

# **Kernheizwerke**

## **Technische Konzepte und Marktpotentiale**

BMFT Fördervorhaben RB 0158

### **Zusammenfassung des Gesamtprojektes**

Wolfgang Bernnat  
Tobias Kohler  
Alfred Voß

Institut für Kerntechnik und Energiewandlung e.V.

# **Kernheizwerke**

## **Technische Konzepte und Marktpotentiale**

BMFT Fördervorhaben RB 0158

### **Zusammenfassung des Gesamtprojektes**

Wolfgang Bernnat  
Tobias Kohler  
Alfred Voß

Institut für Kerntechnik und Energiewandlung e.V.

Stuttgart, August 1990

Inhaltsverzeichnis:

Teil 1: Problemstellung, Zielsetzung, Vorgehen .....	1
Teil 2: Technische Konzepte von Kernheizwerken .....	4
Teil 3: Energiewirtschaftliche Einordnung von Kernheizwerken .....	12
Teil 4: Weitere Aspekte für die Einführung von Kernheizwerken .....	20
Teil 5: Schlußfolgerungen, Empfehlungen, Forschungsbedarf .....	24

## Teil 1: Problemstellung, Zielsetzung, Vorgehen

Versorgungssicherheit und Preisgünstigkeit der Energieversorgung bei gleichzeitiger Umweltverträglichkeit sind wichtige Ziele der Energiepolitik, die trotz der derzeit relativ entspannten Lage auf dem Ölmarkt ein weiteres Zurückdrängen des Erdölverbrauchs und eine weitere Diversifikation der Versorgung wünschenswert machen.

Eine Alternative zu Öl und Gas kann in bestimmten Bereichen die Kernenergie sein. Reaktoren emittieren keine chemischen Reaktionsprodukte (z. B.  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , Staub,  $\text{CO}_2$ ) was insbesondere für den zunehmend geforderten Schutz der Erdatmosphäre von großer Bedeutung ist. Die Versorgungssicherheit von Uran ist derzeit zudem aufgrund der geschätzten Ressourcen und leichteren Vorratshaltung sowie aufgrund einer breiten Streuung der Bezugsquellen günstiger zu beurteilen als die von Öl und Gas. Für die Substitution fossiler Energieträger in der Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland besteht im Wärmemarkt ein weitreichendes Potential.

Für den Einsatz der Kernenergie zur Wärmeversorgung bieten sich neben der Wärmeauskopplung aus Kernkraftwerken neue Möglichkeiten durch den Einsatz von Kernheizkraftwerken und Heizreaktoren (oder auch Kernheizwerken) auf Basis der Leichtwasserreaktor- oder Hochtemperaturreaktortechnologie an.

In jüngster Zeit hat die Wärmebereitstellung durch kleine Kernheizwerke und Kernheizkraftwerke verstärkte Aufmerksamkeit gefunden. Wesentliche Gründe dafür sind neue, weiterentwickelte technische Konzepte für kleine und mittlere Kernheizwerke die die Anforderungen an verbrauchernahe Standorte bei noch akzeptablen spezifischen Anlagenkosten erfüllen und damit eine interessante Alternative zur Fernwärmeerzeugung werden könnten.

Die Ziele dieser Arbeit waren:

- \* die bisher bekannten Heizreaktor-konzepte bezüglich der Auslegung, Sicherheitseigenschaften und Kosten zu analysieren und den Stand der Technik sowie die Anforderung aus sicherheitstechnischer und betrieblicher Sicht darzustellen,
- \* schwerpunktmäßig Beurteilung wichtiger neuer Auslegungsprinzipien wie thermohydraulisches und reaktordynamisches Verhalten von Reaktoren mit zweiphasigem Leichtwasser-Naturumlauf und reaktorphysikalische Auslegungsfragen bei solchen



Anlagen wie Moderatorichtekoeffizienten und Abbrandverhalten bei sehr langen Brennstoffzyklen,

- \* Beurteilung des Kernverhaltens von Heizreaktoren bei hypothetischer Annahme des totalen Ausfalls der Wärmeabfuhr durch Kernschmelz-Simulationsrechnungen mit dem Programmsystem KESS-2,
- \* systematischer Vergleich der Kernheizwerke mit fossilen Alternativsystemen und Abschätzung von technischen und wirtschaftlichen Potentialen in der Niedertemperaturwärmeversorgung der Bundesrepublik Deutschland sowie eine Untersuchung der Exportchancen,
- \* Analyse der umweltbezogenen Aspekte bei Kernheizwerken im Vergleich zu den Alternativsystemen,
- \* Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Kernheizwerken.

Die Arbeiten in diesem Projekt gliedern sich in 11 einzelne Kapitel, die im Anhang genannt sind und deren wesentliche Inhalte und Ergebnisse in den Teile 2 bis 4 dieser Abstracts kurz dargestellt sind.

In den Kapiteln 1 bis 4 und 7, deren Ergebnisse im Teil 2 zusammengefaßt dargestellt werden, werden die technischen Konzepte verschiedener Kernheizwerke untersucht und dargestellt, wobei in Kapitel 1 eine Übersicht über die verschiedenen Konzepte mit den wichtigsten Auslegungsparametern gegeben ist. In Kapitel 2 werden die wesentlichen Anforderungen an Kernheizwerke an verbrauchernahen Standorten untersucht. In Kapitel 3 werden spezielle Aspekte zur reaktorphysikalischen und thermodynamischen Auslegung von Heizreaktoren dargestellt, insbesondere wird der Naturumlauf mit Hilfe eigener entwickelter Modelle simuliert. In Kapitel 4 wird das Kernverhalten bei Ausfall sämtlicher Wärmesenken mit Hilfe von Kernschmelz-Simulationsrechnungen mit dem Programmsystem KESS-2 untersucht, um für die drei leichtwassergekühlten Heizreakortypen NHR-200 (Siemens/KWU), SHR (Schweizer Heizreaktor) und SECURE-H-400 (Schweden) die maximal zur Verfügung stehende Zeit bis zur Einleitung von Maßnahmen zur Störfallminderung abzuschätzen. Ferner werden für den gasgekühlten Heizreaktor GHR-10 (ABB/Siemens) das Kernverhalten bei totalem Ausfall der Wärmesenke dargestellt. In Kapitel 7 werden die Anlagen- und Brennstoffkosten verschiedener ausgewählter Kernheizwerke sowie ihre Wärmegestehungskosten analysiert.

Der energiewirtschaftliche Teil der Arbeiten, welcher in Teil 3 zusammengefaßt ist, umfaßt, neben einem systematischen Vergleich in Bezug auf den Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsaspekt der Kernheizwerke mit ihren fossilen Alternativsystemen in Kapitel 8 die in Kapitel 9

durchgeführte Abschätzung von Potentialen für Kernheizwerke im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland. Als Basis der technischen Potentialanalyse dienen die Analysen des Niedertemperaturwärmemarkts (Kapitel 5) und der strukturellen Untersuchung des Fernwärmesystems in Kapitel 6.

Teil 4 stellt die internationale Dimension von Kernheizwerken in Form einer Untersuchung der Exportmärkte anhand einer Reihe von Indikatoren dar. In Kapitel 11 wird untersucht, wie die Einsatzmöglichkeiten von Kernheizwerken in einem realen bestehenden Fernwärmeversorgungssystem sind. Dazu wird die Einbindung eines Kernheizwerkes mit einem Kraftwerkseinsatzoptimierungsmodell untersucht.

## Teil 2: Technische Konzepte von Kernheizwerken

### Übersicht über Heizreaktorkonzepte (Kapitel 1)

Der Einsatz von nuklearer Energie im Niedertemperaturwärmemarkt ist in zwei Alternativen denkbar. Die erste Möglichkeit ist die Kraft-Wärme-Kopplung, die praktisch bei allen Leistungsreaktoren realisiert werden kann. Diese Auskopplung von Fernwärme kann bei sehr langen Transportwegen oder ungünstigen topologischen Verhältnissen zwischen Energieerzeuger und Verbraucher kostenaufwendiger sein. Deshalb wurden als zweite Alternative Heizreaktoren entwickelt, die wesentlich geringere Reaktorleistungen als die große LWR-Anlagen aufweisen und die aufgrund sehr konservativer Auslegung und inhärenter Sicherheitseigenschaften bzw. passive Sicherheitseinrichtungen verbunden mit hohen Karenzzeiten, bis bei Störfällen Notmaßnahmen getroffen werden müssen, für verbrauchernahe Standorte geeignet sind. Damit können sie bezüglich der Leistung besser an den Bedarf der in Frage kommenden Nah- und Fernwärmenetze angepaßt werden. Heizreaktoren mit Leistungen von 10-500 MW wurden in den letzten ca. 10 Jahren unter Beachtung besonderer Sicherheitsanforderungen entwickelt bzw. konzipiert. Die wichtigsten Entwicklungsziele für diese Heizreaktoren sind praktisch bei allen Konzepten:

- \* hohe inhärent Sicherheitseigenschaften und passive Sicherheitseinrichtungen,
- \* niedrige Leistungsdichte im Reaktorkern und träges Verhalten bei Transienten und Störfällen,
- \* extrem niedrige Emissionen radioaktiver Stoffe im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen,
- \* den Fernwärmenetzanforderungen entsprechender Lastfolgebetrieb,
- \* niedrige spezifische Investitionskosten,
- \* einfache und kostengünstige Betriebsweise und Wartung,
- \* hohe Verfügbarkeit und lange Betriebszyklen,
- \* hinreichende Schutzvorrichtungen gegen Einwirkungen von außen,
- \* Einbeziehung von anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen zur Beherrschung auslegungsüberschreitender Ereignisse

Folgende Heizreaktorkonzepte wurden in den vergangenen Jahren entwickelt und in der Fachliteratur dargestellt, wobei die Ziffern bei den Typbezeichnungen die konzipierte Leistung angeben.

