_v einem Quellterm im Fluid.

In (2.3) geht die Fluidgeschwindigkeit c in die Berechnung der Aufheizung des Fluides ein; $\dot{q}_s(x, t)$ ist von der Dicke der Interface-Elemente unabhängig, solange die eingestellte Geschwindigkeit c_{trapez} den Massenstrom korrekt wiedergibt.

Die Mittelung der Dichte über eine Kanallänge führt dazu, daß die Wärmeaufnahme des Fluides am - kalten - Eintritt überschätzt, am heißen Austritt unterschätzt wird. Dieser Fehler wird bei dem beschriebenen Fluidmodell

in Kauf genommen. Im Bereich der Erste-Wand-Kanäle von DEMO liegt die maximale Abweichung an Ein- bzw. Austritt z.B. bei 3.5% [3].

Nachfolgende FE-Modelle machen von der Möglichkeit Gebrauch, Kanalquerschnitte zu vereinfachen, d.h. zum Beispiel runde Kanäle durch rechteckige zu ersetzen. Dabei müssen die Invarianten des Massenstroms ($c \cdot A$) und der Wärmeübertragung ($\alpha \cdot A_{wand}$) erhalten bleiben. Außerdem verändern sich damit Wärmeleitpfade in der Struktur.

In Blanketanwendungen kommt es oft vor, daß das Kühlmittel die Struktur mehrfach durchläuft. Im hier beschriebenen Modell entfällt die aufwendige Lösung von Impulsgleichungen im zwischen den Kanälen liegenden Sammler, während es für die Lösung der Energiegleichung ausreicht, Ein- und Austrittstemperaturen aufeinanderfolgender Kühlkanäle gleichzusetzen, um explizite Iteration zu sparen.

In den in diesem Bericht geschilderten Verfahren brauchen die Impulsgleichungen des Fluides nicht gelöst zu werden, da der Massendurchsatz vorgegeben ist. Damit wird auf die Berechnung von Druckverlusten verzichtet; falls erforderlich, müßten diese in einer separaten Rechnung ermittelt werden.

2.2 Strukturseite

Die elementaren Forderungen an das Wärmeleitungs–Strukturmodell bestehen darin, daß

- ein repräsentativer Ausschnitt aus der Struktur modelliert wird,
- das Verhältnis aus produzierter und abgeführter Wärme repräsentativ sein muß, daß also die Gesamtbilanz erhalten bleiben muß, und daß
- die durch die Struktur definierten Wärmeleitungswege möglichst genau abgebildet werden.

Diese Forderungen beschränken den Grad der zulässigen Vereinfachung. Insbesondere ist das Auftrennen einer Struktur zwischen zwei Kanälen unter Annahme einer adiabaten Trennfläche nur zulässig bei gleichgerichteter Kanalströmung und bekannter Lage der Grenzfläche. Fälle mit entgegengesetzter Strömung (komplizierte adiabate Grenze), ortsabhängigen Wärmequellen und insbesondere transientser Wärmeleistung können nur mit einem geometrisch realitätsnahen Strukturmodell erfaßt werden. Die Anwendungsbeispiele in Kapitel 4 und 5 werden im Hinblick auf diese Empfehlungen kommentiert werden.

Kapitel 3

Thermohydraulische Modellierung mit Finiten Elementen

3.1 Netzerzeugung in FIDAP 7.6

Geometrien sind in FIDAP 7.6 ([4], [5]) durch Punkte (“POINT”), Linien (“LINE”), Flächen (“MFACE”) und Volumina (“MSOLID”) definiert, die durchgehend mit Identifikationskennziffern numeriert und ansprechbar sind. Die Modellierung läuft in der folgenden Weise ab:

1. Definition von Punkten über ihre Koordinaten, wahlweise kartesisch (x, y, z) oder zylindrisch (r, ϕ, z) .
2. Erzeugung von Linien durch Verbindung von jeweils zwei Punkten.
3. Erzeugung von Flächen, die durch mehrere Linien eingeschlossen werden.
4. Erzeugung von Volumina, indem Flächen entlang von Linien in die dritte Dimension projiziert werden.

Abb. 3.1 zeigt die Konstruktionselemente in einer einfachen Geometrie und illustriert, daß die eigentliche Vernetzung durch Teilung der Linien in Abschnitte erfolgt. Weiterführende Informationen sind den FIDAP Handbüchern zu entnehmen.

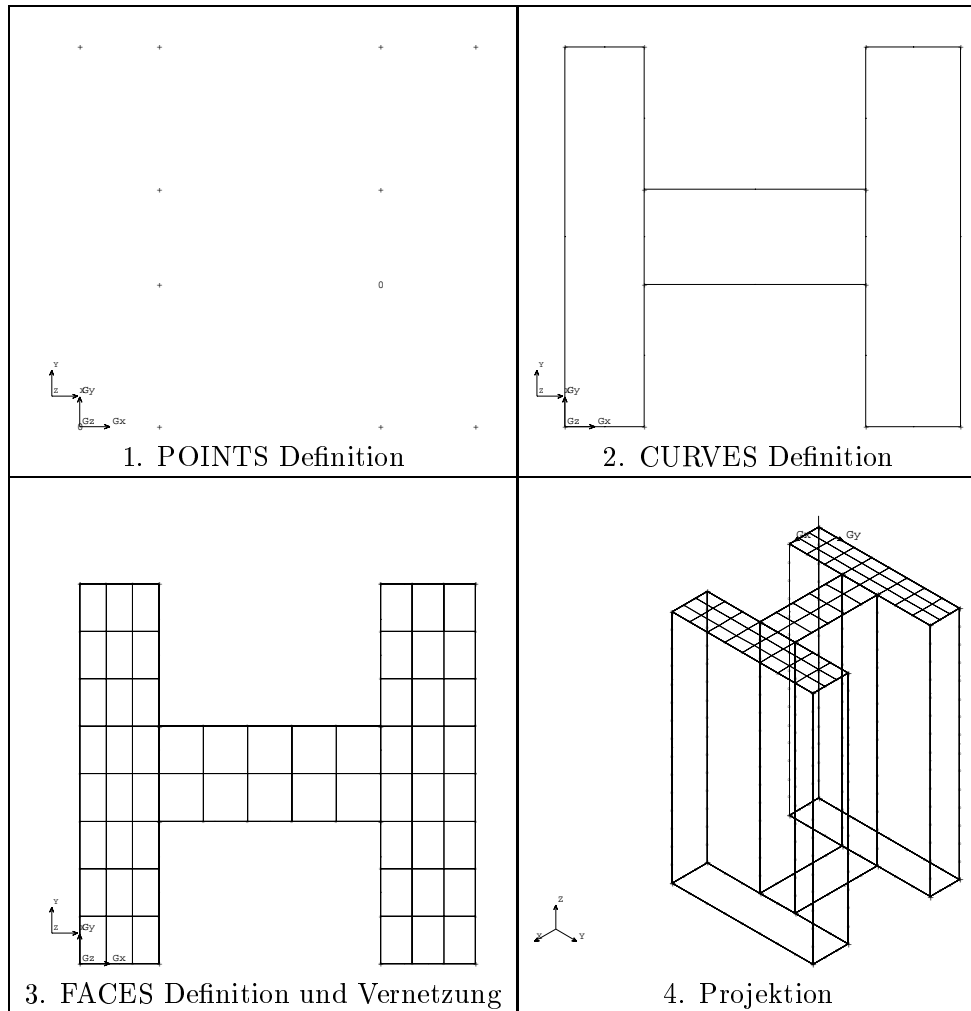


Abbildung 3.1: Erzeugung eines geometrischen Modelles in FIDAP.

3.1.1 Interaktive Netzerzeugung

FIDAP 7.6 besitzt eine graphische Oberfläche, die es erlaubt, die oben genannten Schritte interaktiv auszuführen. Dabei werden alle Eingaben auf eine Datei (Journal file) geschrieben, die in nachfolgenden FIDAP-Läufen als Eingabedatei benutzt werden kann. Interaktives Arbeiten wird leicht umständlich, wenn die Zahl der Grundelemente groß ist (Beispiel). Dann bietet sich eine Kombination an aus interaktiver Erstellung eines Teiles des Modelles und nachfolgender Manipulation des Journal files durch Hinzufügen sich wiederholender Arbeitsschritte und/oder Parameterisierung an. FIDAP 7.6 bietet für eine solche Parameterisierung einfache Elemente wie Variablen (z.B. für IDs von Grundelementen), arithmetische Operationen sowie IF- und DO-Schleifen an.

Die Erzeugung eines 3D-Modelles aus einem bestehenden Querschnitt ist bei großen Modellen ebenfalls unübersichtlich und zeitaufwendig. Um sie zu vereinfachen ist ein Projektionsprogramm erstellt worden, das im nachfolgenden vorgestellt wird.

3.1.2 Hilfsprogramm PROJECT

PROJECT ist ein Programm, das zum Erzeugen eines 3D-Modelles aus einem vorgegebenen Modellquerschnitt dient. Eine parameterisierte Form dieses Querschnittes wird dem Programm vorgegeben, zusammen mit einer Beschreibung der erwünschten Projektion. PROJECT erzeugt lesbaren Code, der mit dem READFILE Kommando in FIDAP eingelesen werden kann und der in FIDAP das 3D-Modell generiert. PROJECT ist in der Makrosprache der Ingenieursoftware MATRIXx [6] geschrieben, das eine einfache Syntax und eine Sammlung leistungsfähiger Unterprogramme besitzt und das in beidem der vielleicht weiter verbreiteten Software MATLAB entspricht. PROJECT kann nur aus MATRIXx heraus aufgerufen werden.

Die Charakterisierung eines Querschnittes in PROJECT beruht auf den Identifikationskennziffern für Punkte, Linien, Flächen und Volumina, die FIDAP vergibt. Jeder Fläche wird ein Projektionsaufpunkt, ein Inkrement für FlächenIDs, sowie eine Materialkennziffer zugeordnet. Außerdem werden die Kennziffern und Koordinaten aller Projektionsaufpunkte definiert. Der entscheidende Vorteil des Programmes ist, daß nach Charakterisierung des Ausgangsquerschnittes beliebig viele Projektionen mit geringem Aufwand, nämlich Definition des Projektionsweges, erzeugt werden können. Die Geometrie in Abb. 3.2 ist mit PROJECT aus dem Querschnitt in Abb. 3.1 erzeugt worden.

Einzelheiten zum Programm werden in Anhang A gegeben.

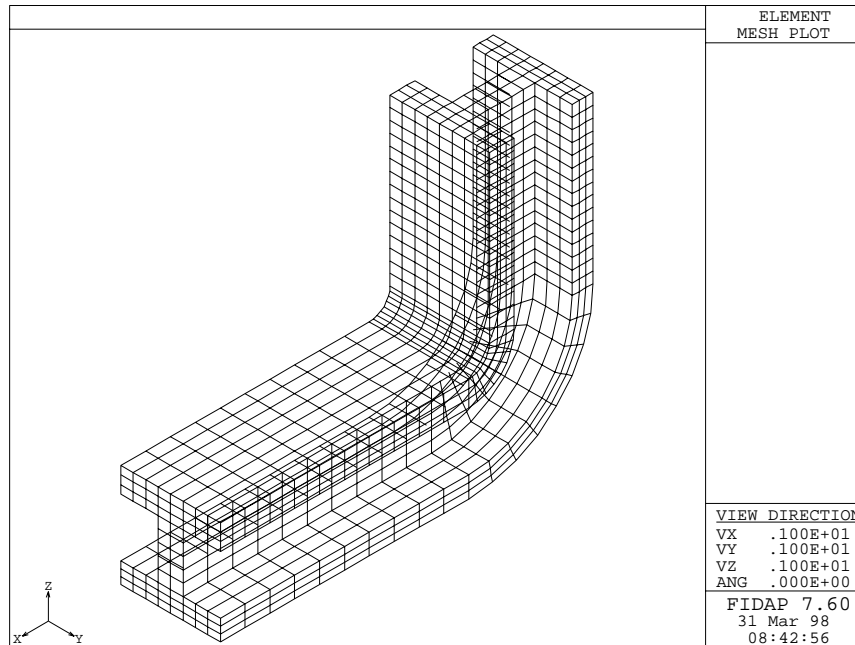


Abbildung 3.2: Erzeugen von Rotations- und Translationsprojektionen mit PROJECT.

3.1.3 Alternative Netzerzeugung

FIDAP 7.6 besitzt IDEAS- und PATRAN-Schnittstellen zum Einlesen von Netzen, die innerhalb eines CAD Programmes erzeugt werden. Ein Zusammenspiel mit dem im IRS vorhandenen CATIA ist bisher nicht erprobt worden, ein Erfolg erscheint aber wegen der eingeschränkten Unterstützung allgemeiner Schnittstellenstandards auch nicht als sicher.

3.2 Thermohydraulische Analyse in FIDAP

Die Möglichkeiten von FIDAP 7.6, das als Fluidcode die Impulsgleichungen des Fluides gekoppelt mit der Energiegleichung in Fluid und Struktur lösen kann, werden für das in Kapitel 2 beschriebene Fluidmodell nicht ausgeschöpft. FIDAP erlaubt aber, das beschriebene Modell als stärkste Vereinfachung eines thermischen Fluidmodelles zu behandeln.

