

AUSLEGUNG VON HELIUM-DAMPFERZEUGERN FÜR HOCHTEMPERATURREAKTOREN ZUR ERZEUGUNG VON PROZESSDAMPF FÜR INDUSTRIELLE DAMPFPROZESSE

M. Esch¹, D. Knoche², A. Hurtado¹, W. Tietsch²

(1) TU Dresden

(2) Westinghouse Electric Germany

1. Einleitung

In der chemischen, petrochemischen und Grundstoffindustrie wird Prozesswärme in großen Mengen benötigt. Der Markt für Wärme und Treibstoffe ist etwa doppelt so groß wie der für elektrische Energie [1]. Etwa die Hälfte der in der Industrie benötigten Prozesswärme wird heute mit Gas, ein weiteres Viertel mit festen Brennstoffen, wie Koks oder Kohle mit der bekannten CO₂-Problematik erzeugt.

Zu einer zukünftigen Verbesserung der Klimabilanz für die Erzeugung von Prozesswärme in Form von Prozessdampf sind Hochtemperatur-Reaktoranlagen (HTR) eine wirtschaftlich und auch klimatologisch interessante Alternative. Auch in den USA wird diese Form der Prozesswärmeerzeugung mittlerweile eine sehr große Chance eingeräumt. Aus wirtschaftlichen Gründen und wegen ihrer geringen Einbauhöhe sind für die Prozessdampferzeugung Wendelrohr (Helix) – Wärmetauscher attraktiv. Diese Art von Dampferzeugern wurde in Deutschland in den 70er-Jahren im Rahmen der HTR-Projekte entwickelt. Die Auslegung derartiger Dampferzeuger erfolgte u. a. mit dem Rechenprogramm DERZ (DampfERZeug). DERZ berechnet für eine gegebene Leistung und für vorgegebene Randbedingungen die benötigte Rohrlänge und die wesentlichen für die Auslegung wichtigen thermohydraulischen Parameter, wie Rohrbündeldurchmesser, Druckverlust etc. Die Ergebnisse von DERZ werden mit einem modernen nodalen Rechenprogramm TRACE verglichen und dabei überprüft, ob derartige Programme, die für LWR-Reaktoren entwickelt worden sind, auch im HTR-Bereich einsetzbar sind.

2. Entwicklung der HTR-Technologie in Deutschland

In Deutschland wurden bisher zwei Hochtemperaturreaktoren entwickelt, errichtet und betrieben. In Jülich wurde 1961 der AVR-Reaktor der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH gebaut. Als Versuchsreaktor wurde dieser nach wissenschaftlichen und nicht nach wirtschaftlichen Aspekten errichtet. Die Zielsetzung des AVR bestand darin, den Nachweis des physikalischen Prinzips der HTR-Technologie zu erbringen, die inhärenten Sicherheitseigenschaften zu demonstrieren sowie den Reaktor als Testbett zur Erprobung von Brennelementen zu nutzen. In der Folge wurde in Hamm-Uentrop 1971 der Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR) als Prototyp für eine kommerzielle HTR-Anlage erbaut. Die Zielsetzung des THTR-300 bestand im Nachweis der Funktionsfähigkeit der spezifischen Primärkreiskomponenten und der

Demonstration des sicheren und zuverlässigen Langzeitbetriebes. Weitere Entwicklungen, wie z. B. der HTR-500, basieren auf dem Design des THTR. Ebenso wurden viele Vorarbeiten für weitere zukünftige Anwendungen z. B. in dem Projekt Prototyp-anlage Nukleare Prozesswärme (PNP) geleistet.

3. Auslegung eines Helix-Dampferzeugers

Die Auslegung eines Dampferzeugers erfolgt auf Basis eines Anforderungskataloges, der sich aus verschiedenen Kategorien zusammensetzt. Als Ausgangsbasis für die Auslegung sind insbesondere die Anforderungen des zukünftigen Betreibers im Hinblick auf den vorgesehenen Anlagenbetrieb und die von den Genehmigungsbehörden gestellten Sicherheitsanforderungen zu nennen. Weitere Auslegungskriterien leiten sich aus dem anzuwendenden kerntechnischen Regelwerk ab. Es bestehen darüber hinaus Anforderungen hinsichtlich der verfügbaren und qualifizierten Werkstoffe, den Randbedingungen, die durch den Kernbereich des HTR-Reaktors kommen und natürlich die geometrischen Vorgaben der Anlage an sich. Ein Vergleich wichtiger geometrischer und thermohydraulischer Parameter des AVR, THTR und HTR-500 ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Vergleich der geometrischen und thermohydraulischen Parameter verschiedener HTR-Dampferzeuger