NHR	(200 - 400 MW)	(Siemens/KWU)
SECURE-H	(200 - 400 MW)	(ABB-Atom, Schweden)
SHR	(10 - 20 MW)	(Schweiz, PSI)
GHR	(10 - 20 MW)	(ABB/HRB/HRG)
GEYSER	(10 - 20 MW)	(Schweiz, PSI)



AST	(bis 500 MW)	(Sowjetunion)
SLOWPOKE	(10 MW)	(AECL, Kanada)
THERMOS-100		(Technicatome, Frankreich)
LTR-5		(INET, China)
LTR	(200 - 500 MW)	(China)
HERE	(200 - 500 MW)	(Universität-Gesamthochschule Essen)
HTR	(200 - 500 MW)	(Universität-Gesamthochschule Duisburg)
TRIGA	(200 - 500 MW)	(GA, USA)

In Kanada ist zur Zeit eine Heizreaktor-Demonstrationsanlage vom Typ SLOWPOKE (Schwimmbadreaktor) mit 2 MW<sub>th</sub> im Testbetrieb. In China ging 1989 eine Pilotanlage vom SWR-Typ mit 5 MW<sub>th</sub> in Probe- und Leistungsbetrieb. In der Sowjetunion sind zwei Doppelanlagen mit je 2x500 MW<sub>th</sub> vom Typ AST-500 im Bau. Die Inbetriebnahme hat sich infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl sehr stark verzögert. Zur Zeit findet eine erneute Überprüfung der Sicherheit durch internationale Arbeitsgruppen der IAEA statt. In der Schweiz wurden die drei Anlagen SHR-10, GHR-10 und GEYSER-10, alle mit 10 MW<sub>th</sub>, bezüglich Machbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit sehr detailliert untersucht und miteinander verglichen. Eine Entscheidung zum Bau eines Prototyps konnte jedoch noch nicht getroffen werden.

Durch die unterschiedlichen Leistungen der verschiedenen Konzepte und die unterschiedlichen Randbedingungen, unter denen sie entwickelt oder konzipiert wurden, sind Vergleiche nicht einfach durchzuführen, da z.B. Konzepte mit hohem Wasserinventar (verbunden mit höherer Karenzzeit bis zum erforderlichen Eingreifen zur Kernnotkühlung) den Nachteil höherer spezifischer Investitionskosten aufweisen. Andererseits sind bei allen Systemen (SECURE, GEYSER) neuartige "inhärente" Abschaltmechanismen oder Steuerelementantriebe (NHR, SHR) sowie passive Nachwärmeabfuhrkonzepte vorgesehen, die den Bau einer Prototypanlage erfordern, was die Entwicklungskosten erheblich erhöht und die Markteinführung verzögert.

Von den vorgestellten Konzepten weisen der NHR-200, SHR-10, GHR-10, SECURE-400, THERMOS, SLOWPOKE, TRIGA, die chinesischen Anlagen (da eng verwandt mit NHR und SHR) und die sowjetischen Anlagen (AST-500) eine gewisse Angebotsreife aus, da sie weitgehend auf bestehender LWR-, HTR- oder Forschungsreaktortechnologie aufbauen. Eine erste Überprüfung der NHR-200- bzw. SECURE-400-Anlage bezüglich der Verträglichkeit der Sicherheitskonzepte mit den Genehmigungsrichtlinien für LWR wurde von der GRS vorgenommen und positiv bewertet. Bis auf die Anlagen in Kanada (SLOWPOKE-Demonstrationsreaktor) und China (5 MW<sub>th</sub>-Demonstrationsanlage) sind jedoch keine Heizreaktoren in Betrieb. Bis auf die zwei Anlagen in Gorki und Woronesch in der UdSSR

sind zur Zeit keine weiteren Projekte im Bau. Kanada plant jedoch den Bau eines 10 MW<sub>th</sub>-SLOWPOKE-Reaktors (SES-10).

Es bestehen zur Zeit noch relativ wenig Erfahrungen mit den speziellen Heizreaktoren, so daß Verfügbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit noch nicht ausreichend beurteilt werden kann. Dennoch wurden im Zusammenhang mit der Erarbeitung dieser Konzepte neue sicherheitstechnische Lösungen der Nachwärmeabfuhr und Reaktorabschaltung nach inhärent sicheren Prinzipien und mit passiven Sicherheitseinrichtungen entwickelt, welche die Sicherheitsanforderungen für kerntechnische Anlagen in der Nähe dicht besiedelter Regionen erfüllen können. Erfahrungen können jedoch nur mit dem Bau und Betrieb solcher Anlagen gewonnen werden.

### Sicherheitstechnische Anforderungen (Kapitel 2)

Für Kernheizwerke gelten wie auch für Kernkraftwerke grundsätzlich die gleichen Kriterien und gesetzlichen Bestimmungen wie sie nach dem Atomgesetz und der Strahlenschutzverordnung abgeleitet werden. In den letzten 15 Jahren wurden vom BMI eine Reihe Regeln und Leitlinien zum Bau von Leichtwasserreaktoren aufgestellt, die für diese Anlagen uneingeschränkt Gültigkeit haben. Diese Kriterien betreffen sowohl die Schutzziele als auch Auslegungskriterien sowie die Standortanforderungen. Ergänzt werden diese Kriterien durch Leitlinien der Reaktorsicherheitskommission (RSK) und Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA).

Für Heizreaktoren haben die allgemeinen Grundsätze auf welchen diese Kriterien und Leitlinien basieren ebenfalls Gültigkeit und können unmittelbar angewandt werden. Solche Kriterien oder Anforderungen, die sich spezifisch nur auf das LWR-Konzept mit DWR beziehen lassen sich dagegen allenfalls sinngemäß auf Heizreaktoren übertragen. Nach Überprüfung aller wesentlicher Kriterien auf Übertragbarkeit und direkter Übereinstimmung mit den Anforderungen selbst oder sinngemäßer Übereinstimmung, kann eine Aussage über die Genehmigungsfähigkeit einer Heizreaktoranlage gemacht werden.

Eine von der GRS vorgenommene Überprüfung der Konzepte des NHR-200 bzw. des SECURE-H-400 bezüglich der Übereinstimmung mit den Sicherheitskriterien die grundsätzlich für alle Kernreaktoren und speziell für große LWR Gültigkeit haben, zeigte, daß die als direkt oder sinngemäß anwendbaren Anforderungen des sicherheitstechnischen Rahmens erfüllt bzw. als erfüllbar eingeschätzt werden können.



Durch die Anforderung stadtnaher Standorte kommt dem Sicherheitskonzept von Heizreaktoren eine besondere Bedeutung zu, da aktive Notfallschutzmaßnahmen wie Evakuierung praktisch nicht durchgeführt werden können. Dadurch wird neben den Sicherheitsebenen Basissicherheit und Qualitätssicherung, Störfallverhinderung und Begrenzung von Störfällen die Verhinderung von Unfällen bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen mit sehr niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit im Genehmigungsverfahren eine wichtige Rolle spielen, d.h. für einen stadtnahen Standort von Kernreaktoren müssen auf Notfallschutzmaßnahmen (Evakuierung etc.) zur Risikominimierung verzichtet werden und statt dessen durch konzeptionelle Maßnahmen verbunden mit anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen (Accident Management Maßnahmen) unfallbedingte Emissionen radioaktiver Stoffe auf die Werte begrenzt werden, die nach den aktuellen BMI - Regeln noch keine Evakuierung erfordern, z.B. die Dosis - Richtwerte für das Einleiten akuter Notfallmaßnahmen bei störfallbedingter Bestrahlung nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen.

Durch die sehr konservative Auslegung der meisten Heizreaktorkonzepte bzw. die inhärenten Sicherheitseigenschaften (insbesondere beim GHR) kann nach den bisherigen Untersuchungen davon ausgegangen werden, daß die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen mit Maximaldosen von Einzelpersonen der Bevölkerung  $> 10$  rem extrem gering ist ( $< 10^{-7}/a$ ).

### Spezielle Aspekte zur Auslegung von Heizreaktoren (Kapitel 3)

Die besonderen Anforderungen an Heizreaktoren für stadtnahe Standorte - wie hohe inhärente Sicherheit, träges Verhalten bei Transienten, passive Wärmeabfuhr, den Anforderungen entsprechendes Lastfolgeverhalten, seltener Brennelementwechsel, vereinfachter und damit kostengünstiger Aufbau - beeinflussen wesentlich die Reaktorauslegung.

Im Gegensatz zu Leistungsreaktoren können Heizreaktoren mit ihren relativ kleinen Leistungsdichten mit Naturumlaufkühlung betrieben werden. Diese hat den Vorteil, daß sie allein aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Steigraum und Fallraum funktioniert, also nicht ausfallen kann, solange im Sekundärkreis eine Wärmesenke existiert. Nachteile der Naturumlaufkühlung sind ein größeres Bauvolumen und (bei gleichem Brennstabgitter) ein höherer Uraneinsatz, insbesondere bei Anwendung einer einphasigen Naturumlaufkühlung.

