Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Vorhaben

Erweiterung der THAI-Versuchsanlage als SMR-Integral-Anlage

NU-eX

in der Fördermaßnahme

Nukleare Sicherheitsforschung und der Strahlenforschung

Autor(en)

Becker Technologies GmbH,
M. Freitag, E. Schmidt, K. Dieter
Neckarstraße 12-14, 65239 Hochheim am Main
freitag@becker-technologies.com

Förderkennzeichen: 02NUK092
Projektlaufzeit: 01.05.2024 – 30.06.2025
Erstellungsdatum: 01.12.2025

Projektpartner

Das Vorhaben wurde eng verzahnt und in Abstimmung mit dem Vorhaben 150 1680 (THAI-Umzug, -Erweiterung, -Wiederinbetriebnahme und Versuche zu sicherheitsrelevanten Fragestellungen bestehender und neuer Reaktorkonzepte THAI VII-b, Laufzeit 01.05.2024 bis 31.01.2026) durchgeführt.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzfassung 3
I.1 Aufgabenstellung 3
I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 3
I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick 4
II. Teil II Eingehende Darstellung 5
II.1 Motivation und Aufgabenstellung 5
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 6
II.2.1 Voraussetzungen, unter denen das F&E Vorhaben durchgeführt wurde 7
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 8
II.4 Erzielte Ergebnisse 9
II.4.1 NU-eX-Pool der SMR-Erweiterung 9
II.4.2 Zugang zum Pool und Arbeitssicherheit 13
II.4.3 NU-eX-Behälter der SMR-Erweiterung 14
II.4.4 Infrastruktur-Erweiterung der neuen Versuchsanlage 21
II.4.5 Medienversorgung 24
II.4.6 Messtechnik 27
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen 30
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 30
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 31
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. 32
II.9 Literaturverzeichnis 32

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Die Arbeiten des Vorhabens beziehen sich auf die durchzuführenden Maßnahmen, um die bundeseigene THAI-Versuchsanlage zu einer SMR-Integralanlage (Abk. für Small Modular Reaktor) zu erweitern, um auch zukünftige Fragestellungen der Reaktorsicherheitsforschung adressieren zu können, Bild I-1. Die THAI-Versuchsanlage soll um eine große Wasservorlage und einen SMR-Versuchsbehälter erweitert werden (rechts vorne in Bild I-1). Die Erweiterung erlaubt es, experimentelle Daten und Erkenntnisse zu passiven Sicherheitssystemen bei bestehenden und zukünftigen Reaktorkonzepten, wie z. B. Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) sowie Small Modular Reaktoren (SMR) zu generieren. Diese Daten dienen dem Erkenntnisgewinn und der Validierung sowie Weiterentwicklung von Rechenmodellen schnelllaufender Systemcodes, sogenannter Lumped Parameter Codes (LP), und Computational Fluid Dynamics-Codes (CFD).

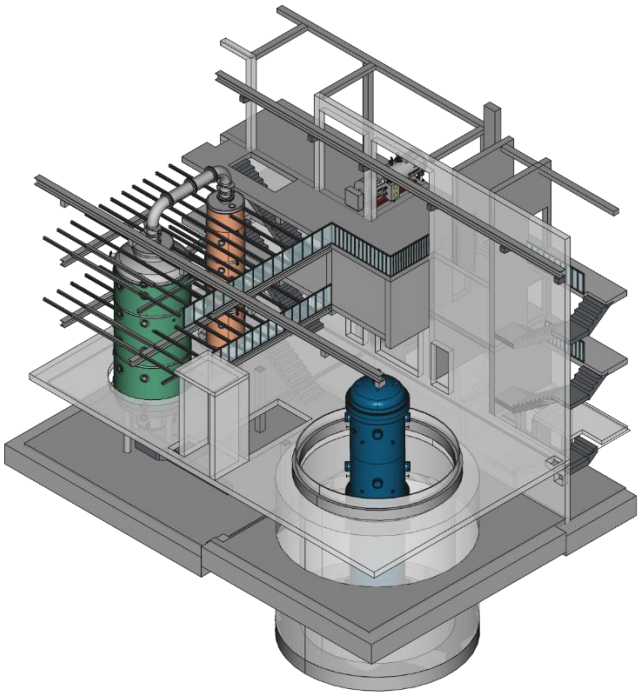

Bild I-1: Bauausführungszeichnung der SMR-Erweiterung - NU-eX (vorne links) im Verbund mit der THAI+-Konfiguration am neuen Standort in Hochheim am Main

Die technische und wissenschaftliche Evaluierung zur Erweiterung der THAI-Versuchsanlage (nachfolgend NU-eX bezeichnet) wurden im Rahmen des Vorhabens THAI VII-a erarbeitet, auf der 7. Sitzung des Projektkomitees „Transienten und Unfallabläufe“ am 20. Oktober 2022 vorgestellt und vom Expertengremium empfohlen. Die Erweiterung im Bereich SMR unterscheidet sich in technischer und wissenschaftlicher Hinsicht deutlich von den aktuellen internationalen Versuchsanlagen, wie beispielsweise SPARC, ATLAS-CUBE (Korea), MCTHBF (China), POOL-LOOP (EDF) und HYMIT (China). Sie eröffnet die Möglichkeit, die durch die THAI-Forschungsprogramme erarbeitete, internationale Führungsposition auf dem Gebiet der Reaktorsicherheitsforschung zu festigen und weiter auszubauen.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Auf dem Gebiet der experimentellen Sicherheitsforschung für wassergekühlte Reaktoren sind neben dem THAI-Programm insbesondere die Aktivitäten in den Versuchsanlagen MISTRA (CEA) und TOSQAN (IRSN), PANDA (PSI) [Pan25], sowie in der koreanischen SPARC-Anlage zu nennen. Im Rahmen der OECD/NEA-Projekte HYMERES-2 [Pal20] und PANDA wurden eine Vielzahl von thermohydraulischen Versuchen durchgeführt, die sich im Wesentlichen mit dem Thema atmosphärischer Transport und Mischungsprozessen befassten. Diese Arbeiten bestätigen die große Bedeutung, die der

Containment-Thermohydraulik zukommt. Auch nach langjähriger experimenteller Forschung auf diesem Gebiet sind wichtige Fragen offen, wie z. B. zur Containment-Außenkühlung, zum Wasserstoffverhalten bei eng verbauten Sicherheitsbehältern, oder zur Wirksamkeit von passiven Sicherheitssystemen unter transienten Unfallbedingungen. Die THAI-Anlage und insbesondere ihre Erweiterung soll Voraussetzungen bieten, um die notwendigen Validierungsdaten für die nationale Rechenkette, bestehend aus dem Lumped-Parameter Code AC^2 [AC2], dem europäischen ASTEC Code [ASTEC] und den CFD-Programmen ContainmentFOAM [CNTFM] und GASFLOW [GSFLW] genieren zu können.

Dies beinhaltet Untersuchungen zu passiven Wärmeabfuhrsystemen, z. B. eines wasserbedeckten Containments oder der Containmentaußenkühlung mittels Wasserfilm. Der Einsatzbereich der erweiterten THAI-Anlage reicht deutlich über den von MISTRA, TOSQAN, PANDA und SPARC hinaus. Zu nennen ist hier insbesondere der Einsatz von Wasserstoff für Rekombinations- und Verbrennungsversuche und die experimentellen Möglichkeiten im Bereich des Spaltproduktverhaltens (Iod und Aerosole). NU-eX ermöglicht experimentelle Untersuchungen zu gekoppelten Phänomenen, die aus dem Zusammenspiel verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse in einer hinreichend komplexen Mehrraumgeometrie resultieren. Überschneidungen mit den Arbeitsbereichen anderer Versuchsanlagen lassen sich dabei nicht vollständig vermeiden; sie sind jedoch teilweise ausdrücklich erwünscht, um anlagenspezifische Einflüsse zu identifizieren und auszuschließen. Durch diese komplementären Untersuchungen wird zugleich die Zuverlässigkeit der Rechenprogramme erhöht, die zur Vorhersage sicherheitsrelevanter Vorgänge im realen Reaktor-Containment eingesetzt werden.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Die Arbeiten umfassten die Planung und Erweiterung der THAI-Anlage am Standort Hochheim am Main. Als zentrale Bestandteile der Anlagenweiterung wurde ein großes Wasserbecken (NU-eX-Pool) errichtet, in dem ein neuer druckfester Versuchsbehälter installiert wurde (NU-eX-Behälter). Zusätzlich zu diesen beiden Hauptkomponenten wurde die Medienversorgung und Messtechnik beschafft und installiert, ebenso die erforderlichen Erweiterungen der Versuchsinfrastruktur. Das permanent stehende Wasserbecken wurde mit einem Innendurchmesser von 6,5 m und einer Höhe von 8,0 m errichtet. Der Pool ragt dabei deutlich tiefer als das Kellergeschoss des Anlagengebäudes. Das Wasservermögen des Pools beträgt 265,5 m^3 abzüglich der Verdrängung des eingetauchten NU-eX-Behälters.

Für die Anlagenerweiterung wurde ein großer Edelstahl-Druckbehälter geplant und gefertigt. Der Behälter dient als zentrale Komponente für die Experimente in der zukünftigen NU-eX-Anlage. Er wurde für einen zulässigen Überdruck von 64 bar bei 200 °C ausgelegt und kann dank der durchgängigen Nutzung mit O-Ringen auch unter technischen Vakuumbedingungen (entsprechend −1 bar ü) eingesetzt werden. Mit einem Durchmesser von 2,3 m und einer Höhe von 12 m wurde der Behälter mittig und oben jeweils mit einem umlaufenden Flansch ausgestattet, um eine einfache Abnahme der oberen Behälterhälfte und des Deckels für Einbauten und Instrumentierungsarbeiten zu ermöglichen. Des Weiteren erlaubt dieser Behälter mit dem herausnehmbaren Mittelsegment, dass Skalierungsuntersuchungen mit einer einzigen modularen Anlage durchgeführt werden.

NU-eX ermöglicht Experimente zur sicherheitstechnischen Bewertung von Forschungs- und Leistungsreaktoren und dient im gleichen Maße auch der Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung im Bereich der Reaktorsicherheit. Sie ist in ihrer Technik und Nutzung weltweit einzigartig und bietet eine große Bandbreite an Einsatzbereichen. Die wissenschaftlichen und sicherheitstechnischen Fragestellungen umfassen u. a. die Thermohydraulik und Hydrodynamik von großen Wasservorlagen, Wasserstoff-Risiko und -Beherrschung, das Spaltproduktverhalten von Aerosolen und Iod sowie die Quellterm-Prognose und die Zuverlässigkeit von Rückhaltesystemen. Die SMR-Erweiterung erlaubt damit die Analyse von passiven Sicherheitssystemen in bestehenden und zukünftigen Leistungs- sowie Forschungsreaktoren europäischer Nachbarländer.

Eigene Schutzrechte wurden für die Durchführung des Vorhabens nicht in Anspruch genommen. Die verwendete Fachliteratur ist im Literaturverzeichnis am Ende dieses Berichts aufgeführt.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die Arbeiten des Vorhabens bezogen sich auf die durchzuführenden Maßnahmen, um die bundeseigene THAI-Versuchsanlage zu einer SMR-Integralanlage (Abk. für Small Modular Reaktor) zu erweitern, um auch zukünftige Fragestellungen der Reaktorsicherheitsforschung adressieren zu können, Bild I-1. Die THAI-Versuchsanlage sollte um eine große Wasservorlage und einen SMR-Versuchsbehälter erweitert werden (rechts vorne in Bild I-1). Die Erweiterung erlaubt es jetzt, experimentelle Daten und Erkenntnisse zu passiven Sicherheitssystemen bei bestehenden und zukünftigen Reaktorkonzepten, wie z. B. Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) sowie Small Modular Reaktoren (SMR) zu generieren. Diese Daten dienen dann dem Erkenntnisgewinn und der Validierung sowie Weiterentwicklung von Rechenmodellen schnelllaufender Systemcodes, sogenannter Lumped Parameter Codes (LP), und Computational Fluid Dynamics-Codes (CFD).

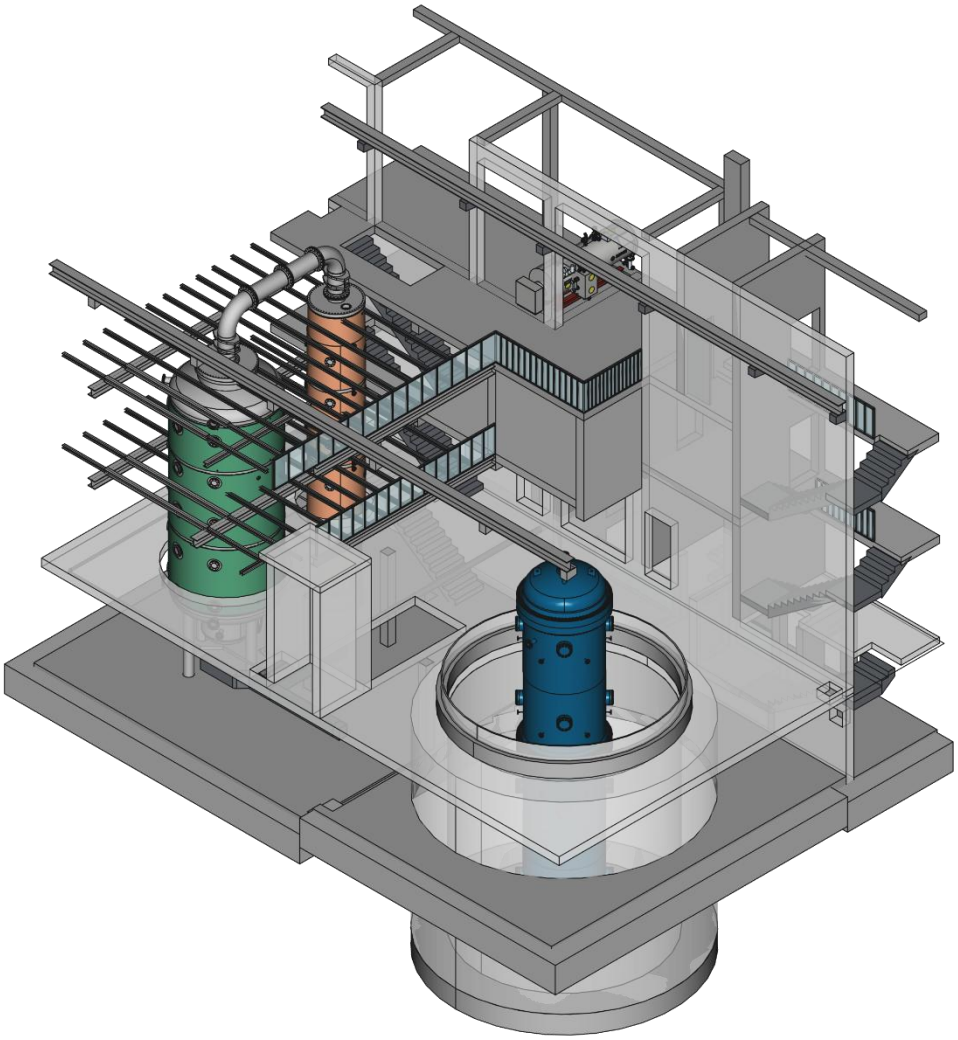

Bild II-1: Bauausführungszeichnung der SMR-Erweiterung - NU-eX (vorne links) im Verbund mit der THAI+-Konfiguration am neuen Standort in Hochheim am Main

Die technische und wissenschaftliche Evaluierung zur Erweiterung der THAI-Versuchsanlage (nachfolgend als NU-eX bezeichnet) wurden im Rahmen des Vorhabens THAI VII-a erarbeitet, auf der 7. Sitzung des Projektkomitees „Transienten und Unfallabläufe“ am 20. Oktober 2022 vorgestellt und vom Expertengremium nachdrücklich empfohlen.

Neben der Erweiterung der Versuchsanlage ergab sich auch durch übergeordnete Zwänge der Umzug

der THAI-Bestandsanlage an einen neuen Standort. Der Erhalt der renommierten THAI-Versuchsanlage, in Verbindung mit der Notwendigkeit ihres Umzugs an einen neuen Standort, und die avisierte SMR-Erweiterung wurden im Rahmen der 534. RSK-Sitzung von der Kommission empfohlen. In Hochheim am Main wurde ein entsprechendes Grundstück erworben, welches über die notwendigen technischen und räumlichen Möglichkeiten verfügt, um ein neues Versuchsanlagengebäude zu errichten und die THAI-Versuchsanlage sowie die SMR-Erweiterung (Versuchsbehälter und Wasserbecken) zu integrieren. Die Errichtung des notwendigen Neubaus und des Umzugs wurde durch ein paralleles Vorhaben (Vorhaben 150 1680, beauftragt durch den Projektträger GRS im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BMUKN), getragen. Beide Vorhaben wurden in sehr enger zeitlicher und technischer Verzahnung durchgeführt, da sehr große technische Abhängigkeiten bestanden. Dies berücksichtigt unter anderem die Integration der Anlagenerweiterung in die bestehende Anlage als auch den Neubau des Versuchsgebäudes.

