

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik

Bedeutung von Stabilitätsuntersuchungen für heutige und zukünftige Siedewasserreaktoren

Carsten Lange, Dieter Hennig, Antonio Hurtado

Dresden, 19.10.2011





Übersicht



- Einleitung Stabilitätsanalyse als ein grundsätzliches Auslegungsprinzip von Kernreaktoren
- Besonderheiten der SWR Stabilitätsanalysen
- Repräsentative Ergebnisse



- Der Lehr- und Forschungsschwerpunkt Reaktordynamik
- Zusammenfassung







ECHNISCHE UNIVERSITÄT

DRESDEN

- Zeitkonstanten in NK, BD, TH - Rückkopplungseigenschaften

Die Stabilitätseigenschaften hängen im wesentlichen von der

- neutronenphysikalischen
- thermohydraulischen und
- brennstofftechnischen Kernauslegung ab.

Einleitung - Stabilitätsanalyse als ein grundsätzliches Auslegungsprinzip von Kernreaktoren



Faciliti Foreir Cheritudion, 1477 Drumbulle





The eniginal SVLA

Senigri SVTA-64

SVEA SVEA 96

estinghouse Electricity Company www.westinghousenucleation





Einleitung - Stabilitätsanalyse als ein grundsätzliches Auslegungsprinzip von Kernreaktoren

Vergangener und gegenwärtiger Trend:

- Leistungserhöhung in Kernreaktoren
- Weiterentwicklung und Einsatz von hocheffizienten Brennelementen
- Modifikation der Kerndimensionen

Reaktorfahrweisen zur Erhöhung der Brennstoffausnutzung, z.B. spectral shift Fahrweise

...erhöhen die Bedeutung von Stabilitätsanalysen im Rahmen der Kernauslegung





Besonderheiten der SWR Stabilitätsanalysen







Besonderheiten der SWR Stabilitätsanalysen

Ziel der Arbeit ist es, das SWR Stabilitätsverhalten im Detail zu verstehen!

- Verkleinerung des Ausschlussgebietes

Aus mathematischer Höhere Brennstoffausnutzung

- Harmonisierung der Überwachungssysteme Bestimmung der Lösungsmannigfaltigkeit des SWR-DGL-Systems

- stabile und instabile Fixpunkte
- stabile und instabile periodischen
- Lösungen (stabile und instabile Grenzzyklen/Orbits)
- andere Phänomene wie "Turning points", Periodenverdopplung,

instabile Grenzzyklen ("Repellor") bedürfen besonderer Beachtung bezüglich der Betriebssicherheit!



Die Leistungsfähigkeit der Methode wurde bisher an zahlreichen Arbeitspunkten von 4 KKWs demonstriert, für die Messdaten vorliegen.





Repräsentative Ergebnisse

Vertiefende Untersuchungen mit der RAM-ROM Methode

- Nichtlineare Stabilitätsanalysen zum KKW Leibstadt Zyklus 7
 - Übergeordnetes Ziel: Beitrag zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit und Geltungsbereich der ROM-Analysen
 - Fokus: Suche nach Leistungsoszillationen großer Amplitude

Erzielte Ergebnisse:

- **ROM-Analyse** sagt die Existenz von "limit points of cycles" voraus, in denen Leistungsoszillationen großer Amplitude generiert werden können.
- Systemcode RAMONA bestätigt die ROM-Vorhersage
 - → "limit points of cycles" (Umkehrpunkt) ist ein bekanntes Phänomen in der nichtlinearen Dynamik!
 - → Nachweis im SWR durch zwei unabhängige Methoden.
 - → lineare Betrachtung kann dieses Phänomen nicht erklären!













Behauptung: lokale Leistungsoszillationen vermindern die "Stabilitätsmarge" Keine Erklärung des ortsabhängigen Decay Ratio

- Keine Erklärung des Langzeitoszillationsmusters

Beantwortung der noch offenen Fragen gelingt durch

- **RAM-ROM** Analyse
- Diskussion des Lösungsverhaltens der raum- und zeitabhängigen Diffusionsgleichung mit externer oszillatorischer Quelle
- Signalanalyse







Lokale Leistungsoszillationen

Bisher (bezogen auf Forsmark-Ereignis)





Erzielte Ergebnisse zu lokalen Leistungsoszillationen

RAM-ROM Methode \rightarrow Forsmark-Kern ist stabil!