Die Ein- und Zweiphasigkeit der Naturumlaufkühlung wirkt sich auch charakteristisch auf das dynamische Verhalten der Heizreaktoren aus. In zweiphasigen Systemen können für bestimmte Wertepaare von Eintrittsunterkühlung und Heizleistung thermohydraulisch bedingte Durchsatzoszillationen auftreten, die wegen der Rückwirkung der Moderator-dichte auf die Reaktivität zu Leistungoszillationen führen. Durch eine Stabilitätsanalyse werden in der vorliegenden Untersuchung die Stabilitätsbereiche für den Betrieb von kleinen und großen Heizreaktoren identifiziert. Zur Absicherung des Rechenmodells dienen Experimente an einer beheizten Testschleife mit Naturumlaufkühlung.

Einen relativ breiten Raum nimmt die Analyse des unregelmäßigen Lastfolgeverhaltens von Heizreaktoren mit Naturumlaufkühlung ein. Beispiele für den ein- und zweiphasigen Fall sind dabei HERE-300 und NHR-200. Entgegen der landläufigen Erwartung zeigen die dynamischen Rechnungen, daß auch das zweiphasige System unter Heizreaktorbedingungen ein von Natur aus richtiges Lastfolgeverhalten aufweist.

Zum Test des Systemverhaltens bei Störungen wurde u.a. das kurzzeitige Ziehen von Steuerelementen (NHR-200) untersucht. Als Beispiel für einen ATWS-Störfall ist für das zweiphasige System NHR-200 der weitgehende Verlust der Wärmesenke ohne Verfahren der Steuerstäbe behandelt worden. Dabei zeigt sich, daß der im SWR erwartete rasche Leistungsanstieg unter Naturumlaufbedingungen nicht auftritt.

Durch geeignete neutronenphysikalische Auslegungen der Spaltzone unter Verwendung erhöhter Spaltstoffanreicherung, abbrennbarer Neutronengifte (Gadolinium) und zentraler Kanäle mit nichtsiedendem Wasser im Brennelement - können lange Zykluszeiten und betragsmäßig kleine Dampfblasenkoeffizienten der Reaktivität erzielt werden. In Verbindung mit höheren Gadoliniumkonzentrationen ist die Abschaltsicherheit trotz relativ hoher Spaltstoffanreicherung mit der im SWR üblichen Anordnung der kreuzförmigen Steuerelemente gewährleistet.

#### Untersuchung des Kernverhaltens bei der hypothetischen Annahme des Ausfalls sämtlicher Wärmesenken (Kapitel 4)

In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt der Untersuchung des Kernverhaltens verschiedener Heizreaktoren unter schweren Störfallbedingungen. Die Analysen, die mit dem Kernschmelzcode KESS-2 durchgeführt wurden, beschränken sich jedoch auf Heizreaktoren (NHR-200, SHR-10, SECURE-H-400), deren ausgereifte Konzeption teilweise auf den SWR bzw. DWR basiert. Ausgehend von einer Störung in der Wärmeabfuhr, wird



bei den Störfallanalysen des weiteren unterstellt, daß sämtliche Nachwärmeabfuhrsysteme ausgefallen oder inaktiviert sind ("worst case").

Unter Verwendung eines Modells zur Wasserverdampfung aufgrund des Druckabfalls im RDB, bedingt durch das Öffnen der Sicherheitsventile, lassen sich zunächst Zeiten für die untersuchten Heizreaktoren SHR, Siemens/KWU-NHR und SECURE-H ermitteln, die angeben, wann die Kernfreilegung beginnt. Mit der nachfolgenden KESS-2-Analyse kann dann der Zeitbereich von Beginn der Kernfreilegung bis zum Einsetzen der exothermen Zirkon-Wasser-Reaktion ermittelt werden. Sowohl für den SHR als auch für den Siemens/KWU-NHR ergibt sich diese Zeitspanne zu ca. 14 h, für den SECURE-H beträgt sie aufgrund der geringen Leistungsdichte während der Kernfreilegung und der größeren Wassermasse in der radialen Kernumgebung ca. 44 h. Bei den untersuchten Heizreaktoren tritt ca. 0,5 h später Kernschmelzen auf.

Durch eine pessimistische Abschätzung können dann Zeiten angegeben werden, innerhalb derer geeignete Accident-Management-Maßnahmen mit Erfolg durchzuführen sind, um die vollständige Nachwärmeabfuhr sicherzustellen und somit schwere Kernschäden zu verhindern. Die Zeitspanne, die für den SHR 23 h, für den Siemens/KWU-NHR 30 h und für den SECURE-H 15 d beträgt, ist zur Wiederherstellung der Kühlbarkeit des Kerns ausreichend.

Des weiteren wurde das Aufheizverhalten des Kerns des heliumgekühlten und graphitmoderierten GHR unter vergleichbaren Störfallbedingungen diskutiert. Aufgrund der Wärmeabfuhr ins Erdreich bleibt die Maximaltemperatur im Kern unterhalb der Temperatur, die einen Partikelbruch bewirkt, d. h. selbst ein Totalausfall der aktiven Nachwärmeabfuhrsysteme mit gleichzeitigem Druckabbau im Primärsystem führt zu keiner merklichen Spaltproduktfreisetzung, so daß selbst bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen die Störfallplanungswerte der maximal zulässigen Individualdosis weit unterschritten bleiben.

#### Kostenermittlung für Kernheizwerke (Kapitel 7)

Die bisher bekannten, für die Verhältnisse in der Bundesrepublik interessanten, Heizreaktorkonzepte sind nur zum Teil so detailliert, daß Kosten ermittelt werden können. Es sind dies die Anlagen NHR-200, GHR-10, SHR-10, SECURE-H-400. Die beiden 10 MW-Anlagen GHR und SHR wurden in der Schweiz analysiert und verglichen, die Anlagen NHR und SECURE-H wurden für verschiedene Anwendungen bereits angeboten (SECURE-H für Fernwärme in Helsinki und Seoul, NHR für Fernwärme in China). Prototypanlagen

wurden jedoch noch nicht erstellt, daher sind Kostenschätzung mit z. T. großen Unsicherheiten behaftet. Die Einflüsse von vorhandenen Unsicherheiten in Investitionskosten, Betriebskosten, Brennstoffkreislaufkosten sowie weiterer wichtiger Parameter auf die Wärmeeresetzungskosten werden durch Sensitivitätsanalysen aufgezeigt, die Hinweise auf die zu erwartende Bandbreite in den Wärmeeresetzungskosten ergeben können.

Die Kostenrechnung wird mit realer Diskontierung durchgeführt. Für die wesentlichen Einflußgrößen auf die Brennstoffkreislaufkosten wie Natururanpreis, Preise für Konversion, Anreicherung im Brennelementherstellung wird von keinem Anstieg der realen Preise ausgegangen.

Für die spezifischen Anlagekosten wurden Schätzkosten von 750 DM/kW für den SECURE-H, 1000 DM/kW für den NHR, 2000 DM/kW für den GHR und 2250 DM/kW für den SHR angenommen. Dabei wurde angenommen, daß diese Anlagen mehrfach gebaut werden können, zumindest in einer Kleinserie, damit die Entwicklungskosten auf mehrere Anlagen verteilt werden können. Die in den Systemvergleichen verwendeten Anlagekosten basieren auf Angaben der Hersteller, um Konsistenz zu anderen Studien zu haben. Als Betriebszeit der Anlage wurde 30 Jahre angenommen. Nach Abschalten der Anlage werden 10 Jahre Abklingzeit und dann Abbruch und Beseitigung angenommen. Für die Abrißkosten werden 9 % der Anlagekosten angenommen, die sich an den derzeit geschätzten Kosten für große LWR orientieren. Die gesamten die Anlage betreffenden Kosten werden mit der Barwertmethode auf den Inbetriebnahmezeitpunkt der Anlage umgerechnet und mit der Annuitätsmethode auf die gesamte Produktionszeit gleichmäßig verteilt.

Für die Personalkosten wurde von einer geringen Anzahl von Personen, die Anlage steuern bzw. warten und überwachen, ausgegangen. Entsprechend der Leistungsgröße wurden für den SECURE-H-400 40 Personen, den NHR-200 30 Personen, für die 10 MW-Anlagen 12 Personen (bemannte Anlage) bzw. 2 Personen (vollautomatischer fernüberwachter Betrieb) angenommen. Die Realisierbarkeit dieser geringen Anzahl wird jedoch durch ein umfangreiches Testprogramm mit einem Prototypreaktor nachzuweisen sein.

Bei den Brennstoffkosten wurde den unterschiedlichen Reaktorzyklen und Anfangsanreicherungen Rechnung getragen. Hierbei könnten noch durch Optimierung der Auslegung günstigere Brennstoffkreislaufkosten erzielt werden. Bei der Entsorgung wurde integrierte

Entsorgung bei LWR-Brennstoff und direkte Endlagerung bei HTR-Brennstoff angenommen, und zwar zu den derzeit veröffentlichten und in den gängigen Studien verwendeten Preisen.

Wärmegestehungskosten für Kernheizwerke bei 4000 h/a Auslastung und den Basisannahmen

SHR-10	GHR-10	NHR-200	SECURE-H-400
73,82DM/MWh	68,63 DM/MWh	37,45 DM/MWh	29,94 DM/MWh

Die hier ermittelten Wärmegestehungskosten sind Basis für die im Systemvergleich und in der Fallstudie Stuttgart durchgeführten Analysen.