Drei verschiedene Randbedingungen müssen bei dieser Modellierung vorgegeben werden:

1. Die Fließgeschwindigkeit des Kühlmittels muß an den Fluidknoten vorgegeben werden, und zwar als Eingabe, da die Impulsgleichung nicht

gelöst wird. Dabei wird die Geschwindigkeit vom Benutzer so vorgegeben, daß der aus gemittelter Dichte und Profil der Geschwindigkeit errechnete Massenfluß dem vorgegebenen Wert entspricht. Für die zwei weiter unten beschriebenen alternativen Modellierungen des Wärmeüberganges sind unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile anzunehmen. Der entsprechende FIDAP Befehl ist

ICNODE(UZ, CONSTANT = c_z , ENTITY = "kanal")

mit *UZ* der Strömungsrichtung (Alternativen: *UX*, *UY*), c_z der Strömungsgeschwindigkeit in diese Richtung und "kanal" der Bezeichnung des entsprechenden Kanals. Aus dem Zusammenhang $\dot{m} = \rho A c$ ergibt sich, daß \dot{m} und c proportional sind, wenn A und ρ in Strömungsrichtung konstant sind.

2. Die Fluiddomäne braucht eine Temperatureintrittsbedingung.
3. Die Simulation der Abfuhr von Strukturwärme durch ein Fluid erfordert die Modellierung des Wärmeüberganges zwischen Struktur und Fluid. FIDAP gestattet zwei Arten der Modellierung:

A. Modellierung der Übergangsschicht als separate Struktur mit eigenen Stoffwerten, die - von der Wärmeleitfähigkeit abgesehen - identisch sind mit denen des Fluides. Als Wärmeleitfähigkeit wird der dem Wärmeübergangswiderstand äquivalente Wert unter Berücksichtigung der Elementdicke errechnet. Nachteil dieser Methode ist, daß die Übergangsschicht durch Volumina gebildet wird und damit die Komplexität des Modelles erheblich erhöhen kann. Für die Geschwindigkeit ist ein Trapezprofil anzunehmen.

B. FIDAP gestattet die Definition von GAP ("Spalt")-Entities, mit denen an einem Materialübergang, z.B. Struktur/Kühlmittel, ein Wärmeübergangswiderstand angebracht werden kann. Die erforderlichen Befehle sind

ENTITY(NAME = "grenze", GAP = 0, PROPERTY = "g1", ATTACH = "fluid")

HTRANSFER(SET = "g1", CONSTANT = value)

wobei die Lage von "grenze" zwischen der Struktur und dem Fluid "fluid" vorausgesetzt wird. Der Name "g1" dient zur Verknüpfung der Wärmeübergangsdefinition mit "grenze", während *value* der vorgegebene Wärmeübergangskoeffizient ist. Als Geschwindigkeitsprofil muß in diesem Fall ein Rechteckprofil über dem Kanal ohne Zwischenelemente angesetzt werden.

Wärmeleitung und Wärmeerzeugung in der Struktur bleibt von der Fluidmodellierung unberührt.

Schließlich gestattet FIDAP 7.6 die Zusammenlegung des Temperaturfreiheitsgrades an zwei oder mehr beliebigen Knoten. Durch diese Randbedingung kann die Eintrittstemperatur eines Kanals der Austrittstemperatur seines Vorläufers gleichgesetzt werden, die Teil der Lösung ist. Diese Option war in Abschnitt 2.1 zur Modellierung von durch Sammler verbundenen Einzelkanälen gefordert worden.

3.3 Thermohydraulische Analyse in ABAQUS

Zur Modellierung von Zwangskonvektion im Rahmen einer von der mechanischen Analyse *entkoppelten Wärmeleitungsanalyse* (Abschnitt 6.4.2 in [7]) stellt ABAQUS “forced convection” (FC)-Elemente mit der Typbezeichnung DCCiDj bereit, wobei die Zahlenwerte i und j die Dimension und Knotenzahl des Elementes definieren. Im untenstehenden Beispiel werden dreidimensionale Quaderelemente mit 8 Knoten, also DCC3D8, siehe Abschnitt 14.1.4 in [8], benutzt.

Drei verschiedene Randbedingungen müssen bei der Modellierung vorgegeben werden:

1. Der Massenfluß bezogen auf den durchströmten Querschnitt muß an den Knoten der FC-Elemente vorgegeben werden. Der entsprechende ABAQUS Befehl ist

```
*MASS FLOW RATE
Knotenset,  $\dot{m}_x$  ,  $\dot{m}_y$  ,  $\dot{m}_z$ 
```

mit \dot{m}_x , \dot{m}_y und \dot{m}_z den Flußkomponenten in Richtung der Koordinatenachsen¹(Abschnitt 23.13.3 in [9]). Im hier beschriebenen Fall, in dem die Impulsgleichungen nicht gelöst werden, wird der Massenstrom als Eingabe vorgegeben mit

```
*INITIAL CONDITIONS, TYPE = MASS FLOW
Knotenset,  $\dot{m}_x$  ,  $\dot{m}_y$  ,  $\dot{m}_z$ 
```

Die Fluiddarstellung in FIDAP und ABAQUS unterscheidet sich lediglich darin, daß in FIDAP die Komponenten der Fluidgeschwindigkeit

¹In der ABAQUS-Version 5.6 gibt es einen Programmfehler, der auftritt, wenn m_z die Fließrichtung ist und m_x , m_y gleich Null oder klein sind! Die Werte $m_x > 0$ und $m_y = m_z = 0$ führen aber zu korrekten Ergebnissen.

vorgegeben werden. Aus dem Zusammenhang $\dot{m} = \rho A c$ ergibt sich, daß \dot{m} und c proportional sind, wenn A und ρ in Strömungsrichtung konstant sind. In ABAQUS wird darüberhinaus bei $\rho = \rho(T)$ die lokale Geschwindigkeit des Fluides gebildet, die als freie Variable in die Berechnung des Wärmeüberganges (s.u.) eingehen kann.

2. Die Fluiddomäne braucht eine Temperatureintrittsbedingung.
3. Zur Modellierung des Wärmeüberganges zwischen Struktur und Fluid stellt ABAQUS "interface" (IF)-Elemente DINTERi bereit, die mit Struktur- und Fluidknoten definiert werden (Abschnitt 22.5.2 in [9]). Die Beziehung des Wärmeüberganges (1) wird in diesen Elementen nur in Richtung der Flächennormalen angewendet, in dieser Richtung darf das Element auch sehr dünn sein. Der Wärmeübergangskoeffizient wird mit den Anweisungen

```
*INTERFACE
*GAP CONDUCTANCE
Datensatz Wärmeübergang
```

definiert (Abschnitt 23.7.2 in [9]).

Wärmeleitung und Wärmeerzeugung in der Struktur bleibt von der Fluidmodellierung unberührt. Die Option, die Eintrittstemperatur eines Kanals der Austrittstemperatur seines Vorläufers durch Kopplung von Temperaturfreiheitsgraden gleichzusetzen existiert in ABAQUS wie in FIDAP.

Beispiele zur Anwendung von FC-Elementen findet man im Abschnitt 3.1.15 in [10] und im Internet [11].

3.4 Vergleich von FIDAP und ABAQUS

Die Möglichkeit, thermohydraulische Berechnungen in die thermische Analyse in ABAQUS einzubringen, hätte entscheidende Vorteile vor der bestehenden Lösung:

1. Es müßte nur ein, statt zwei, Modelle aufgestellt werden und nur ein FE-Code betrieben werden.
2. Eine Übergabe interpolierter Fluidtemperaturen zwischen FIDAP und ABAQUS würde entfallen.

Bevor Schlüsse gezogen werden, sollen in einer vergleichenden Rechnung die thermohydraulischen Fähigkeiten der Codes direkt verglichen werden.

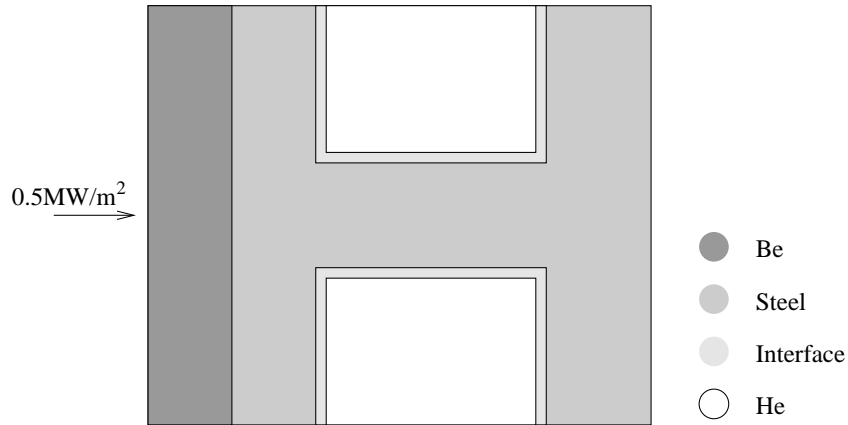


Abbildung 3.3: Ausschnitt aus der Ersten Wand des ITER-Testblanketmodules: radial-poloidaler Querschnitt.

Dazu ist ein 3D Ausschnitt aus der ersten Wand des HCPB-Moduls gewählt worden, siehe Abb. 3.3. Das Modell enthält in poloidaler Richtung zwei halbe Erste-Wand Kanäle, in radialer Richtung erstreckt es sich über 25mm. Die 5mm starke Berylliumschicht auf der Ersten Wand ist Teil des Modelles. In toroidaler Richtung (senkrecht zur dargestellten Ebene in Abb. 3.3) ist das Modell 1000mm lang.

Thermische Lasten sind die an der Berylliumschicht anliegende Oberflächenstrahlung von $50\text{W}/\text{cm}^2$ sowie innere Wärmequellen in Beryllium und Stahl, die zu konstant $8\text{W}/\text{cm}^3$ bzw. $10\text{W}/\text{cm}^3$ angenommen wurden. Die Kanäle werden von Helium gegenläufig durchströmt, dessen Eintrittstemperatur 254.8°C beträgt. Diese Werte sowie alle Stoffdaten stimmen mit den Daten für das ITER Testmodul überein. Sie können den Eingabedateien für ABAQUS und FIDAP entnommen werden, die im Anhang A bzw. B stehen.

3.4.1 Stationärer Wärmeeintrag

In diesem ersten Beispiel wird angenommen, daß der Wärmeeintrag in die Struktur konstant ist. Die Erhaltung der Energie erfordert, daß die vom Fluid abgeführte Wärme der von der Struktur aufgenommenen entspricht. Daraus kann die Aufwärmspanne des Fluides leicht berechnet werden, sie ist

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Oberflaeche}} + P_{\text{Quelle}}}{\dot{m}c_p} \quad (3.1)$$

mit c_p der spez. Wärmekapazität von Helium und $P_{\text{Oberflaeche}}$, P_{Quelle} den oben genannten Leistungstermen.

Fall	Wert	ABAQUS	FIDAP	exakte Lösung
A	ΔT_1	34.6K	33.9K	34.3K
A	$T_{out,1}$	289.4C	288.7C	289.1C
A	ΔT_2	34.6K	33.9K	34.3K
A	$T_{out,2}$	289.4C	288.7C	289.1C
A	T_{max}	517.2C	518.7C	-
B	ΔT_1	41K	39.5K	-
B	$T_{out,1}$	295.8C	294.3C	-
B	ΔT_2	28.6K	28.2K	-
B	$T_{out,2}$	324.4C	322.5C	323.4C
B	T_{max}	537.2C	540.2C	-

Tabelle 3.1: Heliumaufheizspannen und Maximaltemperaturen bei stationärem Betrieb.

3.4.2 Ungekoppelte Kühlkanäle

In einem ersten Fall des Beispiels (A) wird angenommen, daß die Kanäle nicht hintereinandergeschaltet sind, sondern beide die obige Eintrittstemperatur haben. Die Heliumaustrittstemperaturen in Tab. 3.1 zeigen, daß ABAQUS- und FIDAP-Ergebnisse gut mit der exakten Lösung übereinstimmen. Die Temperaturen an Fluidknoten im Austrittsquerschnitt weichen in diesem Beispiel um 0.7K voneinander ab. Schließlich liegen auch die maximalen Strukturtemperaturen, die plasmaseitig im Beryllium auftreten, dicht beisammen.

3.4.3 Hintereinandergeschaltete Kühlkanäle

In diesem Fall (B) wird angenommen, daß das Helium einen Kanal durchströmt und danach im zweiten Kanal zurückgeführt wird. Zu diesem Zweck wird die oben erwähnte Kopplung der Temperaturfreiheitsgrade zweier Knoten im Austrittsquerschnitt des ersten bzw. Eintrittsquerschnitt des zweiten Kanals angewendet. Auch in diesem Fall stimmen alle Werte, die in Tab. 3.1 dargestellt sind, hinreichend gut überein; Fluidtemperaturen im Austrittsquerschnitt weichen um 1.9K voneinander ab. Bei Hintereinanderschaltung verschiebt sich die Aufheizung der Kanäle in der Weise, daß $(\Delta T_1 - \Delta T_2)$ immerhin etwa 12K ist.

