



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

NACHRICHTEN



Jahrgang 38 • 3/2006

Durchführung von nuklearen Stilllegungsprojekten
im Forschungszentrum Karlsruhe

**Im Inhaltsverzeichnis verwendete
Abkürzungen:**

HAP	Hauptabteilung Projekte
HDB	Hauptabteilung Dekontaminations- betriebe
INE	Institut für Nukleare Entsorgungstechnik
WAK	Wiederaufarbeitungs- anlage Karlsruhe

Herausgeber:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640 · 76021 Karlsruhe
Telefon 07247 82-0

Redaktion:

Dr. Joachim Hoffmann

Redaktionsbeirat:

Prof. Dr. K. Beheng, IMK
Prof. Dr. J. Blümer, IK-IEKP
Dr. W. Breitung, IKET
Prof. Dr. E. Dinjus, ITC-CPV
Dr. K. Gompper, INE
Dr. G. Metzger, FTU
Dr. W. Pfleging, IMF-I
Prof. Dr. V. Saile, IMT (Vorsitzender)
Dr. K.-F. Weibezahn, IMB

Layout, Grafik und Satz:

Stolz Grafisches Atelier · Karlsruhe

Druck:

Wilhelm Stober GmbH · Eggenstein

Nachdruck mit Genehmigung des
Forschungszentrums Karlsruhe GmbH
unter Nennung der Gesellschaft und
des Autors gestattet. Beleg erbeten.

Die NACHRICHTEN
können kostenlos über die
Hauptabteilung Bibliothek und Medien
des Forschungszentrums bezogen
werden.

Printed in the Federal Republic of
Germany



Vor dem Rückbau der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK) werden die Brennelemente aus dem Reaktorgebäude geschleust.

Inhalt / Contents

■ **Vorwort** 117

Foreword

K. Komorowski, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat 713: Stilllegung, Rückbau und Entsorgung kerntechnischer Versuchsanlagen

The topics of decommissioning and disposal of nuclear facilities tend to create the impression that these activities only refer to the past. But this impression is wrong. Although the tasks to be addressed have their roots in the past, they are clearly relevant to our future. The programme presented here places particular emphasis on the need to find solutions for pressing problems of disposal in connection with the decommissioning of the Reprocessing Plant Karlsruhe, the development of international market segments for dismantling services and the development and testing of innovative techniques for the vitrification of highly active wastes and the disassembly of activated and contaminated components.

■ **Die Stilllegungsprojekte im Forschungszentrum Karlsruhe: Ein Überblick** 118

The Nuclear Facilities Decommissioning Projects at the Forschungszentrum Karlsruhe: An Overview

P. Fritz, Vorstand

■ **Auf Sichtweite mit der „Grünen Wiese“: Status des MZFR-Rückbaus “Green Field” within the Range of Vision: Status of MZFR Dismantling** 123

E. Prechtel, B. Eisenmann, Hauptabteilung Projekte (HAP-MZFR); W. Süßdorf, Studsvik®-IFM

The history of the then largest heavy-water reactor in the world, the Multi-Purpose Research Reactor “MZFR” dates back to the late 1950s. The decision to construct the MZFR was made on June 13, 1960 by the German Atomic Commission. By the state, in cooperation with research and industry, the MZFR was built in less than four years on the premises of the former Society for Nuclear Research (GfK). On September 29, 1965, the facility reached its first criticality. The commissioning phase of nearly three years was followed by a largely defect-free operation until final shutdown on May 3, 1984. After shutdown, safe enclosure of the MZFR was planned first. Then, in 1989, it was decided in favor of stepwise, complete dismantling. The decommissioning concept for the complete removal of the plant down to the green field comprises eight steps. For each of these eight decommissioning steps, a separate decommissioning license is required. According to the current schedule, the “green field” will be reached by the end of 2010.