### Teil 3: Energiewirtschaftliche Einordnung von Kernheizwerken

Eine wesentliche Aufgabenstellung dieses Projekts ist die Potentialabschätzung für Kernheizwerke. Die Analysen, die in Kapitel 9 durchgeführt werden, betrachten technische Potentiale, welche auf zwei Ebenen durchgeführt wird, einerseits wird in Kapitel 5 der Wärmemarkt, andererseits in Kapitel 6 das bestehende Fernwärmesystem als Basis einer Potentialabschätzung analysiert.

#### Der Niedertemperaturwärmemarkt der Bundesrepublik Deutschland (Kapitel 5)

Kernheizwerke sind für die Erzeugung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau und damit für die Einspeisung in Nah- bzw. Fernwärmenetze ausgelegt. Das System Fernwärme kann die Versorgung mit Raumwärme, Warmwasser und Prozeßwärme bis 200°C übernehmen. Der Niedertemperaturwärmemarkt der Bundesrepublik Deutschland, welcher diese Verwendungszwecke zusammenfaßt, stellt also das theoretische Potential für Kernheizwerke. Es wird der Bedarf von Niedertemperaturwärme im Energiesystem der Bundesrepublik im Jahr 1985 sowie deren Entwicklung in der nahen Zukunft (2000) in drei Szenarien analysiert, um die Anteile des Endenergieverbrauchs zu ermitteln, die ohne Betrachtung technischer Restriktionen mit Wärme aus Kernheizwerken versorgt werden können. Weiterhin werden die aus diesem Bereich resultierenden Schadstoffemissionen abgeschätzt.

Die Untersuchung des existierenden NT-Wärmemarktes muß die Sektoren Industrie, Kleinverbraucher und Haushalte berücksichtigen. Der Sektor der Industrie fragt nur 17 % seines Endenergieverbrauchs als NT-Wärme nach, woran der Verbrauch zur Raumwärmeversorgung den größten Anteil hat. Folgende Industriezweige weisen eine nennenswerte NT-Wärmenachfrage auf: Investitionsgüter produzierendes Gewerbe, Nahrungs- und Genußmittelgewerbe, Teile des Verbrauchsgüter produzierenden Gewerbes, Zellstoff-, Papier- und Pappeerzeugung und chemische Industrie. Die Projektion ergibt mit minus 5 % bis minus 20 % einen stark rückläufigen Verbrauch des Energieverbrauchs des Sektors im NT-Bereich, wobei die Branchen mit nennenswerter NT-Nachfrage weniger stark betroffen sind. Bei den Kleinverbrauchern ist mit 74 % ein großer Teil des Endenergieverbrauchs im Bereich der Bereitstellung von NT-Wärme angesiedelt, die Raumwärme alleine hat einen Anteil von 57 %, was darauf hindeutet, daß in den meisten Sparten dieses Sektors NT-Wärme vornehmlich zur Raumwärmeversorgung und Warmwasserversorgung eingesetzt wird. Die Projektion der Energienachfrage deutet einen Rückgang von 2 bis 11 % bis zum Jahr 2000 an, welcher die meisten Sparten betrifft. Die Haushalte setzen mit

92 % den größten Teil Ihres Energieverbrauchs zur Erzeugung von Raumwärme und zur Warmwasserbereitung ein und die durchgeführte Projektion weist nahezu unabhängig vom Szenario einen Rückgang von etwa 15 % auf.

Im Rahmen der gesamten bundesdeutschen Endenergienachfrage von 7,4 GJ im Jahr 1985 repräsentiert die Raumwärme einen Anteil von 36 %, die Warmwasserbereitung 5 % und die Niedertemperaturprozeßwärme 3 % und 56 % der Endenergie werden für sonstige Verwendungen wie Hochtemperaturprozesse oder Kraftanwendungen eingesetzt. Am Endenergieverbrauch für Niedertemperaturverwendungen halten die Haushalte und die Kleinverbraucher zusammen 87 %. Die Untersuchung möglicher Zukunftsentwicklungen des NT-Wärmemarktes ergibt, daß die Nachfrage im Jahr 2000 in der mittleren Variante um über 10 % geringer sein könnte als heute, welches zur Folge hat, daß anderer Niedertemperaturwärmeerzeugersysteme verdrängt werden müssen, falls Kernheizwerke eingesetzt werden sollen, denn ein Zubaupotential des NT-Wärmemarktes existiert nicht.

Die Ermittlung der Schadstoffemissionen im Zusammenhang mit dem NT-Wärmemarkt kann hier nur grob abgeschätzt werden. Durch den geringeren Endenergieverbrauch, durch Brennstoffsubstitution und durch technische Emissionsminderungsmaßnahmen lassen sich die Freisetzungen aller betrachteten Schadstoffe im Zusammenhang mit dem NT-Wärmemarkt bis zum Jahr 2000 reduzieren.

#### Fernwärme in der Bundesrepublik Deutschland (Kapitel 6)

Die Fernwärme bedient den Niedertemperaturwärmemarkt. Kernheizwerke sind dazu konzipiert, in Nah- oder Fernwärmenetze einzuspeisen. Es werden die Rahmenbedingungen der Fernwärmewirtschaft dargestellt, die das Umfeld für den Einsatz von Kernheizwerken bilden und in die sich Heizreaktoren als Wärmeerzeuger einbinden lassen müssen. Es lassen sich in der Fernwärmewirtschaft eine Reihe struktureller Merkmale feststellen, die Einsatzmöglichkeiten für Kernheizwerke eingrenzen und die zur Potentialabschätzung herangezogen werden.

Innerhalb der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland weist die Fernwärme eine zunehmende Bedeutung auf, sie konnte von 1975 bis 1988 einen Zuwachs des Anteil am Endenergieverbrauch von 1,7 % auf 2,7 % erreichen, was einer Bereitstellung von etwa 200 PJ entspricht. Auch für die Zukunft wird mit einem zwar verringerten, jedoch gegenüber dem stagnierenden bzw. schrumpfenden Wärmemarkt beachtlichen Wachstum gerechnet. Eine Umfrage unter den Fernwärmeunternehmen ergab eine



durchschnittliche Erwartung eines Wachstums der Wärmeabgabe von 1,3 % pro Jahr. Die Fernwärme erfuhr zeitweise eine starke politisch motivierte finanzielle Förderung, die durch ihre gesamtwirtschaftlichen und umwelttechnischen Vorteile begründet wird und die hauptsächlich die finanzielle Belastung durch die Anlaufkosten mindern soll. Diese gezielte Förderung ist ausgelaufen und findet momentan keine Fortsetzung, jedoch wird derzeit von einer baldigen Neuauflage der Fernwärmeförderung ausgegangen.

Die Fernwärme beruht in der Bundesrepublik Deutschland in hohem Maße auf Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, wobei sich der Anteil der installierten Leistung der KWK-Anlagen seit 1975 um 10 % auf heute 57 % reduziert hat. Allerdings hat sich die damit erzeugte Wärme um 5 % auf 78 % erhöht, welches auf eine wesentliche Erhöhung der Auslastung dieser Anlagen hindeutet.

Im Jahr 1986 repräsentierten 14 der etwa 140 Fernwärmeversorgungsunternehmen etwa die Hälfte und insgesamt 31 Unternehmen drei Viertel des Anschlußwertes der Fernwärmeversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Die Fernwärmeverteilung erfolgt mit einer, seit 1975 etwa konstanten Zahl von Netzen, welches darauf hindeutet, daß der Ausbau im wesentlichen durch Verdichtung und Vernetzung bestehender Netze und nicht durch Netzneubau erfolgt. Der größte Teil der neugebauten Leitungen ist für Vorlauftemperaturen bis 130°C ausgelegt, wobei die Kunststoff-Mantelrohr-Technik dominiert. Eine Untersuchung der Netzgrößenklassen der Heißwassernetze ergibt, daß alleine etwa 68 % der etwa 430 Heißwassernetze weniger als 35 MW Anschlußwert haben, damit allerdings weniger als 10 % des gesamten Anschlußwertes repräsentieren. Die Zahl der Netze mit über 100 MW Anschlußwert liegt bei etwa 90, sie versorgen rund 3/4 des Anschlußwertes.

Eine Untersuchung des Alters der Fernwärmeerzeuger, für die eine Unternehmensbefragung unter den Fernwärmeversorgungsunternehmen durchgeführt wurde, ergibt, daß die meisten der in Betrieb befindlichen Wärmeerzeuger nach 1950 gebaut wurden. Ein Maximum erreichte der Bau von Fernwärmeerzeugern zwischen 1970 und 1975. Seither werden jährlich etwa 780 MW Erzeugerleistung gebaut. Bei den Anlagen unter 50 MW dominieren die Heizwerke zahlenmäßig. Über 50 MW werden im wesentlichen Heizkraftwerke betrieben. Betrachtet man die Fernwärmeerzeuger nach Standorten, so ist festzustellen, daß Heizkraftwerke deutlich größere Leistungseinheiten darstellen, als Heizwerke, welche allerdings zahlenmäßig häufiger sind.

### Potentialabschätzung für Kernheizwerke (Kapitel 9)

Eine wichtige Aufgabenstellung im Rahmen dieses Projekts ist Ermittlung des technischen Potentials für Kernheizwerke. Diese Frage wird auf zwei Ebenen bearbeitet. Zum einen wird das technische Potential in der "klassischen" Fernwärmewirtschaft, zum anderen ein möglicher Einsatz von Kernheizwerken im analysierten Niedertemperaturwärmemarkt untersucht.