3.4.4 Leistungstransiente

In diesem Fall wurde die Volumen- und Oberflächenleistung innerhalb von fünfzig Sekunden linear von null auf Vollast gefahren und dort konstant

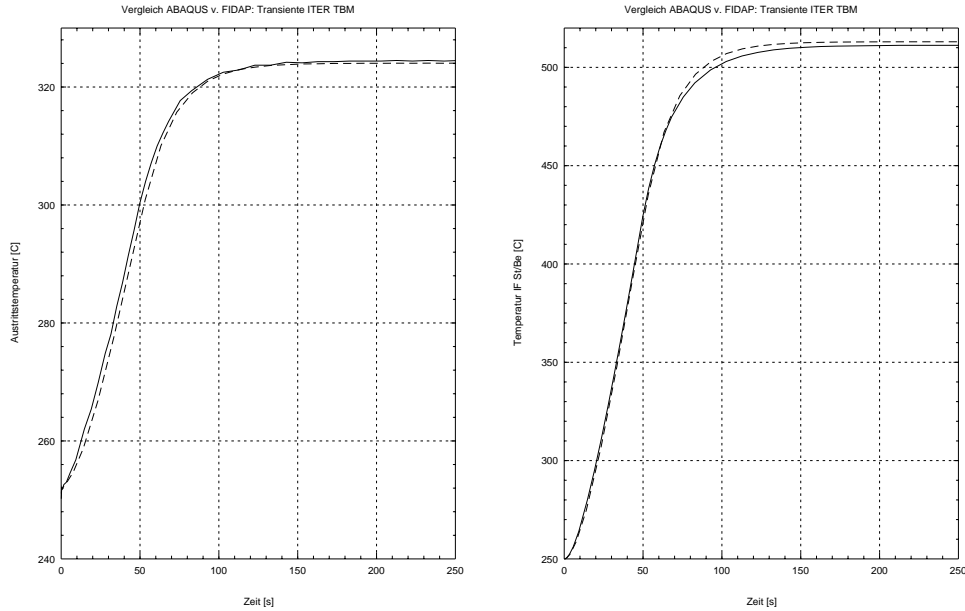


Abbildung 3.4: Transiente Temperaturverläufe im Helium und an der Grenzfläche zwischen Beryllium und Stahl. - - FIDAP, — ABAQUS.

gehalten. Zwei zugehörige Zeitverläufe in einem Zeitraum bis 250 Sekunden sind in Abb. 3.4 dargestellt. Sie beschreiben die Temperaturentwicklung am Heliumaustritt (bei hintereinandergeschalteten Kanälen), und an einem Knoten auf der Grenzfläche zwischen Beryllium und Stahl. Die Transienten aus ABAQUS- und FIDAP-Rechnung stimmen gut überein, Abweichungen liegen bei maximal 2K im Fluid und 1K in der Struktur.

In beiden Fällen wurde vom Programm eine automatische Schrittweitensteuerung vorgenommen. Tab. 3.2 demonstriert die Unterschiede zwischen den beiden Lösungsverfahren bei der Verwendung von Standardwerten. Obwohl Anfangs- und Maximalschrittweite übereinstimmen, braucht ABAQUS 11 Zeitschritte mehr als FIDAP. Das Verhältnis der CPU-Rechenzeiten ist jedoch um ein Vielfaches ungünstiger, ABAQUS benötigt mehr als siebenmal soviel. Eine Analyse der Lösungsverläufe ergibt, daß der wesentliche Nachteil von ABAQUS nicht in der Zahl der ausgeführten Iterationen, sondern im Zeitaufwand für den einzelnen Iterationsschritt, also in der Ineffizienz des Lösungsverfahrens liegt. Es sollte nicht unerwähnt bleiben, daß die ABAQUS-Rechenzeit für diese Transiente auf der CRAY J916/16-4096 im HIK bei 3353.5 Sekunden liegt.

	ABAQUS	FIDAP
Integrationsverfahren	internal	Trapez
Lösungsverfahren	internal	successive substitution
Anfangsschritt/max. Schritt	0.1s / 10s	
Zahl der Schritte bis 250s	43	32
CPU-Rechenzeit (RS/6000 SP)	683.5s	93.4s

Tabelle 3.2: Vergleich der transienten Rechnungen.

3.5 Datenübergabe an strukturmechanischen Code

Wenn die Thermohydraulik im Rahmen der thermischen Analyse in ABAQUS gelöst werden kann, dann entfällt der explizite Schritt einer Datenübergabe. Zwei Gründe sprechen aber gegen diese Vorgehensweise:

1. Der direkte Vergleich ABAQUS/FIDAP spricht hinsichtlich algorithmischer Effizienz und Stabilität der transienten Lösung für FIDAP.
2. Die Verwendung des thermohydraulischen Modelles in ABAQUS setzt eine von der mechanischen Analyse entkoppelte thermische Analyse voraus. Gerade bei Transienten ist es aber vom Postprocessing (Suche von Spannungsmaxima) her günstig, gekoppelt zu lösen.

In den bisherigen Analysen ist stets der Weg gewählt worden, lediglich Fluidtemperaturen entlang dem Strömungspfad, also 1D, von FIDAP an ABAQUS zu übergeben. Dafür sprechen nach wie vor folgende Punkte:

1. Die Anforderungen an das FE-Netz sind verschieden. Insbesondere kann es für die Thermohydraulik nötig sein, einen anderen Blanketausschnitt zu modellieren - wegen unterschiedlich wirkender Randbedingungen oder um den gesamten Strömungspfad abzubilden - oder auch vorteilhaft, Vereinfachungen im Strukturmodell vorzunehmen, die für die mechanische Analyse unzulässig sind.
2. Eine Interpolation der 1D Fluidtemperaturen von ABAQUS auf FIDAP kann mit Ingenieursoftware wie MATRIXx, das hier verwendet wurde, sehr einfach durchgeführt werden, im Gegensatz zur Interpolation von 3D Strukturtemperaturen.
3. Die Wärmeleitanalyse der Struktur in ABAQUS bedeutet nur einen geringen Mehraufwand zur Strukturanalyse.

Kapitel 4

FIDAP-Analyse: HCPB Testmodul

Das Helium-Cooled Pebble Bed (HCPB) Brutblanket ist eines von zwei für DEMO favorisierten Blanketkonzepten [1]. In der ersten ITER-Phase soll u.a. ein HCPB-Testmodul unter Reaktorbedingungen betrieben werden. Im Rahmen der Auslegung solch eines Testmoduls sind thermische und strukturmechanische Analysen mit FIDAP bzw. ABAQUS durchgeführt worden die zeigen sollen, wie groß Modulspannungen im Betrieb mit zyklischer Plasmaleistung werden [12, 13].

Abb. 4.1 zeigt den Aufbau des Testmoduls, mit U-förmig gebogener, stark gekühlter Erster Wand und dahinterliegender Brutzone, die aus horizontalen Keramik- und Berylliumschüttbetten, getrennt durch gekühlte Stahlplatten, besteht. Der Leistungseintrag in das Blanket setzt sich aus einem hohen Wärmestrom auf die Oberfläche der Ersten Wand und radial abfallender Neutronenheizung zusammen.

Die Strömungsführung im Modul ist diesem Leistungseintrag angepaßt: Helium strömt nach dem Eintritt in das Modul zunächst durch die Ersten-Wand-Kanäle, jeweils gegenläufig in benachbarten Kanälen, bevor es in die Kühlplatten im Bereich der Brutzone geleitet wird. Wegen des radialen Leistungsprofils und damit stark unterschiedlicher Kühlungsanforderungen ist die Brutzone in sechs Kühlzonen eingeteilt, in denen die zahlreichen, parallel zur Ersten Wand laufenden Kanäle durch Drosselung unterschiedliche Massenströme transportieren. Die Ströme sind aus einer vorherigen stationären Analyse so vorgegeben, daß die Aufheizung des Heliums in allen Kühlzonen gleich ist.

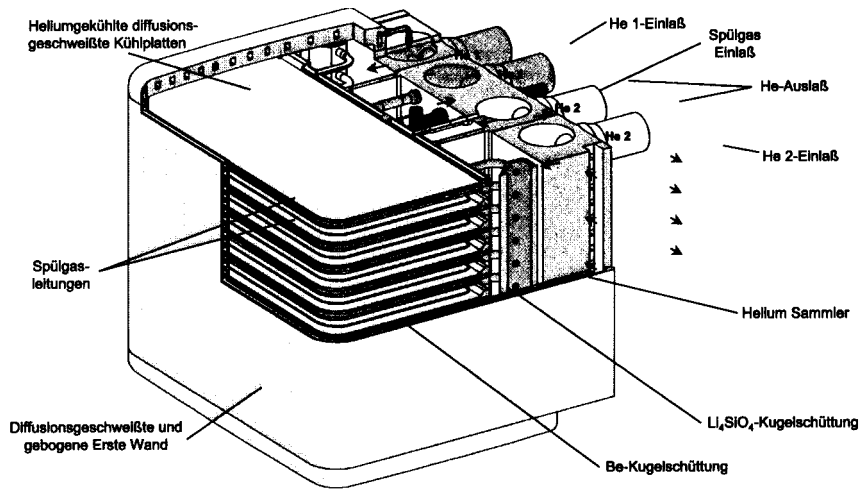


Abbildung 4.1: HCPB-Testblanketmodul für ITER.

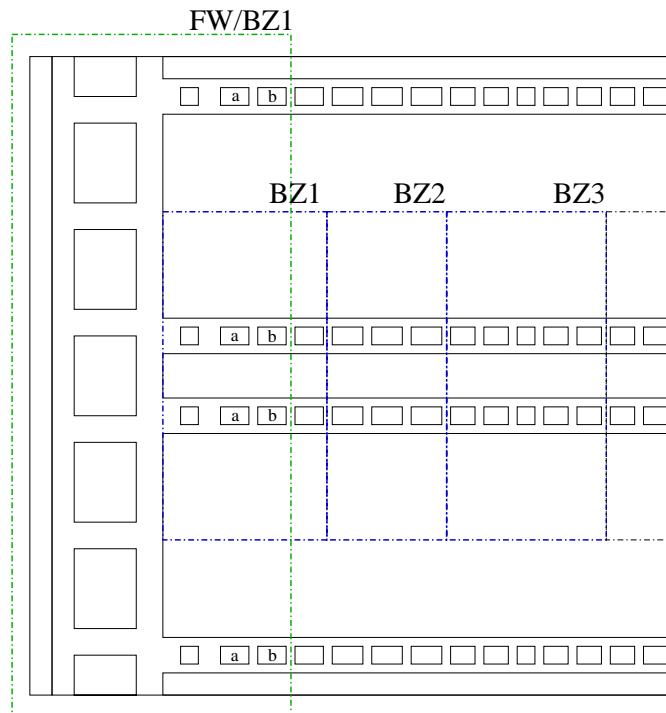


Abbildung 4.2: Lage der FE-Modelle FW/BZ1, BZ2 und BZ3 im Modul. a, b sind die Plattenkühlkanäle, die in FW/BZ1 mitmodelliert werden.

4.1 Modellierung

Eine 3D-Modellierung eines poloidalen Blanketausschnittes über viele Schüttbetten ist wegen der feinen Strukturen im Brutbereich unmöglich, aber aus thermischen Überlegungen heraus auch nicht sinnvoll. Im Brutbereich übertrifft - außer nahe der Ersten Wand - poloidale Wärmeleitung bei weitem die radiale Wärmeleitung [3]. Bei separater Modellierung der Kühlzonen unter der Annahme adiabater Grenzen in radialer Richtung ist daher mit einem nur geringen Fehler zu rechnen. Nur für den Erste Wand-Bereich muß ein Modell erstellt werden, das Wärmeflüsse aus der Brutzone in die Erste Wand widerspiegelt.

Aus dem Aufteilen des Moduls in sieben Einzelmodelle, nämlich Erste Wand/-Erste Kühlzone sowie sechs Kühlzonenmodelle, ergibt sich auch eine flexible Wahl der poloidalen Ausdehnung der einzelnen Modelle: Während das Erste Wand-Modell eine poloidale Höhe von sechs Erste-Wand-Kanälen (= 144 mm) haben sollte, um Randeffekte auf die Verhältnisse in seiner poloidalen Mitte geringzuhalten, gelten in den Kühlzonen periodische Randbedingungen des poloidalen Wärmeflusses bereits für die halbe Höhe.

Abb. 4.2 zeigt schematisch die radiale/poloidale Lage der beschriebenen Modelle:

FW/BZ1: Das FE-Netz dieses Modelles ist in Abb. 4.3 dargestellt. Dünne Elementschichten zwischen Struktur und Helium bzw. Schüttbetten dienen dazu, die an den Materialgrenzen wirksamen Wärmeübergangskoeffizienten vorzugeben.

