

Diss. ETH 14416

# **Investigating BWR Stability with a New Linear Frequency-Domain Method and Detailed 3D Neutronics**

A Dissertation Submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH  
for the Degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by

**PHILIPP HÄNGGI**

Dipl. Phys. ETH  
born December 19, 1968  
Citizen of Rickenbach (SO), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. G. Yadigaroglu, examiner  
Prof. Dr. J. Blomstrand, co-examiner  
PD Dr. J. Halin, co-examiner

2001



# Abstract

Using frequency-domain methods, sparse matrix techniques and advanced numerical algorithms a new computer program MATSTAB has been developed to predict the core stability characteristics of a boiling water nuclear reactor. The code uses the same thermal-hydraulic model as the transient code RAMONA-3B and the same neutronic model as the online steady-state core simulator POLCA. This includes three-dimensional neutronics and an individual representation of each fuel assembly (no lumping).

The very large set of equations is linearized and leads to a generalized eigenvalue problem which is solved iteratively using a combination of Newton's method and sub-space decomposition. The tailor-made algorithm calculates the first few dominating eigenvalues (decay ratios) and their left and right eigenvectors. MATSTAB not only predicts global, but also regional oscillations. A comparison between the decay ratios of the two oscillation types allows to judge which mode will occur.

Using MATSTAB and the interface to the online steady-state core simulator POLCA, it is possible to predict the stability of the reactor core in its present state. A calculation with full spatial resolution (all fuel assemblies, 25 axial nodes) is performed within a few minutes on a standard personal computer.

The eigenvalues and eigenvectors may not only be used to calculate the decay ratio and oscillation frequency, but also to analyze the stability behavior of the coupled neutronic/thermal-hydraulic system. A new method is introduced which allows to calculate and display the contribution to (in)stability of any part of the reactor model (fuel assembly, neutronics, thermal-hydraulics, riser, pumps, etc.). It is also possible to display the contribution to (in)stability of any physical quantity (power-density distribution, void, pumps etc.). This allows to enter a new territory and possibly to gain new insights into the mechanisms behind instabilities. This new method is not yet explored in depth, but some simple judgments were already used to optimize the core design and control rod sequence with respect to stability during start up procedures in Forsmark.

The results of the code have been successfully validated against numerous stability measurements from the Forsmark, Oskarshamn (both in Sweden) and Leibstadt (Switzerland) plants. The predictions show good agreement with the measured data for all global oscillations in all the plants. The regional oscillations in Cycle seven of Leibstadt were clearly predicted by MATSTAB, but the specific values for the decay ratios were underestimated in a systematic way.



# Zusammenfassung

Um die Kernstabilität eines Siedewasserreaktors vorherzusagen, wurde unter Einbezug von Frequenz-Raum-Methoden, schwach besetzten Matrizen und fortgeschrittenen numerischen Algorithmen das Computer Programm MATSTAB entwickelt. Das Programm benutzt die gleichen thermodynamischen Modelle wie das Transienten-Programm RAMONA-3B und das gleiche Neutronik-Modell wie der Online-Kernsimulator POLCA. Dies beinhaltet eine dreidimensionale Neutronik und eine explizite Modellierung jedes Brennelementes (keine Gruppenbildung).

Das sehr grosse Gleichungssystem wird linearisiert und führt zu einem verallgemeinerten Eigenwertproblem, das unter Verwendung der Newton-Methode und der Zerlegung in Unterräume iterative gelöst wird. Der eigens entwickelte Algorithmus berechnet die dominierenden Eigenwerte und deren zugeordnete linke und rechte Eigenvektoren. Dadurch ist MATSTAB in der Lage, nicht nur die globalen, sondern auch die regionalen Schwingungen vorherzusagen. Ein Vergleich der Dämpfungskonstanten (DR) der beiden Schwingungstypen erlaubt es zudem abzuschätzen welcher Schwingungstyp auftreten wird.

Verwendet man das in MATSTAB eingebaute Interface zum Online-Kernsimulator POLCA, kann man die aktuelle Kernstabilität berechnen. Ein Rechenlauf mit voller räumlicher Auflösung (alle Brennelemente, 25 axiale Knoten) dauert auf einem Standard Personal-Computer nur wenige Minuten.