Die Erweiterung im Bereich SMR unterscheidet sich in technischer und wissenschaftlicher Hinsicht deutlich von den aktuellen internationalen Versuchsanlagen, wie beispielsweise SPARC, ATLAS-CUBE (Korea), MCTHBF (China), POOL-LOOP (EDF) und HYMIT (China). Sie eröffnet die Möglichkeit, die durch die THAI-Forschungsprogramme erarbeitete, internationale Führungsposition auf dem Gebiet der Reaktorsicherheitsforschung zu festigen und weiter auszubauen.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Auf dem Gebiet der experimentellen Containment-Sicherheitsforschung für wassergekühlte Reaktoren sind neben dem THAI-Programm insbesondere die Aktivitäten in den französischen Versuchsanlagen MISTRA (CEA) und TOSQAN (IRSN), in der schweizerischen Anlage PANDA (PSI) [Pan25], sowie in der koreanischen SPARC-Anlage zu nennen. Im Rahmen der OECD/NEA-Projekte HYMERES-2 [Pal20] und PANDA wurde eine Vielzahl von thermohydraulischen Versuchen durchgeführt, die sich im Wesentlichen mit dem Thema atmosphärischer Transport und Mischungsprozessen befassten. Diese Arbeiten bestätigen die große Bedeutung, die der Containment-Thermohydraulik zukommt. Auch nach langjähriger experimenteller Forschung auf diesem Gebiet sind wichtige Fragen offen, wie z. B. zur Containment-Außenkühlung, zum Wasserstoffverhalten bei eng verbauten Sicherheitsbehältern, oder zur Wirksamkeit von passiven Sicherheitssystemen unter transienten Unfallbedingungen. Die THAI-Anlage und insbesondere ihre Erweiterung soll Voraussetzungen bieten, um die notwendigen Validierungsdaten für die nationale Rechenkette, bestehend aus dem Lumped-Parameter Code AC^2 [AC2], dem europäischen ASTEC Code [ASTEC] und den CFD-Programmen ContainmentFOAM [CNTFM] und GASFLOW [GSFLW] genieren zu können.

Dies beinhaltet sowohl Untersuchungen zu passiven Wärmeabfuhrsystemen, z. B. eines wasserbedeckten Containments oder der Containmentaußenkühlung mittels Wasserfilm. Der Einsatzbereich der erweiterten THAI-Anlage reicht deutlich über den von MISTRA, TOSQAN, PANDA und SPARC hinaus. Zu nennen ist hier insbesondere der Einsatz von Wasserstoff für Rekombinations- und Verbrennungsversuche und die experimentellen Möglichkeiten im Bereich des Spaltproduktverhaltens (Iod und Aerosole) durch Verwendung von radioaktivem Iod-123. Bezüglich gekoppelter Phänomene, insbesondere wenn es um den Einsatz von Iod-123 und Wasserstoff geht, ist THAI der internationale Maßstab.

Für besondere, einzelne Anwendungsfelder gibt es national und international spezialisierte Versuchsanlagen, wie z. B.:

- die REKO-Anlage zur Untersuchung des Verhaltens von passiven autokatalytischen Rekombinatoren (PAR) am Forschungszentrum Jülich,
- die SAAB-Anlage im Forschungszentrum Jülich für Tests zur Aerosolrückhaltung/Freisetzung aus einem Wasserpool,
- die HYMIT-Anlage an der Shanghai Jiao Tong Universität (China) für Untersuchungen zur Wasserstoffverteilung, Wasserstoffverbrennung und PARs,

- die Anlagen für Wasserstoff-Explosionsversuche am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), an der Technischen Universität München (TUM), in Russland (RUT-Anlage) und in Frankreich (ENACCEF-Anlage bei ICARE/CNRS),
- die MCTHBF-Versuchsanlage bei NPIC (China) für Wasserstoffverteilungs- und Verbrennungstests,
- die COTHYDE-Versuchsanlage bei CNPRI (China) für Tests zur Thermohydraulik und Wasserstoffverteilung,
- die CIGMA-Versuchsanlage bei JAERI (Japan) für Tests zur Thermohydraulik und Wasserstoffverteilung,
- die ARISE-Versuchsanlage bei CIAE (China) zur Untersuchung der Aerosol-Resuspension bzw. dem Re-Entrainment-Verhalten.

International sind neben der integralen ATLAS Anlage [ATLAS] mit einem generischen Sicherheitsbehälter (CUBE) auch eine Reihe von existierenden und zukünftigen SMR-spezifische Versuchsanlagen zu erwähnen:

- COSMOS-H Karlsruher Institut für Technologie (KIT) [San23]

Die Anlage COSMOS-H steht für Critical heat flux On Smooth and MOdified Surfaces – High pressure loop. Sie ist am KIT-Campus Nord im Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) angesiedelt und dient der experimentellen Erforschung von thermohydraulischen Vorgängen – insbesondere von Siedeflächenkritikalitäten und Strömungs-/Siedephänomenen unter Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen. Die Anlage kann strategisch für SMR-spezifische thermo-hydraulische Experimente genutzt werden. Obwohl es sich nicht um eine ausschließliche SMR-Versuchsanlage handelt, bietet sie die Möglichkeit SMR-spezifische thermohydraulische Bedingungen einstellen und untersuchen zu können.

- Lappeenranta-Lahti University of Technology (LUT), Finland [LUT25]

An der LUT werden zurzeit zwei neue SMR basierte Versuchsanlage errichtet, Eine Anlage dient der Nachbildung des passiven Nachwärmeabfuhrsystems des 50 MW-thermischen SMR-Designs (LDR-50), während die zweite Anlage für Tests des Notkühlbeckens eines französischen SMR-Konzepts vorgesehen ist. Die Anlagen sollen ab 2026 für die Beantwortung von Forschungsfragestellungen zur Verfügung stehen. Beide Anlagen sind fester Bestandteil des EU-finanzierten EASI-SMR Projekts, dass sich mit der Funktionalität und der Leistungsfähigkeit von passiven Sicherheitssystemen beschäftigt.

- NIST (NuScale Integral System Test) Facility (früher installiert an der Oregon State University, Corvallis, OR, USA) [SMR20]

NuScale hat unter anderem mit der NIST eine Laborversuchsanlagen eingerichtet, um die thermohydraulischen Modelle und das Anlagendesign des NuScale SMR-Moduls zu validieren. Die Anlage dient potenziell auch der Schulung von Anlagenbedienern, der Validierung von Rechenmodellen sowie der Unterstützung des Anlagendesigns für das 77 MW(e)-SMR-Modul. Die Simulationsinfrastruktur ist ein zentraler Bestandteil der Code-Validierung, der Fertigungsreifeprüfung und des Zulassungsverfahrens des Reaktordesigns [Sch18], [SMR20]. Die Anlage ist trotz ihres Standortes an der OSU nicht für die Öffentlichkeit zugänglich.

II.2.1 Voraussetzungen, unter denen das F&E Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben basiert auf der Expertise und experimentellen Infrastruktur der bisherigen Forschungsvorhaben, die mit der THAI-Versuchsanlage durchgeführt wurden, Tabelle II-1. Neben ausschließlich nationalen Versuchsprogrammen wurden bereits vier internationale Verbundvorhaben durchgeführt, unter der Schirmherrschaft der OECD/NEA im Rahmen sogenannter Joint Projects, Tabelle II-1. Wesentliche Inhalte des hier zu berichtenden Vorhabens waren Arbeiten, die dem Erhalt der Anlage durch einen Umzug an den Standort Hochheim am Main und der Erweiterung hin zu einer SMR-Integralanlage dienten.

Wesentliche Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens waren:

- der konsolidierte und erhaltende Rückbau am alten Standort mit der Sicherung peripherer Einrichtungen, die es erlauben, ein breites Spektrum von Versuchsrandbedingungen einzustellen.
- das Vorliegen der erforderlichen Genehmigungen zur Errichtung des neuen Versuchsgebäudes und der darin zu errichtenden SMR-Erweiterung. Das neue THAI-Versuchsgebäude soll einen temporären Kontrollbereich beinhalten und damit den Umgang mit radioaktivem Iod-Tracer ermöglichen. Mit der Radiotracer-Methode lassen sich die Iod-Konzentrationen und das Iod-Transportverhalten mit der erforderlichen Genauigkeit (10^{-8} g/l) bestimmen.
- die Durchführung des parallellaufenden, eng verzahnten Vorhabens 150 1680 (THAI-Umzug, -Erweiterung, -Wiederinbetriebnahme und Versuche zu sicherheitsrelevanten Fragestellungen bestehender und neuer Reaktorkonzepte THAI VII-b, Laufzeit 01.05.2024 bis 31.01.2026)

Tabelle II-1: Nationale und OECD/NEA-Projektphasen des THAI-Programms

Programmphase	**Vorhaben**	**Abschlussberichte**	**Themenschwerpunkte**
THAI-I	1501218	[Kan03], [Fun04]	Thermohydraulik, Iod
THAI-II	1501272	[Kan07], [Fun06]	Thermohydraulik, Iod, Aerosole
THAI-III	1501325	[Kan09]	CFD, Iod
THAI-IV	1501361	[Gup13]	SWR, CFD, Iod, Aerosole
THAI-V	1501455	[Gup17]	Wasserstoff, Iod, Aerosole
THAI-VI	1501547	[Gup19], [Gup21]	Wasserstoff, Iod, Aerosole
THAI-VII-a	1501630	[Fre24]	Wasserstoff, Iod, SMR
OECD/NEA-THAI	1501326	[Kan10]	Wasserstoff, Iod, Aerosole
OECD/NEA-THAI 2	1501420	[Gup15]	Wasserstoff, Iod, Aerosole
OECD/NEA-THAI 3	1501516	[Gup20]	Wasserstoff, Iod, Aerosole
OECD/NEA-THEMIS	1501613	[Gup24]	Wasserstoff, Iod, Aerosole

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Vorhabens „Erweiterung der THAI-Versuchsanlage als SMR-Integral-Anlage“ (02NUK092) erfolgte in enger Abstimmung mit dem Projektträger KIT PTKA, dem Projektträger GRS und mit externen Fachleuten. Das Vorhaben wurde am 8. April 2024 beantragt und mit Laufzeitbeginn 1. Mai 2024 sowie Laufzeitende 31.12.2024 bewilligt. Aufgrund unvorhergesehener Verzögerungen beim Baufortschritt wurde am 25.11.2024 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um sechs Monate beantragt, mit deren Bewilligung das Laufzeitende auf den 30.06.2025 festgelegt wurde.

Die technische und wissenschaftliche Evaluierung der Erweiterung der THAI-Versuchsanlage um eine SMR-Integralanlage wurde im Rahmen des Vorhabens THAI VII-a bearbeitet und auf der 7. Sitzung des Projektkomitees „Transienten und Unfallabläufe“ in einem Zwischenbericht vorgestellt und vom Expertengremium empfohlen. Bild II-2 zeigt den Arbeits- und Zeitplan verzahnt mit dem OECD-NEA THEMIS Projekt über die gesamte Projektlaufzeit. Die Erweiterung der bundeseigenen THAI-Versuchsanlage folgt dem Ziel auch in Zukunft Fragestellungen der Reaktorsicherheitsforschung adressieren zu können, wie z. B. zur Bereitstellung von experimentellen Daten und Erkenntnisse zu passiven Sicherheitssystemen bei bestehenden und zukünftigen Reaktorkonzepten, wie z. B. SMR.

Weitere Arbeiten betreffen den Umzug und den Wiederaufbau der THAI-Versuchsanlage am neuen Standort, nach deren vorherigen, vollständigen Demontage am Standort Eschborn. Der Wiederaufbau der THAI-Versuchsanlage sollte engverzahnt mit der Erweiterung durchgeführt werden, da neben den Sicherheitsbehältern auch alle Peripheriegeräte und die zugehörige Messtechnik an den neuen Standort in Hochheim verlagert werden und dort für die Nutzung an der SMR-Integralanlage zu adaptieren

sind. Die Errichtung des Pools, zur Bereitstellung der großen Wasservorlage für die partielle und vollständige Überdeckung des neuen SMR-Behälters wurde bereits in den erforderlichen Genehmigungen zu Bau, Brandschutz und Strahlenschutz berücksichtigt.

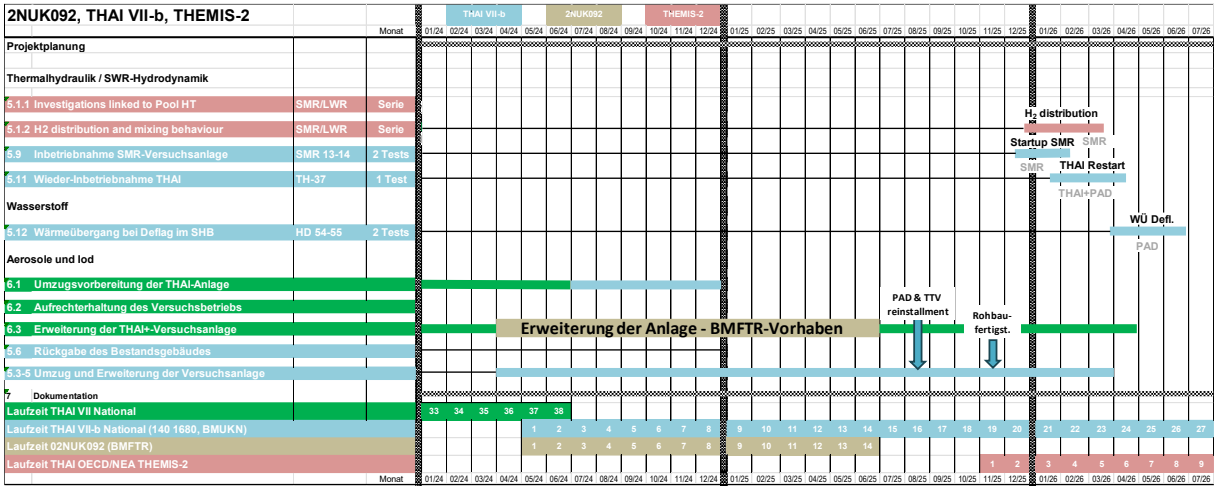

Bild II-2: Ablaufplan 02NUK092 verzahnt mit THAI VII-b (150 1680)

II.4 Erzielte Ergebnisse

Als zentrale Bestandteile der Anlagenweiterung wurde ein großes Wasserbecken (NU-eX-Pool) errichtet, in dem ein neuer druckfester Versuchsbehälter installiert wurde (NU-eX-Behälter). Zusätzlich zu diesen beiden Hauptkomponenten wurde die entsprechende Medienversorgung installiert, als auch zwingend erforderliche Erweiterungen der Versuchsinfrastruktur. Die einzelnen Aspekte sind im Folgenden detailliert beschrieben.

II.4.1 NU-eX-Pool der SMR-Erweiterung

Um Untersuchungen hinsichtlich der Außenkühlbarkeit von Sicherheitsbehältern durchführen zu können, musste ein Wasserbecken errichtet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die technische Ausführung des Wasserbeckens einen großen Bereich an Versuchsszenarien abdeckt, unter anderem die vollständige Wasserüberdeckung eines Sicherheitsbehälters, wie z. B. beim NuScale-SMR, eine partielle Wasserüberdeckung oder eine Außenhautkühlung mittels Sprays oder Wasserfilm, usw. Für die beiden letzten genannten Szenarien ist das Wasserbecken zwar nicht mit Kühlwasser gefüllt, dennoch ist es unerlässlich, um einen kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen, der nicht nur Daten zum Anlaufverhalten des Systems, sondern auch zum Verhalten in einer langanhaltenden Unfallphase bereitstellen kann. Ebenso ermöglicht das Wasserbecken die Aufhängung und den gleichzeitigen Schutz der Instrumentierung mit einer hohen räumlichen Flexibilität.

Das permanent stehende Wasserbecken wurde mit einem Innendurchmesser von 6,5 m und einer Höhe von 8,0 m errichtet. Der Pool ragt dabei deutlich tiefer als das Kellergeschoss des Anlagengebäudes. Relativ zum Kellergeschossboden des THAI-Gebäudes (−3,40 m) liegt der Poolboden 4,1 m tiefer (−7,5 m). Relativ zum THAI-Behälterinnenboden (THAI-Koordinatensystem „0“ entspricht −2600 mm unter dem EG-Boden) liegt der Poolboden auf einer THAI-Koordinatenhöhe von −4900 mm. Das stehende Wasservermögen des Pools beträgt somit maximal 265,5 m^3 abzüglich der Verdrängung des eingetauchten NU-eX-Behälters.

II.4.1.1 Planungs- und Vorbereitungsarbeiten des Pools

Neben der Planung des Pools durch den zuständigen Architekten erfolgte eine statische Bemessung des notwendigen Verbaus zur Errichtung des Pools innerhalb der erweiterten THAI-Versuchsanlage im direkten Anschluss an das Bestandsgebäude auf dem Gelände Neckarstr. 12-14 in Hochheim am Main. Da es sich bei dem Pool um ein aus statischen Gesichtspunkten komplexes Gewerk handelt, das in seiner Beurteilung über die Statik eines oberirdischen Hoch-/Tiefbaus hinaus geht, musste ein dafür geeignetes Ingenieurbüro beauftragt werden die entsprechenden Planungsunterlagen und Analysen

bereitzustellen. Zusammen mit dem Architekturbüro Clemens Herold, Frankfurt am Main, erstellte die GeoIngenieure FLG GmbH die notwendigen Unterlagen und führte die notwendigen Grundwasseranalysen und Erkundungsbohrungen auf dem Gelände durch. Basierend auf der Bodenbeschaffenheit, dem hohen Grundwasserniveau auf dem Gelände und der Anforderungen zur Beschränkung der Kopfverformungen sowie fehlender Möglichkeit einer Rückverankerung wurde eine aufgelöste Bohrpfahlwand mit Spritzbetonausfachung der Betongüte C20/25 auf den Lastfall BS-T bemessen, Bild II-3. Dabei wurde die Nähe des Verbaus zur Bestandsgründung berücksichtigt und ein Pfahlabstand von 3 m gewählt. Zur Begrenzung der Kopfverformung wurde mit einem erhöhten aktiven Erddruck gerechnet.

