

# Scaled Model of a Natural-Circulation Heating Reactor

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Martin Urs Zeller

Diploma of Mech. Eng. ETHZ  
born June 21, 1959  
citizen of Stäfa (ZH) and Zürich

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. G. Yadigaroglu, examiner  
Prof. Dr. U. Müller, co-examiner

1992

# Abstract

The proposed 10 MW Geyser is a district heating reactor producing hot water. It is an entirely passively controlled LWR system of high inherent safety, not using any of the usual active components. The pressure in the core is hydrostatic. Core cooling occurs by natural circulation and the power is controlled by boron in the primary circuit; there are no control rods. There is no boiling in the core but steam is produced by flashing due to the hydrostatic pressure reduction in the riser. The primary, flashing driven, natural circulation loop transports the heat generated in the core to the secondary circuit. The secondary, also natural-circulation circuit transports it via the district heating net to the consumers. The boron content of the primary circuit is adjusted by entirely passive means to match the load requirements. This control is achieved by a dynamic equilibrium between dilution and addition of boron. Dilution is accomplished by an additional natural circulation loop, the "cleaning circuit", which is coupled by a heat exchanger to the primary circuit. This loop is generating pure steam also by flashing, leading to a continuous depletion of the boron content of the primary circuit. Boron is added in an automatically controlled way according to the power demand.

A 30 kW scaled integral thermohydraulic model of the 10 MW Geyser reactor has been built to simulate the system dynamics for typical load following in a district heating net and to analyse the behavior of the coupled natural circulation loops driven by gravity-induced flashing. Scaling criteria proper to such loops were derived and the primary and cleaning circuits were scaled down accordingly. The reference design for these two circuits resulted from a parametric study carried out with a computer program developed to calculate the steady-state of the Geyser reactor.

The experimental facility contains all relevant circuits and the core is simulated by an electric heater. The power control by boron is not simulated in the experiment, but instead the electronic power control system described below with appropriate time constants is used. The working fluid of the primary, the secondary and the cleaning circuits is Refrigerant-113. The tertiary circuit operates with water. The use of Refrigerant-113 allows simulation at much lower power and temperature, and at a height reduced to approximately 2/3 of the water system. A big part of the facility consists of glass components allowing the visual observation of the boiling (flashing) boundaries.

Experiments with different system setups were carried out. Their steady state operation was compared, and the range of stable operation of the system was determined. The superheat needed to generate bubbles in the flashing driven, primary and cleaning circuits was of particular interest. It was investigated and accounted for the steady state analysis of these two circuits. Calculated system operating states are compared with the experimental ones.

The transient behavior of the system was investigated using the electronic controller. As the pressure in the primary condenser is directly affected by core power, it was chosen as the feedback variable controlling the power. The experimental parameters were the time constants of the controller and changes in the cooling rate. The system responded adequately to changes in the consumer demands for heat. The experiments also showed that for flashing-driven natural circulation loops, nucleation phenomena are important. The coupling of two such circuits via a plate heat exchanger and the design of the core simulator have a considerable influence on the stability of the system.