-
-
- **Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR):
Rückbau des Reaktordruckbehälters in Kooperation zwischen dem
Forschungszentrum Karlsruhe, Hochschule und Industrie** 130

**Research Reactor (MZFR):
Segmentation of the Reactor Pressure Vessel. Co-operation between
Forschungszentrum Karlsruhe, University Hannover, and RWE NUKEM**

P. Hildwein, RWE NUKEM GmbH

The first step to dismantlement of the MZFR reactor pressure vessel was the segmentation of the vessel internals by under water plasma arc cutting. Commercially available plasma systems however did not meet the specific MZFR requirements. An advanced plasma system and a CAMC back-up system was therefor developed by a co-operation between Forschungszentrum Karlsruhe, University Hannover, and RWE NUKEM. With these systems the vessel internals have then been segmented successfully.

- **Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) – Stand des Projektes
Compact Sodium Cooled Reactor (KNK) – Status of the Project** 135

K. Brockmann, HAP

The Compact Sodium Cooled Reactor (KNK) was operated as a research reactor for the breeder development and the test of the sodium technology until 1991. The decommissioning will be done in 10 steps. Eight steps are finished and the ninth step is being carried out at this time. The sodium systems are dismantled and now the high activated sodium contaminated reactor vessel will be dismantled remote controlled. The detailed planning of the dismantling of the primary shield and the biological shield are in progress. The green field conditions will be reached in 2010.

- **Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK):
Beseitigung des Reaktortanks und der aktivierten Strukturen im Sicherheitsbehälter
der KNK im Zuge der 9. Stilllegungsgenehmigung** 141

**Decommissioning of the Reactor Tank and the Activated Structures within the
Containment of the Sodium Cooled Nuclear Reactor Facility (KNK) Regulated by the
Permission Step 9**

E. M. Züfle, Westinghouse Electric Germany GmbH

Westinghouse was assigned with the decommissioning of the KNK plant by the Forschungszentrum Karlsruhe. One very substantial subject such as the decommissioning of the reactor vessel, is currently performed under specific boundary conditions as residual sodium in the vessel on nitrogen environment. An enclosure in hot-cell technology with wall thickness of 350 mm and total weight of around 500 Mg has been erected above the reactor vessel. All operations are done remote controlled. The paper describes the main boundary conditions, weights and dose rates, cutting technology and installed infrastructure.

■ **Einsatz und Entwicklung von Zerlegewerkzeugen für den Rückbau nuklearer Anlagen** 147
Application and Development of Dismantling Technologies for Decommissioning of Nuclear Installations

Fr.-W. Bach, G. Kremer, T. Rümenapp, Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover

The decommissioning of nuclear installations poses a challenge to high performance underwater cutting technologies because of complex limiting conditions, like radioactive contamination, accessibility, geometry of work piece, material thickness and composition. For the safe dismantling of the moderator tank and the thermal shield of the Multi-purpose Research Reactor (MZFR) Karlsruhe the development and the use of thermal cutting tools will be demonstrated, in this case the underwater plasma arc cutting and the contact arc metal cutting (CAMC).

■ **Behandlung und Entsorgung von Großkomponenten und radioaktiven Reststoffen** 153
Treatment and Disposal of Large Components and Radioactive Residues

L. Valencia, HDB

Decommissioning of nuclear facilities gives rise to radioactive residues and wastes. Their reuse or proper disposal requires special techniques and equipment. Since 1979 the Central Decontamination Department (HDB) in the Forschungszentrum Karlsruhe specialized in this work. They processed dismantled large components, like the steam generators and core internals of the Multi-purpose Research Reactor and the sodium discharge tank and rotary shield of the Compact Sodium-cooled Nuclear Reactor Facility or concrete structures from the hot cells of the Karlsruhe reprocessing plant.