Vor der eigentlichen Ausführung der Spundwanderrichtung und der Verbauwandarbeiten der Bohrpfahlwand musste der Untergrund auf Kampfmittelrückstände sondiert werden. Auf Höhe der Spundwand, entsprechend mittig auf den Spundwandachse in einem Bohrrasterabstand von 1,5 m, wurde erschütterungsfrei mittels Vollbohrschnecke bis zur geforderten vertikalen Tiefe von 5 m abgeteuft. Das Raster bestand aus 28 Einzelbohrungen und die Bohrlöcher wurden mittels Bohrlochsondierung Geomagnetik aufgezeichnet und auf mögliche Verdachtspunkte, die auf Kampfmittel hindeuten, interpretiert. Im Bereich der zu errichtenden Bohrpfahlwand wurde ebenfalls auf 5 Metern mittels 6 Probebohrungen abgeteuft. Im Rahmen der Arbeiten wurde keine Indikation vorhandener Kampfmittel gefunden und entsprechend die Spundwanderrichtung und der Verbau freigegeben. Die statischen Berechnungen der Bohrpfahlwand, der Poolstatik und die Berücksichtigung beim Fundament und der Gebäudestatik wurden vom zuständigen Prüfstatiker geprüft und freigeben (L. Strutt, BVS H/R/S GmbH & Co. KG).

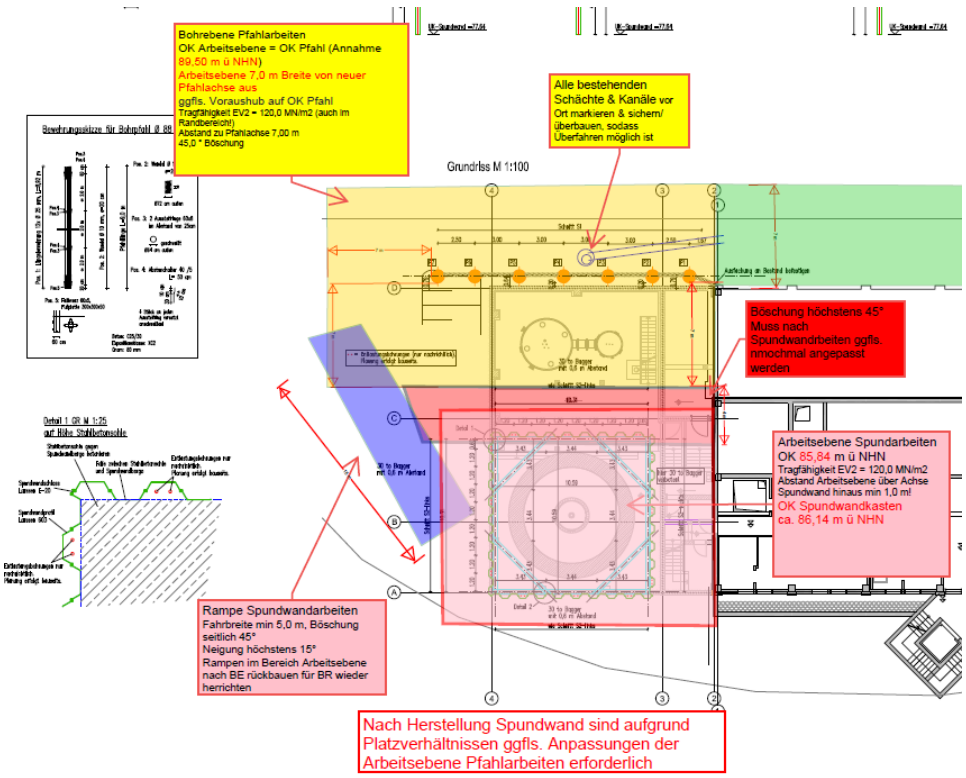

Bild II-3: Detailplanung der Bohrpfahlwand als Verbau (Bahnbettschutz) und die Ausführung des Spundwandkörpers

II.4.1.2 Ausführung der Bohrpfahlwand

Nach der Planung und dem geprüften statischen Nachweis der Bohrpfahlwand durch die beauftragte Fachfirma (Köster GmbH) wurde das Gelände hinreichend befestigt und verdichtet, um das Pfahlbohrgerät aufstellen zu können. Dazu war eine Absicherung der nahen verlaufenden Oberleitung zu treffen, welche die vertikalen und horizontalen Abmessungen des Bohrgeräts berücksichtigt. Das Bohrgerät wurde vor dem Bestandsgebäude angeliefert und aufgebaut, das Verfahren an den Einsatzort im Bereich der THAI-Versuchsanlage geschah mittels Kettenantriebs des Bohrgeräts, Bild II-4.

Bild II-4: Bohrpfahlwandbohrung und Verfüllung (links) und Spundwandeinrammung (rechts)

Die sechs Ortbeton-Großbohrpfähle für die Pfahlwand wurden nach DIN EN 1 536 mit einem Durchmesser von 1000 mm und einer Mindestpfahllänge von 11,10 m bei maximaler Bohrtiefe von 13,0 m errichtet. Das Abteufen der Bohrungen geschah fachgerecht gemäß Gutachten und das Bohrgut wurde entsorgt. Innerhalb der Bohrungen wurde die statisch erforderliche Pfahlbewehrungen mittels Bewehrungskörper gestützt durch konstruktive Flacheisenbewehrungen eingesetzt und mittels Beton C2 0/25 befestigt. Nach Fertigstellung der Bohrung wurde das Pfahlbohrgerät rückgebaut und abgefahren.

Darauffolgend wurde die Baugrube in Etappen ausgeteuft (Fa. LDA BAU GmbH) und schrittweise die Zwischenräume der Bohrpfahlwände mittels Spritzbetonausfachung von mindestens 200 mm mit statisch geforderter Bewehrung aus Lagermatten befestigt.

II.4.1.3 Herstellung des temporären Spundwandkasten und Wasserhaltung

Für die Errichtung des Pools wurde ein Spundwandkasten auf der Höhe des Kellergeschosses in die Baugrube gerammt (Fa. Köster GmbH). Für die Spundwandarbeiten wurde eine Arbeitsebene auf Kellergeschossniveau hergestellt und hinreichend verdichtet. Die Zugänglichkeit auf diese Ebene für das Rammgerät wurde mit einer temporären Rampe mit geringer Steigung ausgeführt und nach Fertigstellung der Arbeiten wieder komplett rückgebaut.

Der Spundwandkasten (10,31 x 10,31 m) wurde mit einer Gesamttiefe von 8,20 m rückbaubar von der Köster GmbH errichtet und gegenüber dem potenziell eindringenden Grundwasser abgedichtet. Der seitliche Überstand des Spundwandkastens wurde mit Erdreich verfüllt und verdichtet. Im Bereich des Spundwandkastens wurden Entlastungsbohrungen zur Reduzierung des anstehenden Wasserdrucks durchgeführt. Die Gesamttiefe entspricht einem Geländeniveau von 77,64 m ü NN, wobei das Grundwasserniveau mit 84 ü NN ermittelt wurde. Nach der statischen Versteifung des Kastens mittels Querträgern wurde der Kasten freigeräumt und die Wasserhaltung für Drainage des Grundwassers angeschlossen. Die Grundwasserbeeinflussung wurde entsprechend beantragt, da der Pool selbst in den Grundwasserleiter einbindet und zur Minimierung der Grundwasserbeeinträchtigung im Schutze eines wasserdichten Verbaus errichtet wurde.

Für unvermeidliche Restdurchlässigkeiten der Baugrube zum Pool beantragte BT in diesem Zusammenhang eine einfache wasserrechtliche Erlaubnis zum Entnehmen, Zutage fördern, Zutage leiten und Ableiten von Grundwasser aus der Wasserhaltung in das städtische Kanalnetz. Die genehmigte Wasserhaltung wurde fristgerecht wieder rückgebaut. Die Bauzeit wurde in der Ausführung so optimiert, dass die Wasserhaltung in der Dauer auf das Mindestmaß beschränkt blieb. Der dauerhafte Verbleib des Poolbaukörpers im Grundwasser wurde ebenfalls von den zuständigen Behörden genehmigt.

Aufgrund der geringen Permeabilität des Tiefengrundes konnte auf eine Unterwasserbetonierung verzichtet werden, da die Wasserhaltung ausreichend war, um die Baugrube trocken zu halten. Nach Gründung, Abdichtung und Armierung wurde das Poolfundament mit einer Dicke von 0,6 m und einem Durchmesser von 8,5 m hergestellt. Bereits in die Fundamentierung wurden die zwölf 200er-Hüllrohre für die Aufnahme der Behälterbefestigung in das Fundament eingegossen. Innerhalb des Poolbodens sind hinreichend viele Erdungsfahnen eingegossen, die den elektrischen Potentialausgleich des NU-eX-Behälter sicherstellen.

II.4.1.4 Errichtung des Pools

Die Poolwand wurde nach oben in drei miteinander verschränkten und abgedichteten Segmenten errichtet. Die Seitenwand des Pools wurde mit 1 m Dicke errichtet, was eine Selbstabdichtung des Poolkörpers ohne zusätzliche Beschichtung sicherstellt. Im Kellergeschossniveau des Gebäudes sind insgesamt 6 wasserdichte Durchgänge durch den Pool ausgeführt worden, um dort die Instrumentierung in den Pool bzw. in den NU-eX-Behälter sowie Gas- und Dampfeinspeisungen, bzw. Probenahmeleitungen aufbauen und anschließen zu können. Die beiden Durchführungen mit 300 mm Durchmesser auf der Südwestseite, Bild II-5, auf einer Höhe (Mitte der Durchführung) von −1,01 m und −2,4 m relativ zum Erdgeschossboden wurden errichtet, um die neben dem Pool im UG stehenden Umwälzpumpe und die Wasseraufbereitung (UV-Licht) dort anzuschließen.

Bild II-5: Ausgeführter Pool mit den entsprechenden Durchführungen in das UG des Gebäudes.

Diese Umwälzung wird eine Keimfreiheit der Wassersäule im Betrieb herstellen. Die untere Durchführung soll als ‚Ansaugstutzen' und die obere als ‚Rückspülstutzen' genutzt werden. Die Umwälzpumpe dient ebenfalls auch als Befüll- und Entleervorrichtung für den Pool. Trotz der Installation einer leistungsfähigen selbstansaugenden Pumpe muss davon ausgegangen werden, dass der Pool nicht vollständig entleert werden kann. Aus diesem Grund wurde am Boden des Pools ein 0,2 × 0,2 m großer und 20 cm tiefer Pumpensumpf installiert, der es ermöglicht, das verbleibende, ggf. manuell hineingeschobene, Restwasser abzupumpen und so den Pool vollständig trocken zu legen. Aufgrund der großen Poolhöhe ist die Sumpfpumpe nicht permanent installiert. Zusätzlich wurden zwei weitere 300 mm sowie zwei 200 mm Durchführungen errichtet.

Der Spundwandkörper wurde den statischen Vorgaben entsprechend verfüllt bzw. mit Schotter verfüllt und verdichtet, so dass der Poolaufbau selbst bei maximaler Wasserfüllung keine Druckkräfte auf die

Gründung und das Fundament des Anbaus aufbringt. Im Anschluss wurde die Versteifung des Spundwandkastens wieder ausgeschweißt und die Spundwandtafeln einzeln aufgenommen und herausgezogen. Für das Rammziehgerät musste erneut eine temporäre Rampe errichtet und nach dem Abtransport rückgebaut werden. Die Gebäudefundamente wurden mechanisch und akustisch vom Pool nach baurechtlichen Vorgaben entkoppelt. Die Seitenwände des Pools wurden an die Bodenplatte des Erdgeschosses des THAI-Anlagengebäudes angeschlossen bei gleichzeitiger mechanischer und akustischer Entkopplung zum EG-Boden.

Die Wandstärke des Pools bietet eine hinreichend große Abschirmwirkung, die den Einsatz eines THAI-üblichen Radiotracers sowohl im NU-eX-Versuchsbehälter ohne stehende Wassersäule, aber auch im Wasser selbst ermöglichen würde. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der erweiterten THAI-Anlage ist der Radiotracereinsatz im Pool nicht vorgesehen, da vorerst eine thermohydraulische Charakterisierung der Anlage erfolgen wird, bevor man sich komplexeren Szenarien, wie z. B. dem Spaltproduktttransport widmen wird. Die thermohydraulische Anlagenerfahrung ist nicht nur für den sicheren Betrieb und die zuverlässige Planung von Experimenten notwendig, sondern auch um die Rechenprogramme zu trainieren, für welche spätere Spaltproduktvalidierungsdaten bereitgestellt werden.

II.4.2 Zugang zum Pool und Arbeitssicherheit

Der Zugang zum Pool wird über wasserfeste Leitern ermöglicht. Das beschaffte Leitersystem (Lorenz Hasenbach GmbH & Co.KG/ Haca Leitern) ist so ausgelegt, dass es fest in der Poolwand verschraubt ist. Diese Leiter dient auch als Fluchtweg aus dem Pool und ist mit einer Sicherungsschiene versehen, um einen möglichen Absturz aus großer Höhe zu verhindern. Als zweiter Zugangsweg ist es geplant per Lastenkran und zugelassenem Fahrkorb in die Anlage abzusteigen. Ebenfalls möglich wäre es, Arbeiten am NU-eX-Behälter und an der Poolwand mittels eines Hubsteigers zu verrichten. Zu diesem Zweck hat die Becker Technologies unabhängig vom Projekt ein entsprechendes Fahrzeug erworben.

II.4.2.1 Wasserzufuhr und Ableitungssysteme

Im Bestandsgebäude existierte ein Trinkwasseranschluss, der signifikant erweitert werden musste und aufgrund der Regenwasserkanalumlegung neu verlegt werden musste. Der bestehende Schmutzwasseranschluss und die bereits vorhandene Hebeanlage sind ausreichend groß und sollen weiterhin genutzt werden. Die Planung für die Trinkwasserinstallation erfolgte auf Basis der DIN 1988. Die Planung der Schmutzwasserinstallation erfolgte auf Basis der DIN 1986.

Die Installation der Trinkwasserleitungen zur Versorgung des Pools und des Dampferzeugers erfolgte entsprechend den gesetzlichen Vorschriften und hygienischen Standards (RMG Gebäudetechnik GmbH und TGA Rhein-Main GmbH in Koordination des Ingenieurbüros Garczarek GmbH). Eine weitere wichtige Maßnahme war die Trennung von Trinkwasser und Betriebswasser in spezifischen Bereichen wie der Versuchshalle und vor allem für den NU-eX-Pool. Hier wurden separate Wasseranschlüsse für Trinkwasser und Betriebswasser installiert, um den individuellen Anforderungen der Versuchsanlage gerecht zu werden. Die Entwässerung des Pools wurde durch den Einbau der ausreichend großen und im KG positionierten Umwälz- und Ansaugpumpe gewährleistet, die das Beckenwasser nach oben befördern und eine gezielte Entwässerung ermöglichen wird (Linn-Pumpen GmbH).

Abseits des Pools und der übrigen THAI-Anlage sind 4 Waschtische in den Schleusen, eine Dekontaminierungsdusche und ein Ausgussbecken angelegt. Die Warmwasserbereitung erfolgt mit Durchlauferhitzern: 2x 11 kW für die Waschtische und 1x 24 kW für die Dusche. Die Warmwasserbereitung erfolgt dadurch nur bei Bedarf. An den Waschtischen sind Armaturen mit IR-Sensor und Spülfunktion verbaut. Die Duscharmatur ist mit integriertem Spülventil errichtet.

II.4.2.2 Keimfreiheit der Wasservorlage

Die Installation einer leistungsstarken UV-Anlage (UMEX GmbH, FlexGruup GmbH & Co. KG) dient der Entkeimung der Wasservorlage. Die beschafften und eingebauten Gasentladungsstrahler erzeugen UV-Strahlen und zerstören aufgrund der eingebrachten Energie das Replikationszentrum (DNS) der Mikroorganismen. Die UV-Anlage ist an die Umwälzpumpe angeschlossen und wird bei Langzeitversuchen

eingesetzt werden, um eine ausreichende Stabilität der Wasservorlage zu bieten. Das Pumpensystem und die UV-Anlage ist in der Lage das Poolvolumen innerhalb von ca. 8 h umzuwälzen. Diese Umwälzanlage dient auch der Durchmischung der Wasservorlage, falls während des Versuchsbetriebs thermische Stratifikationen auftreten sollten. Generell ist es vorgesehen, das Tiefbecken regelmäßig mit Frischwasser zu füllen und nach den Versuchen zeitnah zu entleeren.

II.4.3 NU-eX-Behälter der SMR-Erweiterung

II.4.3.1 Anforderungen

Aufgabe der Auslegung des NU-eX-Behälters war es, einen Druckbehälter zu konzipieren, in dem thermohydraulische Bedingungen eingestellt werden können, die für einen SMR-Sicherheitsbehälter unfalltypisch wären (vgl. Nuscale, Nuward, BWR-X-300).