Die Analyse des technischen Potentials in der heutigen Fernwärmewirtschaft baut auf deren strukturellen Merkmalen auf, wobei die Fernwärmeverteilungsnetze, die Fernwärmeversorgungsunternehmen und der Anlagenpark der Wärmeerzeuger betrachtet werden. Um einen technisch-ökonomisch maximal sinnvollen Grundlastanteil an der Wärmenachfrage der etwa 140 Fernwärmeversorgungsunternehmen zu ermitteln, wurde ein Modell entwickelt. Bei einer Einbindung, bei der das Kernheizwerk mit etwa 90 % der Wärmeeinspeisung eine optimale Einbindung hat, deckt es einen Anteil von etwa 50 % der Wärmehöchstlast ab und wird dabei mit einer Auslastung von 4000 h/a betrieben.

Eine Umfrage unter den Fernwärmeversorgungsunternehmen zeigt, daß in der Fernwärmewirtschaft heute historisch bedingt eine große Zahl kleiner Wärmeerzeuger installiert ist. Die Analyse der typischen Entwicklung des Aufbaus einer Fernwärmeversorgung deutet darauf hin, daß zukünftig Fernwärmeerzeuger nicht entsprechend der heute bestehenden Wärmeerzeugergrößenstruktur zugebaut werden, sondern daß größere Einheiten zum Einsatz kommen werden.

Die ermittelten technischen Potentiale für Kernheizwerke in der bestehenden Fernwärmewärmewirtschaft belaufen sich auf etwa 180 bis 380 Kernheizwerke mit 10 MW Leistung, 20 bis 35 Anlagen mit 100 MW, 10 bis 15 Kernheizwerke mit 200 MW und maximal 10 Anlagen der 400-MW-Klasse. Es ergibt sich damit auf heutiger Basis eine installierbare Kernheizwerksleistung von etwa 9,8 bis 14,3  $\text{GW}_{\text{th}}$ . Eine Abschätzung möglicher Entwicklungen der Fernwärmewirtschaft deutet geringe Wachstumsraten an, um die das technische Kernheizwerkspotential wachsen könnte - eine Zunahme der Fernwärmenachfrage zwischen 1 und 1,5 % pro Jahr wird für möglich gehalten, was einem Wachstum von zwischen 15 und 25 % bis zum Jahr 2000 entspricht.

Die Analyse des technischen Potentials für Kernheizwerke im Rahmen des gesamten Niedertemperaturwärmemarktes untersucht eine stark erweiterte Versorgung der Wärmeverbraucher mittels Nahwärme und Fernwärme, die weitgehend mit



Kernheizwerken gespeist wird. Es wird eine Grundlastversorgung zu 50 % der Wärmehöchstlast betrachtet, wobei die Annahme getroffen wird, daß lediglich 75 % der Einwohner mit Fernwärme zu erreichen sind, womit berücksichtigt ist, daß ein Teil der Bevölkerung am Ortsrand oder außerhalb von Siedlungen wohnt. Die Spitzenlast wird mit fossilen Spitzenlastanlagen erzeugt.

Grundlage der Analyse ist die Gemeindestruktur in der Bundesrepublik Deutschland. Eine eingehende Untersuchung der Verteilung der Bevölkerung in den einzelnen Bundesländern ergibt, daß die Zusammenfassung einzelner Siedlungen zu Gemeinden in den einzelnen Bundesländern nicht direkt vergleichbar ist, so daß ein Abgleich der Daten notwendig ist. Auf der Basis einer korrigierten Gemeindestruktur und der damit verbundenen Verteilung der Bevölkerung auf Gemeinden unterschiedlicher Einwohnerzahl läßt sich ein technisches Kernheizwerkspotential ermitteln.

Es ergibt sich ein technisches Potential von etwa 7100 bis 9200 Anlagen der 10 MW-Klasse, 110 bis 170 Kernheizwerke der 100 MW-Klasse, 40 bis 75 Anlagen mit je 200 MW und etwa 90 Kernheizwerke mit 400 MW. Die insgesamt installierbare Kernheizwerksleistung auf heutiger Basis betrüge damit zwischen 126 und 160  $\text{GW}_{\text{th}}$ . Die analysierte Entwicklung des NT-Wärmemarktes bis zum Jahr 2000 ergibt eine Schrumpfung um etwa 10 %, womit sich die Zahl einsetzbarer Kernheizwerke entsprechend verringert.

#### Vergleich von Kernheizwerken mit konkurrierenden Wärmeerzeugungssystemen (Kapitel 8)

Um die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Wärmeerzeugungssysteme zu ermitteln, wird ein Vergleich von Kernheizwerken mit konkurrierenden Wärmeerzeugungssystemen durchgeführt. Die Konzepte für Kernheizwerke müssen sich in der Praxis einer großen Bandbreite von erprobten und neuen fossilen Wärmeerzeugungstechnologien verschiedenster Leistungsklassen als Konkurrenz stellen. Die Bandbreite der Techniken reicht dabei von Kraft-Wärme-Kopplung in Großkraftwerken bis zur Einzelfeuerung in Einfamilienhäusern. Für den Systemvergleich wurden vier Leistungsklassen gebildet:

Klasse I	Anlagen zwischen 150 und 400 MW Fernwärmeleistung
Klasse II	Anlagen um 100 MW Fernwärmeleistung
Klasse III	Anlagen um 10 MW Fern-/Nahwärmeleistung
Klasse IV	Anlagen zwischen 10 und 40 kW Wärmeleistung

In den Klassen I - III werden Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke und Heizwerke für die Brennstoffe Steinkohle, Heizöl leicht und schwer und Erdgas betrachtet. In Klasse IV sind

Öl- und Gaskessel enthalten. Die Berechnungen der Wärmegestehungskosten wird mit Hilfe der dynamischen Annuitätenmethode aus volkswirtschaftlicher Sicht durchgeführt. Für die Entwicklung der realen fossilen Energieträgerpreise auf Preisbasis 1986 wurden die zwei in der folgenden Tabelle gezeigten Szenarien in DM/MWh zugrunde gelegt:

Jahr Szenario	2000		2010		2020	
	I	II	I	II	I	II
Großkunde						
HS	25,9	25,9	25,9	40,3	25,9	40,3
HEL	42,8	42,8	42,8	64,4	42,8	64,4
GAS	29,2	29,2	29,2	47,2	29,2	47,2
STK	36,7	36,7	36,7	39,6	36,7	39,6
Haushalte						
HEL	50,7	50,7	50,7	77,2	50,7	77,2
GAS	63,7	63,7	63,7	90,9	63,7	90,9

Szenario I: geringer Preisanstieg bis 2000, dann stagnierend

Szenario II: moderater Preisanstieg bis 2010, dann stagnierend

Die Preise für Kernbrennstoffe bleiben im Szenario I + II gleich. In einem ersten Vergleich der reinen Wärmegestehungskosten der Anlagen der Klassen I - III aus der Sicht potentieller Betreiber, zeigt sich, daß die spezifischen Wärmegestehungskosten von Kernheizwerken in der Bandbreite der fossilen Vergleichsanlagen liegen wobei die teuersten Anlagen mit heimischer Steinkohle fahren und die günstigsten mit Erdgas.

Die Wettbewerbsfähigkeit der Heizreaktoren ist stark vom angenommenen Szenario der fossilen Energieträgerpreise abhängig. Sie sinkt erheblich, wenn von stagnierenden oder nur moderat steigenden fossilen Energieträgerpreisen ausgegangen wird. Werden stark steigende Energieträgerpreise angenommen, so sind deutliche Vorteile für Kernheizwerke zu erkennen. Die deutlich teurere Wärmeerzeugung in kleinen Kernheizwerken reagiert besonders sensitiv auf den zugrunde gelegten Personalaufwand (bemannt, unbemannt).

Beim Vergleich mit Hausheizungsanlagen ist den Kosten der Nah- bzw. Fernwärmeerzeugung noch ein Zuschlag für Spitzenlast und Wärmetransport und -Verteilung zuzuordnen, um so die spezifischen Wärmegestehungskosten beim Endverbraucher zu erhalten.

Dabei ergibt sich daß schon bei stagnierenden Energieträgerpreisen Fernwärmesysteme mit großen Kernheizwerken unter den hier getroffenen Annahmen konkurrenzfähig



Wärme liefern können. Bei moderat oder stark steigenden Preisen wird dieser Vorteil deutlicher da sich hier die Kapitalintensität von Kernheizwerken positiv auswirkt. Kleine Kernheizwerke scheinen erst bei stark steigenden Energiepreisen die Grenze der Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen. Die hier ermittelten Ergebnisse unterliegen einer gewissen Unsicherheit, da eine genaue Prüfung der Herstellerangaben der Investitionskosten für Kernheizwerke nicht durchgeführt werden konnte. Steigende Investitionskosten würden die Wettbewerbssituation für Kernheizwerke sehr schnell negativ beeinflussen. Hier besteht für die Zukunft weiterer Analysebedarf.