■ **Stand und Perspektiven der Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) – Neustrukturierung des Projektes** 159
Actual Status and Prospects of the Decommissioning of the Reprocessing Plant Karlsruhe (WAK) – New Structuring of the Project

W. Pfeifer, G. Katzenmeier, WAK

Following the decision of the utilities to refrain from building the industrial reprocessing plant in Wackersdorf, the prototype reprocessing plant in Karlsruhe (WAK) was shut down in 1991. To date, the installations of the main process building have been removed partly remotely and transferred to the Research Center's Central Decontamination Department (HDB) for waste treatment. The facility for the vitrification (VEK) of the high-active fission product solution (HAWC) presently is in the state of cold commissioning. A concept for subsequent dismantling of the HAWC storage areas and the VEK has been submitted and approved in parts. The parties of the decommissioning agreement concluded in 1991 (Federal Republic of Germany, State of Baden-Württemberg, Forschungszentrum Karlsruhe, DWK, WAK) have decided to restructure the project with a view to minimize interfaces. The Energiewerke Nord (EWN, energy company of Northern Germany), a state-owned company, has become the new partner of the WAK GmbH instead of the DWK, a subsidiary of the utilities. Forschungszentrum Karlsruhe has transferred its responsibility for the project to the WAK GmbH. With EWN being the new partner, the scheduling and cost plans made so far are revised and technical dismantling steps are reevaluated.

■ **Die Verglasung von hochradioaktiven Flüssigabfällen – ein Weg zu mehr Sicherheit in der nuklearen Entsorgung**

166

Vitrification of Highly Radioactive Waste Solutions – a Means Towards Increased Safety in Nuclear Waste Management

T. Fanghänel, G. Roth, INE

Highly radioactive waste solutions originating from reprocessing of spent fuel are usually solidified by immobilization in borosilicate glass to ensure the safe intermediate storage and final disposal. The main steps of the high temperature vitrification process and the technology are described. The liquid-fed ceramic melter developed by Institute for Nuclear Waste Disposal (INE) and its application by the VEK vitrification plant, starting hot operation in 2007, are presented. VEK will immobilize 60 m³ of highly radioactive waste solution with a gross activity of 7.7×10^{17} Bq into 50 tons of waste glass, filled into 130 canisters of 400 kg glass each.

■ **HAWC-Entsorgung der WAK – eine mit der VEK zu lösende Aufgabe**

172

HLLW Management of WAK – a Task to Solve with VEK

J. Fleisch, M. Weishaupt, WAK; G. Roth, S. Weisenburger, INE

Following a five years construction period (2000–2005), the Karlsruhe high level waste vitrification plant (VEK) (Verglasungsanlage Karlsruhe) is now in the commissioning phase. The VEK vitrification process is based on an advanced liquid-fed ceramic melter developed by the Institut für Nukleare Entsorgung (INE). The safety features ensure a minimization of radioactive effluents and emissions as well as resistance against external impacts from potential earthquakes or aircraft accident. Cold test operation is foreseen for the second half of 2006, with the subsequent hot operation phase in 2007/2008.

■ **Auslegung der VEK gegen EVA – eine Herausforderung**

177

Analysis and Design of VEK for Extreme Events – a Challenge

H. P. Wölfel, Wölfel Beratende Ingenieure HÖchberg und Fachgebiet Maschinendynamik TU Darmstadt

For analysis and design of the VEK building – especially for design against earthquake and airplane crash – a 3D-integral-model had been developed, being able of yielding any global response quantities – displacements, accelerations, sectional forces, response spectra, global reinforcement – for any load actions from one mathematical model. Especially for airplane crash a so called dynamic design results in reinforcement quantities at every time step and so leads to a realistic and economic design. The advantages of the integral-model had been transferred to the design of the processing installation where the structural analysis of steel structures, vessels and piping had been dealt with in one integral mathematical model.

Vorwort

K. Komorowski, Bundesministerium für Bildung und Forschung,
Referat 713: Stilllegung, Rückbau und Entsorgung kerntechnischer Versuchsanlagen

Stilllegung und Entsorgung kerntechnischer Anlagen erwecken primär den Eindruck, dass hier lediglich Themen der Vergangenheit betroffen sind. Dieser Eindruck trägt. Die anstehenden Aufgaben haben zwar ihre Wurzeln in der Vergangenheit, sie weisen aber auch deutlich in die Zukunft.