Daraus ergaben sich zum einen Mindestanforderungen an Größe und Geometrie des Versuchsbehälters als auch an thermohydraulische Druck- und Temperaturbedingungen. Darüber hinaus waren auch arbeitstechnische Gesichtspunkte zu berücksichtigen wie Zugänglichkeit des Behälters von innen und von außen für Umbauten und Instrumentierung. Weiterhin waren, Höchstmaße für Straßentransport, Modularität und Aufstellung im Gebäude bzw. Pool zu beachten.

Unter Berücksichtigung der Bereitstellung von notwendigen Versuchsdaten für eine Anlage mit einem Volldruck- bzw. Unterdruckcontainment wurde der Behälter für einen Betrieb bei maximal −1 bis 64 bar ü ausgelegt bei einer gleichzeitig maximalen Betriebstemperatur von 200 °C. Zusammensetzung, Druck und Temperatur der einzustellenden Versuchsatmosphäre sollen unfalltypisch sein, z. B.:

- Sattdampf und nicht-kondensierbare Gase
- Gesamtdruck: 0/ 65 bar
- Partialdruck Dampf: 16 bar (bei Volldruckbelastung von 64 bar ü)
- Temperatur: 200 °C
- Wasser im Behältersumpf, Wasser als Wandfilm and der Behälterinnen- bzw. Behälteraußenseite

Im Versuchsbetrieb ist eine Variation dieser Werte vorgesehen und insbesondere sollen Mischungsverhalten und Schichtungseffekte untersucht werden. Entsprechende Variationen hinsichtlich der Einspeiseorte von Dampf- und nicht-kondensierbaren Gasen, sind aufgrund der Erfahrungen im THAI-Behälter ebenso umzusetzen, wie die potenzielle Ableitung und Mischung des Behältersumpfes. Ebenso, wie bei den bestehenden THAI-Behältern wird die Installation von Einbauten in den Behälter wichtig sein, weshalb der Behälter idealerweise auf vollem Durchmesser geöffnet werden sollte, wozu entsprechende Haltelaschen im Behälter eingebaut wurden.

Im Vergleich zu Sicherheitsbehältern großer Leistungsreaktoren ist das Volumen moderner SMR wesentlich kompakter ausgeführt und entsprechend hohe Gasgeschwindigkeiten und ein signifikanter Einfluss von Wandscherspannungen auf die Strömung ist zu erwarten. Dies wird noch weiter verstärkt, da nicht nur das Gesamtvolumen eines SMR-Sicherheitsbehälters wesentlich kleiner ist, sondern auch der vorhandene Containmentbauraum sehr stark von notwendigen Inneneinbauten, wie Reaktordruckbehälter, Dampferzeuger oder Druckhalter belegt wird.

Da aufgrund von Skalierungseffekten bekannt ist, dass kleine Versuchsanlagen im Vergleich zu großen und vor allem vertikal hohen realen Sicherheitsbehältern zu wesentlich geringeren Strömungsgeschwindigkeiten führen, bestand bei der Behälterauslegung die Forderung, eine Rayleighzahl von Ra > 10^{15} erzeugen zu können. Der absolute Wärmeübergang von der Wand des Sicherheitsbehälters an das ihn umgebende Wasser hängt ab von der Rayleigh-Zahl:

$$\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr} = \frac{g\beta}{\nu^2}(T_s - T_\infty) l^3 \,\mathrm{Pr} \qquad \text{with } \mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$$

unter der Annahme einer einphasigen laminaren oder turbulenten natürlichen Konvektion. Gr ist die Grashof-Zahl, Pr die Prandtl-Zahl, g die Erdbeschleunigung, β der Koeffizient der thermischen Expansion des Fluids, ν die kinematische Viskosität, $T_w - T_\infty$ die Temperaturdifferenz zwischen der heißen

Oberfläche (Temperatur T_w) und dem Fluid weit weg von der Oberfläche (Temperatur T_∞), l die Charakteristische Länge der Oberfläche, und a die thermische Leitfähigkeit des Fluids.

Dies konnte mit der umgesetzten Behälterhöhe von 12267 mm erreicht werden. Die Anforderungen für den Durchmesser des Behälters sind bzgl. der thermohydraulischen Skalierung geringer, allerdings ist der Behälter hinreichend groß auszuführen, um die Anlage hin zu einer möglichen Integralanlage erweitern zu können. Für eine solche Erweiterung ist es wichtig einen zumindest generischen Kühlkreislauf in den Sicherheitsbehälter installieren zu können. Zur einfacheren Instrumentierung und zur bestmöglichen Zugänglichkeit dieser Einbauten ist der Behälter mit zwei umlaufenden Apparateflanschen ausgerüstet, was es ermöglicht, diese Einbauten in einem vorgefertigten Zustand auf Höhe des unteren Apparateflansches zu befestigen und dann die obere Behälterhälfte aufzusetzen.

Zur Prinzipiellen Eignung für Versuche mit Heißdampf, Aerosolen und Iod wird der Behälter in Edelstahl ausgelegt. Die nicht metallischen Dichtungen mussten möglichst inert hinsichtlich chemischen Iod-Reaktionen ausgelegt sein. Obwohl sich an dieser Stelle PTFE bewährt hat, bieten O-Ring Dichtungen an dieser Stelle eine Reihe von entscheidenden Vorteilen:

- Reduktion der notwendige Anpresskräfte bei voller Druckbeaufschlagung
- Zuverlässigkeit im Unterdruck (Vakuumbedingungen)
- Bekannte PTFE-Dichtigkeitsprobleme bei thermischen Lastwechseln
- Geringer Dichtungsverschließ

Vor allem aufgrund der besseren Handhabbarkeit unter Druck und der höheren Zuverlässigkeit bei Vakuumbedingungen wurde der Behälter durchgängig an allen großen Flanschen (DN200) mit O-Ring Dichtungen ausgelegt. Die Stutzen DN 25 und DN100 wurden hingegen ohne O-Ringnut hergestellt.

Neben technischen Skalierungsüberlegungen wurden beim Design des Behälters auch wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt:

- Transportierbarkeit auf der Straße
- Installation am Aufstellungsort
- Zerlegbarkeit und Zugänglichkeit in der THAI-Anlage.

Die messtechnische Zugänglichkeit in den Behälter muss durch Stutzen und Behälterflansche sichergestellt werden. Aufgrund der geforderten Druckklasse wird vorerst auf optische Zugänge verzichtet.

II.4.3.2 Technische Ausführung

Ein entsprechender Edelstahl-Druckbehälter wurde geplant und gefertigt, Bild II-6 bis Bild II-9. Das Abheben der oberen Hälfte dient insbesondere der Einbringung wechselnder Einbauten, welche die Geometrie und die Grundfunktionen des Primärkreises bzw. von passiven Sicherheitssystemen (Dampferzeuger, etc.) abbilden sollen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die NU-eX-Erweiterung zur Integralen Versuchsanlage auszubauen. Des Weiteren erlaubt dieser Behälter mit dem herausnehmbaren Mittelsegment Skalierungsuntersuchungen mit einer einzigen modularen Anlage durchzuführen.

Für die Lagerung der oberen Behälterhälfte im demontierten Zustand wird eine Fundamentplatte außerhalb des Gebäudes erstellt. Der speziell gestaltete Deckel mit großer Öffnung erleichtert die Durchführung von Instrumentierungsarbeiten an den Einbauten im Inneren des Behälters. Der Ablagestandort für diesen Deckel ist außerhalb des Tiefbeckens im Erdgeschoss des Neubaus vorgesehen.

Relativ zum Kellergeschossboden des THAI-Gebäudes (-3,4 m) liegt der Behälterinnenboden 4,015 m tiefer (-7,415 m). Relativ zum THAI-Behälterinnenboden (THAI-Koordinatensystem „0“) liegt der Behälterinnenboden auf einer THAI-Koordinatenhöhe von -4815 mm.

Der Behälter verfügt über eine Gesamthöhe von 12267 mm gemessen von der Unterkante des Standfußes bis zur Oberkante des obersten Flansches im Behälterdeckel. Der untere und obere Korbbogenboden (Behälterboden und Behälterdeckel) besitzen jeweils einen kleinen Radius von 354 mm und ei-

nen großen Radius von 1840 mm. Beide nehmen eine Bauhöhe von ca. 650 mm ein, bei einer Wandstärke von mindestens 34 mm und einer nominellen Wandstärke von 39 mm. Das dazwischenliegende zylindrische Behältersegment (inklusive des oberen Segments) besitzt eine Gesamthöhe von 10703 mm bei einer Wandstärke von 40 mm und einem Innendurchmesser von 2220 mm. Im vollständigen Zusammenbauzustand ergibt sich somit eine maximale Innenhöhe von 10703 mm + 2 × 610 mm = 11923 mm. Im Komplettzusammenbau besitzt der Behälter ein Innenvolumen von 45,30 m^3 und ein Gewicht von 46,603 t.

Bild II-6: Unterer Teil des NU-eX-Behälters mit der Standzarge vor der Auslieferung

Bild II-7: Einhub des unteren Teils des NU-eX-Behälter in den Pool-Rohbau

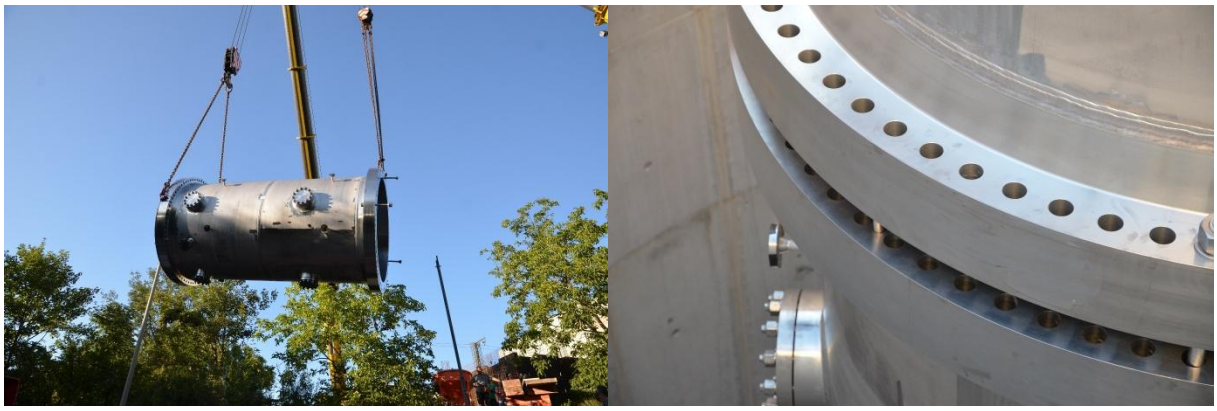

Bild II-8: Einhub des oberen Segments in den Pool und Aufsetzen auf Zentrierstifte

Bild II-9: Fertiger NU-eX Zusammenbau nach Aufsetzen des Behälterdeckels

Durch die Abnahme des oberen zylindrischen Segments verringert sich die Behälterhöhe um 4750 mm und ergibt dann eine Innenhöhe von 7173 mm. Das Behältervolumen verringert sich dann entsprechend um 18,386 m^3 zu einem verbleibenden Volumen von 26,964 m^3.

Die beiden Behältersegmente werden jeweils durch Apparateflansche (jeweils mit einer Stärke von 225 mm) getrennt, bzw. verschlossen. Zum druckdichten Verschluss der Flansche stehen jeweils 80 × M45 Stiftschrauben und entsprechende Muttern zur Verfügung.

Auf Höhe 1050 mm + 695 mm = 1745 mm von der Unterkante der Standzarge gemessen befinden sich 4 Blockflansche mit einer Durchgangsöffnung von 200 mm und einem Außendurchmesser von 430 mm. Die Blockflansche werden mit 12 × M33 Dehnschrauben verschlossen und abgedichtet. Die vier Flansche sind symmetrisch über den Umfang angeordnet (90°). Auf Höhe 4050 mm + 695 mm = 4745 befinden sich weitere 4 Blockflansche gleicher Bauart auf dem unteren Behältersegment. Am oberen Behältersegment befinden sich die 2 × 4 Blockflansche Zugangsflansche auf einer Höhe von 1471,7 mm, bzw. 3971,7 mm über dem Apparateflansch. Auf der obersten Flanschebene befinden sich zusätzlich zwei 150 × 23,5 mm Rohrstutzen mit DN 100 Flanschen als Abschluss. Auf dem Behälterdeckel sind zwei 114,3 × 6,3 mm Rohrstutzen eingeschweißt ebenfalls mit einem DN 100 Flansch als Abschluss. Entlang der Behälterhöhe und dem Behälterumfang sind 24 kleinere Rohrstutzen (33,7 × 3,2 mm) angebracht, die der späteren Einspeisung von Wasser, Dampf und nicht-kondensierbaren Gasen, bzw. der Ableitung von Wasser oder Gasgemischen dienen werden.

Die Korbbögen, der zylindrische Behältermantel und die Apparateflansche wurden aus Duplex-Stahl 1.4462 gefertigt, der auch unter dem Namen X2CrNiMoN22-5-3 oder AISI 318LN bekannt ist. Es handelt sich um einen nichtrostenden Stahl mit einem zweiphasigen, austenitisch-ferritischen Gefüge, der sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit (besonders gegen Spannungsrisskorrosion) und hohe Festigkeit auszeichnet. Die Standzarge, Block- und Stutzenflansche wurden aus 1.4571 gefertigt.

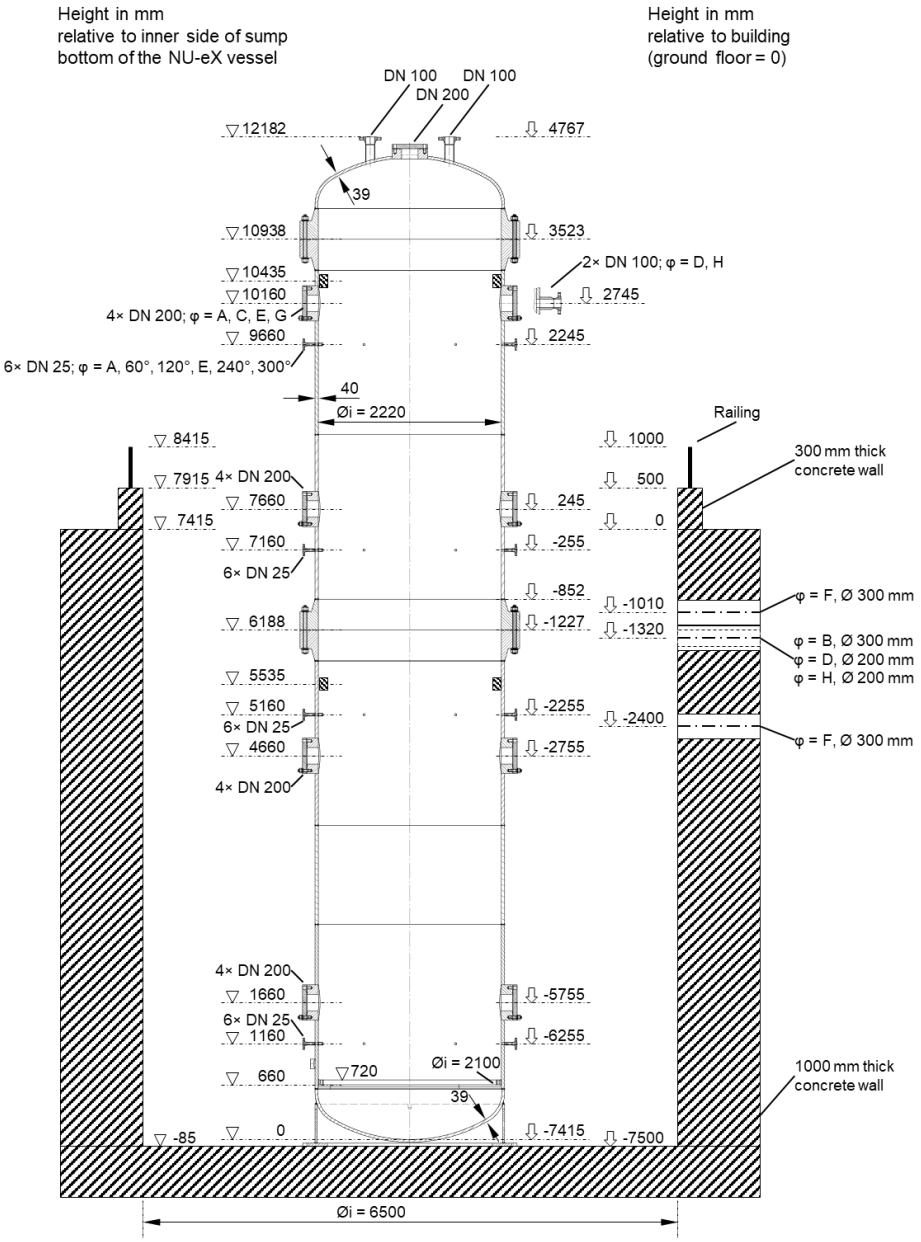

Bild II-10: Behälter der neuen NU-eX-Integralanlage mit einem Auslegungsdruck von 64 bar ü im Pool

Zum Transport der einzelnen Segmente sind Anschlagösen an den beiden zylindrischen Segmenten und am Deckel angebracht, die ein vertikales Aufstellen bzw. ein seitliches Umlegen ermöglichen. Vor der Aufstellung des Behälters auf den Poolboden wurden mittels Schablonenring entsprechend dem Behälterfuß 12 200er Hüllrohre in das Fundament eingegossen. Direkt am unteren Behältersegment ist eine umlaufende Standzarge angeschweißt. Nach der Aufstellung des Behälters wurden die 12 Ankerschrauben in die entsprechenden Hüllrohre eingesetzt und mittels 4 Nivellierspindeln KS4045 vertikal und horizontal ausgerichtet. Nach dem Verfüllen der Hüllrohre mit Vergussmörtel (24 Einheiten a 25 kg) wurden die Ankerschrauben nach Vorgabe auf ihr Anzugsmoment angezogen und der Behälter so dauerhaft und erdbebensicher befestigt. Für den Behälter stehen die Prüfzeugnisse für die geforderten

Druck- und Temperaturrandbedingungen nach durchgeführter TÜV-Abnahme zur Verfügung.