Das Kühlmittel wird nach seinem Durchlauf durch die Erste Wand in die Kühlplatten der Brutzone geführt. Dieser Strömungsführung wird durch die Kopplung der Temperaturfreiheitsgrade am Erste-Wand-Austritt und Brutzoneneintritt der - geometrisch separierten - Kanäle Rechnung getragen.;

BZ2-6: Abb.4.4(a) illustriert die Reduktion der Zonen im Brutbereich auf ein zweidimensionales Modell, das durch Zusammenlegung der Einzelkanäle zu einem equivalenten Kühlkanal alle Zonen geometrisch ähnlich macht und - nach Mittelung der radial veränderlichen Volumenheizung - die radiale Koordinate einspart. Der radiale Teil der U-förmigen Kühlzone wird dabei als gerade Verlängerung des Mittelteiles modelliert (geometrisch „aufgebogen“), die radial abfallende Volumenheizung in diesem Teil wird als Funktion der Längskoordinate formuliert und den ITER-Verhältnissen nachgebildet. Abb. 4.4(b) zeigt die erste von einundvierzig Maschen, in die das FE-Modell die Fließrichtung auflöst; der radiale Anteil des Kanals wird hierfür gerade gezogen, d.h. in die Richtung seiner plasmazugewandten Mitte

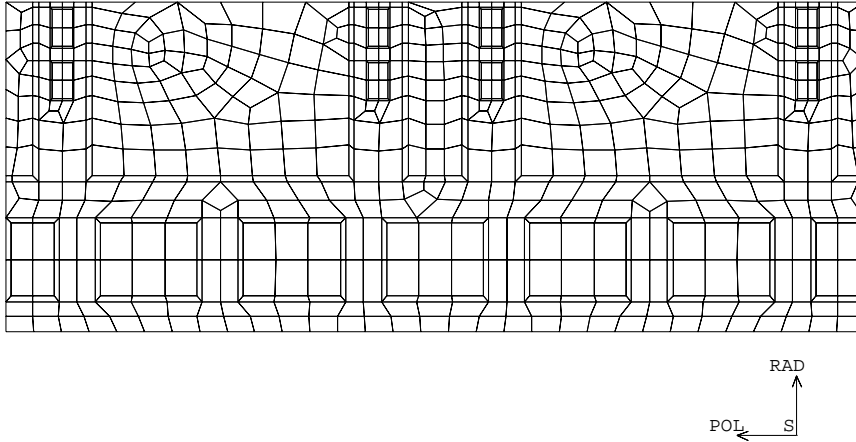


Abbildung 4.3: Radial-poloidaler Querschnitt des FE-Modelles der Ersten Wand FW/BZ1.

gebracht. In FW/BZ1 werden Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Struktur und Fluid/Schüttbetten durch dünne Elementschichten (in Abb. 4.4(b) nicht dargestellt) eingebracht. Die Periodizität des poloidalen Wärmestromes an den Modellgrenzen wird durch die Kopplung zweier Knotenschichten (A-C, B-D), also einen Temperaturgradienten, erzwungen.

Die Fließrichtung in den Kanälen der aufeinanderfolgenden Kühlplatten ist als gegenläufig vorgegeben. Heliumeintrittstemperaturen sind die mit FW/BZ1 gewonnenen Fluidtemperaturen am Erste-Wand-Austritt, die im transienten Fall als Zeitfunktion vorgegeben werden. Alle fünf Teilmodelle BZ2 bis BZ6 (BZ1 wird durch FW/BZ1 besser beschrieben, s.o.) werden nur über die Eintrittstemperaturen der Kühlkanäle mit FW/BZ1 gekoppelt.

4.2 Ergebnisse

Abb. 4.5(a) zeigt für FW/BZ1 stationäre Fluidtemperaturen mit geringen Gradienten in den Seitenwänden und starkem Anstieg im plasmazugewandten Mittelbereich. Ausgeprägte radiale Effekte - radiales Leistungsprofil und dem entgegengesetzt Wärmeflüsse aus der BZ1 in die Erste Wand - werden deutlich am unterschiedlichen Temperaturverlauf in den Plattenkühlkanälen. Die zeitlichen Verläufe der Heliumaustrittstemperaturen während einer Brennphase des ITER-Leistungszyklus sind in 4.5(b) dargestellt. Dieser Zyklus ist

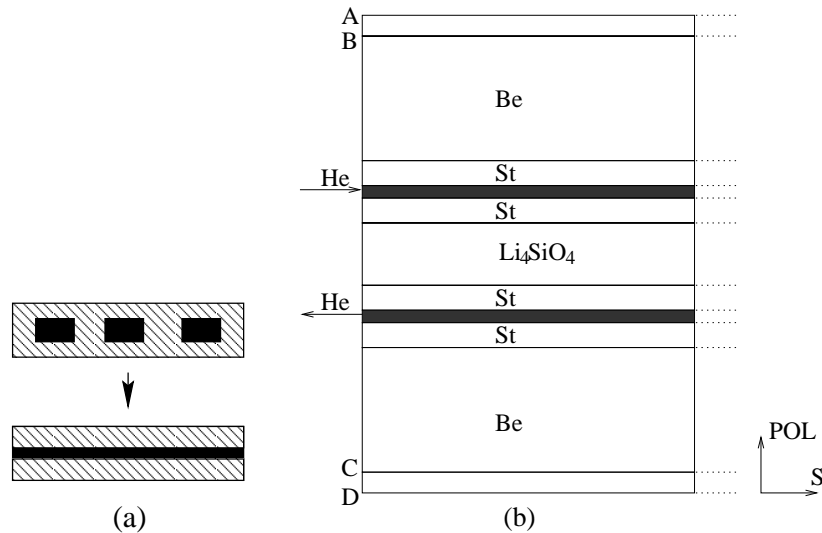


Abbildung 4.4: Reduktion der Kühlzonenmodelle BZi auf zwei Dimensionen. (a) Radial Vereinfachung Kanalmodell, (b) 2D-Modell BZ2-6, Knotenebenen A, B, C, D zur Definition eines Temperaturgradienten als Randbedingung.

in der folgenden Weise definiert: 50s linearer Anstieg von 0 auf 100%, 1000s Brennphase 100%, 100s lineares Abfahren auf 0%, 1000s Ruhephase 0%.

Abb. 4.6(a) zeigt das stationäre Temperaturprofil des Kühlmittels über der Fließrichtung. Abb. 4.6(b) ist ein Schnitt entlang der poloidalen Ausdehnung des Modelles bei der halben Kanallänge: Von Interesse für die strukturmechanische Analyse ist der Temperaturverlauf der Kühlplatten, die hier bei ca. 345°C liegen.

Für die Übergabe an das Strukturmechanikmodell, Abb.4.7, werden die Plattentemperaturen

1. in jedem Zeitschritt und in jeder der einundvierzig BZi-Maschen in Fließrichtung zunächst poloidal gemittelt, so daß eine Stahltemperatur pro Kühlplatte und Laufkoordinate existiert.
2. Für alle Schnittmengen zwischen BZi- und Strukturmodellmaschen werden die lokalen BZ-Temperaturen in Fließrichtung gemittelt. Die Masche A des Strukturmodelles, siehe Skizze Abb.4.8, schneidet sich mit drei Maschen des BZ1; in diesem Fall wird also der Mittelwert über die skizzierten drei Maschen als Beitrag des BZ1 zur Maschen-temperatur von A gewertet.
3. So berechnete Temperaturen aus allen sechs Kühlzonen BZ1 bis BZ6 gehen flächengewichtet in die Umrechnung auf das im Brutbereich sehr grobe Strukturmechaniknetz ein. Strukturmodellmasche B in Abb.

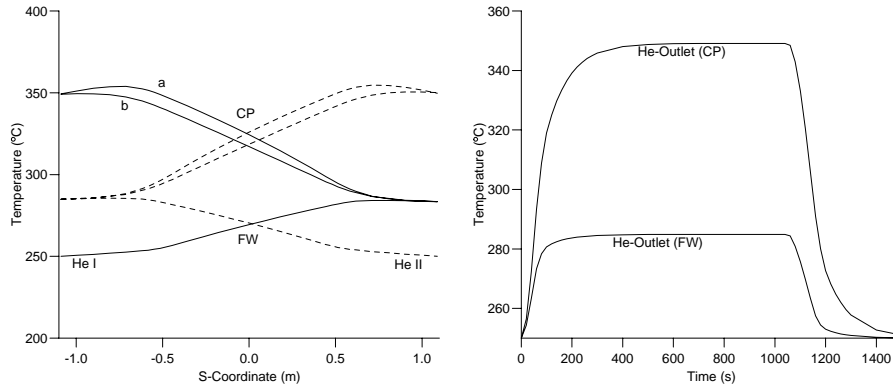


Abbildung 4.5: Fluidtemperaturen im Testblanketmodul, berechnet mit FW/BZ1. links: stationäre lokale Werte mit a, b den Kanälen in der Kühlplatte (CP), He I und HE II den zwei Heliumkreisläufen in der Ersten Wand (FW); rechts: transiente Werte am Kanalaustritt.

4.8 wird zu etwa gleichen Teilen aus Temperaturen von BZ5 und BZ6 bestimmt.

Mit dieser thermohydraulischen Eingabe konnten aus der strukturmechanischen Analyse Zeitpunkt und Ort des Spannungsmaximums während des Leistungszyklus ermittelt werden.

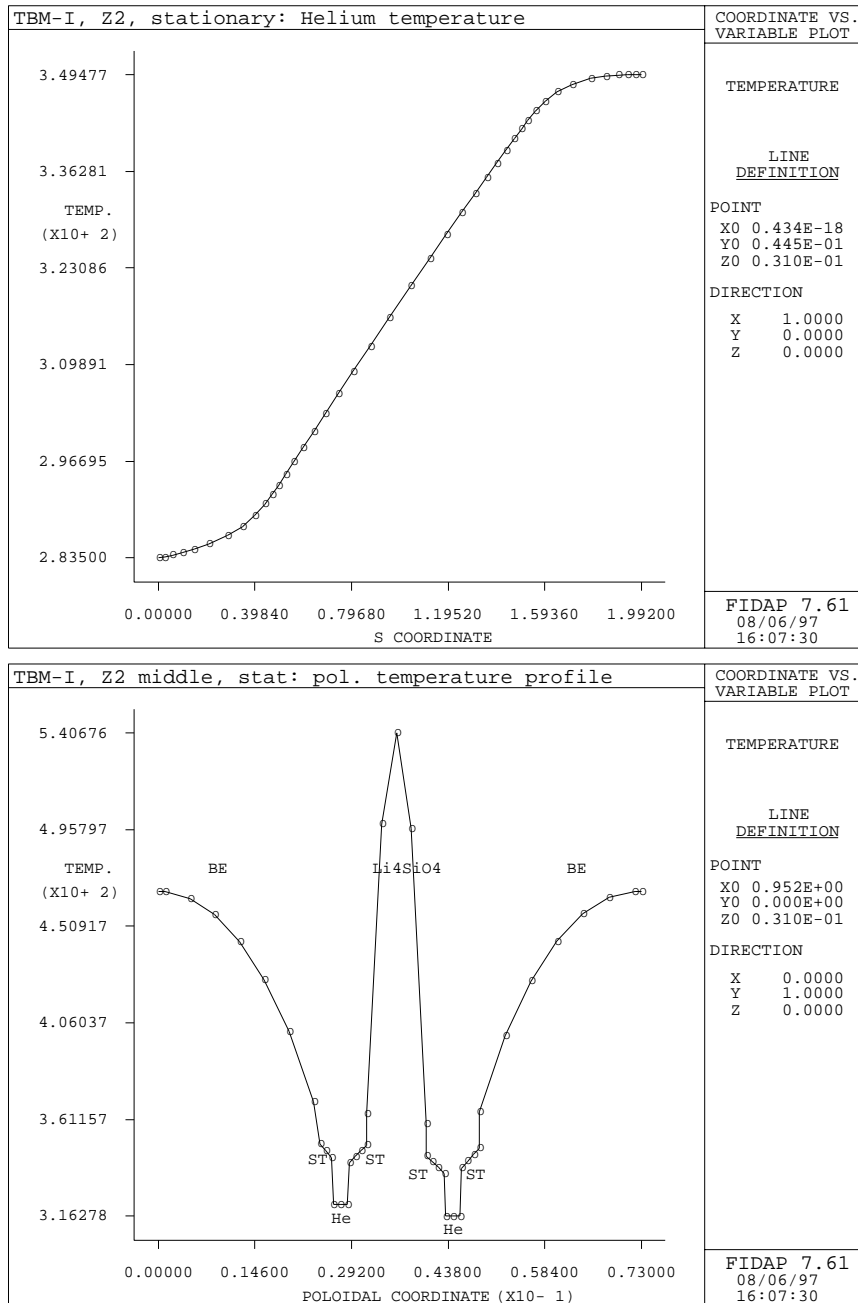


Abbildung 4.6: Stationäre Temperaturen in der zweiten Kühlzone: (a) Helium entlang des Strömungspfad; (b) poloidales Profil in der toroidalen Mitte.