# Zusammenfassung

Der vorgestellte 10 MW Geyser ist ein Heizreaktor, der ausschliesslich der Wärmeversorgung dient. Dieser vollständig passiv geregelte Leichtwasserreaktor hoher inhärenter Sicherheit kommt ohne die sonst üblichen aktiven Sicherheitssysteme und Regeleinheiten aus. Der Druck im Reaktorkern ist hydrostatisch. Die Kernkühlung erfolgt durch Naturzirkulation und die Leistung wird ohne Steuerstäbe über den Borgehalt des Primärkreislaufs geregelt. Das Wasser siedet im Reaktorkern noch nicht. Es verdampft teilweise beim Aufstieg im Diffusor infolge des abnehmenden hydrostatischen Drucks ohne Wärmezufuhr. Dieser Vorgang wird Flashing genannt. Der durch Flashing angetriebene Primärkreislauf transportiert die im Reaktorkern erzeugte Wärme über den Sekundärkreislauf zum Fernwärmenetz. Primär- und Sekundärkreislauf arbeiten im Naturumlauf. Die leistungsabhängige Selbstregulierung des Borgehaltes im Primärkreislauf erfolgt vollkommen passiv. Sie wird durch das dynamische Gleichgewicht zwischen Zumischung und Verdünnung von Bor erreicht. Die Verdünnung erfolgt durch einen zusätzlichen Naturzirkulationskreislauf, den "Reinigungskreis", der durch einen Plattenwärmetauscher an den Primärkreislauf gekoppelt ist. Dieser ebenfalls durch Flashing angetriebene Kreislauf erzeugt reinen Dampf, der als Kondensat dem Primärkreislauf beigelegt wird und damit dessen Borgehalt kontinuierlich reduziert. Die Borzufuhr erfolgt selbsttätig aufgrund des Leistungsbedarfes.

Es wurde eine skalierte 30 kW Versuchsanlage des 10 MW Geyser Heizreaktors gebaut, um das dynamische Verhalten des Systems für typische Laständerungen eines Fernwärmenetzes zu simulieren und um das Verhalten der beiden gekoppelten Naturzirkulationskreisläufe, die durch Flashing angetrieben werden, zu untersuchen. Skalierungskriterien für solche Kreisläufe wurden hergeleitet und der Primär- und Reinigungskreis wurden damit skaliert. Die Referenzgeometrie dieser beiden Kreisläufe resultierte aus einer parametrischen Studie, die mit eigens dafür entwickelten Computerprogrammen durchgeführt wurde, um den stationären Betriebszustand des Geysers zu berechnen.

Die Versuchsanlage enthält alle relevanten Kreisläufe, und der Reaktorkern wird mit einer elektrischen Heizung simuliert. In den Experimenten wurde die Leistungsregelung über die Borsäurekonzentration des Primärkreislaufes durch einen elektronischen Regler mit entsprechenden Zeitkonstanten ersetzt. Die Versuchsanlage wird im Primär- und im Sekundärkreislauf mit Freon 113 betrieben. Der Kühlkreislauf arbeitet mit Wasser. Die Verwendung von Freon 113 erlaubt die Simulation bei viel kleineren Temperaturen und Leistungen; zudem konnte die Höhe der Referenzanlage um etwa ein Drittel reduziert werden. Ein grosser Teil der Versuchsanlage wurde mit Glaskomponenten gebaut, um die Beobachtung der Siedegrenzen in den Diffusoren zu ermöglichen.

Experimente wurden mit verschiedenen Versuchsanordnungen durchgeführt. Deren stationäres Verhalten wurde verglichen und die entsprechenden Leistungsbereiche stabiler Betriebszustände wurden ermittelt. Die zur Blasenbildung, in den durch Flashing angetriebenen Primär- und Reinigungskreisen, notwendige Ueberhitzung der Flüssigkeit war von besonderem Interesse. Sie wurde aus den experimentellen Ergebnissen ermittelt und bei der Berechnung des stationären Betriebszustandes dieser beiden Kreisläufe berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden mit den experimentellen Werten verglichen.

Bei der Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens der Versuchsanlage wurde die

Leistung mittels eines elektronischen Reglers gesteuert. Der Druck im Primärkondensator wurde dabei als Steuergrösse des Reglers gewählt, weil er direkt von der Reaktorleistung beeinflusst wird. Versuchsparameter waren Änderungen der Kühlleistung und die Zeitkonstanten des Reglers. Die Versuchsanlage reagierte erwartungskonform auf Änderungen des Wärmebedarfes. Die Experimente haben aufgezeigt, dass Siedephänomene für durch Flashing angetriebene Naturzirkulationskreisläufe wichtig sind. Die Kopplung zweier solcher Kreisläufe und das Design des Core-Simulators haben einen beträchtlichen Einfluss auf die Stabilität des Systems.