Die integrale SMR-Erweiterung wurde so gefertigt, dass die essenziellen Parameterbereiche für die zukünftige Forschung abgedeckt werden. Diese wären in kleineren Skalierungen nicht erreichbar, würden in größeren Maßstäben jedoch unvertretbare Kosten verursachen. Dies ermöglicht die Durchführung von Versuchen mit präzise einstellbaren Rand- und Anfangsbedingungen, unterstützt von einer umfassenden Instrumentierung, die an die spezifischen Versuchsbedingungen angepasst werden kann.

Die Auslegung des Behälters bzgl. Druck, Temperatur, Oberflächengüte und seiner Zeitstandsfestigkeit (1000 Lastwechsel) erlaubt es den NU-eX-Behälter nicht nur für SMR-typische Thermohydraulikversuche einzusetzen, sondern auch für Untersuchungen zum Verhalten von Wasserstoff und dem Zündungsverhalten, bzw. Deflagrationsverhalten bei erhöhter Wasserstoffkonzentration. Auch experimentelle Untersuchungen zum Rekombinatorverhalten in Volldruckcontainments (z. B. NuScale oder BWR-X300) können in der Anlage durchgeführt werden und so neue Daten bzgl. der Wirksamkeit von passiven Sicherheitssystemen bereitgestellt werden. Eine frühere Limitierung der THAI-Anlage, dass aufgrund der doppelwandigen Thermoölheizung und der Behälterisolation keine Versuche zur Containmentaußenkühlung durchgeführt werden konnten, wird mit der neuen Anlage ebenfalls aufgehoben. Im NU-eX-Behälter und dem Pool können Untersuchungen zur Filmkühlung als auch zur Spraykühlung von Sicherheitsbehältern durchgeführt werden und dringend benötigte Versuchsdaten für die Validierung der Unfallwerkzeuge bereitgestellt werden. Vor allem das Kühlkonzept des AP1000 (Westinghouse) kann mit dem NU-eX-Behälter bewertet und seine Wirksamkeit untersucht werden, wobei dies nicht nur unter Auslegungsrandbedingungen, sondern auch unter auslegungsüberschreitenden Bedingungen erfolgen kann. Experimentelle Untersuchungen der Hersteller wiederum decken nur Fragen für die Qualifizierung des Designs und den jeweils in den Genehmigungsverfahren spezifizierten Bereich ab.

II.4.3.3 Ausrichtung im Gebäude

Die Ausrichtung des Behälters im Pool und damit im Gebäude basiert auf den Durchgängen durch den Pool im Kellergeschoss und damit vor allem hinsichtlich der Ausrichtung zur THAI+ Anlage. Die Art der Winkel und Höhenangaben der THAI-Behälter werden prinzipiell auch für den NU-eX-Behälter beibehalten. Die Höhenangaben im NU-eX-Koordinatensystem basieren auf dem tiefsten Punkt im Behälter $H_{NU\text{-}eX} = 0$, welcher sich 85 mm über dem Poolboden befindet. Der Poolboden befindet sich 7,5 m unterhalb des EG-Bodens des Gebäudes womit sich $H_{NU\text{-}eX} = 0$ damit 7,415 m unterhalb des EG-Bodens befindet, siehe Bild II-10. Die azimutale Ausrichtung erfolgt basierend auf der Draufsicht mit dem 0°-Winkel in Richtung der nördlichen Gebäudewand. Zu einfacheren Zuordnung in den Instrumentierungsplänen werden den Hauptwinkel (alle 45 °) alphabetisch Großbuchstaben zugeordnet, es gilt 0° = „A“, 45° = „B“ bis 315° = „H“, Bild II-11. Daneben sind die um −15° versetzten Winkel von 345° = −15° bis 300° mit den Kleinbuchstaben „a“ bis „h“ versehen.

II.4.3.4 Behälterstutzen und Flansche

Die beiden großen Apparateflansche (DN 2300) dienen der Zugänglichkeit und zur Installation von Instrumentierung, bzw. Einbauten in den Behälter. Um eine optimale Instrumentierung und Zugänglichkeit zu gewährleisten, wurde der Behälter sowohl im Deckel als auch entlang der Zylinderfläche mit insgesamt 17 Blockflanschen ausgestattet. Diese großen Flansche dienen vor allem dem Anschluss der Instrumentierung bestehend u. a. aus Drucksensoren, Thermoelementen, Feuchtemesstechnik und Probenahmeleitungen. Zusätzlich sind am Behälter 28 kleinere Stutzen verbaut zum:

- Einspeisen und Abziehen von Fluiden, z. B. Dampf oder Luft, und evtl. zum Anschließen eine Sprühwasserleitung sowie notwendiger Abblase- und Entwässerungsleitungen,
- Anbau druckdichter Durchführungen von Probenahmeleitungen, z. B. für Aerosol und Iodmessungen, und von Leistungs- und Messkabeln,
- Anschließen von Hilfsaggregaten, z. B. elektrischer Heizer,
- Anschließen von Wärmetauschern bzw. passiven Sicherheitssystemen, die im Pool und innerhalb des NU-eX-Behälters installiert werden.

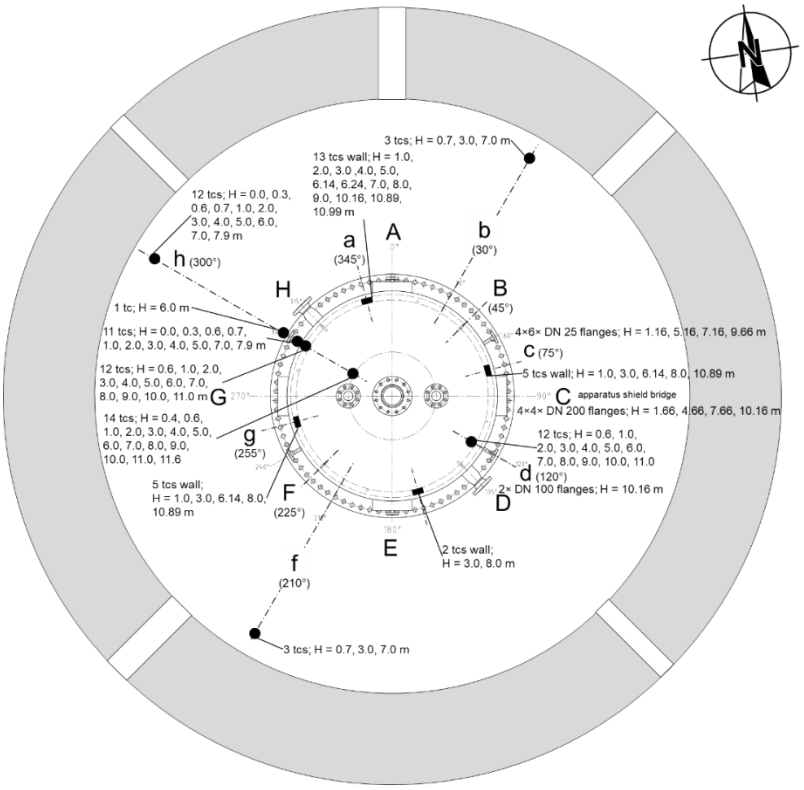

Bild II-11: Ausrichtung des Behälters im Pool

II.4.3.5 Spezifischer Behältersumpf und Kondesatsammlung

Während eines Kühlmittelversluststörfalls oder -unfalls kommt es in Sicherheitsbehältern stets zum Kondensatanfall an den Containmentwänden und Strukturen. Diese werden in Sicherheitsbehältern großer Druckwasserreaktoren mittels Drainageleitungen und freiem Überströmen in den Gebäudesumpf geleitet. Aufgrund des tiefliegenden Reaktordruckbehälters (RDB) und den massiven Betonstrukturen rings um den RDB ist die freie Sumpfoberfläche oftmals wesentlich geringer als der horizontale Containmentquerschnitt. Aus diesem Grund und den zugrundeliegenden Skalierungsüberlegungen wurde damals für den THAI-Behälter ein reduziertes Sumpfvolumen ausgeführt.

Für kleinere SMR-Containments wird das Kondensat, bzw. das freigesetzte Wasser in der unteren Kalotte des Sicherheitsbehälters gesammelt, eine notwendige Reduktion der Sumpfoberfläche im Vergleich zum Containmentquerschnitt ist nicht gefordert, sondern hängt von der jeweiligen Geometrie der SMR-Anlage an. Um die Forderung eines generischen SMR-Containments zu erfüllen, wurde der Sumpfraum des NU-eX-Behälter als Korbbogen ausgeführt.

Im Gegensatz zum THAI- und PAD-Behälter wurden im NU-eX-Behälter keine umlaufenden Rinnen zum Auffang des lokalen Wandkondensats installiert, da diese regelmäßig auch für den THAI-Behälter demontiert werden mussten um ein freies Ablaufen des Kondensats, z. B. bei Aerosolabwaschversuchen zu ermöglichen. Für den NU-eX-Behälter besteht aufgrund der ausbaubaren oberen Behälterhälfte eine einfache Variationsmöglichkeit, das Kondensat mit unterschiedlichen Behälterhöhen zu messen und Daten bereitzustellen.

II.4.3.6 Hydraulikaggregat für den NU-eX Flanschverschluss

Um die Druckfestigkeit bei 64 bar sicherzustellen, ist der Einsatz und damit die Herstellung maßgefertigter Bolzen unumgänglich, welche ihrerseits erhebliche Anzugsmomente besitzen. Hierzu wurde eine speziell konfektionierte Apparatur beschafft, die mittels Hydraulikzylindern die Schrauben auf das vorgeschriebene Drehmoment anziehen kann. Dieses Werkzeug wird nicht manuell bedienbar sein, sondern mithilfe des in der Versuchshalle installierten Krans von einem Bolzen zum nächsten transportiert werden. Diese Anpassungen gewährleisten nicht nur die Einhaltung der geforderten Druckfestigkeit, sondern ermöglichen auch eine effiziente und sichere Handhabung der Montageprozesse.

Das Aggregat besteht aus einer Fernsteuereinheit (Hydraulikaggregat Typ LHU-30 Solution), in der das Drehmoment und der Drehwinkel vorab programmiert werden und dann zwischen manuellem und automatischen Schraubvorgang gewechselt werden kann. Aufgrund der Dokumentationspflichten beim Umgang mit Hochdruckbehältern wurde das Modul mit einer automatischen Dokumentationseinheit ausgerüstet, welche eine softwaregesteuerte Sollwertdefinition für das Drehmoment und eine Dokumentation der einzelnen angezogenen Bolzen ermöglicht. Für die Apparateflaschen und Instrumentierungsflansche wurden die geforderten Drehmomente als Standardfall hinterlegt und programmiert. Damit kann sichergestellt werden, dass diese Flansche stets mit ausreichender Sicherheit befestigt wurden. Für den NU-eX-Behälter wurden der Schlüsselsatz Kassettenschrauber Typ LDK-6 mit einem Drehmomentbereich bis 6200 Nm und die Wechselkassette WK6 - 80 und 3 1/8" beschafft.

II.4.3.7 Dachfenster

Der Umbau des NU-eX-Behälters in eine Anlage mit reduzierter Höhe durch den Abbau des oberen Behälterteils erwies sich in der Umsetzung innerhalb des Gebäudes als unwirtschaftlich. Zwei Gründe waren dafür entscheidend, erstens der benötigte Platzbedarf, der neben der Ablage des Behälterdeckels auch die Ablage des oberen Behälterteils benötigt hätte und eine signifikante Gebäudeerweiterung nach sich gezogen hätte. Zweitens hätte die Leistungsfähigkeit des Hallenkrans um mindestens einen Faktor von 1,5 gesteigert werden müssen, was unweigerlich einen deutlichen Mehrbedarf bei der statischen Gebäudeplanung bedeutet hätte.

Um die Funktionalität einer modularen Anlage in der geplanten Weise zu ermöglichen, erwies es sich als notwendig und wesentlich wirtschaftlicher den Behälteroberteil mittels eines mobilen Autokrans aus dem Gebäude auszuheben und abzusetzen. Dies wird durch ein Oberlicht im Dach ermöglicht, welches zentral über dem Standplatz des NU-eX-Behälters platziert ist. Das Oberlicht ist entsprechend einfach demontierbar und erlaubt den Aushub des Behälters und dessen Zwischenlagerung westlich des THAI-Gebäudes. Die entsprechenden Oberlichter wurde von der Fachfirma Willy Löw AG hergestellt.

II.4.4 Infrastruktur-Erweiterung der neuen Versuchsanlage

II.4.4.1 Elektroanschluss und Elektroinstallation

Die elektrische Versorgung (Arno Metzler GmbH & Co.KG) der NU-eX-Erweiterung erforderte den Aufbau und die Installation großer Versorgungsschaltschränke sowie zugehöriger Unterverteiler zum Anschluss der zugehörigen Peripherie-Geräte (Dampferzeuger, Messtechnik, Lüftungsanlage, etc.).

Die Anschlussleistung der Stromversorgung für die THAI-Anlage beträgt nach der Erweiterung ca. 600 kVA, größter Einzelverbraucher ist der neue elektrische Dampferzeuger mit 500 kW. Zusätzlich bleibt der kleine Dampfkessel mit einer Anschlussleistung von 108 kW bestehen.

Für die Halle sind zahlreiche Unterverteiler für 3-Phasenwechselstrom (32 A und 16 A) sowie für 1-Phasenwechselstrom beschafft worden, um lokale und transportable Messtechnik zu versorgen, bzw. auch individuelle Einspeisesysteme (z. B. für Iod und Aerosole) zu versorgen (Alexander Bürkle GmbH & Co. KG). Die Datenerfassungsschränke wurden im Rahmen des Umzugs und der Erweiterung der THAI-Versuchsanlage um lokale USV-Einheiten erweitert, die speziell für die 12V/24V Spannungsversorgung ausgelegt sind (USV = Unterbrechungsfreie Strom-Versorgung). Die Rechner zur Aufzeichnung der Versuchsdaten und zur Steuerung der Anlagentechnik sind ebenfalls mit einer lokalen USV ausgerüstet. Sämtliche Anlagen sind mit geforderten Sicherheitssystemen und FI-Schalter abgesichert.

Zum Potentialausgleich wurden im Keller und im Pool des Gebäudes Erdungsfahnen installiert, so dass nicht nur der Hauptschaltschrank dort angeschlossen werden kann, sondern auch lokal eine Schutzerdung für die Versuchsbehälter und weitere wichtige Bauteile sowie Infrastruktur generiert werden kann. Die Netzwerkverkabelung zum Anschluss der Datenerfassung im neuen Gebäude an die bestehende, aus Eschborn überführte, THAI-Infrastruktur wurde bereits beschafft befindet sich zzt. noch im Aufbau (Alexander Bürkle GmbH & Co. KG).

II.4.4.2 Lüftung und Klimatisierung

Für den Betrieb der NU-eX-Erweiterung war die Installation einer Lüftungs- und Heizungsanlage notwendig, die über eine reine Gebäudeheizung und Klimatisierung hinausreicht. Vor allem der tiefe Poolkörper bedarf einer ausreichenden Belüftung, die für ein zulässiges Arbeiten auch ausreichend Wärme bereitstellt. Die Detailplanung wurde im Vorhaben umgesetzt und entsprechend abgeschlossen, bevor die eigentliche Installation der Anlagen ausgeführt werden konnte (Ingenieurbüro Garczarek GmbH).

II.4.4.3 Heizungsanlage

Die Heizlastberechnung erfolgte auf Basis der DIN EN 12831-1 bzw. DIN/TS 12831-1. Die Berechnung ergab eine Heizlast von 55 kW unter Berücksichtigung der Lüftungswärmeverluste. Hinzu kommt der Wärmebedarf für die Erwärmung der Außenluft der Lüftungsgeräte. Für die Versorgung der THAI-Versuchsanlage und für die Heizung des Pools wird eine Wärmepumpe mit ca. 80 kW Heizleistung benötigt. Die Größe der Wärmepumpe ergibt sich durch die ermittelte Heizlast. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde im Außenbereich südlich des THAI-Gebäudes aufgestellt.