	Einheit	AVR	THTR-300	HTR-500
Dampferzeuger				
Thermische Leistung pro Dampferzeuger	(MWth)	46	128	160
Anzahl der Dampferzeuger	(-)	1	6	8
Dampferzeugertyp	(-)	Evolente	Helix	Helix
Geometrie				
Höhe	(mm)	5535	18574	12300
Durchmesser	(mm)	3550	2055	2960
Heizflächenvolumen	(m ³)	53,27	22,175	84,64
Wärmeübertragende Fläche	(m ²)	1762	983,2	1055
Hochdruckteil				
Höhe	(mm)	5535	8280	7000
Äußerer Durchmesser	(mm)	3550	1970	2454
Innerer Durchmesser	(mm)	590	815	820
Wärmeübertragende Fläche	(m ²)	1762	923,5	1045
Zwischenüberhitzer				
Höhe	(mm)	-	500	-
Äußerer Durchmesser	(mm)	-	1970	-
Innerer Durchmesser	(mm)	-	738	-
Wärmeübertragende Fläche	(m ²)	-	59,7	-
Dampftemperatur (Eintritt)	(°C)	-	365	-
Dampfdruck (Eintritt)	(bar)	-	55	-
Dampftemperatur (Austritt)	(°C)	-	535	-
Dampfdruck (Austritt)	(bar)	-	49	-
Helium				
Kühlgaseintrittstemperatur	(°C)	850	750	1390
Kühlgasaustrittstemperatur	(°C)	275	250	260
Gasmassendurchsatz	(kg/s)	17	49,4	70
Druck	(bar)	10,8	38,49	49
Druckverlust	(bar)	0,0088	0,44	0,3
Dampf				
Speisewassertemperatur	(°C)	115	180	190
Speisewasserdruck	(bar)	116,7	240	~240
Dampftemperatur	(°C)	505	550	530
Dampftemperatur (nach Einspritzung)	(°C)	-	535	-
Dampfdruck	(bar)	74	186,2	190
Dampfmassendurchsatz	(t/h)	56	154,8	228,6

Alle relevanten Bedingungen und Anforderungen sind in Form einer technischen Spezifikation für den betreffenden Dampferzeuger aufbereitet und bilden zusammen mit der Betriebs- und Störfallliste, der Ermittlung der Drücke, Temperaturprofile und -transienten sowie der Klassifizierung der Lastfälle die Auslegungsgrundlage.

4. Rechenprogramm DERZ und TRACE

Die Auslegung erfolgt mit dem Rechenprogramm DERZ. Mit TRACE werden die DERZ-Ergebnisse überprüft.

DERZ

Der Rechencode DERZ ist für die thermische Auslegung von mit Helium beheizten Dampferzeugern anwendbar [2]. Die Ergebnisse von Auslegungsrechnungen mit DERZ wurden mit Messungen am THTR verglichen. Es hat sich eine gute Übereinstimmung ergeben. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die in DERZ verwendeten physikalischen Modelle überprüft werden und dem heutigen Kenntnisstand angepasst werden müssen. So wurde z. B. die im Wasserbereich des Dampferzeugers verwendete Nusselt-Beziehung dem heutigen Wissensstand angepasst:

Die früher verwendete Nusselt-Zahl

$$Nu_{alt} = \frac{\xi \cdot (Re - 1000) \cdot \frac{Pr}{8}}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{0,67} - 1)} \quad (Gl. 1)$$

mit $\xi = (1,82 \cdot \log_{10}(Re - 1000) - 1,64)^{-2}$

wurde durch folgende Analogie ersetzt:

$$Nu_{neu} = \frac{\xi \cdot (Re - 1000) \cdot \frac{Pr}{8}}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{0,67} - 1)} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{Wand}} \right)^{0,14} \quad (Gl. 2)$$

mit $\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^{0,5}$ und $D = D_w \left[1 + \left(\frac{h}{\pi \cdot D_w} \right)^2 \right]$

wobei h die Längsteilung der Helix-Anordnung und D_w der jeweilige Helissendurchmesser ist. Außerdem wurde die Wasserdampftafel IAPWS-IF97 eingebunden und auf der Primärseite die Heliumstoffwerte nach der KTA 3102.1 „Auslegung der Reaktorkerne von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren; Teil 1: Berechnung der Helium-Stoffwerte“ implementiert.