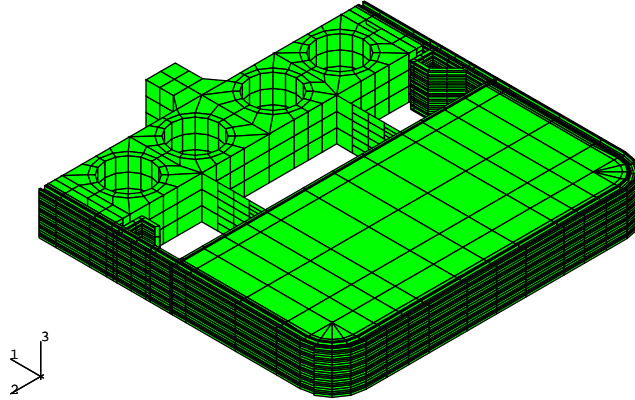


Abbildung 4.7: FE-Modell für die strukturmechanische Analyse.

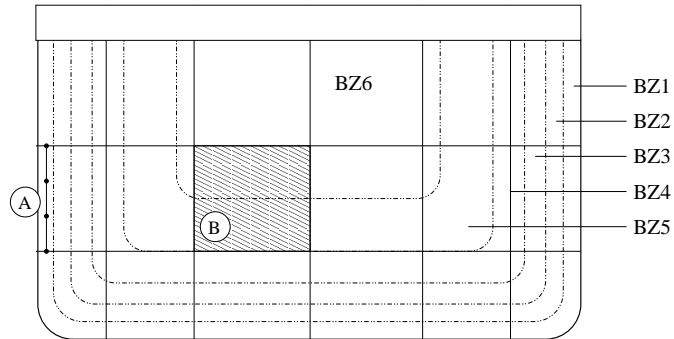


Abbildung 4.8: Umrechnung von Kühlzonen-temperaturen auf das FE-Netz der Brutzone in der strukturmechanischen Analyse. — Strukturmechanik-netz, - · - Grenzen der BZ_i .

Kapitel 5

FIDAP Analyse: ITER Abschirmblanket

In seiner ersten Betriebsphase wird der geplante ITER ein wassergekühltes Abschirmblanket besitzen. Die Kühlung des großen Wärmeeintrages aus Oberflächenwärmestrom und radial abfallender Volumenheizung erfolgt im Abschirmmodul durch radial angepaßte Kühlleistung und durch eine die Wärmeleitung stark verbessernde, auf den Stahlblock gehippte Kupferschicht im Bereich der Ersten Wand. Diese Kombination aus thermisch schneller Erster Wand und langsamer, massiver Rückzone führt zu hohen thermischen Spannungen im Bereich der Ersten Wand, besonders während des in ITER zu fahrenden zyklischen Leistungsbetriebes.

Im Rahmen eines Projektes zur Vorbereitung von Mockup-Tests für das Abschirmblanket wurde die Ermittlung transienter Spannungsverläufe im Modul nötig [2]. Teil der zitierten Arbeit ist die transiente thermohydraulische Analyse des bis 1997 gültigen Designs, Abb. 5.1, die im nachfolgenden beschrieben wird. Die Ergebnisse dieser Analysen sind wenn nicht quantitativ, so doch qualitativ, auf das heute favorisierte Abschirmblanket übertragbar.

5.1 Modellierung

Das Abschirmmodul besitzt einige Charakteristika, die das hier entwickelte thermohydraulische FE-Modell, skizziert in Abb. 5.2 abbilden muß. Dazu zählen:

1. Strömungsführung: Kühlwasser tritt am unteren poloidalen Ende in das Modul, ein und durchströmt die Kanäle der Ersten Wand poloidal und über die gesamte toroidale Breite. Im rückwärtigen Bereich fließt

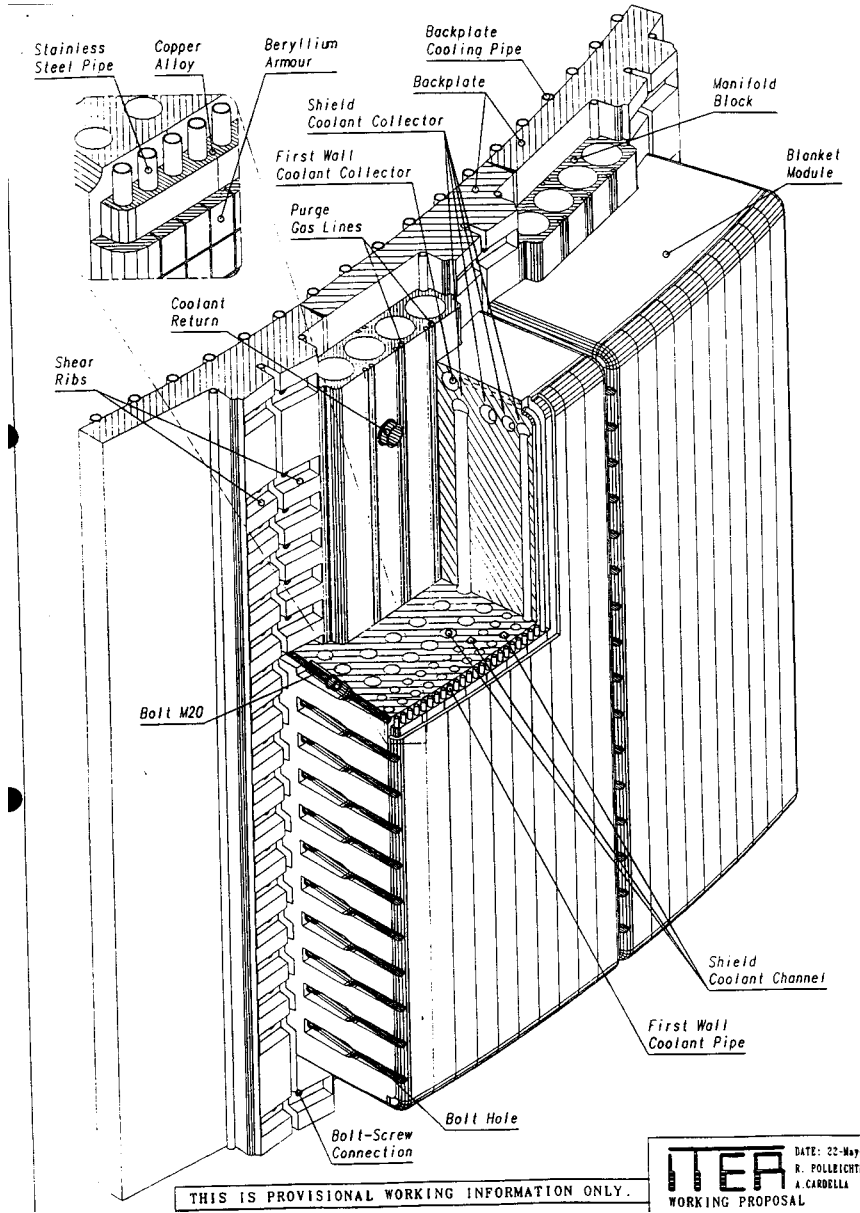


Abbildung 5.1: Modul des ITER-Abschirmblankets (inboard #4).

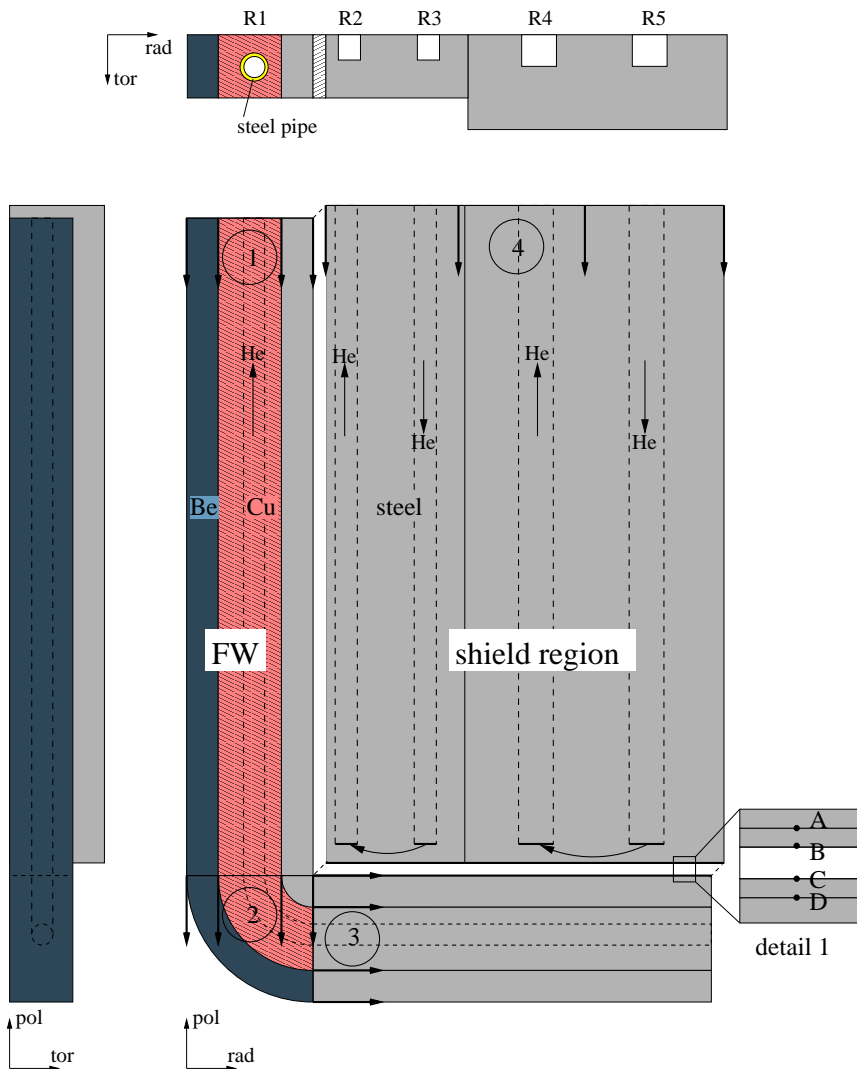


Abbildung 5.2: Schematischer Aufbau des 3D Abschirmblanketmodelles. Darstellung der unteren poloidale Hälfte von M_1 ; die abgesetzt dargestellte Rückzone ist nur am poloidalen Ende nicht mit der FW verbunden (siehe Detail 1). Das 3D-Modell entsteht durch Projektionen 1-4 aus einem radial-toroidalen Querschnittsmodell. R1-R5: 1. bis 5. Kanalreihe; A-D: Knotenebenen, durch deren Kopplung (A-C, B-D) ein identischer Wärmestrom an den Oberflächen des Detail 1 erreicht wird.

das Wasser poloidal zunächst in einer toroidalen Hälfte mäanderförmig von der Rückseite zur Ersten Wand, danach in der zweiten toroidalen Hälfte mäanderförmig wieder zur radial hintersten Kanalreihe, wo es austritt. Um den gesamten Strömungspfad abzubilden, wurde ein FE-Modell in Form einer radial-poloidalen Scheibe erstellt, das bei entsprechend angepaßten Randbedingungen für beide toroidalen Hälften benutzt werden kann. Ein Modell M_1 mit direkter Fluidkopplung zwischen Erste-Wand-Kanal und fünfter Kanalreihe R5 entspricht der zuerst durchströmten Modulseite und wurde zuerst gerechnet; die in Abb. 5.2 skizzierte Strömungsführung entspricht diesem Fall. Für das Modell M_2 der zweiten toroidalen Hälfte wurden die aus M_1 bekannten Austrittstemperaturen, stationär wie transient, als Eingangstemperatur vorgegeben.

2. Poloidale Enden: Da FIDAP eine realitätsnahe 3D Vernetzung der Enden nicht gestattet, wurden Erste Wand und rückwärtiger Bereich in diesem Bereich getrennt modelliert und über eine Kopplung von Temperaturfreiheitsgraden an der Grenzfläche als zusammenhängende Struktur simuliert. Tatsächlich wurden zwei Paare von Knotenebenen, A-C bzw. B-D in Abb. 5.2, miteinander verknüpft um zu gewährleisten, daß der Wärmestrom aus dem rückwärtigen Bereich in die am poloidalen Ende kalte Erste Wand korrekt wiedergegeben wird.
3. Sammler: Das Modell ist in diesem Bereich stark vereinfacht. Sammler werden nicht modelliert, statt dessen werden an den Enden aller Kanäle Ein- bzw. Austrittsquerschnitte modelliert, an denen der Temperaturfreiheitsgrad des Kühlmittels gekoppelt werden kann, z.B. $T_{ein,R4} \equiv T_{aus,R5}$.
4. Fluidmodell: Das in Abschnitt 2 beschriebene Fluidmodell ist in diesem Fall angemessen. Werte der mittels Spalt modellierten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Struktur sind über eine Nusseltbeziehung aus den Strömungsgeschwindigkeiten bekannt, die wiederum aus einer Energiebilanz des Modules stammen.