- lokale Störungen, die zu Änderungen in den thermohydraulischen Kanalrandbedingungen führen, können selbsterhaltene DWO's erzeugen, die wiederum lokale Leistungsoszillationen anregen
- lokale Leistungsoszillationen ändern nicht das SWR Stabilitätsverhalten (keine Änderung der "Stabilitätsmarge")
- im Forsmark-Fall kann der Kern als getriebener nichtlinearer Oszillator interpretiert werden → Decay Ratio verliert als Stabilitätsindikator seinen Sinn
- Das Oszillationsmuster kann sowohl mit RAMONA als auch mit einem einfachen Modell qualitativ nachgebildet werden







Der Lehr- und Forschungsschwerpunkt Reaktordynamik







Internationales Netzwerk

Institution	Bereich der Zusammenarbeit
TU Dresden	ROM, Systemcodes, Signalanalyse
Chalmers, Schweden	Lineare und nichtlineare Signalanalyse, ROM
UP Valencia, Spanien	Signalanalyse, spezielle Codes zur Auswertung gemessener Inkernsignale, z. B.: Mode- Dekomposition, ROM, Systemcodes
CRIEPI, Japan	Versuchsanlage SIRIUS-N/F/T
KTH, Schweden	Systemcodes
TU München	Systemcodes
KIT	Systemcodes
PSI	Systemcodes, ROM
University of Illinois, USA	ROM





Zusammenfassung

- Universität hat den Auftrag, gründliche Kenntnisse zu den Wirkungsmechanismen in Leistungsreaktoren zu vermitteln.
- Die Untersuchung des Raum-Zeitverhaltens inklusive der physikalischen Rückwirkungsmechanismen in Leistungsreaktoren ist Gegenstand der Reaktordynamik.
- Die Analyse des Stabilitätsverhaltens von Leistungsreaktoren (dynamischen Systemen) ist dabei als Spezialgebiet von besonderer Bedeutung.
- Reaktor-Stabilitätsanalysen sind wegen der z.T. sehr sensitiven Parameterabhängigkeiten eine Herausforderung an alle Systemcodes.
- Die Entwicklung z.B. eines SWR- ROM's fördert (bei den Studierenden) ein vertieftes Verständnis der Physik des Siedewasserreaktors und damit auch der inzwischen relativ komplexen Systemcodes.
- Diese Arbeiten verbinden Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Reaktordynamik in geradezu idealer Weise.





Anhang





Kompetenzerhalt und Nachwuchsförderung

Ausbildungskonzept in Reaktordynamik

I Reactor Kinetics

- Point kinetic equations (heuristic derivation)
- Solution of the point kinetics equations for different reactivity insertions
- Space-dependent diffusion equation vs. point kinetics (limits of the point model).
- Reactivity of symmetrical and nonsymmetrical control rods

II Core thermal-hydraulics

- First principle equations (single/2phase flow)
- One-dimensional core thermal-hydraulics
- Experimental correlations
- Discretization of the spatial differential quotients and numerical problems (characteristics, numerical diffusion)
- 2-phase flow instabilities (self-sustained density wave oscillations)





III Reactor dynamics

- Reactivity (static, dynamic)
- Reactivity feedback effects
- Reactivity measurement
- Safety limit values
- Computer codes used for reactor dynamic analysis (coupled system codes)
- Reactivity initiated accidents
- Recirculation pump failure

IV Stability of nuclear reactors

- Reactor design (BWR, HTR)
- Linear and nonlinear stability analysis
- Stable and unstable dynamic systems
- Temperature and void stability, Xe stability
- BWR/PWR/HTR stability analysis
- Quick look into the nonlinear dynamics