Alle Aussagen beziehen sich auf Vergleich mit dem Einsatz heimischer Steinkohle. Wird Importkohle eingesetzt, die langfristig ungefähr halb so teuer ist wie die heimische Steinkohle, so ergeben sich daraus günstigere Fernwärmegestehungskosten. Diese Einsatzmöglichkeiten wurden nicht weiter betrachtet, da sie dem momentan erklärten Ziel der langfristigen nationalen Politik zur Sicherung der Förderung heimischer Steinkohle und Importrestriktionen für ausländische Steinkohle widerspricht. Bei einer Überprüfung der politischen Zielsetzung ist dies mit ins Kalkül aufzunehmen.

Der Systemvergleich, aus dem einige Ergebnisse unter Berücksichtigung der Spitzenlast- und Wärmeverteilungskosten in der folgenden Tabelle gezeitigt sind, macht deutlich, daß die Wärmegestehungskosten der Kernheizwerke vergleichsweise hohe Kapitalkosten aufweisen. Gegenüber den Vergleichsanlagen weisen sie niedrige Brennstoffkosten auf, wobei bei den Uranpreisen langfristig eine gewisse Unsicherheit besteht - der bislang entspannte Uranmarkt könnte bei einer rasch ansteigenden Nachfrage mit Preiserhöhungen reagieren. Die Vorteile der Kernheizwerke werden besonders deutlich, wenn die Auslastung steigt, da dies zu sinkenden spezifischen Wärmegestehungskosten führt. Die in der Fernwärme übliche Problematik der Anlaufkosten, die besonders kapitalintensive Anlagen betrifft, kann reduziert werden, wenn davon ausgegangen wird, daß Kernheizwerke in schon bestehende Fernwärmeversorgungssysteme als Ersatz von Altanlagen integriert werden und damit schon bei Inbetriebnahme eine hohe Auslastung aufweisen.

Parallel zu einer Diversifizierung der Energieträger im Wärmemarkt wird durch einen Beitrag der Kernenergie eine Reduzierung der Verbrennung fossiler Brennstoffe erreicht. Beim Ersatz bestehender Fernwärmeerzeuger wird dabei schwerpunktmäßig Kohle und bei einem Ausbau der Fernwärme insbesondere Heizöl substituiert. Beide Strategien tragen zur Reinhaltung der Luft mit Schwerpunkt CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei, wobei aus volkswirtschaftlicher Sicht keine Kosten für die Luftreinhaltung anfallen, da die spezifischen

Wärmeerzeugungskosten der Kernenergieanlagen günstiger sind als die der ersetzten oder Vergleichsanlagen.

Szenario	Anlage	Brennstoff	Fernwärmeleistung [MW]	Auslastung [h/a]	spezifische Wärmekosten [DM/MW]
I	SECURE	Uran	396	4000	71,0
I	NHR - KWU	Uran	198	4000	73,1
I	HTR	Uran	255	4000	99,0
I	HKW	Steinkohle	375	4000	102,8
I	HKW GuD	Erdgas	150	4000	66,2
I	HKW	Steinkohle	110	4000	109,4
I	HW	Erdgas	100	4000	71,6
I	GHR	Uran	10	2700	133,6
I	SHR	Uran	10	2700	127,4
I	HKW	Erdgas	11	2700	90,2
I	Heizkessel	Erdgas	0,016	1600	132,3
II	SECURE	Uran	400	4000	74,0
II	NHR - KWU	Uran	200	4000	76,1
II	HTR	Uran	255	4000	101,9
II	HKW GuD	Erdgas	150	4000	92,0
II	HKW WSF	Steinkohle	70	4000	105,4
II	HKW	Erdgas	70	4000	80,6
II	GHR	Uran	10	2700	136,6
II	SHR	Uran	10	2700	130,4
II	HKW WSF	Steinkohle	20	2700	147,4
II	HW	Erdgas	10	2700	100,8
II	Heizkessel	Erdgas	0,043	1800	125,9

Der Einsatz der Kernenergie im Wärmemarkt ist aus Sicht der Umweltbelastung positiv zu bewerten. Dabei ist die Langfristigkeit dieses Vorteils hervorzuheben, denn die Emissionssituation ist über die Lebensdauer der Anlage gesichert. Beim Einsatz von Kernheizwerken muß jedoch berücksichtigt werden, daß es im Normalbetrieb zu einer geringfügigen Freisetzung radioaktiver Spaltstoffe kommt. Analysen und Bewertungen denkbarer Störfälle müssen Aufschluß über die damit verbundenen Risiken für die Gesellschaft geben.



## Teil 4: Weitere Aspekte für die Einführung von Kernheizwerken

### Exportchancen für Kernheizwerke (Kapitel 10)

Die Einführung der Kernheizwerkstechnologie eröffnet die Möglichkeit, die Wettbewerbsfähigkeit der Bundesrepublik im internationalen Handel durch den Export dieser Anlagen zu stärken. Um diese Möglichkeit zu untersuchen, wurde in Kapitel 10 unter Anwendung eines Indikatorensystems eine Eingrenzung der Länder durchgeführt, die für einen Import von Kernheizwerken in Frage kommen.

Anhand von Basisindikatoren wie den klimatischen Verhältnissen und der Bevölkerungsdichte läßt sich die Zahl der in Frage kommenden Länder auf diejenigen eingrenzen, die in kalten und gemäßigten Zonen liegen und einen ausreichenden Wärmebedarf und Wärmedichte für den Einsatz von Kernheizwerken bieten. Zusätzlich werden die Länder analysiert, die eine hohe Industriedichte in denjenigen Branchen aufweisen, die einen großen Niedertemperaturwärmebedarf haben. Anhand der Wirtschaftsindikatoren Bruttoinlandsprodukt, Außenhandelsaldo und Verschuldungsgrad erfolgt eine erste Orientierung. Der Warenhandel mit dem Ausland wird durch ein hohes Bruttoinlandsprodukt eines Importlandes begünstigt. Bei der Außenhandelsbilanz wird ein positiver Außenhandelsaldo als günstig für die Exportchancen angesehen. Auch könnten durch die Entstehung des EG-Binnenmarktes Hemmnisse beim Export von Kernheizwerken vermindert werden. Als Industrieindikatoren werden die Entwicklungstendenzen in Branchen untersucht, die durch einen hohen Niedertemperaturwärmebedarf gekennzeichnet sind. Die Analyse der Energieindikatoren betrachtet im wesentlichen die Energieimportabhängigkeit der Länder. Vor allem in den von hohen Ölimporten abhängigen Ländern ist es das erklärte Ziel der Energiepolitik, den Ölanteil bei den eingesetzten Primärenergieträgern zu reduzieren. Dies bedeutet, daß im Prinzip eine Reihe von Indikatoren für eine gute Exportsituation von Kernheizwerken sprechen.

Die Exportchancen sind jedoch teilweise dadurch gehemmt, daß die bundesdeutsche Kernenergiewirtschaft in anderen Ländern in Konkurrenz zu der weltweit kraftwerksbauenden Industrie steht, oder vielfach eine nationale Industrie vorfindet, die in der Lage ist, solche Kernheizwerke selbst zu bauen. So gilt derzeit für die deutschen Hersteller, daß lediglich 17 % des Weltmarktes im Wettbewerb als zugänglich zu betrachten sind. Besonders innerhalb der EG ist der Inlandsmarkt oftmals Domäne der heimischen Industrie, was sich jedoch nach 1992 etwas auflockern kann. Frei von Beschränkungen dieser Art sind insbesondere Entwicklungsländer.

Bezüglich der Umweltindikatoren gilt generell, daß die Situation bei den Umweltbelastungen in den betrachteten Ländern eine erhebliche Verbesserung erfahren müßte. Die Exportsituation von Kernheizwerken wird folglich durch die Umweltsituation in den möglichen Importländern stark begünstigt. Für den Export von Kernheizwerken spielt die Wirtschaftlichkeit der Wärmeproduktion in Kernheizwerken gegenüber Konkurrenzenergien eine wesentliche Rolle. Den Wärmebereitstellungskosten der Kernheizwerke werden die Preise für leichtes Heizöl inklusive Steuern in den verschiedenen Ländern gegenübergestellt.

Insgesamt ergibt sich für 6 Länder eine gute Exportsituation für Kernheizwerke, dies sind Dänemark, Frankreich, Polen, Ungarn, die UdSSR und Japan. Für weitere 11 Länder werden Exportpotentiale gesehen, für Finnland, Belgien, die Schweiz, Österreich, Spanien, Portugal, die DDR, die CSFR, Bulgarien, China und Südkorea. Da das Potential vor allem in Osteuropa und in Asien liegt, kommt der weiteren Entwicklung des politischen Dialogs mit diesen Staaten eine wesentliche Bedeutung für die Exportchancen von bundesdeutschen Kernheizwerken zu. Der nächste Schritt müßte eine detaillierte Analyse der 6 Länder hinsichtlich der Absatzchancen von bundesdeutschen Kernheizwerken sein, um auch den Anteil an Planung und Bau von Kernheizwerken (Engineering, Hardware, Software, usw.) zu ermitteln, der aus der Bundesrepublik in das jeweilige Land zu exportieren wäre.

Wichtigster Eckpfeiler des internationalen Nonproliferationsnetzwerkes ist der Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen (Atomwaffensperrvertrag), der bisher von 140 Staaten unterzeichnet wurde. Artikel 1 dieses Nichtverbreitungsvertrages verpflichtet die Kernwaffenstaaten, keine Kernwaffen oder Kernsprengkörper weiterzugeben oder beim Bau und Entwicklung Unterstützung zu leisten. Dennoch bestehen in dieser Fragestellung derzeit einige Probleme, so daß die Frage der Proliferation im Hinblick auf den Export von Kernheizwerken nicht bewertet werden kann.