5.2 Ergebnisse

Die FE-Rechnung liefert lokale Kühlwassertemperaturen, Abb. 5.3, die von einer ersten Auslegungsrechnung [14] dadurch abweichen, daß

- die Aufheizspanne im Erste-Wand-Kanal durch den Wärmezufuß aus dem Blanket in der FE-Rechnung fast 10K größer ist

- Aufheizspannen in der fünften Kanalreihe mit 2K deutlich geringer sind als die überschlägig ermittelten 5K.

Für die strukturmechanische Analyse ist es wichtig, daß über die stationären Kühlmitteltemperaturen hinaus auch lokale transiente Temperaturen während des ITER-Leistungszyklus berechnet werden, wie sie in Abb. 5.4 dargestellt sind. Damit können transiente Temperaturverteilungen in der Struktur berechnet und Zeitpunkt und Wert der maximalen thermischen Spannungen bestimmt werden. Es zeigt sich, daß solche Maximalwerte kurz nach dem An- bzw. Abfahren des Reaktors bei 65 bzw. 1153 Sekunden auftreten. Verformungsbilder illustrieren das mechanische Arbeiten des Moduls im Leistungsbetrieb.

Gegenwärtig wird das FE-Modell dazu eingesetzt, Testbedingungen zu ermitteln, die beim Betrieb eines Mock-up in einer Versuchsanlage ITER-relevante Belastungszyklen bewirken.

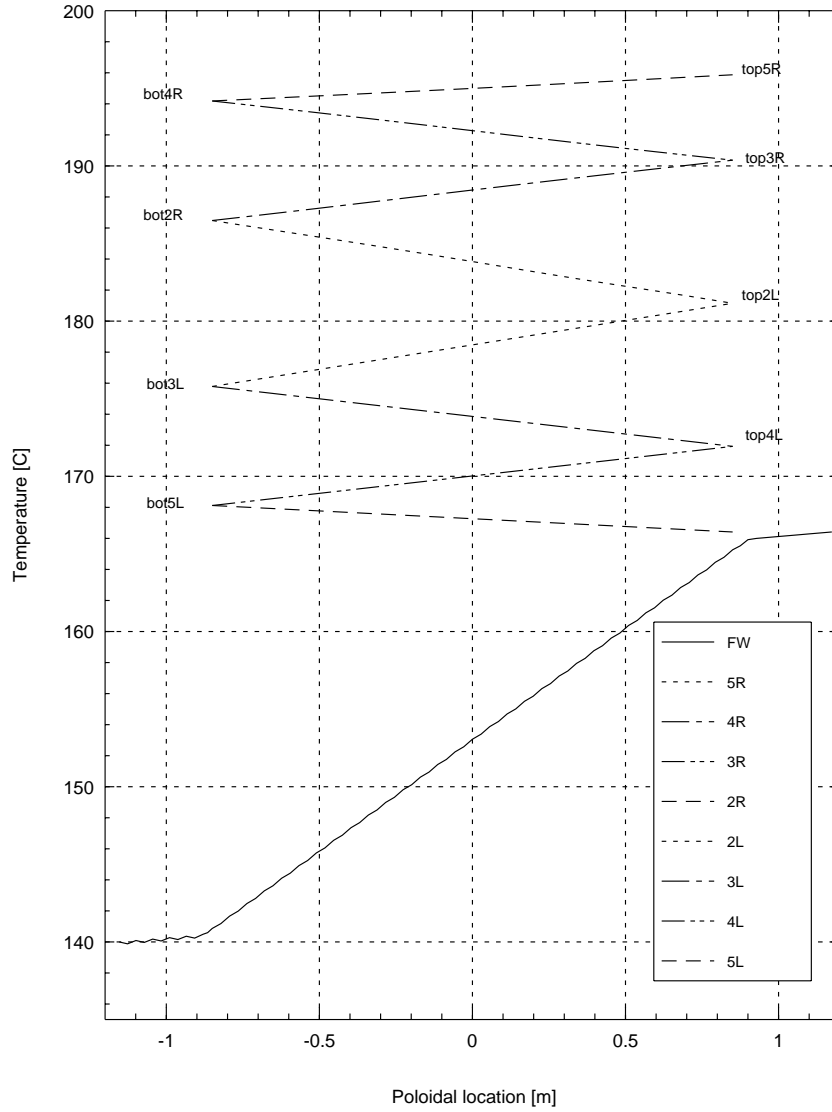


Abbildung 5.3: Stationäre Kühlmitteltemperaturen im ITER-Abschirmblanket.

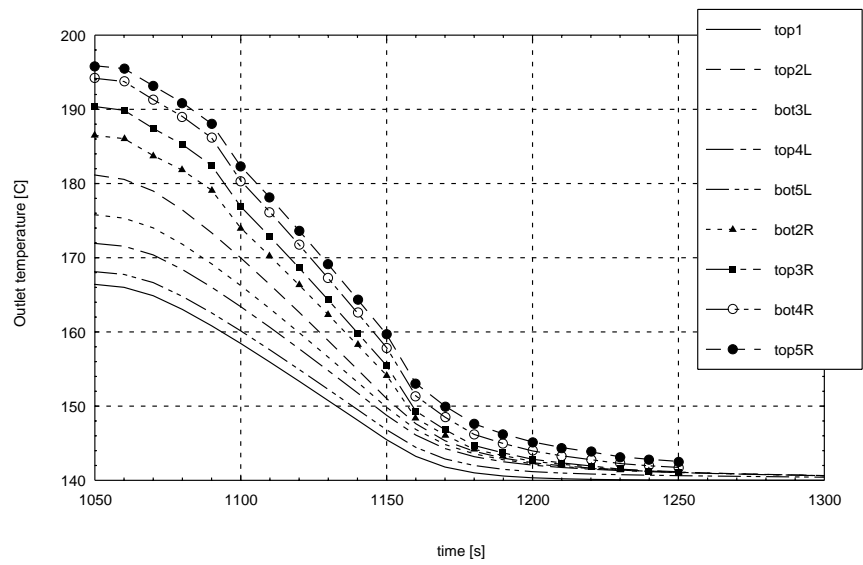
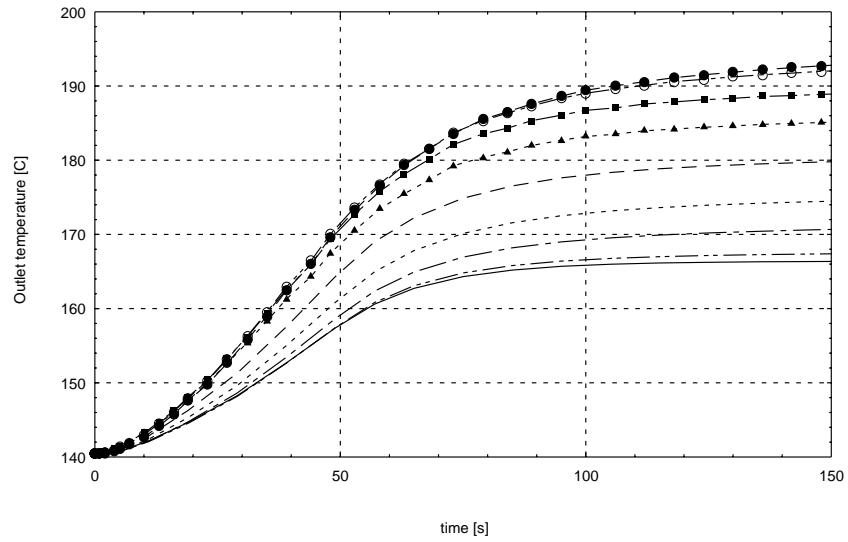


Abbildung 5.4: Transiente Kühlmitteltemperaturen im ITER-Abschirmblanket.

Kapitel 6

Schlußfolgerungen

Ein Verfahren zur thermohydraulischen Analyse ist vorgestellt worden, bei dem Fluidtemperaturen unter Vorgabe von Fluiddichte, Fluidgeschwindigkeit und aus einer Nusseltbeziehung bestimmten Wärmeübergangskoeffizienten ohne Lösung der Impulsgleichungen berechnet werden. In Blanketanwendungen führt dieser Weg auch bei zahlreichen Kühlkanälen noch zu akzeptablen Rechenzeiten und liefert Ergebnisse, die die Güte des Nusseltansatzes reflektieren. Der Aufwand für die alternative Lösung der Impulsgleichungen einer turbulenten Strömung in einem komplexen Kühlkreislauf ist so groß, daß sich die beschriebene Methode bis auf weiteres durchsetzen wird.

Das Strukturmechanikprogramm ABAQUS ist in der Lage, die beschriebene thermohydraulische Aufgabe zu lösen. Eine Zusammenfassung von Thermohydraulik und Strukturmechanik, die den heutigen zweifachen Modellierungsaufwand stark reduzieren würde, empfiehlt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht: ein Vergleich von ABAQUS und FIDAP deutet auf eine ungünstige Implementierung der thermohydraulischen Randbedingung in ABAQUS hin.

Vereinfachungen im Bereich der Netzgenerierung werden von den verbesserten Fähigkeiten heutiger CAD-Programme erwartet. Bezüglich FIDAP ist man dabei noch auf eine Schnittstelle zwischen CAD und FE-Programm angewiesen, über die ein in CAD erzeugtes Netz an das FE-Programm übergeben wird. Eine Integration CAD/FE jenseits der limitierten FE-Fähigkeiten heutiger CAD-Programme zeichnet sich aber sowohl bei FIDAP - Version 8.0 besitzt einen CAD-ähnlichen Preprozessor -, als auch bei ABAQUS ab - für das im IRS eingesetzte CAD-Programm CATIA wird inzwischen ein Modul zur Erzeugung von ABAQUS Eingabedateien angeboten.

Literaturverzeichnis

- [1] L.V. Boccaccini (ed.): "European Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) Test Blanket: ITER Design Description Document". FZKA 6127, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [2] S. Hermsmeyer et al.: Thermal-stress analysis of ITER shield module under power-cycling conditions, Conference Proceedings pp. 1377-1380, SOFT 98, Marseille, France, Sept. 1998.
- [3] P. Norajitra, "Thermohydraulics Design and Thermomechanics Analysis of Two European Breeder Blanket Concepts for DEMO". FZKA 5580, Forschungszentrum Karlsruhe, 1995.
- [4] FIDAP Users Manual. FIDAP Ver. 7.0, 1993.
- [5] FIDAP Update Manual. FIDAP Ver. 7.5, 1995.
- [6] MATRIXx Getting Started (Win NT/95). MATRIXx Ver. 6.0, 1998.
- [7] ABAQUS/Standard User's Manual. ABAQUS Ver. 5.6, Vol.1, 1996.
- [8] ABAQUS/Standard User's Manual. ABAQUS Ver. 5.6, Vol.2, 1996 .
- [9] ABAQUS/Standard User's Manual. ABAQUS Ver. 5.6, Vol.3, 1996.
- [10] ABAQUS/Standard Example Problems Manual. ABAQUS Ver. 5.6, Vol.1, 1996.
- [11] URL <http://www.hks.com/applications/cont-casting/>
- [12] M. Lenartz: Persönliche Mitteilung, 1998.
- [13] M. Lenartz et al.: Thermal-mechanical analysis of the European HCPB ITER test blanket module, Conference Proceedings pp. 1373-1376, SOFT 98, Marseille, France, Sept. 1998.
- [14] L. Bruno, Persönliche Mitteilung, 1996.

Anhang A

Projektionshilfe PROJECT

A.1 Beschreibung

PROJECT ist ein Werkzeug zur erleichterten Erstellung projizierbarer 3D-Geometrien in FIDAP. Ausgehend von einem definierten Querschnitt und einer Anzahl von Projektionsvorschriften erzeugt das Programm lesbaren FIDAP-Code, der an den vorher existierenden Code zur Beschreibung des Querschnittes angefügt wird. Als Projektion sind sowohl Translation als auch Rotation verfügbar. PROJECT ist in der Programmiersprache des Programmpaketes MATRIXx geschrieben und wird aus dem Programm XMATH heraus aufgerufen, das im DCE seit Anfang 1999 nicht mehr zur Verfügung steht und deshalb im IRS auf einem lokalen PC unter Windows NT läuft. Zur korrekten Ausführung einer Projektion müssen die Dateien **project.msf**, **bol2idx.msf** and **coo_axes.msf** im aktuellen Verzeichnis vorhanden sein. Normalerweise wird man die potentiell aufwendige Parametereingabe aber nicht interaktiv durchführen, sondern ein MATRIXx-Skriptfile dazu benutzen. Diese Datei muß den Suffix *.ms tragen, also z.B. example.ms, und aus einer Abfolge von MATRIXx Befehlen bestehen.

Im Anhang A.3 ist das Listing einer solchen Datei gegeben.

Im folgenden wird die Anwendung des Programmes mit Definition seiner Eingabe- und Ausgabedaten und dem Programmaufruf beschrieben. Die Funktion des Programmes wird anhand der Beispielgeometrie aus Abschnitt 3.1 erläutert.