Das hier vorgestellte Programm setzt zukunftsweisende Akzente insbesondere zur Lösung drängender Entsorgungsfragen in Zusammenhang mit der Stilllegung der Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe, bei der Erschließung von internationalen Marktsegmenten für Rückbauleistungen sowie bei der Entwicklung und Erprobung innovativer Techniken zur Verglasung von hochaktiven Abfällen und der Zerlegung von aktivierten und kontaminierten Komponenten.

Die Nutzung der Kerntechnik zur Stromerzeugung wird auch auf internationaler Ebene von Fragen nach der Machbarkeit, Sicherheit und Finanzierbarkeit nuklearer Stilllegungs- und Entsorgungsarbeiten geprägt.

Das seit 1982 laufende Planfeststellungsverfahren für die Einrichtung des Endlagers KONRAD wurde nach rund zwanzigjähriger Verfahrensdauer im Juni 2002 abgeschlossen. Zu den anhängigen Klagen hat das Oberverwaltungsgericht Lüneburg am 8. 3. 2006 alle Einsprüche gegen das Endlager Schachanlage KONRAD im Hauptsacheverfahren abgewiesen. Es bleibt abzuwarten, wie das Bundesverwaltungsgericht über die Einsprüche gegen die Nichtzulassung der Revision entscheiden wird. Viele Fachleute im Bereich der

Stilllegung kerntechnischer Anlagen haben wiederholt die berechnete Erwartung unterstrichen, dass dann unverzüglich mit der Umrüstung der Schachanlage begonnen werden möge.

Mit der Inbetriebnahme eines Endlagers könnten auch die ehemals nuklear ausgerichteten Helmholtz-Zentren zügig und nachhaltig von den Risiken der langfristigen Lagerung von nuklearen Abfällen befreit und zugleich volkswirtschaftliche Einsparpotenziale erschlossen werden, die nicht zuletzt auch der Forschung zu Gute kämen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung setzt sich für den sicheren, zügigen und kostengünstigen Rückbau derjenigen kerntechnischen Anlagen ein, die nicht mehr benötigt werden und genutzt werden können.

So konnten im Geschäftsbereich des Ministeriums u. a. die vollständige Beseitigung von zwei Reaktoren (KKN Niederaichbach, HDR Karlstein) sowie der sichere Einschluss bei zwei weiteren Reaktoren (THTR Hamm-Uentrop, FR2 Karlsruhe) erreicht werden. Ferner wurde der SNR-300 Brutreaktor in Kalkar einer anderen Nutzung zugeführt. Hervorzuheben sind auch die Stilllegungsprojekte der EU im EURATOM-Forschungszentrum Ispra (JRC), die bezüglich der organisatorischen und operationellen Ausgestaltung auch auf die gewonnenen Erfahrungen im Forschungszentrum Karlsruhe zurückgreifen konnten.

Weitere Rückbauprojekte im Verantwortungsbereich des Bundesministeriums für Bildung und Forschung befinden sich in fortgeschrittenen Projektphasen. Da-

rüber hinaus trägt das Ministerium durch projektorientierte Fördermaßnahmen dazu bei, den Stand von Wissenschaft und Technik bei leistungsfähigen Rückbautechniken zu verbessern, Spin-off-Effekte in andere Wissenschafts- und Wirtschaftsbereiche umzusetzen und zur Kompetenzerhaltung in der Kerntechnik beizutragen.

Nach Einschätzung der IAEA stehen allein durch Überalterung bis zum Jahr 2030 rund 250 kerntechnische Anlagen weltweit zur Stilllegung und zum Rückbau an. Damit rückt das Fachgebiet „Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen“ auch auf internationaler Ebene verstärkt in den Mittelpunkt. Aufgrund weitgehend abgeschotteter Märkte werden Leistungen auf internationaler Ebene nur begrenzt nachgefragt bzw. angeboten.