Die Eigenwerte und Eigenvektoren dienen nicht nur zur Berechnung der Dämpfungskonstanten und der Frequenz der Schwingungen, sondern können auch zur Analyse des Stabilitätsverhaltens des gekoppelten Schwingungssystems (Thermohydraulik/Neutronik) herangezogen werden. Eine neue Methode wird eingeführt, die es erlaubt, den Beitrag von jedem Modellteil (Brennelement, Neutronik, Thermohydraulik, Pumpen usw.) zur (In)stabilität abzuschätzen und grafisch darzustellen. Es ist zusätzlich möglich, den Beitrag einzelner physikalischer Grössen (Leistungsdichte, Dampfblasen Anteil, Brennstofftemperatur usw.) zur (In)stabilität zu berechnen. Dadurch wird ein neues Forschungsfeld erschlossen, das möglicherweise zu neuen Erkenntnissen über den Mechanismus hinter den Instabilitäten führt. Die neuen Methoden sind derzeit noch nicht in voller Tiefe umgesetzt, aber erste einfache Ansätze wurden angewandt. Die Resultate sind in Forsmark eingesetzt worden, um die Kernbeladung und die Kontrollstab-Sequenz während des Anfahrens zu optimieren.

Die Resultate von MATSTAB wurden erfolgreich anhand zahlreicher Messungen in Forsmark, Oskarsham (beide Schweden) und Leibstadt (Schweiz) überprüft. Die Vorhersagen zeigten in allen Kernkraftwerken gute Übereinstimmung, mit den gemessenen Daten für globale Schwingungen. Die regionalen Schwingungen, die im siebten Zyklus in Leibstadt aufgetreten sind, wurden qualitativ zwar eindeutig vorhergesagt, quantitativ jedoch auf systematische Art und Weise unterschätzt.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Previous Work . . . . .	4
1.2.1	Selected Papers . . . . .	5
1.2.2	Different Types of Computer Codes . . . . .	7
1.3	The Scope of this Work . . . . .	9
<b>2</b>	<b>The Concept Behind MATSTAB</b>	<b>11</b>
2.1	The Central Equations . . . . .	12
2.1.1	Linearization . . . . .	12
2.1.2	Sparse Matrix Techniques . . . . .	15
2.1.3	Eigenvalues and Eigenvectors . . . . .	15
2.2	The Structure of MATSTAB . . . . .	18
2.2.1	Input Data . . . . .	18
2.2.2	Constructing the System Matrix $\mathbf{A}_s$ . . . . .	20
2.2.3	Eigenvalue Calculation . . . . .	21
2.2.4	Visualization . . . . .	21
<b>3</b>	<b>The Model</b>	<b>23</b>
3.1	Choosing the RAMONA Model . . . . .	24
3.1.1	Nodalization Scheme . . . . .	25
3.1.2	Inconsistencies with the POLCA Model . . . . .	29
3.2	Neutron Kinetics and Power Generation . . . . .	30
3.2.1	Fast and Thermal Neutron Flux . . . . .	30
3.2.2	Delayed Neutrons . . . . .	31
3.3	Thermal Conduction . . . . .	32
3.4	Thermal-Hydraulics . . . . .	32
3.5	Summary . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Calculation of the Key Parameters</b>	<b>35</b>
4.1	The Numerical Problem . . . . .	36
4.2	Solving $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ for a Very Large Matrix $\mathbf{A}$ . . . . .	37
4.2.1	LU - Decomposition . . . . .	37
4.2.2	Conjugate Gradient Method . . . . .	40
4.3	The Calculation of a Specific Eigenvalue/Eigenvector . . . . .	43