A.2 Programmaufruf

Der volle Aufruf des Programmes aus XMATH heraus lautet

[CS_out, PP_out, LASTID_out, TXT_out] = project(CS, PP, PR, LASTID, INCID, {EN, EID, COO, IDAX})

Dabei sind die Variablen links Ausgabedaten, die auf der rechten Seite die vom Benutzer vorzugebenden Eingabedaten.

CS[n,4] Die Querschnittsmatrix CS enthält die für das Programm wichtigen Informationen über die in FIDAP definierten Flächen (MFACEs).

$$QS = \begin{bmatrix} ID_{MFACE1} & IDX_{P1} & W_1 & IDX_{EN1} \\ ID_{MFACE2} & IDX_{P2} & W_2 & IDX_{EN2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_{MFACE_n} & IDX_{P_n} & W_n & IDX_{EN_n} \end{bmatrix}$$

Jedem MFACE, das durch die Identifikationsnummer ID_{MFACE_i} gekennzeichnet ist, werden drei Kennwerte zugeordnet. Der Wert IDX_{P_i} ist ein Index auf den i-ten Punkt in der Projektionspunktematrix PP, also auf den Punkt, von dem die Projektion des entsprechenden MFACE ausgeht. W_i ist die Wertigkeit des MFACE, also die Zahl der neuen MFACEs, die durch die Projektion erzeugt wird. Schließlich ist IDX_{EN_i} ein Index auf die Entity-Matrix EN, der besagt, welcher Entity das erzeugte MSOLID angehören wird.

PP[m+4,4] Die Matrix PP beschreibt die Projektionspunkte, von denen die Projektion der Flächen ausgeht und die jeweils Eckpunkt der zugeordneten Fläche sein müssen. Sie hat die Dimension [m+4,4], mit m der Anzahl der Projektionspunkte, wobei die ersten vier Zeilen eine Definition des Koordinatensystems enthalten, in dem die Punktekoordinaten gegeben sind:

$$PP = \begin{bmatrix} TYP_{COO} & ID_{COO} & 0 & 0 \\ 0 & x_{P1} & y_{P1} & z_{P1} \\ 0 & x_{P2} & y_{P2} & z_{P2} \\ 0 & x_{P3} & y_{P3} & z_{P3} \\ ID_{PP1} & x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_{PPm} & x_m & y_m & z_m \end{bmatrix}$$

TYP_{COO} ist 1 für kartesische, 2 für zylindrische Koordinaten, ID_{COO} ist die Kennzahl des Koordinatensystems, die mit der von FIDAP vergebenen ID übereinstimmen muß. P_1 ist der Ursprung des KOO-Systems, P_2 definiert die Richtung der x-Achse, nämlich $(x_{P2} - x_{P1}, y_{P2} - y_{P1}, z_{P2} - z_{P1})$, und P_3 ist ein Punkt in der xy-Ebene; wird die x-Achse in diesen Punkt gedreht, so ist damit das rechtsdrehende

KOO-System eindeutig definiert. In der fünften Zeile beginnt die Definition der Projektionsaufpunkte. Hier sind die ID_{PP_i} die von FIDAP vergebenen Punkt-IDs, die Koordinaten werden durch die (x_i, y_i, z_i) repräsentiert.

PR[1,7] oder **PR[1,10]** ist ein Zeilenvektor, der die Projektionsvorschrift enthält. Dieser Vektor kann in zwei unterschiedlichen Formen auftreten. Bei Translationen ist sein Aufbau

$$PR = \left[x_{TR} \quad y_{TR} \quad z_{TR} \quad n_{int} \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3 \right]$$

mit der Translation (x_{TR}, y_{TR}, z_{TR}) und n_{int} der Anzahl der Intervalle auf der Projektionsachse. p_1, p_2 und p_3 sind Parameter, die der MEDGE-Befehl in FIDAP zur flexiblen Intervalleinteilung fordert. Sind sie null, dann ist die Einteilung equidistant. Wird explizit ein KOO-System an PROJECT übergeben, dann ist PR in diesem System zu verstehen; andernfalls ist die Translation im KOO-System der Matrix PP zu verstehen. Bei Rotationsprojektion ist der Vektor

$$PR = \left[x_{P_1} \quad y_{P_1} \quad z_{P_1} \quad x_{TR} \quad y_{TR} \quad z_{TR} \quad n_{int} \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3 \right]$$

d.h. es muß der Ursprung P_1 des KOO-Systems übergeben werden, das für die Rotation definiert wird. Die anderen Parameter entsprechen denen der Translation, wobei aber die Rotation in zylindrischen Koordinaten angegeben wird.

Beim Erzeugen von FIDAP-Code stützt sich PROJECT auf die IDs der verwendeten geometrischen Elemente, d.h. Punkte, Kurven, MFACEs und MSOLIDS. Die Übereinstimmung mit den von FIDAP vergebenen IDs ist kritisch für die Anwendung des Programmes.

LASTID[1,4] ist ein Zeilenvektor mit dem die zum Beginn der Projektion höchsten belegten Kennzahlen LID an PROJECT übergeben werden.

$$LASTID = \left[LID_{POINT}, LID_{CURVE}, LID_{MFACE}, LID_{MSOLID} \right]$$

Diese Werte können in FIDAP/FI-GEN mit dem LASTID()-Kommando abgefragt werden. Die Information ist essentiell für die Buchhaltung der IDs geometrischer Elemente.

INCID[1,4] Ebenso wichtig wie LASTID ist die Zunahme der geometrischen Elemente pro Projektion. Der Zeilenvektor INCID enthält diese Information und ist vom Benutzer vorzugeben

$$INCID = \left[INC_{POINT}, INC_{CURVE}, INC_{MFACE}, INC_{MSOLID} \right]$$

Die Parameter entsprechen denen für LASTID. Die Bestimmung von INCID kann entweder durch Abzählen am FIDAP-Querschnitt erfolgen oder dadurch, daß eine einzige Projektion mit INCID=[0,0,0,0] durchgeführt wird. Nach Aufruf dieser Projektion in FIDAP ergibt sich INCID als Differenz aus LASTID nach der Projektion und LASTID vor der Projektion.

Die folgenden Eingabeparameter, die im Programmaufruf in geschweiften Klammern stehen, sind optional.

EN[1,1] und **EID[1,1]** beziehen sich auf die Vergabe von ENTITY-Namen im 3D-Modell.

$$EN = \begin{bmatrix} EN_1 \\ EN_2 \\ \vdots \\ EN_t \end{bmatrix}$$

mit den EN_i den ENTITY-Namen, z.B. $EN_1 = \text{''Stahl''}$. Die Matrix CS besitzt in ihrer vierten Spalte für jedes MFACE einen Index in die EN -Matrix. Ein durch Projektion aus dem MFACE entstandenes MSOLID erhält den durch diesen Index gekennzeichneten ENTITY-Namen. Stünde in CS für ein MFACE eine 1 in der vierten Spalte, so würde das dieser Zeile entsprechende MSOLID den Namen EN_1 , also z.B. "Stahl" erhalten.

EID ermöglicht eine weitergehende Art der Bezeichnung: Allen ENTITY-Namen in EN wird der Zeichenfolge EID, z.B. EID="R", angehängt. Werden mehrere Projektionen hintereinander ausgeführt, so kann EID zur Unterscheidung der MSOLIDS dienen, ohne daß EN neu definiert werden muß.

COO[4,4] ist eine Matrix, die ein ggf. benötigtes neues Koordinatensystem definiert. Im Normalfall beziehen sich Projektionen auf das Ursprungs-koordinatensystem. Gerade bei Rotationsprojektion ist es aber sinnvoll, ein neues KOO-System im Rotationsmittelpunkt zu definieren und Projektionsangaben darauf zu beziehen.

$$COO = \begin{bmatrix} TYP_{COO} & ID_{COO} & 0 & 0 \\ 0 & x_{P1} & y_{P1} & z_{P1} \\ 0 & x_{P2} & y_{P2} & z_{P2} \\ 0 & x_{P3} & y_{P3} & z_{P3} \end{bmatrix}$$

Die Definition der Parameter ist identisch mit der Koordinatensystem-Definition in der PP -Matrix.

Die Definition neuer KOO-Systeme ist einer Beschränkung unterworfen: Eine Achse des neuen KOO-Systems muß identisch sein mit einer Achse des alten KOO-Systems in *PP*. Die Information, welche Achsen identisch sind, muß an PROJECT gegeben werden.

IDAX[1,2] leistet diese Aufgabe, indem es die Indizes zwei einander entsprechender Achsen an das Programm übergibt

$$IDAX = \left[ID_{ax,alt}, ID_{ax,neu} \right]$$

Z.B. könnte $ID_{ax,alt} = 2$ (also die y-Achse), $ID_{ax,neu} = 3$ (also die z-Achse) sein.

Die drei ersten Ausgabedaten von PROJECT entsprechen in ihrer Form den Eingabedaten CS, PP und LASTID. **CS_out** ist die dem Eingangs-MFACE im MSOLID gegenüberliegende Fläche, die bei einer anschließenden Projektion wiederum als Eingangsgröße dient. Ebenso ist **PP_out** die Menge der in **CS_out** liegenden Projektionspunkte, **LASTID_out** die auf neuesten Stand gebrachte Menge der IDs geometrischer Elemente. Sind diese drei Parameter gegeben, so ist der Aufwand für eine anschließende Projektion in der gleichen "Richtung" mit der Bestimmung der Projektionsdaten PR und ggf. COO gering.

TXT_out ist die eigentliche FIDAP-lesbare Ausgabe des Programmes, nämlich eine Liste der Befehle, die FI-GEN zum Erzeugen der Projektion benötigt. TXT_out kann auf eine Datei geschrieben werden (siehe Beispiel).

A.3 Beispiel einer Projektion

```
# Data section

1 PP1 = [1, 1, 0, 0; 0, 0, 0, 0; 0, 1, 0, 0; 0, 1, 1, 0; 1, 0, 0, 0; 4, 19, 9, 0];
2 CS1=[ 1, 1, 6, 1; 2, 2, 3, 1; 3, 2, 5, 1];
3 LASTID1 = [12, 14, 3, 0];
4 INCID1 = [12, 26, 17, 3];
5 EN = ["ST"];

6 M1 = [0, 0, 0];
7 PR1 = [0,0,-40,0,15,0,0,0];
8 M2 = [30,0, 0, -40,0];
```

```

9 PR2 = [M2, 0, -90, 0, 4, 0, 0, 0];
10 M3 = [30.0, 0, -70.0];
11 PR3 = [0,0,-60.0,10,0,0,0];

12 COO1 = [1, 2, 0, 0; 0, M1; 0, M1+[10,0,0]; 0, M1+[0,10,0]];
13 COO2 = [2, 3, 0, 0; 0, M2; 0, M2+[-10,0,0]; 0, M2+[0,0,10]];
14 COO3 = [1, 4, 0, 0; 0, M3; 0, M3+[0,0,10]; 0, M3+[0,10,10]];

15 [CS2,PP2,LASTID2,TXT2]=project(CS1,PP1,PR1,LASTID1,INCID1,EN,"-L",COO1);
16 [CS3,PP3,LASTID3,TXT3]=project(CS2,PP2,PR2,LASTID2,INCID1,EN,"-RL",COO2,[2,3]);
17 [CS4,PP4,LASTID4,TXT4]=project(CS3,PP3,PR3,LASTID3,INCID1,EN,"-FW",COO3,[3,2]);

18 SET sessionDiary " example.txt"
19 display([TXT2;TXT3;TXT4]);
20 remove sessionDiary

```

Kommentare zu den einzelnen Zeilen

- 1 In MATRIXx-Notation wird eine Matrix durch rechteckige Klammern eingeschlossen, Elemente sind durch Kommata und Zeilen durch Semikola getrennt. In PP1 werden Punkt 1 (0,0,0) und Punkt 4 (19,9,0) als Projektionsaufpunkte definiert (letzte zwei Zeilen). Die Punkte sind gegeben im kartesischen KOO-System 1 (erste Zeile), das in den Zeilen 2 bis 4 definiert ist. Die Punkte 1 und 4 sind in Abb. 3.1 gekennzeichnet.
- 2 Die Querschnittsmatrix hat drei Zeilen, in denen die MFACES 1 bis 3 (in Bild 3.1 von links nach rechts) beschrieben sind. MFACE 1 in Zeile 1 hat Punkt 1 als Projektionspunkt, die folgenden MFACES haben Punkt 4. Die Wertigkeit des ersten MFACE ist 6, entsprechend der Anzahl der Linien, die das MFACE begrenzen. Bei MFACE 2 ist eine der Begrenzungslinien bereits durch die Projektion von MFACE 1 abgedeckt, es bleiben 3 Begrenzungslinien. MFACE 3 schließlich hat ebenfalls 6 Linien, von denen eine mit MFACE 2 gemeinsam ist, so daß die Wertigkeit 5 bleibt. Schließlich haben alle MFACES den Entity-Index 1, der auf das erste Element in EN, also "ST" (für Stahl) verweist.
- 3 Nach Erstellen des Querschnittes in Bild 3.11-3 gibt es 12 Punkte, 14 Linien und 3 Flächen.