Bild 1 zeigt das Blockdiagramm mit den Ein- und Ausgabewerten des Programms DERZ.

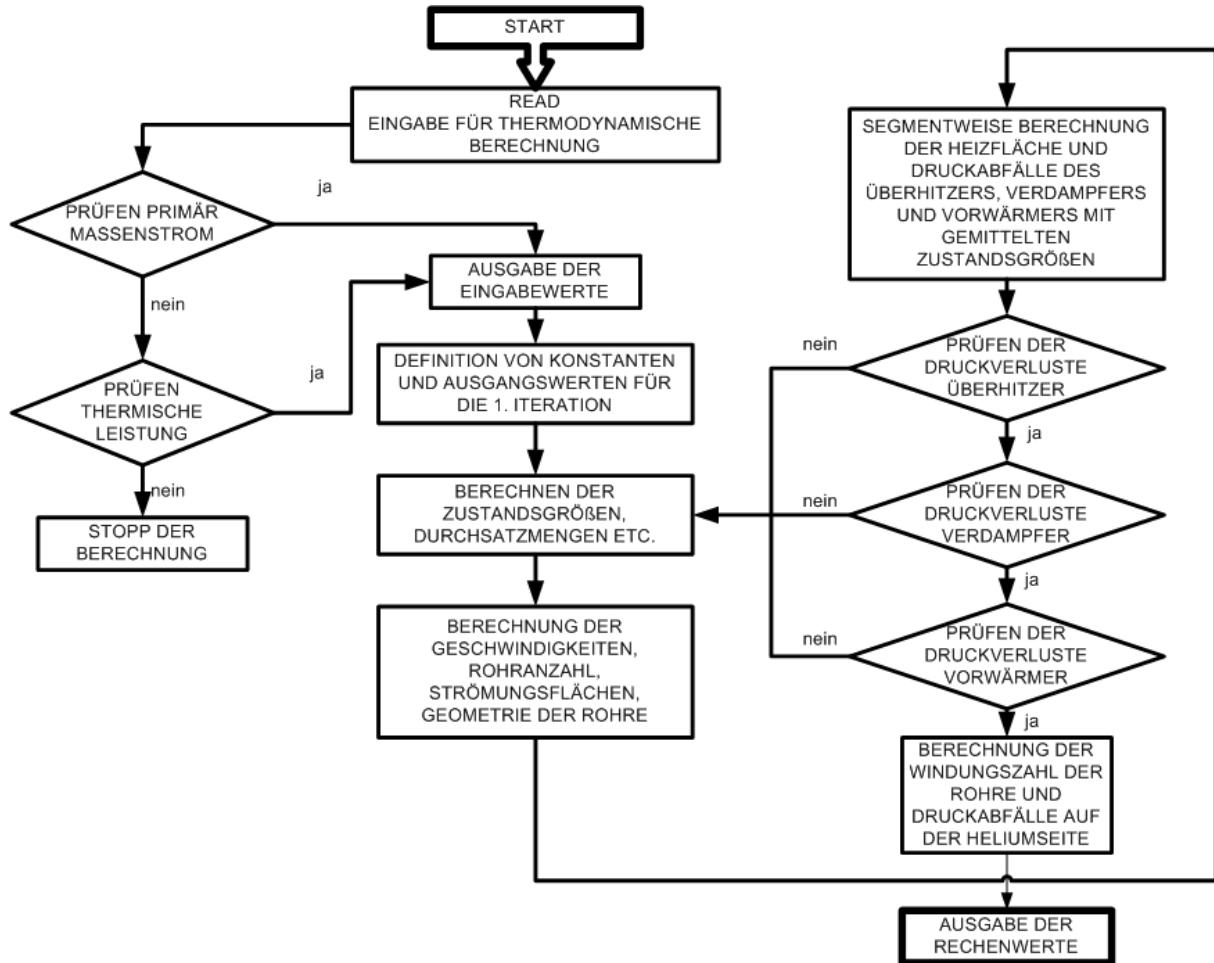


Bild 1 Blockdiagramm DERZ

TRACE

Das thermohydraulische Rechenprogramm TRACE ist ein best-estimate Code und wird von der U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) entwickelt. TRACE gilt als Nachfolger von RELAP5 und TRAC. Das Hauptanwendungsgebiet dieses Rechenprogramms sind typische Transienten und Störfälle bei Leichtwasser- und CANDU-Reaktoren. Das Programm beinhaltet jedoch auch neben Wasser die Berücksichtigung von nicht kondensierbaren Gasen und Helium und erlaubt eine äußerst flexible geometrische Beschreibung von thermohydraulischen Problemen. TRACE ist somit ein Mehrphasen-Programm mit dem kompletten Satz von Erhaltungsgleichungen für alle Phasen [3].

Zur Modellierung von Helix-Dampferzeugern wird eine Dampftafel nach der IAPWS-IF97 verwendet. Die Berechnung der Helium Stoffwerte ist bereits in TRACE implementiert.

Im Bild 2 ist ein vereinfachtes Modell eines Helix-Dampferzeugers modelliert für TRACE dargestellt. Die Helissen selbst, in denen eine abwärts gerichtete Verdampfung stattfindet, werden als gerade Rohre unter einem definierten Winkel modelliert und in zwei übereinander liegenden Rohrbündeln angeordnet. Über Wärmestrukturen sind sie mit dem Helium führenden Außenrohr verbunden.