Durch Vernetzung und Bündelung der anstehenden Aufgaben unter Einbindung der Energiewerke Nord GmbH (EWN) sind wir zuversichtlich, die vor uns liegenden Arbeiten Helmholtz-übergreifend nachhaltig und erfolgreich erledigen zu können. Hierdurch werden zugleich weitere Freiräume für die Forschung im Forschungszentrum Karlsruhe geschaffen.

Diese Fachveranstaltung und die geführten Diskussionen zeigen zugleich, dass auch bei komplexen Fragestellungen unter nicht immer einfachen Rahmenbedingungen tragfähige Lösungen erarbeitet werden konnten und Kerntechnik in der Praxis sicher beherrschbar ist.

Die Stilllegungsprojekte im Forschungszentrum Karlsruhe: Ein Überblick

P. Fritz, Vorstand

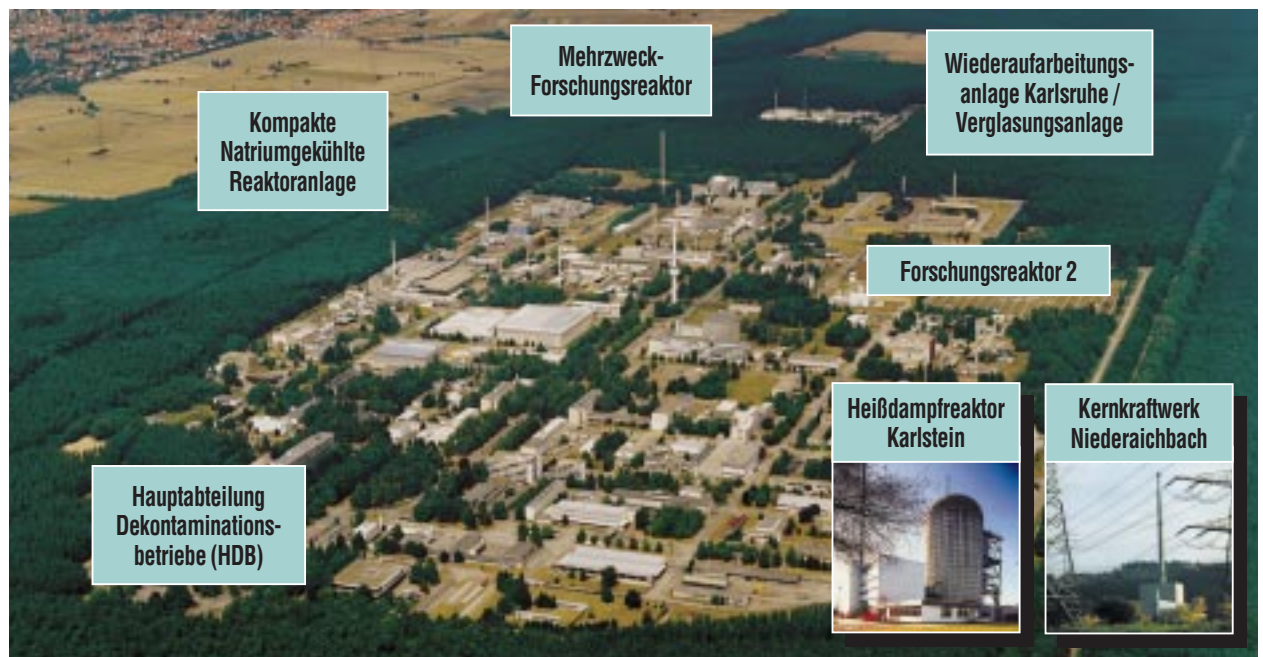


Abb. 1: Bis in die frühen 70er Jahre errichtete das damalige Kernforschungszentrum Karlsruhe große kerntechnische Versuchsanlagen.