Die Wärmepumpe versorgt das Lüftungsgerät für die Anlagenräume (Heizregister: 60 kW), das Lüftungsgerät für die Betriebsräume (Heizregister 11 kW) und die statischen Heizkörper (6 kW Heizlast). Die Wärmepumpe wird an einen Heizkreisverteiler (Kellergeschoss) angeschlossen mit den drei Verteilern für die beiden Lüftungsanlagen und die Heizkörper. Um einen Frostschutz zu gewährleisten sind im Außenbereich Rohrbegleitheizungen montiert. Die Anbindungsleitungen zw. Wärmepumpe und Verteiler verlaufen weitestgehend im Erdreich oder im Gebäude. Im Technikraum ist ein 1,5 m^3 großer Pufferspeicher aufgestellt. Der Puffer überbrückt die notwendigen Auftauphasen im Winterbetrieb und reduziert die Taktraten in der Übergangszeit. Aufgrund der niedrigen Vorlauf-/Rücklauftemperaturen mussten ausreichend große Vertikalheizkörper montiert werden. Das Rohrnetz wird aus Edelstahl hergestellt und kann dadurch auch für eine eventuelle Kühlung verwendet werden.

II.4.4.4 Lüftung

Die Auslegung der Lüftung für die Versuchshalle und die Laborräume erfolgte auf Basis der DIN 25425-1 (Stand 05.2021) und der DGUV-Information 213-850 (Stand 2021). Für die Dusche und den Umkleideraum erfolgt die Auslegung auf Basis der Richtlinie für Arbeitsstätten, ASR A 4.1. Für die Schleusen wurde ein 2-facher Luftwechsel angenommen. Die Auslegung der Volumenströme für die Lüftungsanlage ist in Tabelle II-2 dargestellt. In allen Räumen, außer der Dusche und der Umkleide ist der Abluft-Volumenstrom höher als der Zuluft-Volumenstrom, so dass sich ein Unterdruck im Betrieb einstellt. Und eine mögliche Kontamination von Iod in der Anlage zurückgehalten wird.

Die Lüftungs- und Heizungsanlage wurde viergeteilt ausgeführt. Das größte Lüftungsaggregat (RLT 1) ist außerhalb des Gebäudes aufgestellt und versorgt die Anlagenräume der erweiterten THAI-Versuchsanlage mit einem Gesamt-Volumenstrom von 5930 m^3/h im Normalbetrieb (Stufe 1) und von 10430 m3/h im Maximalbetrieb. Der entsprechende Luftwechsel beträgt ca. 3,25 pro Stunde. Für einen ausreichend hohen Luftwechsel in den Betriebsräumen (Schleusen, Warte, und Labore) wurde ein zweites, wesentlich kompakteres Lüftungsgerät im Keller der Anlage installiert (RLT 2) mit einem Volumenstrom von 1445 m^3/h. Die Kanäle für Zu- und Abluft wurden in der Halle an der Südseite montiert und teilweise in der Halle entlang der Wand zu den Nebenräumen verlegt. Die Heizung der Betriebsräume geschieht entweder direkt über das Lüftungsgerät oder über Heizkörper, in Abhängigkeit von Beschaffenheit der Räumlichkeiten und der geforderten Raumtemperatur (z. B. Laborarbeitsbereich). Die Luftverteilung erfolgt über 2 getrennte Kanalnetze (RLT 1 / RLT 2). Für die RLT 1 wurden Rechteckkanäle (Hauptkanal ca. 700 x 800 m) in der Versuchshalle montiert. Die Zuluft wird über Weitwurfdüsen eingebracht. Dadurch erfolgt eine Durchströmung der Halle.

Für den Pool selbst wird ein weitgehend mobiles Umwälzlüftungsgerät installiert. Dies erlaubt es, den NU-eX-Pool in voller Teufe mit ausreichend Frischluft zu versorgen. Im eigentlichen Versuchsbetrieb, wenn der Pool mit Wasser gefüllt ist, kann die Belüftung einfach rückgebaut werden, um eine Verkeimung und eine Korrosion unter Wasser zu vermeiden. Die Arbeiten zur Lüftung und Heizung wurden von der Fachfirma TGA Rhein-Main GmbH ausgeführt.

Tabelle II-2: Auslegung der Volumenströme für die Lüftungsanlage

Etage	Bezeichnung	Fläche m^2	Raumvolumen m^3	Kontrollbereich DIN 25425-1, 25 m^3(h m^2)	Sozialräume ASR A 4.1 11 m^3(h m^2)	Nebenräume 2x-LW
UG	Versuchshalle	220	3200	5500		
UG	Schleuse	18	56			112
EG	Probenlabor	11	32	275		
EG	Materialschleuse	11	32			64
EG	Labor	11	32	275		
EG	Schleuse	3	10			20
1. OG	Messkabine	29	89	725		
1. OG	Dusche	3	9		33	
1. OG	Schleuse	15	45			90
1. OG	Umkleide	11	33		121	
2. OG	Notschleuse	11	57			114

II.4.4.5 Hallenkran

Im 2. Obergeschoß des THAI-Gebäudes wurde ein 10-t-Laufkran (Doppel-Kranbrücke mit Laufkatze) installiert, Bild II-12. Mit diesem Kran werden sowohl Arbeiten an der THAI-Versuchsanlage und der NU-eX-Erweiterung bis hinunter auf den Boden des Pools durchgeführt. Der Hallenkran wurde ausgelegt, um die maximale Befahrbarkeit im Anlagenraum zu gewährleisten. Die Gebäudestatik berücksichtigt die Traglast des Krans von 10 t. Die Wartung und regelmäßige Schulung des Bedienpersonals zum korrekten Umgang mit dem Kran ist vorgesehen. Dies betrifft alle Aspekte der sicheren Bedienung, insbesondere der Einhaltung von Arbeitssicherheitsmaßnahmen. Für Lasten > 100 kN besteht die Möglichkeit, bei geöffneten Hallen-Oberlichtern einen Autokran zu stellen und zu verwenden.

Mit dem Hallenkran kann folgendes sichergestellt werden:

- alle drei Behälterdeckel abnehmen und aufsetzen,
- die Behältereinbauten in den TTV, PAD und NU-eX einsetzen bzw. herausnehmen,
- vertikale Transporte in den Behältern durchführen,
- schwere Komponenten in das 2. OG transportieren und montieren,
- durch den Schacht neben der Hallentreppe Güter von einem Stockwerk in ein anderes heben (ins UG nach Abnehmen der Abdeckbleche im EG-Boden), sowie
- Lasten von einem Flurförderfahrzeug im EG heben.

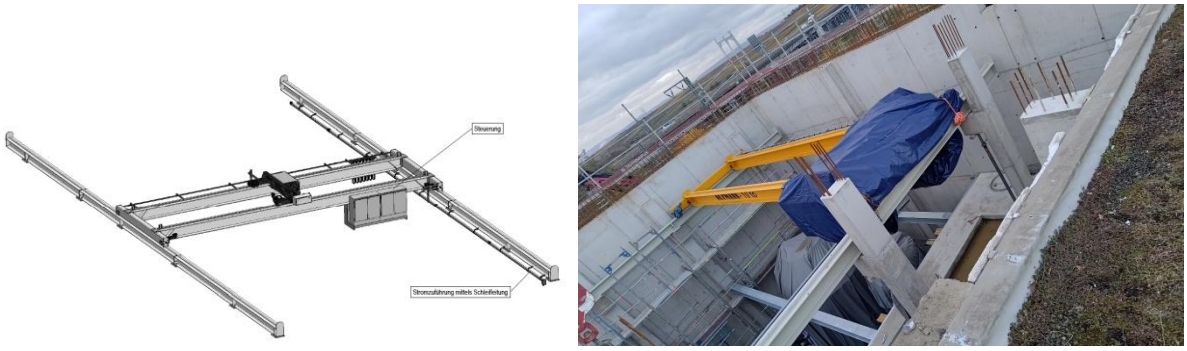

Bild II-12: Plan (links) und Installation (rechts) des 10 t Hallenkrans

Technische Daten des Laufkrans in der neuen THAI-Anlage:

- Tragkraft: 100 kN
- Höchste Kranhakenstellung: +10,26 m Hebepunkt obere Endlage über EG
- Tiefste Kranhakenstellung: −9,54 m Hebepunkt untere Endlage unterhalb EG
- Kranhakenweg (Hubhöhe): 19,80 m

- Länge der Kranbahn: 19,962 m
- Spurweite der Kranbahn: 10,425 m

II.4.5 Medienversorgung

Im Vergleich zum vorherigen Standort der THAI-Anlage in Eschborn musste die Medienversorgung der THAI-Anlage für den Versuchsbetrieb des NU-eX-Pools und des NU-eX-Behälters signifikant erweitert werden. Bei der Medienversorgung der Versuchsbehälter ist zwischen der festinstallierten und jederzeit vorhandenen Infrastruktur und versuchsspezifischen wechselnden Aufbauten zu unterscheiden. Zur permanenten Medienversorgung zählen: Trinkwasser, Abwasserentsorgung, Dampferzeugung, Druckluftbereitstellung.

Die bestehende THAI-Infrastruktur wurde durch einen leistungsfähigen Elektrodampfkessel erweitert, da der bestehende Dampfkessel in seiner Leistung bei weitem zu gering ist, um den neuen Behälter ausreichend mit Dampf versorgen zu können. Der neue zusätzliche Elektrodampfkessel verfügt über eine elektrische Leistung von 0,5 MW und wurde im 2. OG des Neubaus installiert. Diese Erweiterung ermöglicht die Nutzung des leistungsfähigen Dampfkessels nicht nur für den neuen NU-eX-Behälter, sondern auch für die bestehende THAI-Versuchsanlage. Gleichzeitig bleibt die Dampfregelstation im Keller der THAI-Versuchsanlage in Betrieb. Standardbauteile und -Anschlüsse zur Dampf- und Druckluftеinspeisung sind zu den Behältern verlegt und dort angeschlossen.

II.4.5.1 Dampfbedarf

Der bestehende für die THAI-Anlage installierte Dampferzeuger ist mit seiner Leistung von 108 kW bei 8 bar ü zu gering dimensioniert und musste sowohl hinsichtlich seines Massendurchsatzes auch hinsichtlich seines Betriebsdrucks erweitert werden. Dampf wird für unterschiedliche Zwecke für die Erweiterung der THAI-Anlage benötigt, um:

- den NU-eX-Behälter aufzuheizen und den geforderten Behälterdruck zu erzeugen,
- den spezifizierten Dampfgehalt (bzw. die Sättigungstemperatur) im NU-eX-Behälter einzustellen und aufrechtzuerhalten, auch bei gleichzeitiger Wärmeabfuhr über die Behälterwand, z. B. an den NU-eX-Pool,
- die Wassertemperatur des NU-eX-Pools zu konditionieren.

Der Betriebsdruck des neuen Dampferzeugers soll zwar unter dem Auslegungsdruck des neuen NU-eX-Behälters liegen, aber auch ausreichend hoch sein um ausreichend weit über dem Arbeitsdruck (ca. 5 bar abs.) der älteren THAI-Behälter TTV und PAD liegen. Vor allem die Wärmezufuhr in den NU-eX-Behälter erfolgt im Gegensatz zum TTV und PAD nahezu alleinig über Dampfeinspeisung aus dem neuen Dampferzeuger, da für den neuen Behälter weder Thermoölmäntel noch elektrische Heizmanschetten installiert wurden, weil diese Elemente die Wärmeabfuhr an die Umgebungsluft, bzw. die Wasservorlage des Pools stören würden.

Aufgrund der positiven Erfahrung mit dem bestehenden THAI-Dampferzeuger wurde wieder auf einen elektrisch beheizten Dampferzeuger zurückgegriffen. Im Vergleich zu dem vorhandenen 108 kW Dampferzeuger wurde allerdings eine stufenlose Regelung der Dampfleistung vorgesehen, da diese eine wesentlich höhere Flexibilität im Anlagenbetrieb erlaubt. Eine Dampfbereitstellung mittels öl- oder gasbefeuertem Dampfkessel wurde auch unter Berücksichtigung des Platz- und Wartungsbedarfs im Vorfeld ausgeschlossen. Der Dampferzeuger muss ohne ständige Aufsicht als selbständige Komponente der Versuchsanlage betrieben werden. Einschlägige Vorschriften verlangen dafür eine entsprechende regeltechnische Ausrüstung des Dampferzeugers.

Für den voraussichtlichen Betrieb der erweiterten THAI-Anlage wurden zwei spezifische Szenarien für die Auslegung des notwendigen Dampfmassenstroms herangezogen. Eine Aufheizung des NU-eX-Behälters in einer ausreichend kurzen Dauer muss sichergestellt werden, um die Versuchsbedingungen zu erreichen und die Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion im stabilen Anlagenbetrieb überwinden zu können.

- Stahlmasse des Versuchsbehälters: 45000 kg
- Kondensationsenthalpie: 2200 kJ/kg
- Spezifische Wärmekapazität: 0,5 kJ/(kg K),
- Aufheizen von 20 °C auf 200 °C
- Während einer Dauer von T = 6 h = 21600 s.
- Erforderliche Wärmemenge: $Q_{Heiz} = m \cdot c_p \cdot \Delta t = 45000 \cdot 0{,}5 \cdot 180 = 4{,}1 \cdot 10^6$ kJ
- Erforderliche Heizleistung: $N_{Heiz} = Q / T = 4{,}1 \cdot 10^6$ kJ /21600 s = 188 kW
- Entsprechender Dampfmassenstrom: $\dot{m}$ = 188 kW / (2200 kJ/kg) = 307,6 kg/h

Für den Betrieb in Naturkonvektion muss der Wärmeverlust über die Wand, bzw. der beabsichtigte Abtransport der Wärme über die Außenoberfläche des NU-eX-Behälters berücksichtigt werden. Der Wärmeübergangskoeffizient α kann über die Nusseltzahl Nu berechnet werden. Für Rayleigh-Zahlen kleiner 10^{12} ist die modifizierte Churchill-Chu-Korrelation anwendbar und validiert um die Nusselt-Zahl sowie den Wärmeübergangskoeffizient α mit den folgenden Gleichungen zu berechnen, in welcher λ die thermische Leitfähigkeit ist [Jan00]:

$$Nu = \left[0{,}825 + \frac{0{,}387\, Ra^{1/6}}{\left(1+\left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}}\right]^2 \quad \text{mit } \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

Mit einer Länge von 12 m und einer Prandtl-Zahl von 0,72 (Luft) und den Stoffwerten bei einer mittleren Temperatur von 100 °C kann Ra ~ $1{,}13 \cdot 10^{13}$ abgeschätzt werden. Dies entspräche einer Nusselt-Zahl von ca. 2500 nach der modifizierten Berechnungsvorschrift von Churchill-Chu. Unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit von Luft (0,0314 W/(m K)) kann der Wärmeübergangskoeffizient für den NU-eX-Behälter zu 6,53 W/(m² K) berechnet werden.

Aus einer Vielzahl von THAI-Versuchen konnte als Wärmeübergangskoeffizient für den TTV und PAD ein Bereich zwischen 5,7 und 6,6. W/(m² K) eingegrenzt werden. Mit dem aktuellen Berechnungsbeispiel wird dieser Wert mit ca. 6,5 W/(m² K) für den NU-eX-Behälter bestätigt: Mit einer Oberfläche von 87 m² würde sich folglich ein Wärmeverlust an die Raumluft von 102 kW ergeben.

$$N_{verlust} = \alpha\,(A\,\Delta T) = 6{,}5\ \mathrm{W/(m^2K)} \cdot 87\ m^2 \cdot 180\ K = 102\ kW$$

Um eine ausreichende Sicherheit bereitzustellen, wurde die Leistung des Dampfkessels folgendermaßen ausgelegt:

$$N_{Bedarf} = N_{Heiz} + 2 \cdot N_{verlust} > 392\ kW$$

Das verfügbare Aggregat in dieser Leistungsklasse besitzt eine Anschlussleistung von 500 kW.

II.4.5.2 Ausführung des neuen großen Elektrodampferzeugers

Der Elektrodampfkessel ELSB, Bild II-13, zeichnet sich vor allem durch seine hohe Dynamik, die vor allem durch die vier einzelnen Thyristorstufen erreicht wird:

Dampfkessel:	Elektrodampfkessel ELSB (Fa. BOSCH) (Bild 2-13)
elektrische Heizleistung:	460 kW
Dampfleistung:	700 kg/h, bei 20 °C Speisewassertemperatur
Betriebsvolumen	1190 L
Betriebsüberdruck:	20 bar

Die regeltechnische und Sicherheits-Ausrüstung nach TRD 604/24 h erlaubt den Betrieb der Kesselanlage ohne ständige Beaufsichtigung. Die Abnahme erfolgte im Werk gemäß europäischer Druckgeräterichtlinie DGRL (2014/68/EU). Die Lastregelung des elektrisch betriebenen Kessels ist so voreingestellt, dass der Lastbereich von 0 bis 100 % in minimal 60 Sekunden ab- bzw. hochgefahren werden kann. Unabhängig davon, kann es zu sicherheitsgerichteten Abschaltungen durch Ansprechen der Sicherheitskette des Kessels (oder im Leistungsschrank) kommen.