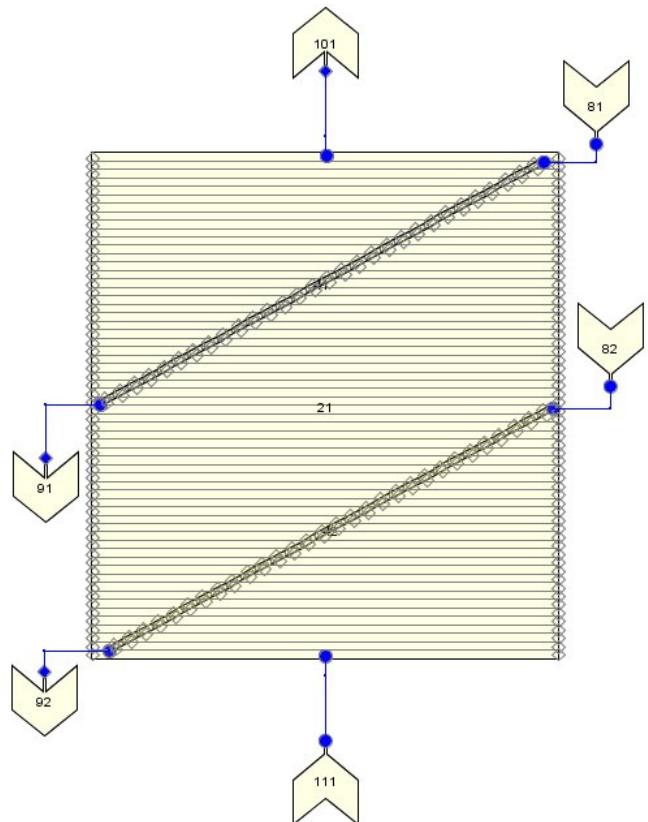


Bild 2 TRACE Modell eines Helix-Dampferzeugers



Bild 3 Foto eines THTR-Rohrbündels während der Fertigung

Bild 3 zeigt ein Dampferzeugerrohrbündel des THTR-300 während der Fertigung. Man erkennt die gewendelten wärmeübertragenden Rohre sowie eine der drei festen Tragplatten, die zur Fixierung der Rohre dienen.

5. Anzuwendendes Regelwerk

Innerhalb des Regelwerkes des KTA wurde ein Regelentwurfsvorschlag mit der Bezeichnung KTA 3221 für „Metallische HTR-Komponenten“ erarbeitet und im Dez. 1992 der Öffentlichkeit vorgelegt. Dieser Regelentwurfsvorschlag behandelt im Teil 1 die „Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen“, im Teil 2 die „Auslegung, Konstruktion und Berechnung“ und im Teil 3 die „Herstellung von Komponenten“. Diese Regel wurde jedoch bis heute nicht beschlossen und verabschiedet, da, wie bekannt, die Weiterentwicklung des HTR in Deutschland nicht weiterverfolgt wurde. Dennoch bildet dieser Regelentwurfsvorschlag die Basis für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erforderlichen Randbedingungen bei der Konstruktion und Auslegung von Hochtemperaturreaktorkomponenten, insbesondere des Helix-Dampferzeugers.