V Exercises





Zusammenfassung

Lehr- und Forschungsschwerpunkt Reaktordynamik

Ausbildung in Reaktordynamik

Systemcodes \rightarrow z.B. Code-Paket: CASMO-SIMULATE-SIMULATE3K





RAM-ROM analysis for KKLc7_rec4







Time evolutions of the fundamental and first azimuthal mode and





Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik 01069 Dresden Germany

RAMONA analysis



















Zeitabh. Diffussionsgleichung mit externer Quelle

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \frac{\partial \, \bar{\Phi}(\vec{r},t)}{\partial t} = \begin{bmatrix} (1-\beta) \cdot \hat{\mathbf{F}}(\vec{r},t) - \hat{\mathbf{L}}(\vec{r},t) \end{bmatrix} \cdot \bar{\Phi}(\vec{r},t) + \sum_{l=1}^{6} \lambda_{l} \cdot C_{l}(\vec{r},t) \cdot \vec{X}_{l}^{\nu} + \vec{S}(\vec{r},t)$$
$$\frac{\partial}{\partial t} C_{l}(\vec{r},t) \vec{X}_{l}^{\nu} = \beta_{l} \, \hat{\mathbf{F}} \cdot \bar{\Phi}(\vec{r},t) - \lambda_{l} \cdot C_{l}(\vec{r},t) \vec{X}_{l}^{\nu}$$
$$\mathbf{Mode-Ansatz} \qquad \bar{\Phi}(\vec{r},t) = \sum_{n} \hat{P}_{n}(t) \cdot \vec{\Psi}_{n}(\vec{r}) \qquad \vec{S}(\vec{r},t) = \sum_{n} S_{n}(t) \cdot \vec{\Psi}_{n}(\vec{r})$$
$$C_{l}(\vec{r},t) \vec{X}_{l}^{\nu} = \sum_{n} C_{nl}(t) \, \hat{F}_{0} \, \vec{\Psi}_{n}(\vec{r}) \, \Lambda_{n} \qquad \vec{S}(\vec{r},t) = \sum_{i=1}^{k} \vec{S}_{i}(\vec{r},t)$$

Mode-Kinetische Gleichungen mit externer Quelle

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}P_m(t) &= \frac{1}{\Lambda_m} \Big[(\rho_m^s - \beta) P_m(t) \Big] + \frac{1}{\Lambda_m} \Bigg[\sum_n \rho_{mn}^F P_n(t) - \sum_n \rho_{mn}^D P_n(t) \Bigg] \\ &+ \sum_l \lambda_l C_{ml}(t) + S_m(t) W S_m \\ \frac{d}{dt} C_{ml}(t) &= \frac{1}{\Lambda_m} \Bigg[\beta_l P_m(t) + \sum_n \rho_{mn}^{D_l} P_n(t) \Bigg] - \lambda_l C_{ml}(t) \end{aligned}$$





Schwerpunkte des Doktorandenprojektes



- kritische Sichtung der Komponenten und Algorithmen in Systemcodes
- 1) Schwachstellenanalyse von Systemcodes: Einschätzung des Stabilitätsverhaltens des Systemcodes DYN3D/ATHLET (im Vergleich mit RAMONA)
- 2) Einschätzung der Näherungsannahmen in RAMONA und DYN3D/ATHLET aus Sicht der Stabilitätsanalyse
- 3) Kritische Einschätzung der in den Systemcodes verwendeten Lösungsalgorithmen und dessen Stabilität
- 4) Forderungen an die Modellbildung der Kreislaufkomponenten
- 5) Signalanalyse: Unsicherheiten der statistischen Auswertealgorithmen bei der experimentellen Bestimmung von Stabilitätsindikatoren sind abzuschätzen
- 6) Exemplarische Durchführung dieser Arbeiten für ausgewählte Arbeitspunkte der KKW`s Brunsbüttel, Leibstadt, Ringhals...





Auslegungsstudie für PARCHAN (KEK-Vorhaben 1501400)

• Das Ergebnis soll eine wissenschaftlich fundierte Grundlage einschließlich der Simulation der an der neu zu schaffenden Versuchsanlage auftretenden Effekte (Qualität der Kopplung Thermohydraulik/Neutronenkinetik, Regelungs- und Transientenverhalten) sein. Die Studie wird die Basis für die Errichtung der Versuchsanlage PARCHAN als Gemeinschaftsprojekt von TU Dresden und Errichtern/Betreibern von SWR bilden.

Grobe Gliederung:

- 1. Literaturstudie und Anlagenstudie
- 2. Auslegungsstudie
- 3. Kopplung von Thermohydraulik und Neutronenkinetik
- 4. ATHLET/Dyn3D Modell (oder RAMONA5 ?)
- 5. Zusammenfassender Vorschlag für eine Versuchsanlage





Stabilitätsanalyse

mit einer linearen Stabilitätsanalyse können ausschließlich die <u>lokalen</u> Stabilitätseigenschaften von Fixpunkten untersucht werden. (wenn Hartmann-Großmann-Theorem gilt!)

DR ist ein linearer Stabilitätsindikator!!!







Stabilitätsanalyse Gegenüberstellung lineare und nichtlineare Stabilitätsanalyse Lineare Stabilitätsanalyse Stable fixed points Unstable fixed points $\gamma_{k,c}$ > Nichtlineare Stabilitätsanalyse $\beta < 0 \rightarrow$ stabil $\beta > 0 \rightarrow \text{instabil}$ stable limit cycle Junstable limit cycle (repellor) ∕γk,c k,c YK Subcritical Supercritical ε **Hopf Bifurcation** Hopf Bifurcation Stable fixed points Stable fixed points Unstable fixed points ----Unstable fixed points

Dresden, 19.10.2011

Folie 33