Bild II-13: Dampferzeuger der NU-eX-Erweiterung

Nebenaggregate zum Dampferzeuger bestehen unter anderem aus:

- Schwingungsdämpfer für ELSB
- Speisewasserbehälter FT mit Vollentgasung (Rieselentgaser)
- Speisewasserversorgung Dampfkessel
- Speisepumpe und Druckerhöhungspumpe
- Speisewasserregelmodul – RM
- Schwingungsdämpfer für Wasserservicemodul
- Wasserservicemodul WSM-V
- Ablasswasser-, Entspannungs- und Kühlungsmodul BEM
- Schwingungsdämpfer für Ablasswasser-, Entspannungs- und Kühlungsmodul BEM
- Elektrische Versorgung und Steuer-/Regelmodul

II.4.5.3 Regelstation für die Dampf- und Lufteinspeisung

Die Einspeisung von Dampf und Luft in den Versuchsbehälter erfolgt vorzugsweise über den Behälterdeckel (Stutzen A oder C), da diese in allen Konfigurationen vorhanden sein wird, unabhängig, ob Versuche mit voller Behälterhöhe oder Versuche mit halbierter Behälterhöhe gefahren werden. Folgende Einspeiseszenarien sollen je nach Versuchsszenario aufgeführt werden:

- Impulsfreie Einspeisungen (zur Minderung des unweigerlichen Gasimpulses haben sich Prallbleche vor der Düse bewehrt und sind in großer Anzahl in THAI vorhanden)
- Impulsbehaftete Einspeisung: Die Versorgung über den Deckel generiert automatisch eine abwärtsgerichtete Einspeisung, zum Umlenken der Impulsrichtung stehen Rohrböden und Düsen in der THAI-Anlage zur Verfügung. Die beiden DN-100 Stutzen an der seitlichen Behälterwand auf einer Höhe von $H_{NU\text{-}eX}$ = 10,160 m erlauben auch einen einfachen und schnellen Umbau auf eine radiale Einspeisung in den NU-eX-Behälter ohne aufwändige weitere Maßnahmen.

Die einzuspeisende Dampfmenge kann sich während eines Versuchs verändern. Um sie jeweils mit ausreichender Genauigkeit zu messen, wird der Durchfluss mit 1 oder 2 Durchflussmessern bestimmt,

jeweils für Sattdampfbedingungen $P_ü$ = 20 bar; 212 °C. Der Messbereich wurde folgendermaßen aufgeteilt:

"großer" Messbereich: 70 – 700 kg/h ≡ 19,4 – 194,4 g/s
"kleiner" Messbereich: 15 – 150 kg/h ≡ 4,2 – 41,7 g/s

Jedem Durchflussmesser ist ein passendes Ventil zum Einstellen des gewünschten Dampfmassenstroms zugeschaltet. Um auch die Möglichkeit abzudecken, dem Versuchsbehälter gleichzeitig an unterschiedlichen Einspeisestellen Dampf zuzuführen, kann auch Dampf aus der vorhandenen THAI-Einspeiseleitung genommen werden. Die Regelstation für TTV und PAD befindet sich im KG, die Regelstation für den NU-eX-Behälter im EG.

II.4.5.4 Druckluftversorgung und Einspeisung

Neben der Dampfverteilung und Dampfeinspeisung stehen auch der bewährte Druckluftkompressor zur Verfügung, der bereits in Eschborn verwendet wurde, um Druckluft in die THAI-Versuchsbehälter einzuspeisen. Der Kompressor ist mit einem Vorfilter, Nachfilter, Kältetrockner und Ölabscheider ausgestattet. Zwei Durchflussmesser für Druckluft ($P_ü$ = 7 bar) decken einen Messbereich von 2,5 – 25 kg/h ≡ 0,7 – 7 g/s, bzw. von 18 – 180 kg/h ≡ 5 – 50 g/s ab. Der Kompressor (ölfrei, weitgehend entfeuchtet durch den Kältetrockner) liefert den entsprechenden Massenstrom zuverlässig und dauerhaft. Zwei Motorstellventile hinter den Durchflussmessern erlauben ein Zuspeisen von Luft in die Versuchsbehälter, um die geforderten Luftpartialdrücke einzustellen.

II.4.6 Messtechnik

Der neue Druckbehälter ist analog zu der bestehenden THAI-Versuchsanlage mit einer permanenten Instrumentierung aus Thermoelementen und Druckaufnehmern (KELLER Druckmesstechnik AG) ausgestattet. Zur erweiterten Standardinstrumentierung gehören sämtliche Temperatursensoren und Durchflussmesser in der Medienversorgung der Versuchsanlage (Gase, Wasser, etc.) sowie weitere Instrumentierung zur Erfassung der Heizleistung. Diese Instrumentierung ist mit neuen Datenerfassungsschränken verbunden, die ihrerseits mit der Messwarte verknüpft sind und von dort aus überwacht und gesteuert werden. Diese Standardinstrumentierung gewährleistet eine kontinuierliche Überwachung und Erfassung der relevanten Parameter während der Versuche.

II.4.6.1 Temperaturmessung

Die thermohydraulischen Bedingungen und transienten Vorgänge im NU-eX-Pool und im NU-eX-Behälter müssen sehr genau erfasst werden, da bereits kleine Temperaturunterschiede Naturkonvektionsströmungen erzeugen, bzw. solche dämpfen können. Auch für die experimentellen Untersuchungen von passiven Sicherheitssystemen ist dies von entscheidender Bedeutung, da diese ihr Ansprechverhalten schon bei sehr kleinen Temperaturänderungen verändern können. Durch die Erfahrungen aus dem Betrieb der THAI-Anlage können diese Temperaturdifferenzen zuverlässig mittels kalibrierter Thermoelemente erfasst werden.

Es wurden 100 Mantelthermoelemente der Fa. ThermoExpert mit einem Inconel-Mantel (Inconel Alloy 600; besonders korrosionsbeständig) von 1,5 mm Außendurchmesser und mit isolierter Meßspitze beschafft. Das Thermoelementmaterial ist Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium (= Ni-CrNi = Chromel-Alumel = Typ K). Diese hohe Anzahl ist vor allem deshalb notwendig, da sowohl der NU-eX-Pool, die Innen- und Außenwand, als auch der Gasraum des NU-eX-Behälters ausreichend dicht instrumentiert werden müssen, siehe Bild II-14. Es ist davon auszugehen, dass im Laufe des Anlagenbetriebs wesentlich mehr Temperatursensoren beschafft werden müssen. Die bereits verbauten Thermoelemente sind als permanente Instrumentierung verbaut, das bedeutet, dass ihre Position festgelegt ist und für jeden Versuch an identischer Stelle sein wird. Dadurch werden Daten aus sehr unterschiedlichen Versuchsszenarien ein vergleichbares Bild ergeben und die Datenauswertung und die Interpretation der Versuche erleichtern.

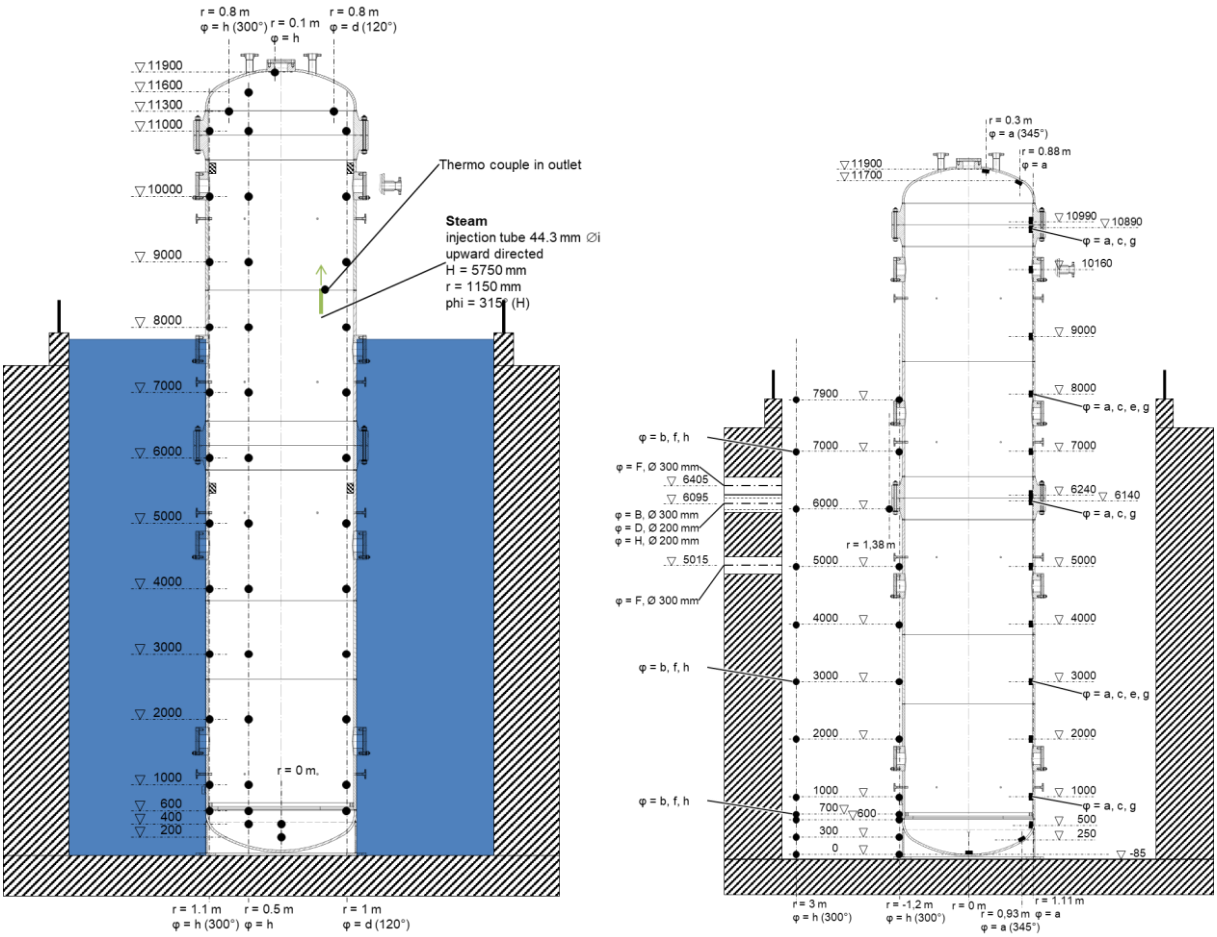

Bild II-14: Standardinstrumentierung der NU-eX-Anlage mit Thermoelementen in den Fluiden (schwarze Punkte) und der Behälterwand (schwarze Rechtecke)

II.4.6.2 PIV Uboot

Bei der Durchführung der Test-Serien „SMR-1-12“ im Vorhaben THAI VII-a (1501630) wurde erstmals die passive Wärmeabfuhr eines in Wasser eingetauchten Sicherheitsbehälters untersucht. In vielen SMR-Designs bildet die Wasservorlage, die finale Wärmesenke für die Nachzerfallswärme des Reaktors. Der Wärmeübergang des Reaktors an die Containment-Wand (Kondensation) sowie der Wärmeübergang von der Containment-Wand an die Wasservorlage (einphasige Naturkonvektion) sind dabei die dominierenden Phänomene, wenn es um das Verständnis und die Validierung der zugehörigen Korrelationen und Sicherheitssysteme geht. Ziel der Versuchsserien war daher die experimentelle Charakterisierung des Wärmeübergangs bei freier Konvektion an einer vertikal ausgerichteten Oberfläche zur experimentellen Absicherung verfügbarer Nusselt-Zahl-Korrelationen für $10^{10} < Ra < 5*10^{14}$.

Dies wurde durch die Verwendung des PAD-Behälters als Wasserpool erreicht, in dem ein Containment-Simulator (CS) installiert wurde. Der CS erstreckte sich über eine Höhe von 9 m und hatte die Form eines abgerundeten Edelstahl-Rechteckprofils. Als zentrales Messinstrument hat sich in dieser Versuchsserie die Verwendung der Particle Image Velocimetry (PIV) herausgestellt, die eine instantane, nicht intrusive Messung eines planaren, 2-dimensionalen Geschwindigkeitsfeldes ermöglicht. Dabei wurden sowohl die Kamera als auch der Laser außerhalb des PAD-Behälters positioniert und über mit Glasscheiben ausgestattete Flansche auf fünf verschiedenen Höhen (2,1 m, 3,5 m, 4,9 m, 6,3 m und 7,7 m) auf der Oberfläche des CS fokussiert.

Dank der Erweiterung der THAI-Versuchsanlage um den neuen NU-eX-Behälter (SMR-Containment) sowie den mit Wasser befüllbaren NU-eX-Pool (Wasserpool) haben sich in diesem Bereich neue Möglichkeiten aber auch Herausforderungen ergeben. Zu den Möglichkeiten zählt unter anderem, dass die Versuche zum Wärmeübergang zwischen NU-eX-Wand und Wasserpool nun wesentlich detaillierter

und in einem technischen Maßstab durchgeführt werden können. Die Herausforderung hierbei ist, dass der NU-eX-Pool nun keine mit Glasscheiben versehenen Flansche (so wie der PAD-Behälter) aufweist. Das PIV-System (zumindest Laser und Kamera) müssen daher direkt im Wasserpool positioniert werden, um das 2-dimensionale Geschwindigkeitsfeld im Bereich der NU-eX-Behälterwand visualisieren und aufzeichnen zu können.

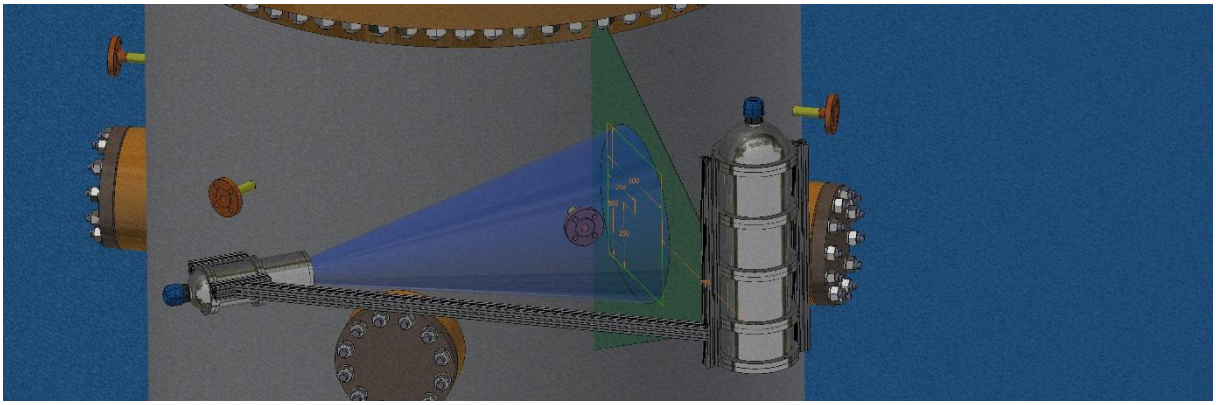

Bild II-15: 3D-CAD-Modell der beiden Pods in der Nähe des NU-eX-Behälters. Isometrische Ansicht

Da es für solche Anwendungen mit sehr tiefen Wasservorlagen keine kommerziellen PIV-Systeme gibt, wurde in enger Zusammenarbeit mit der Fa. ILA_5150 GmbH ein neuartiges Unterwasser-PIV-System entwickelt. Das neu entwickelte System besteht im Wesentlichen aus zwei wasserdichten Gehäusen (Pods), die über ein Gestell in Ihrer Position fixiert sind. Der Kamera-Pod ist dabei horizontal ausgerichtet und besitzt eine Glasscheibe, positioniert in Richtung des Laser-Pods. Der Laser-Pod ist vertikal ausgerichtet und besitzt ebenfalls eine Glasscheibe für den Laserstrahl, positioniert an der seitlichen Mantelfläche des Pods. Die Leitungen der beiden Geräte sind in einem flexiblen Schlauch druck- und wasserdicht aus den beiden Pods herausgeführt. Zusätzlich verfügt der Schlauch über einen Druckluft-Anschluss, um die beiden Pods bei Bedarf kühlen zu können. Am Gestell selbst sind 4 Schlitten einer schmiermittelfreien Linearführung befestigt. Die Laufschienen dieser Linearführung sind an der Innenwand des NU-eX-Pools befestigt. Damit ist es möglich, die beiden Pods an deren Gestell über die gesamte Höhe des NU-eX-Behälters stufenlos zu verfahren. Dank des modularen Aufbaus der Pods können diese in Zukunft auch einfach angepasst werden, z. B. um andere Kameras, Objektive, Laser-Köpfe oder Laser-Optiken zu verwenden. Somit können auch Experimente und Messungen der Geschwindigkeitsfelder an weiteren Stellen als der NU-eX-Außenwand realisiert werden, z. B. im Bereich der Behälter-Flanschverbindung.

II.4.6.3 Datenerfassung

Die Datenerfassung und Anlagensteuerung der NU-eX-Erweiterung basiert auf dem gleichen Konzept wie die ursprüngliche THAI-Versuchsanlage selbst, bestehend aus Datenerfassungs-Software (Delphin Profisignal, Delphin Technology AG) und zugehörigen Hardwaremodulen. Die Datenerfassung und Anlagensteuerung für die Erweiterung wurde in drei einzelnen Wandschränken (Schutzart IP65) aufgebaut, die jeweils mit einem ProfiMessage Master- und zwei ProfiMessage Slave-Geräten ausgerüstet sind und möglichst nahe am Pool installiert werden sollen. Je ein Wandschrank wird als sogenannter Sammelpunkt bezeichnet.