4.3.1	Power Method . . . . .	44
4.3.2	Inverse Iteration . . . . .	45
4.3.3	Inverse Iteration with Shift . . . . .	46
4.3.4	Newton's Method . . . . .	46
4.4	Partitioning Into Subspaces . . . . .	47
4.5	The Global Mode . . . . .	50
4.5.1	The Starting Guesses . . . . .	50
4.5.2	The Main Iteration . . . . .	51
4.6	The Left Eigenvector . . . . .	51
4.7	Regional Modes . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Interpretation and Visualization of Results</b>	<b>57</b>
5.1	Measurement Database . . . . .	58
5.2	Displaying Three Dimensional Variables . . . . .	58
5.3	Eigenvectors . . . . .	60
5.3.1	Right Eigenvector . . . . .	60
5.3.2	Left Eigenvector . . . . .	61
5.4	The Contributors to the Eigenvalue/Decay Ratio . . . . .	62
5.4.1	Contribution of the Model Sections to the Eigenvalue . . . . .	65
5.4.2	Contribution of the Fuel Assemblies to the Eigenvalue . . . . .	67
5.4.3	The Core of an Unstable Operating Point . . . . .	73
5.4.4	Further Analysis Around an Unstable Operating Point . . . . .	76
5.4.5	Contribution of Selected Equations to the Eigenvalue . . . . .	83
5.4.6	Analysis of Operating Points based on $\lambda$ Contribution Plots . . . . .	84
5.4.7	Comparison of Different Operating Points in Leibstadt . . . . .	90
5.5	Sensitivity Analysis . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Verification/Validation</b>	<b>95</b>
6.1	Analysis of the Measurement Data . . . . .	96
6.1.1	ARMA and ARMAX Models . . . . .	98
6.1.2	Comparing LPRM Signals With MATSTAB . . . . .	98
6.2	Global Oscillations . . . . .	99
6.2.1	Forsmark . . . . .	99
6.2.2	Oskarshamn . . . . .	117
6.2.3	Leibstadt . . . . .	120
6.3	Regional Oscillations . . . . .	124
6.3.1	Leibstadt . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>The RAMONA/POLCA Model</b>	<b>133</b>
A.1	Neutron Kinetics and Power Generation . . . . .	133
A.1.1	Governing Equations for Neutron Kinetics . . . . .	134
A.1.2	Boundary Conditions . . . . .	135
A.1.3	Node Integrated Balance Equations . . . . .	135
A.1.4	Prompt Jump Approximation . . . . .	137



---

A.1.5	Linearization . . . . .	139
A.1.6	Power Generation . . . . .	139
A.1.7	Linearization . . . . .	140
A.2	Modeling of Thermal Conduction . . . . .	141
A.2.1	Field Equation of Thermal Conduction . . . . .	141
A.2.2	Discretization . . . . .	143
A.2.3	Linearization . . . . .	144
A.3	Modeling of Thermal-Hydraulics . . . . .	145
A.3.1	Governing Equations for the Thermal-Hydraulics . . . . .	146
A.3.2	Differential Equations . . . . .	147
A.3.3	Algebraic Equations . . . . .	151
A.3.4	Linearization . . . . .	154
A.4	The Numerical Linearization . . . . .	157
<b>B</b>	<b>Detailed Structure of the Matrix <math>A_s</math></b>	<b>159</b>
<b>C</b>	<b>Input / Output of MATSTAB</b>	<b>165</b>
C.1	Screen Output of MATSTAB . . . . .	165
C.2	MATSTAB Input Desk for Leibstadt . . . . .	166
	<b>Acknowledgments</b>	<b>191</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>193</b>



# List of Tables

1.1	Events with Core Instabilities . . . . .	4
1.2	Common Stability Codes in 1998 . . . . .	8
2.1	Differential and Algebraic Equations used in MATSTAB . . . . .	13
5.1	Investigation of the Operating Point with 45% Power/28% Core Flow . . . . .	76
5.2	Decay Ratio and Frequency for Different Slip Values . . . . .	94
6.1	Key Parameters of the NPPs Involved in Validating MATSTAB . . . . .	97
6.2	Comparison Between MATSTAB and Measurements in Forsmark 1 . . . . .	100
6.3	Comparison Between MATSTAB and Measurements in Forsmark 2 . . . . .	106
6.4	Comparison Between MATSTAB and Measurements in Forsmark 3 . . . . .	112
6.5	Comparison Between MATSTAB and Measurements in Oskarshamn . . . . .	117
6.6	Comparison Between MATSTAB and Measurements in Leibstadt . . . . .	120
6.7	Comparison Between MATSTAB and Measurements for Leibstadt Cycle 7 . . . . .	125
B.1	MATSTAB Numbering Scheme for the Channels in a Half-Core Case . . . . .	159
B.2	MATSTAB Numbering Scheme for the Neutronics . . . . .	160
B.3	MATSTAB Numbering Scheme for the Thermal-Hydraulics . . . . .	160
B.4	MATSTAB Numbering Scheme in the Matrix $\mathbf{A}_s$ for the Leibstadt Reactor . . . . .	161
B.5	MATSTAB Numbering Scheme in the Matrix $\mathbf{A}_s$ for Forsmark 1 and 2 . . . . .	162
B.6	MATSTAB Numbering Scheme in the Matrix $\mathbf{A}_s$ for Forsmark 3 . . . . .	163