- 4** Pro Projektion werden 12 Punkte auf der dem Ausgangsquerschnitt gegenüberliegenden Ebene erzeugt; die Zahl der Linien erhöht sich um 14 für den neuen Querschnitt plus 12 für die Verbindung der Punkte. Die Zahl der MFACES erhöht sich um 3 für den neuen Querschnitt plus 14 zwischen Ursprungsquerschnitt und neuem Querschnitt. Für jedes der drei MFACES ergibt sich bei der Projektion ein MSOLID.
- 5** Auf diesen Materialnamen wird in der Querschnittsmatrix verwiesen.
- 6,8,10** M1, M2 und M3 sind die Mittelpunkte dreier zu definierender Koordinatensysteme. Die Definition der Mi ist sinnvoll, da diese Vektoren in die PRi und COOi mehrfach eingehen.
- 7,9,11** PR1 und PR3 definieren Translation (0,0,-40) und (0,0,-60) in den mit ihnen an PROJECT übergebenen KOO-Systemen; PR2 definiert eine Rotation und enthält deshalb den Rotationsmittelpunkt M2.
- 12,13,14** COO1 und COO3 sind kartesische, COO2 ein zylindrisches KOO-System. Die Definition der KOO-Achsen unter Verwendung der Mittelpunkte Mi ist der Übersichtlichkeit wegen sinnvoll.
- 15,16,17** Zeigen drei Aufrufe des Projektionsprogrammes. Die Eingabedaten CS1, PP1, LASTID1, INCID1 und EN für die erste Projektion sind manuell eingegeben worden. Nachfolgende Projektionen übernehmen die auf der linken Seite stehenden Ausgabedaten der vorherigen Projektion und erfordern lediglich die Definition einer Projektion PR, eines KOO-Systems COO und der KOO-Zuordnung IDAX.
- 18,19,20** Im Beispiel wird eine Reportdatei "example.txt" geöffnet und mit den erzeugten FIDAP-Befehlen in TXT2, TXT3 und TXT4 beschrieben. Der Befehl "display([TXT2;TXT3;TXT4]);" wird als erste Zeile auf der Reportdatei abgelegt und muß bei dem Einbinden in FIDAP manuell entfernt werden.

Anhang B

Inputdecks zum Vergleich FIDAP - ABAQUS

B.1 ABAQUS Eingabedatei

```
*HEADING
test
*SYSTEM
0., 0., 0., 0., 0., 1.
0., -1., 0.
*NODE, NSET = CS1
1, 0., 0., 0.
3, 0.005, 0., 0.
5, 0.01, 0., 0.
8, 0.024, 0., 0.
10, 0.03, 0., 0.
601, 0., 0.024, 0.
603, 0.005, 0.024, 0.
605, 0.01, 0.024, 0.
608, 0.024, 0.024, 0.
610, 0.03, 0.024, 0.
205, 0.01, 0.009, 0.
208, 0.024, 0.009, 0.
405, 0.01, 0.015, 0.
408, 0.024, 0.015, 0.
*NGEN, NSET = CS1
1, 3, 1
3, 5, 1
8, 10, 1
601, 603, 1
603, 605, 1
608, 610, 1
205, 208, 1
405, 408, 1
1, 601, 100
2, 602, 100
3, 603, 100
4, 604, 100
5, 205, 100
205, 405, 100
405, 605, 100
206, 406, 100
```



```

207, 407, 100
8, 208, 100
208, 408, 100
408, 608, 100
9, 609, 100
10, 610, 100
*SYSTEM
*NCOPY, OLD SET = CS1, CHANGE NUMBER = 40000, SHIFT, NEW SET = CS2
1.,
, , , , , , , ,
*NFILL, NSET = ALLS
CS1, CS2, 40, 1000
** -----
** ELEMENTE DER BERYLLIUMSCHICHT
**
**
*ELEMENT, TYPE = DC3D8
101, 1, 2, 102, 101, 1001, 1002, 1102, 1101
*ELGEN, ELSET = COAT
101, 6, 100, 100, 2, 1, 1, 40, 1000, 1000
*ELSET, ELSET = FW, GEN
101, 40101, 1000
201, 40201, 1000
301, 40301, 1000
401, 40401, 1000
501, 40501, 1000
601, 40601, 1000
**
** -----
** ELEMENTE IM STAHL
**
**
*ELEMENT, TYPE = DC3D8
103, 3, 4, 104, 103, 1003, 1004, 1104, 1103
*ELGEN, ELSET = ST
103, 6, 100, 100, 2, 1, 1, 40, 1000, 1000
**
*ELEMENT, TYPE = DC3D8
305, 205, 206, 306, 305, 1205, 1206, 1306, 1305
*ELGEN, ELSET = ST
305, 2, 100, 100, 3, 1, 1, 40, 1000, 1000
**
*ELEMENT, TYPE = DC3D8
108, 8, 9, 109, 108, 1008, 1009, 1109, 1108
*ELGEN, ELSET = ST
108, 6, 100, 100, 2, 1, 1, 40, 1000, 1000
**
** -----
** OBERER HE - KANAL
**
*SYSTEM
0., 0., 0., 0., 0., 1.
0., -1., 0.
*NODE
100001, 0.0101, 0.0151, 0.
100004, 0.0239, 0.0151, 0.
100204, 0.0239, 0.024, 0.
100201, 0.0101, 0.024, 0.
*NGEN, NSET = INLO
100001, 100201, 100
100004, 100204, 100
100001, 100004, 1
100101, 100104, 1
100201, 100204, 1

```



```

400101, 5, 1005, 1105, 105, 200001, 201001, 201101, 200101
*ELGEN, ELSET = HTU
400101, 2, 100, 100, 1, 1, 1, 40, 1000, 1000
*ELEMENT, TYPE = DINTER4
400302, 205, 1205, 1206, 206, 200201, 201201, 201202, 200202
*ELGEN, ELSET = HTU
400302, 1, 100, 100, 3, 1, 1, 40, 1000, 1000
*ELEMENT, TYPE = DINTER4
400105, 8, 108, 1108, 1008, 200004, 200104, 201104, 201004
*ELGEN, ELSET = HTU
400105, 2, 100, 100, 1, 1, 1, 40, 1000, 1000
**
**
** =====
**
** Materialdefinition
**
** SOLID SECTION, ELSET=ST,MATERIAL=T91
** MATERIAL,NAME=T91
**
** DENSITY
7630.
**
** CONDUCTIVITY
29.0
**
** SPECIFIC HEAT
448.85, 0.
523.04, 200.
562.69, 300.
609.96, 400.
671.75, 500.
754.96, 600.
754.96, 10000.
**
**
** SOLID SECTION, ELSET=COAT,MATERIAL=BE
** MATERIAL,NAME=BE
**
** DENSITY
1850.
**
** CONDUCTIVITY
183., 0.
137., 200.
122., 300.
110.5, 400.
102., 500.
95., 600.
90., 700.
77.5, 10000.
**
**
** SPECIFIC HEAT
1940., 0.
2385., 20.
2550., 300.
2675., 400.
2790., 500.
2890., 600.
2990., 700.
2990., 10000.
**
**
** SOLID SECTION,ELSET=HEO,MATERIAL=HE

```

```

*SOLID SECTION,ELSET=HEU,MATERIAL=HE
*MATERIAL, NAME = HE
**
*DENSITY
7.14
**
**CONDUCTIVITY
**100.
*CONDUCTIVITY, TYPE = ORTHO
0.257, 1.E5, 1.E5
**
*SPECIFIC HEAT
5200.
**
**
** =====
**
*INTERFACE,ELSET=HTO
*GAP CONDUCTANCE
4484.0
**
*INTERFACE,ELSET=HTU
*GAP CONDUCTANCE
4484.0
**
*NSET, NSET = CO
100102, 140102, 1000
**

*NSET, NSET = CU
200102, 240102, 1000
** =====
*RESTART, WRITE, FREQ = 5
**
** Initial/boundary conditions
**
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=TEMPERATURE
ALLO, 250.
ALLU, 250.
**
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=MASS FLOW
ALLO, 367.
ALLU, -367.
**
*NSET, NSET = ST, ELSET = ST
*NSET, NSET = COAT, ELSET = COAT
*NSET, NSET = HEO, ELSET = HEO
*NSET, NSET = HEU, ELSET = HEU

** =====
**
*STEP, INCR = 10
*HEAT TRANSFER, STEADY STATE
**
*DFLUX
FW, S6, 0.5E6
**
COAT, BF, 8.0E6
ST, BF, 10.0E6
**
*BOUNDARY
INLO, 11, 11, 254.8
INLU, 11, 11, 254.8
**

```

```
** _____  
**  
** Output control  
**  
**  
*EL PRINT, ELSET = ST  
TEMP, HFL, MFR  
*EL PRINT, ELSET = HTO  
TEMP, HFL, MFR  
*EL PRINT, ELSET = HEO  
TEMP, HFL, MFR  
*NODE PRINT, NSET = ST  
NT11,  
*NODE PRINT, NSET = COAT  
NT11,  
*NODE PRINT, NSET = HEO  
NT11,  
*NODE PRINT, NSET = HEU  
NT11,  
*NODE PRINT, NSET = ST, TOTAL = YES  
RFLE,  
*NODE PRINT, NSET = HEO, TOTAL = YES  
RFLE,  
**  
*END STEP  
**
```

B.2 FIDAP-Eingabedatei

```

TITLE
ABAQUS test: FIDAP reference model
FIPREP
PROB (3-D, STEA, NONL, NOMO, ENER)
EXEC( NEWJOB)
OPTI (UPWI)
SOLU (S.S. = 10)
SCALE(X = 0.001, Y = 0.001, Z = 0.01 )
PRIN (NONE)
ENTI (NAME = "def", PLOT)
ENTI (NAME = "in1", PLOT)
ENTI (NAME = "out1", PLOT)
ENTI (NAME = "in2", PLOT)
ENTI (NAME = "out2", PLOT)
ENTI (NAME = "PLASMA", PLOT)
ENTI (NAME = "ST", SOLI, PROP = "st")
ENTI (NAME = "BE", SOLI, PROP = "be")
ENTI (NAME = "HE1", FLUI, PROP = "he1")
ENTI (NAME = "HE2", FLUI, PROP = "he2")
ENTI (NAME = "HT1", GAP = 0.000, PROP = "ht1", ATTA = "HE1")
ENTI (NAME = "HT2", GAP = 0.000, PROP = "ht2", ATTA = "HE2")
DENS (SET = "st", CONS = 7630.0)
DENS (SET = "be", CONS = 1850.0)
DENS (SET = "he1", CONS = 7.14)
DENS (SET = "he2", CONS = 7.14)
SPEC (SET = "be", CURV = 8, TEMP)
.0000000000E+00, .2000000000E+03, .3000000000E+03, .4000000000E+03,
.5000000000E+03, .6000000000E+03, .7000000000E+03, .1000000000E+05,
.1940000000E+04, .2385000000E+04, .2550000000E+04, .2675000000E+04,
.2790000000E+04, .2890000000E+04, .2990000000E+04, .2990000000E+04
SPEC (SET = "st", CURV = 7, TEMP)
.0000000000E+02, .2000000000E+03, .3000000000E+03, .4000000000E+03,
.5000000000E+03, .6000000000E+03, .1000000000E+05, .4488500000E+03,
.5230400000E+03, .5626900000E+03, .6099600000E+03, .6717500000E+03,
.7549600000E+03, .7549600000E+03
SPEC (SET = "he1", CONS = 5200.0)
SPEC (SET = "he2", CONS = 5200.0)
COND (SET = "st", CONS = 29.0)
COND (SET = "be", CURV = 8)
.0000000000E+00, .2000000000E+03, .3000000000E+03, .4000000000E+03,
.5000000000E+03, .6000000000E+03, .7000000000E+03, .1000000000E+05,
.1830000000E+03, .1370000000E+03, .1220000000E+03, .1105000000E+03,
.1020000000E+03, .9500000000E+02, .9000000000E+02, .7750000000E+02
COND (SET = "he1", CONS = 1.0, NONI)
.1000000000E+06, .0000000000E+00, .0000000000E+00, .0000000000E+00,
.1000000000E+06, .0000000000E+00, .0000000000E+00, .0000000000E+00,
.2570000000E+00
COND (SET = "he2", CONS = 1.0, NONI)
.1000000000E+06, .0000000000E+00, .0000000000E+00, .0000000000E+00,
.1000000000E+06, .0000000000E+00, .0000000000E+00, .0000000000E+00,
.2570000000E+00
HTRA (SET = "ht1", CONS = 4484.0 )
HTRA (SET = "ht2", CONS = 4484.0 )
SOUR (HEAT, CONS = 10.0E+06, ENTI = "ST")
SOUR (HEAT, CONS = 8.0E+06, ENTI = "BE")
BCNO (TEMP, EXCL, ENTI = "in1", CONS = 254.8)
BCNO (TEMP, EXCL, ENTI = "in2", CONS = 254.8)
BCFL (HEAT, ENTI = "PLASMA", CONS = 0.5E+06)
ICNO (UZ, CONS = 52.60, ENTI = "HE1")
ICNO (UZ, CONS = -52.60, ENTI = "HE2")
END( )

```