Einleitung

Das Forschungszentrum Karlsruhe hat noch als Gesellschaft für Kernforschung mbH im Auftrag des Bundes in den Jahren 1968 bis 1972 insgesamt fünf große kerntechnische Versuchsanlagen er-

richtet (Abb. 1). Es handelte sich um 5 Kernkraftwerke mit Prototypcharakter und eine Wiederaufarbeitungsanlage als Vorläufer der in Wackersdorf geplanten Anlage. Während der Forschungsreaktor 2 (FR2), der Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR), die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) und die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) sich auf dem Gelände des Forschungszentrums befinden, lagen außerhalb des Zentrums die Anlagen Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN) in Niederaichbach an der Isar und der Heißdampfreaktor Karlstein (HDR) in Groß-Welzheim am Main. Sinn und Zweck der Versuchsanlagen war die Sammlung von Erfahrungen für Hersteller und Betreiber, um entsprechende Großanlagen konzipieren zu können. Die Anlagen nach sehr unterschiedlichen Konzepten wurden in nach heutigen Maßstäben ex-

trem kurzen Zeiträumen konstruiert und errichtet. Nach Abschluss der Betriebsphase wurden alle Anlagen stillgelegt und für die Demontage vorbereitet.

Das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN)

Die erste Anlage, das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN) (Abb. 2) war ein mit CO_2 gekühlter Druckröhrenreaktor mit D_2O als Moderator und Reflektor. Dieser Reaktor mit 100 MW elektrischer und 320 MW thermischer Leistung war aufgrund technischer Probleme nur kurze Zeit in Betrieb. Die radioaktive Belastung war dennoch bereits so hoch, dass eine fernbediente Demontage notwendig wurde. Doch zunächst wurde die Anlage ab 1975 in den „Sicheren Einschluss“ überführt. 1979 fiel der Beschluss zur vollständigen Demontage und Beseitigung.



Abb. 2: Das Kernkraftwerk Niederaichbach wurde von 1966 bis 1972 errichtet und war von 1972 bis 1974 in Betrieb. 1995 war der Rückbau zur „grünen Wiese“ abgeschlossen.

Mit der Demontage wurde als Generalunternehmer die Arbeitsgemeinschaft Noell GmbH/NIS mit Noell als Federführer beauftragt. Für die Demontage wurde ein Drehmanipulator mit einem an einem 12 m langen Teleskoparm befestigten Werkzeugträger entwickelt und in einem 1:1-Teststand im Noell-Werk in Würzburg erprobt.

Die Zerlegewerkzeuge wurden für jede Aufgabe speziell entwickelt. Beispielsweise musste eine Absaugvorrichtung für eine große Menge Abschirm-Kugeln aus Stahl (ca. 2 cm Ø) konzipiert werden. Es kamen thermische und spanabhebende Trennverfahren zum Einsatz.

Im August 1995 war das Ziel „grüne Wiese“ erreicht. Ca. 93 % der Gesamtmasse des KKN konnten als nichtradioaktiver Bauschutt wieder verwendet werden. 5 % konnten nach Behandlung verwertet werden, und lediglich 2 % befinden sich heute als radioaktiver Abfall im Zwischenlager der HDB im Forschungszentrum Karlsruhe (Abb. 3).

Der Heißdampfreaktor Karlstein (HDR)

Das nächste bereits abgeschlossene Rückbauprojekt ist der Heißdampfreaktor in Groß-Welzheim am Main (Abb. 4). Auch diese Anlage, ein Leichtwassergekühlter und -moderierter Siedewasserreaktor mit Überhitzer und einer thermischen Leistung von 100 MW, wurde in kürzester Zeit von 1965 bis 1969 errichtet. Die Anlage war nur kurz von 1969 bis 1971 in Betrieb. Ab 1974 wurden hier umfangreiche Reaktorsicherheitsexperimente durchgeführt.