#### Fallstudie Stuttgart (Kapitel 11)

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Einbindungsmöglichkeiten von Kernheizwerken in den bestehenden Kraftwerkspark der Technischen Werke der Stadt Stuttgart AG (TWS) untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist erstens die Überprüfung der technischen Realisierbarkeit des Einsatzes von Kernheizwerken, die im wesentlichen nur der Fernwärmeversorgung dienen, unter der Voraussetzung eines sicheren und zuverlässigen Betriebes der Fernwärmeversorgung. Zweitens sind die Chancen eines Kernheizwerkseinsatzes im Hinblick auf die emissionsfreie Fernwärmeerzeugung in einem



Ballungsraum mit teilweise hohen Luftbelastungen zu beurteilen. Drittens werden anhand von drei konkreten Fallbeispielen für einen Fernwärme- und Stromerzeugungsanlagenpark mit integrierten Kernheizwerken bzw. Kernheizkraftwerken die Jahreseinsatzweisen über ein Kraftwerkseinsatzoptimierungsprogramm ermittelt und entsprechende Jahreskosten beim Einsatz dieser Kernheizwerke gegenüber alternativen fossilen Erzeugungsstrukturen ermittelt.

Hinsichtlich der technischen Anforderungen eines Fernwärmeversorgungsunternehmens an den Betrieb von Kernheizwerken erscheinen alle sich in der Diskussion befindlichen Systeme diesen Anforderungen gerecht zu werden, allerdings existieren Heizreaktor-konzepte, deren Entwicklungsstand eine abschließende Beurteilung aus Sicht eines Fernwärmeversorgungsunternehmens nicht zuläßt. Die für die Betrachtung am konkreten Einbindungsbeispiel ausgewählten Kernheizsysteme mit Leichtwasserreaktor (ABB und Siemens/KWU) und Hochtemperaturreaktor (HRB) erscheinen technisch ausgereift und entsprechen den technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen eines Fernwärmeversorgungsunternehmens an einen sicheren und zuverlässigen Betrieb.

Aufgrund der Erfahrungen im Verlauf von Genehmigungsverfahren und bei der Errichtung und dem Bau konventioneller Kesselanlagen kann man für die Zukunft eindeutig das Fazit ziehen, daß Ausbaumaßnahmen in Kraftwerken innerhalb von Ballungsgebieten immer mehr auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen werden - wenn nicht gar verhindert werden. Hohe Schadstoffbelastungen - speziell Stickoxidbelastungen - lassen in den Ballungsräumen keine Zusatzbelastungen aufgrund zusätzlicher Emissionen zu, die aus Ausbaumaßnahmen der Energieerzeugung resultieren, falls nicht weitgehende umweltrelevante Auflagen erfüllt werden, resultieren. Hier wachsen - nicht zuletzt auch unter dem Aspekt des Treibhauseffektes - die Chancen eines zukünftigen Einsatzes von Kernheizwerken in der Fernwärmeversorgung.

Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Kernheizwerken sind mit Unsicherheiten behaftet und äußerst schwierig zu treffen, da teilweise keine belastbaren Angaben zu den Investitions- bzw. Betriebskosten dieser Anlagen vorhanden sind. Es wurden mit einem Tageseinsatzoptimierungsmodell innerhalb der Fernwärmeversorgung der TWS Jahreseinsatzzeiten für drei verschiedene Einsatzbeispiele von Kernheizwerks- bzw. Kernheizkraftwerkssystemen ermittelt. Im einzelnen wurde die Einbindung von drei zu einer Einheit zusammengefaßten 15 MW GHR-Blöcken, von einem 100 MW KWU-Block sowie von einem HTR-Modul mit 300 t/h Dampfleistung untersucht. Bei diesen Fallstudien wurden jeweils unterschiedliche Einbindungsarten und Kraftwerkskonstellationen vorausgesetzt. Die vorliegenden



Ergebnisse, lassen den Schluß zu, daß unter dem Kostendruck der Umweltschutzmaßnahmen konventioneller fossiler Anlagen eine Wirtschaftlichkeit der Fernwärmeerzeugung mit Kernheizwerken gegeben ist. Unter den angenommenen Voraussetzungen erreicht der GHR 4700 Vollastbenutzungsstunden pro Jahr und eine Kostenreduktion gegenüber dem konventionellen Anlagenbetrieb um 4 Mio. DM pro Jahr, welches etwa 1 % der Jahresbrennstoff- und Strombezugskosten entspricht. Für die KWU-Anlage beträgt die Vollastbenutzungsstundenzahl unter den vorausgesetzten Randbedingungen 5400 h/a, woraus sich ein Einsparpotential von 9 Mio. DM (3 %) ergibt. Da der HTR-Modul in Kraft-Wärme-Kopplung gefahren wird, d.h. Strom und Fernwärme gleichzeitig produziert, ist das Einsparpotential in diesem Fall gegenüber den konventionellen Anlagenfahrweisen am größten. Bei dieser Fallstudie ergibt sich für den HTR eine Auslastung von 8000 Vollastbenutzungsstunden und ein Einsparpotential von 64 Mio. DM und damit gegenüber dem konventionellen Betrieb um 20 % geringere Brennstoff- und Strombezugskosten, wonach den Investitionsangaben zufolge eine Wirtschaftlichkeit gegeben scheint. Allerdings sind aus Sicht der Energieversorgungsunternehmen bei diesem System auch die größten Unsicherheiten in bezug auf die Brennstoffver- und entsorgung und demzufolge auch auf die Kostenentwicklung zu verzeichnen.

Einer der wichtigsten Punkte beim Einsatz von Kernheizwerken in der Fernwärmeerzeugung ist die Akzeptanz der Bevölkerung für derartige Anlagen. Aus unserer Sicht ist derzeit allerdings noch kein Konsens in der Energiepolitik über die weitere Nutzung der Kernenergie in der Energieversorgung gefunden, so daß sich im Moment wohl keine breite Mehrheit für die Errichtung und den Betrieb von Kernheizwerken findet.

## Teil 5: Schlußfolgerungen, Empfehlungen, Forschungsbedarf

### Schlußfolgerungen

Bis jetzt werden Kernreaktoren weltweit praktisch nur zur Stromerzeugung eingesetzt. Die Möglichkeiten, durch Kraft-Wärme-Kopplung einen Beitrag zur Niedertemperaturwärmeversorgung zu leisten, sind sehr standortabhängig. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von Kernheizwerken wie niedrige Leistungsdichte und niedriger Druck sowie auf inhärenten Prinzipien und passiven Sicherheitseinrichtungen basierendem Sicherheitskonzept lassen sich nach den bisherigen Erkenntnissen stadtnahe Standorte realisieren, so daß Kernheizwerke durchaus mit alternativen Systemen wirtschaftlich konkurrieren können, wenn die spezifischen Investitionskosten wie von den potentiellen Herstellern angegeben nicht wesentlich überschritten werden. Das mit dem Betrieb von Kernheizwerken verbundene Risiko muß so gering sein, bzw. die Auswirkungen extrem unwahrscheinlicher schwerer Störfälle müssen auf die Anlage beschränkt bleiben, so daß eine Notfallplanung wie Evakuierung der Bevölkerung verzichtet werden kann. Die Anlagen müssen so ausgelegt sein, so daß genügend Zeit zur Verfügung steht, durch anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen auch bei Versagen aller Nachwärmeabfuhrsysteme die Nachzerfallsleistung abzuführen und somit schwere Kernschäden mit massiver Freisetzung radioaktiver Stoffe zu verhindern bzw. im Falle des Eintretens einer Kernschmelze die Auswirkungen auf die Anlage zu begrenzen. Für die Anlagen NHR, SHR und SECURE-H wurden diese Zeiten mit 30 h, 23 h und 15 Tage abgeschätzt. Für den GHR besteht auch bei Ausfall aller Wärmesenken und bei Druckentlastung zu keiner Zeit die Gefahr einer massiven Spaltproduktfreisetzung. Auch für die anderen untersuchten Heizreaktorkonzepte sind die Zeiten bis zu einer Kernfreilegung verhältnismäßig lang. Ein interessantes Konzept stellt ein leichtwassergekühltes Kernheizwerk mit zweiphasigem Naturumlauf dar. Hierzu wurden Untersuchungen zur Stabilität des Naturumlaufverhaltens durchgeführt, die Untersuchungen der entwickelnden Institutionen größtenteils bestätigen. Weiteren Aufschluß geben Experimente, die an Teilanlagen durchgeführt wurden: bei entsprechender Wahl von Unterkühlung, thermohydraulischer und reaktorphysikalischer Auslegung kann im gewünschten Leistungsbereich mit einem stabilen Leistungsbetrieb und Selbstregelverhalten gerechnet werden.

Trotz des vorhandenen technischen Potentials für den Einsatz von Kernheizwerken in der Niedertemperaturwärmeversorgung sind derzeit noch wenige Anlagen gebaut bzw. konkret in der Planung. In der Sowjetunion sind Doppelanlagen des AST-500 im Bau, in Kanada wird eine 2 MW-Demonstrationsanlage (SLOWPOKE) betrieben und in China eine



5 MW Prototypanlage. Wenn auch die Erfahrung mit dem Bau der kleinen Prototypanlagen von großem Wert für die Entwicklung von Heizreaktoren sind, ist es unerlässlich vor dem Bau einer Serie von Reaktoren einen Prototyp in der entsprechenden Leistungsklasse zu bauen um verlässliche Informationen über Bau, Genehmigung und Betrieb zu erhalten, die dann auch Grundlage genauere Wirtschaftlichkeitsrechnungen sein können. Da die Planungs- und Errichtungsphase für einen Prototyp mehrere Jahre erfordert, kann mit einer Einführung von Heizreaktoren in den Wärmemarkt nicht vor 10 Jahren gerechnet werden.