6. Anwendung nuklearer Prozesswärme für Dampfprozesse

Zur Nutzung von Prozessdampf für einige chemische und verfahrenstechnische Prozesse, wie z. B. die Dampfreformierung von Methan sowie die Braunkohlevergasung sind Prozessmedientemperaturen im Bereich von 700 °C bis 900 °C notwendig. Prozesswärme mit diesem Temperaturniveau, z. B. durch heißes Helium und durch Dampf kann mit Hochtemperaturreaktoren bereitgestellt werden. Ein Teil der thermischen Energie des Reaktors wird dabei zur Dampferzeugung selbst genutzt und der andere Teil wird den endothermen chemischen Prozessen zugeführt. Die Dampfreformierung von Methan ist eine Möglichkeit der nuklearen Fernwärmennutzung. Hierbei wird die Wärme des Hochtemperaturreaktors genutzt, um zunächst zu Transportzwecken die Wärmeenergie in chemische Energie (Synthesegas) umzuwandeln und die so gespeicherte Energie beim Verbraucher in Fernwärme, Prozessdampf und verbrauchsnah produzierte Elektrizität umzuwandeln. Die Verfahren der nuklearen Kohlevergasung ermöglichen den Einsatz von Kernenergie zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern. Die möglichen Produkte der nuklearen Kohlevergasung sind gasförmige Energieträger, wie Substitut-Naturgas und H₂ sowie Synthesegase und daraus hergestellte flüssige Energieträger wie Methanol, Benzin und weitere Syntheseprodukte [4].

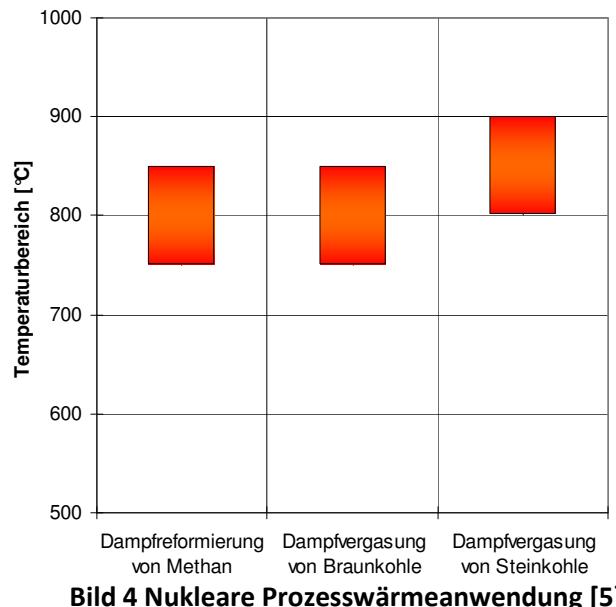


Bild 4 Nukleare Prozesswärmeanwendung [5]

7. Ausblick

Prozessdampf für industrielle Dampfprozesse kann nahezu CO₂-frei mit Hochtemperaturreaktoren bereitgestellt werden. Einige große Industrieunternehmen sehen in dieser Technologie eine Marktchance. Dazu müssen die Dampferzeuger an heutige Anforderungen angepasst werden. Zur genaueren Modellierung wird das TRACE-Modell verfeinert. So werden z. B. die einzelnen Rohrreihen des Rohrbündels zusammengefasst und dadurch die verschiedenen Längen und Winkel modelliert.

8. Literatur

- [1] Kugeler K., Prozessdampferzeugung mit Hilfe modularer Hochtemperaturreaktoren, Aachen, in Vorbereitung
- [2] Spilker H., Ein Fortran-Programm zur Auslegung von Dampferzeugern, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1971
- [3] TRACE V5.0 User's Manual. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2007
- [4] Barnert H., Künftige Möglichkeiten der Wärmeversorgung durch Kernenergie, Atomwirtschaft – Atomtechnik, Düsseldorf, 1978, S. 452ff.
- [5] Kugeler K., Schulten R., Hochtemperaturreaktortechnik, Berlin, 1989