Das System kann alle gängige BUS-Systeme auslesen und ansteuern und gleichzeitig stehen ausreichend viele Analogeingänge zur Verfügung (Millivolt oder Milliampere). Die größte Dichte an individuellen Sensoren wird von Thermoelementen eingenommen werden, weshalb insgesamt 6 × 32 = 192 Thermoelementklemmen vorgesehen sind. Die Umsetzung der analogen Signale in digitale Daten erfolgt mit einer maximalen Auflösung von 24 bit. Diese liegt jenseits der Fehlergrenzen der Sensoren.

In den DELPHIN-Geräten ist ein lokaler Zwischenspeicher eingebaut, der als FIFO-Speicher (First In First Out) arbeitet. Damit ist eine Echtzeitmessung auch dann möglich, wenn sich Verzögerungen in der Datenübertragung zu den Rechnern ergeben sollten. Zur besseren Absicherung gegen Datenverlust

wurden sämtliche Schränke mit einer Notstromversorgung ausgerüstet. Die Zeitsynchronisation wird mittels des NTP-Standards ausgeführt.

Die Sammelpunkte und die Messkabinenrechner kommunizieren via TCP/IP-Protokoll und entsprechenden Gigabit-Switches. Die PC-Hardware soll mit der bestehenden THAI-Anlage verknüpft werden, so dass das System auch als 3-Behälteranalage betrieben werden kann. Die Datensicherung ist bereits implementiert und besitzt noch ausreichend Kapazitäten für die zukünftige Datenspeicherung und -verarbeitung. Zur Datenverarbeitung stehen auf den Delphin ProfiMassage-Geräten sogenannte Rechenkanäle zur Verfügung in denen z. B. die individuellen Kalibrationskurven der Thermoelemente hinterlegt sind. Diese Kanäle bieten neben arithmetischen Funktionen auch die Funktionalität von Regelgrößen und Alarmfunktionen.

Neben der numerischen Anzeige können die Messkanäle und Daten auch in y,t- und x,y-Diagrammen angezeigt werden (ProfiSigna. Die Zeitachse der y,t-Diagramme kann beliebig gedehnt und gestaucht werden und entlang des Datums beliebig verschoben werden. Die Datenspeicherung ist im delphininternen Format möglich, aber auch als allgemeiner ASCII-Export.

II.4.6.4 Steuerung und Anlagenbedienung

Für die THAI-Anlage selbst hat sich bewährt, die Anlage halb-automatisch zu steuern, was bedeutet, dass z. B. das Anfahren von Druck- und Temperaturbedingungen in den Versuchsbehältern durch manuelles Einstellen von Regelventilen geschieht, wobei diese Ventile oftmals aus der Messkabine heraus gesteuert werden. Die manuellen Eingriffe werden in handschriftlichen Testprotokollen, für die ein fester Standard besteht vom Versuchsleiter, bzw. von der Bedienmannschaft dokumentiert.

In ProfiSignal selbst können auch Prozessschaubilder und Live-Messdaten hinterlegt werden, was die Anlagensteuerung wesentlich erleichtert. Solche Schaubilder enthalten auch Messwert- und Statusanzeigen sowie die Bedienelemente zum Steuern und Regeln der Anlage. Bei einer Störung des Steuerrechners müssen eine hardwareseitige Notabschaltung kritischer Komponenten möglich bleiben.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Nichtzutreffend

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Neben dem allgemeinen Nutzen des Vorhabens – Erhöhung der Sicherheit von Kernreaktoren als hoheitliche Aufgabe des Bundes; Sicherung des Know-Hows auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit auf international hohem Niveau; Teilhabe der Bundesrepublik Deutschland als anerkannter Experte und Partner an der internationalen Reaktorsicherheits-Forschung – sind als spezieller Nutzen hervorzuheben:

- Die NU-eX-Anlagenerweiterung der THAI-Versuchsanlage wurde installiert und ermöglicht in Zukunft Versuche, die spezifisch sind für SMR und passive Sicherheitssysteme des Kühlkreislaufs und des Sicherheitsbehälters
- Nu-eX ermöglicht Untersuchungen bei deutlich höherem Druck als bisher in der THAI-Versuchsanlage. Dies findet Anwendungen für Volldruckcontainments und Dampferzeugerzustände eines Druckwasserreaktors
- Neben den Instrumentierungsarbeiten dient das Abheben der oberen Behälterhälfte der Einbringung wechselnder Einbauten, welche die Geometrie und die Grundfunktionen des Primärkreises bzw. von passiven Sicherheitssystemen abbilden sollen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die NU-eX-Erweiterung zur Integralen Versuchsanlage auszubauen.
- Der Umzug der THAI-Anlage an den neuen Standort Hochheim am Main, einschließlich der Erweiterung der THAI-Versuchsanlage um eine Poolanlage (NU-eX-Pool), sind ein wichtiger Meilenstein die THAI-Anlage als unabhängiges experimentelles Werkzeug zur eigenständigen Untersuchungs-

und Beurteilungsfähigkeit von Fragestellungen zu neuen Reaktoren in den Nachbarländern zu erhalten und auszubauen. Die Versuchsanlage sichert die Teilhabe an der internationalen Reaktorsicherheitsforschung und sie ermöglicht die Generierung von Daten zur Validierung und Erweiterung des Geltungsbereiches bestehender Störfall-Analyse-Codes sowie in Entwicklung befindlicher Rechenmodelle.

- Die internationale Anerkennung durch die Datennutzung im Rahmen der Code-Entwicklung und -Validierung, u. a. im Rahmen des geplanten Benchmarks zum NU-eX-Inbetriebnahmeversuch.
- Die fachliche Verschränkung der NU-eX Anlage mit dem im Anlauf befindlichen OECD/NEA THEMIS-2 Vorhabens, welches den internationalen Erfahrungs- und Wissensaustausch gewährleistet wird weiter gefördert.
- Durch erfolgte und geplante Veröffentlichungen, Vorträge auf internationalen Tagungen und die Eingebundenheit in nationale und internationale Fachgremien ist dokumentiert, dass sich die deutsche Reaktorsicherheitsforschung mit der Erweiterung der THAI-Anlagen kontinuierlich weiterentwickelt und weiterhin auf „State of the Art“ - Niveau forscht und ausbildet.
- Die Unterdruckeignung der Anlage und ihre geometrische Flexibilität eröffnen auch Möglichkeiten, sicherheitstechnische Fragestellungen zukünftiger Fusionskraftwerke experimentell zu untersuchen. Insbesondere können in NU-eX sicherheitsrelevante Szenarien nachgebildet werden, die im Betrieb eines Fusionsreaktors auftreten können, etwa Leckagen im Vakuumbehälter, Störungen in der Tritium-Handhabung, das Verhalten von Kühlmitteln unter Stör- und Unfallbedingungen oder die Wechselwirkungen zwischen Plasmaberührenden Materialien (PFM) und Restgasen. Darüber hinaus ermöglicht die Flexibilität der Nu-eX-Konfiguration, komplexe Strömungs- und Transportphänomene in Anlagenräumen nachzustellen, wie sie für die Bewertung der Anlagensicherheit, des Störfallmanagements sowie der radioaktiven Inventarfreisetzung im Störfall entscheidend sind.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Erweiterung der THAI-Versuchsanlage als SMR-Integral-Anlage (02NUK092) wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Programm Nukleare Entsorgung, Sicherheit und Strahlenforschung (NUSAFE) durchgeführt. NUSAFE trägt, wie auch das THAI-Programm selbst zur Bewertung der Sicherheit, bzgl. Verbesserung der Sicherheit von kerntechnischen Anlagen bei, unabhängig vom Standort der jeweiligen Anlagen. Die beteiligten Helmholtz-Zentren in NUSAFE sind:

- Forschungszentrum Jülich (FZJ)
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Aufgrund der weltweit einzigartigen Infrastruktur unterstützt THAI die Zielsetzungen von NUSAFE maßgeblich, auch indem Nachwuchswissenschaftler entweder direkt durch Mitarbeit bei den Experimenten an der THAI-Anlage oder durch eine spätere Datennutzung im Rahmen von Modellentwicklung und Validierungsarbeiten gefördert werden [Wan21, Que21].

Neben den Helmholtz Zentren, leisten auch die Fachabteilungen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH und die Framatome, Erlangen wichtige Beiträge für das durchgeführte Vorhaben.

Die GRS war mit Rechnungen für die Auslegung und Auswertung der Anlagenerweiterung und deren Inbetriebnahmeversuche sowie der Übertragung auf Reaktorbedingungen mit dem Systemcode AC^2/COCOSYS beteiligt. Weiterhin gab/gibt es eine enge Kooperation mit den Forschungsstellen der Forschungszentren und Universitäten, die sich in der Reaktorsicherheitsforschung engagieren (IKE, RUB, UNIBw, TUM).

Die Erweiterung der THAI-Versuchsanlage als SMR-Integral-Anlage fördert auch die Zusammenarbeit von nationalen und internationalen wissenschaftlichen Organisationen, z. B. durch Datenaustausch, Einbindung internationaler Fachleute vor Ort bei Becker Technologies im Rahmen des zurzeit anlaufenden OECD/NEA THEMIS-2 Joint Projects sowie den technischen Austausch (SILENCE-Verbund).

Das nationale Engagement zu SMR-spezifischer Forschung und die entsprechenden Veröffentlichungen auf einschlägigen Konferenzen, wie z. B. der KERNTHEMEN [Fre25b], SCOPE [Die25] oder WGAMA [Fre25c] weckte das frühzeitige internationale Interesse an der Erweiterung der THAI-Versuchsanlage und generiert eine enge thematische Verschränkung und Interessenssituation mit den internationalen Partnern.

Becker Technologies ist eingebunden in die Aktivitäten der WGAMA u. a. mit der Teilnahme an CCVM und H2/SOAR; weiterhin mit Beiträgen zu SNETP-NUGENIA Technical Area 2, schwere Störfälle, an IAEA-Meetings, z. B. zur Bewertung passiver Wärmeabfuhr-Systeme; dem SNETP Forum u. a. zu technologischen Neuerungen in Bezug zu aktuellen Anlagen und neuen Reaktor-Technologien wie SMR, AMR, ATF, insbesondere auch zum Thema “Safety-Research” weiterhin in das SILENCE-Verbund, insbesondere zur Durchführung des „SWINTH-2024“ Seminars, eine gemeinsame Initiative des SILENCE Verbundes und der WGAMA. Becker Technologies vertritt die Interessen der deutschen Reaktorsicherheitsforschungsstrategie im Rahmen von EC/SEAKNOT und EC/SASPAM-SA.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Im Folgenden sind die im Rahmen des Vorhabens generierten Veröffentlichungen aufgeführt. Da im Vorhaben selbst keine Versuche und Experimente geplant waren, sind entsprechend auch keine wissenschaftlichen Fachberichte veröffentlicht worden.

[Die25] K. Dieter, M. Freitag, J. Treufo, E. Schmidt, B. von Laufenberg, „Simulations and experiments of severe accident transients in a generic SMR containment: Expanding the THAI+ test facility with a new vessel, Proceedings of SCOPE-2 2-6, Nov. 2025 – KFUPM, Saudi-Arabia

[Fre25a] M. Freitag, E. Schmidt, „Auslegungsbericht für doppelblinde Simulationen des THAI-Versuchs TH-37 „Wiederinbetriebnahmeversuch der THAI+-Anlage – Aerosolverhalten in einer Zwei-Behälter-Anlage mit Naturkonvektion“, Becker Technologies GmbH, 150 1680 - TH-37 - AB/SR, Mai 2025

[Fre25b] M. Freitag, „Umzug / Erweiterung der THAI-Versuchsanlage“, Kernthemen 2025, 20.-21. May 2025 Messe Dresden

[Fre25c] M. Freitag, “Experience on moving and extending the THAI facility and follow up on OECD/NEA-THEMIS-2” 28th Plenary Meeting of the Working Group on Analysis and Management of Accidents (WGAMA), 8-11. September 2025, Paris, France

II.9 Literaturverzeichnis

[AC2] Programmpaket AC2 https://www.grs.de/de/forschung-und-begutachtung/reaktorsicherheit/programmpaket-ac2

[ASTEC] ASTEC Code https://research-assessment.asnr.fr/research/astec-software-system

[ATLAS] Summary Report of the NEA ATLAS-2 Joint Project, Nuclear Safety, NEA/CSNI/R(2021)6, February 2022

[CNTFM] ContainmentFOAM https://iffgit.fz-juelich.de/containmentfoam_developers/containmentfoam_release9

[Fre24] M. Freitag et al.: Versuchsprogramm zu sicherheitsrelevanten Fragestellungen im Containment bestehender und neuer Reaktorkonzepte (THAI VII-a); Final Report No. 1501630-FR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, Juni 2024

[Fun04] F. Funke et al., „Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter. Teil 2: Iod-Versuche. Bericht 150 1218-S2“, Becker Technologies GmbH, Eschborn, April 2004

[Fun06] F. Funke et al., „Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter - ThAI Phase II. Teil 2: Iod-Versuche. Bericht NTR-G/2007/de/0233A“, AREVA NP GmbH, Erlangen, August 2006

[GSFLW] GASFLOW MPI https://www.gasflow-mpi.com/en/index.html

[Gup13] S. Gupta et al., „Versuchsprogramm zu Quellterm-relevanten Phänomenen im Containment sowie zur weiteren Entwicklung und Validierung von Rechenmodellen - THAI IV“, Berichts-Nr.: 1501361–FR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, März 2013

[Gup15] S. Gupta et al., Aerosol and iodine issues and hydrogen mitigation under accidental conditions in water cooled reactors, OECD/NEA THAI-2 Project Final Report No. 1501420–FR-1, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, May 2015

[Gup17] S. Gupta et al., Ein- und Mehrraumversuche zum Spaltprodukt- und Wasserstoff-Verhalten im Sicherheitsbehälter – THAI-V Project Final Report No. 1501455-FR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, April 2017

[Gup19] S. Gupta et al., Experimental Investigations on Fission-Product Retention and Hydrogen Mitigation for Design-Basis and Severe Accidents in the Containment – THAI VI; Final Report No. 1501547-FR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, October 2019

[Gup20] S. Gupta et al., Fission product behaviour, hydrogen mitigation, and hydrogen combustion in water cooled reactors under severe accident conditions. OECD/NEA THAI-3 Project Final Report No. 1501516–FR-1, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, March 2020

[Gup21] S. Gupta et al., Experimental Investigations on Fission-Product Retention and Hydrogen Mitigation for Design-Basis and Severe Accidents in the Containment – THAI VI-b; Final Report No. 1501594-FR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, April 2021

[Gup24] S. Gupta et al., OECD/NEA THEMIS Project: THAI Experiments on Mitigation measures and source term issues to support analysis and further Improvement of Severe accident management measures (Restricted Version). Final Report No. 1501613-FR-1, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, December 2024

[Jan00] W. S. Janna, Engineering heat transfer, Second Edition, C.R.C. Press, ISBN: 0-8493-2126-3, 2000

[Kan03] T. Kanzleiter et al., „Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter. Teil 1: Versuchsanlage und Thermohydraulik-Versuche. Bericht 150 1218-S1“, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Oktober 2003

[Kan07] T. F. Kanzleiter et al., „Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter, ThAI Phase II. Teil 1: Versuchsanlage, Thermohydraulik- und Aerosol-Versuche. Bericht 150 1272-S1“, Becker Technologies GmbH, Eschborn, März 2007

[Kan09] T. Kanzleiter et al., „Versuchsprogramm zum Spaltprodukt- und Wasserstoffverhalten im Containment, THAI-III-National, Berichts - Nr. 1501325-III-N1“, Becker Technologies GmbH, Eschborn, März 2009

[Kan10] T. Kanzleiter et al., “Hydrogen and Fission Product Issues Relevant for Containment Safety Assessment under Severe Accident Conditions”, OECD-NEA THAI Project Final Report No. 150 1326–FR 1, Becker Technologies GmbH, Eschborn, June 2010

[LUT25] https://www.lut.fi/en/news/lut-university-perform-safety-testing-small-nuclear-reactors

[Que21] C. Queral, “Thermal hydraulic modeling needs for LWR-SMRs”, OECD/NEA/CSNI Specialists Meeting on Transient Thermal-hydraulics in Water Cooled Nuclear Reactors (SM-TH) – Dec. 14-17, 2021 - CIEMAT, Madrid (Spain)

[Pal20] D. Paladino et al.: Identified needs for a follow-up of the OECD/NEA HYMERES-2 project, Presentation at the WGAMA meeting, 23rd September 2020

[Pan25] PANDA OECD/NEA Joint Project 2021-2025, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_84264/panda-experiments-addressing-complex-safety-issues-for-current-water-reactors-and-small-modular-reactors

[San23] V.H. Sanchez-Espinoza et al. “KIT reactor safety research for LWRs: Research lines, numerical tools, and prospects, Nuclear Engineering and Design, Volume 414, 2023, 112573, ISSN 0029-5493, https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112573.

[Sch18] A. Schaffrath, Erweiterung der GRS Rechenkette für die Simulation kleiner modularer, leichtwassergekühlter Reaktoren, Tagung für die junge Generation in der Kerntechnik, München 6.-8. Nov. 2018

[SMR20] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) http://aris.iaea.org, 2020 Edition, IAEA September 2020

[Wan21] F. Wang, X. Cheng, S. Gupta, „COCOSYS analysis on aerosol wash-down of THAI-AW3 experiment and generic containment" Annals of Nuclear Energy, Volume 153, 2021, 108076, ISSN 0306-4549, https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108076.