Die technischen Potentiale für Kernheizwerke innerhalb der bestehenden Fernwärmewirtschaft und bei Annahme einer Grundlastversorgung von 50 % der Wärmehöchstlast wurden untersucht. Es ergeben sich auf heutiger Basis etwa 10 bis 14  $\text{GW}_{\text{th}}$  in der Fernwärmeversorgung bzw. 126 bis 160  $\text{GW}_{\text{th}}$  für die gesamte technisch installierbare Kernheizwerksleistung falls die technische Potentialanalyse auf den gesamten Wärmemarkt ausgedehnt wird.

#### Energiepolitische Empfehlungen

Für die Einbindung von Kernheizwerken in die zukünftige Energieversorgung ist für das infrage kommende Konzept ein Genehmigungsverfahren für einen konkreten stadtnahen Standort erforderlich. Dazu müssen möglicherweise (wie in der Schweiz) noch zusätzliche Genehmigungsrandbedingungen geschaffen werden, die kernheizwerksspezifische Fragestellungen wie z.B. unbemannter Betrieb und Prüfung bei sehr langen Betriebszyklen (>10 Jahre) etc. regeln. Weiterhin ist es zur Gewinnung praktischer technischer sowie auch wirtschaftlicher Erfahrung mit Kernheizwerken unumgänglich, Prototypen unter Beachtung der sicherheitstechnischen und betrieblichen Anforderungen (z.B. innerhalb eines Kernforschungszentrums) zu bauen und zu betreiben. Die Nutzung der Kernenergie in der Nah- bzw. Fernwärmeerzeugung durch Heizreaktoren sollte nicht nur vom wirtschaftlichen Aspekt sondern auch vom Aspekt der Vermeidung schädlicher Spurengase zum Schutz der Erdatmosphäre betrachtet werden. Hier können Heizreaktoren sowohl für die lokale als auch für die globale Minderung der Schadstoffbelastung der Luft beitragen. Die aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen zu erwartenden Dosisbelastungen der Bevölkerung betragen bei den vorgestellten Konzepten (insbesondere beim GHR) nur geringe Bruchteile der natürlichen Strahlenbelastung. Sollen Kernheizwerke als Standbein des Energiesystems eingeführt werden, so kann dies nur erreicht werden, falls die Kernenergie generell, also auch zur Stromerzeugung, genutzt wird. Speziell bei der Infrastruktur z.B. zur Brennstoffver- bzw. -Entsorgung ist dies zu beachten. Die Möglichkeit der Auskopplung von Fernwärme aus Kernkraftwerken (wie

z.B. aus dem HTR-Modul) sollte dort wo es genehmigungstechnisch und wirtschaftlich möglich ist, weiterhin betrachtet werden.

#### Forschungsbedarf

Die bisher betrachteten Anlagen haben einen Reifegrad, der den erfolgreichen Bau und Betrieb voraussehen läßt. Dennoch sind gewisse Fragestellungen zur Auslegung (reaktorphysikalische und thermodynamische Kernausslegung), Auslegung der Nachwärmeabfuhrsysteme etc. noch zu beantworten (z.B. die Frage von Leistungsoszillation bei Naturumlaufbetrieb) bzw. lassen sich mit den bisher nur für große Kernkraftwerke validierten Programmen und Methoden nicht in der erforderlichen Rechengenauigkeit beantworten. Zur Beurteilung der Ausgewogenheit des Sicherheitskonzepts und zur Auffindung von Schwachstellen müßten ferner Risikoanalysen durchgeführt werden. Dabei sind insbesondere auch der stadtnahe Standort und - bei Einführung vieler kleiner Anlagen - auch mögliche Auswirkungen der großen Zahl von Anlagen auf das Kollektivrisiko zu analysieren. Die Anlagenkostenangaben sind weiter abzusichern und zu fundieren, allerdings sollte beachtet werden, daß ohne Erfahrung aus Bau und Betrieb einer Prototypanlage immer mit großen Unsicherheiten gerechnet werden muß. Ferner sind wegen der stark von der Anlagengröße abhängigen Anlagenkosten und der von der Länge des Fernwärmetransports beeinflussten Transportkosten Optimierungen unter Einbeziehung der realen Siedlungsverhältnisse einer größeren Region von Interesse.

Anhang 1: Veröffentlichungen Im Zusammenhang mit dem Projekt:

- \* T. Kohler: "Einsatzmöglichkeiten von Kernheizwerken Im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland" (Dissertation in Vorbereitung)
- \* B. Lukas: "Dynamisches Verhalten eines Heizreaktors mit zweiphaslger Naturumlaufkühlung" (Dissertation in Vorbereitung)
- \* T. Kohler, E.Thöne, Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Kernheizwerken in der BRD, in: Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik '89, 9. bis 11. Mai 1989, Düsseldorf
- \* B. Lukas, D. Emendörfer, Berechnung von Dichtewellenoszillationen in einem zweiphasigen Naturumlaufkreis nach einem einfach nichtlinearen Modell, in: Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik '88, Mai 1988, Travemünde
- \* U.Fahl, T.Kohler, E.Thöne, Möglichkeiten und Grenzen eines Exportes von Bundesdeutschen Kernheizwerken ins Ausland, in: Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik '89, 9. bis 11. Mai 1989, Düsseldorf
- \* A. Voß, Nukleare Heizwerke - eine künftige Alternative?, Vortrag gehalten auf der AGFW-Vortragstagung in Karlsruhe 5. bis 8. Juni 1990 (Veröffentlichung im Jahrbuch Fernwärme 1990 in Vorbereitung)



Anhang 2: Veröffentlichungen, in die Ergebnisse aus dem Projekt eingeflossen sind:

- \* B. Szczesna: "Burn-Up Physics in LWR Gadolinium Lattices" (Dissertation in Vorbereitung)
- \* A. Schatz, Kleine Leistungsreaktoren - Entwicklungsstand und Perspektiven, Tagungsbericht, DAfF-Wintertagung '88, Bonn Januar 1988
- \* B. Szczesna, Burn-Up Physics in PWR Gadolinium, in: Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik '88, Mai 1988, Travemünde
- \* T. Kohler, P. Schaumann, U. Fahl, A. Voß, Nuclear Energy - An efficient Solution for the CO<sub>2</sub> Problem ?, in: Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik '90, 15. bis 17. Mai 1989, Nürnberg (Publikation in Atomwirtschaft voraussichtlich im Oktober in Vorbereitung)
- \* H. Barnert, R. Schulten, W. Bernnat, D. Emendörfer, D. Lutz, A. Voß, R. Hüper, Darstellung des Standes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernspaltungsreaktoren, Studenschwerpunkt A.4.1 des Studienprogramms Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages, Endbericht, IKE Stuttgart, KFA Jülich, Stuttgart, Oktober 1989
- \* U. Fahl, T. Kohler, P. Schaumann, A. Voß, Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Potentiale des Beitrags zur Energieversorgung und zur Minderung klimarelevanter Spurengase durch Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland, Studenschwerpunkt A.4.2 des Studienprogramms Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages, Endbericht, IKE Stuttgart, KFA Jülich, Stuttgart, Oktober 1989
- \* A. Voß (Projektleitung), Perspektiven der Energieversorgung - Möglichkeiten der Umstrukturierung der Energieversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung der Stromversorgung, Gutachten im Auftrag der Landesregierung von Baden-Württemberg, Stuttgart, November 1987
- \* A. Schatz, H. Herold (Teilprojektleiter), Materialienband VI, Kernenergie Teil 1 und 2, Perspektiven der Energieversorgung - Möglichkeiten der Umstrukturierung der Energieversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung der Stromversorgung, Gutachten im Auftrag der Landesregierung von Baden-Württemberg, Stuttgart, November 1987

Anhang 3: Gliederung des Projektes in einzelne Kapitel:

KERNHEIZWERKE TECHNISCHE KONZEPTE UND MARKTPOTENTIALE

- Kapitel 1: Technische Beschreibung und Übersicht über die Gesamtauslegung von Heizreaktorkonzepten
- Kapitel 2: Betriebliche und sicherheitstechnische Anforderungen an Kernheizwerke
- Kapitel 3: Spezielle Aspekte zur Auslegung von Heizreaktoren
- Kapitel 4: Analyse des Kernverhaltens von Heizreaktoren bei Ausfall sämtlicher Nachwärmeabfuhr-Systeme
- Kapitel 5: Der Niedertemperaturwärmemarkt der Bundesrepublik Deutschland
- Kapitel 6: Fernwärme in der Bundesrepublik Deutschland
- Kapitel 7: Kostenermittlung für Kernheizwerke
- Kapitel 8: Vergleich von Kernheizwerken mit konkurrierenden Wärmeerzeugungssystemen
- Kapitel 9: Potentialabschätzung für Kernheizwerke
- Kapitel 10: Exportsituation für Kernheizwerke
- Kapitel 11: Fallstudie Stuttgart