Bei der Demontage war Fernhandhabung aufgrund der niedrigen Ortsdosisleistung nicht erforderlich. Im Juni 1998 wurde das vollkommen ausgeräumte Reaktorgebäude konventionell mit einer Abrissbirne beseitigt (Abb. 5), und im August 1998 war auch an diesem Standort die komplette Anlage beseitigt und die „grüne Wiese“ erreicht (Abb. 6).



Abb. 4: Der Heißdampfreaktor Karlstein wurde von 1965 bis 1969 errichtet und war bis 1971 in Betrieb. Anschließend wurden an der Anlage umfangreiche Reaktorsicherheitsexperimente durchgeführt. Von 1992 bis 1998 wurde der Reaktor zur „grünen Wiese“ zurückgebaut.



Abb. 5: Abriss des 50 m hohen Reaktorgebäudes des Heißdampfreaktors Karlstein.



Abb. 6: Nach Beendigung der FuE-Arbeiten wurde aus dem HDR im Oktober 1998 eine „grüne Wiese“.

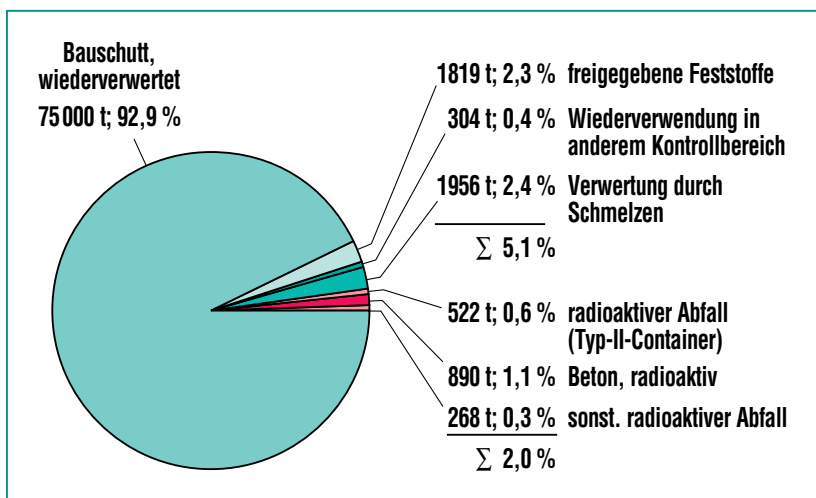


Abb. 3: Massenbilanz des Rückbaus des Kernkraftwerks Niederachbach.



Abb. 7: Der Forschungsreaktor 2, die Gründungsaufgabe der Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft, der ersten Vorläuferinstitution des Forschungszentrums Karlsruhe.

Der Forschungsreaktor 2 (FR 2)

Auf dem Gelände des Forschungszentrums verlief der Betrieb der Nuklearanlagen erfolgreicher, alle Anlagen waren durchschnittlich 20 Jahre in Betrieb. Der Forschungsreaktor 2 (FR2) war der erste auf dem Gelände errichtete Reaktor (Abb. 7 und 8). Er wurde von 1957 bis 1961 gebaut und bis 1981 betrieben. Bis 1993 wurde das Konzept für den sicheren Einschluss entwickelt und bis 1996 umge-



Abb. 8: Der Forschungsreaktor 2 wurde 1957–1961 errichtet und war 1961–1981 in Betrieb.

setzt. Ab 2010 ist der Rückbau bis zur „grünen Wiese“ vorgesehen. Inzwischen wird das Gebäude für die ständige Ausstellung zur Geschichte der Kerntechnik in Deutschland genutzt.

Die anderen beiden Reaktoren MZFR und KNK werden ohne den Zwischenschritt „sicherer Einschluss“ direkt zurückgebaut, da sich inzwischen herausgestellt hat, dass die erwarteten Erleichterungen durch abklingende Radioaktivität nicht ausreichen, um den in der Wartezeit auftretende Kompetenzverlust, insbesondere unmittelbare Anlagenkenntnis sowie Kostensteigerungen durch immer komplizierter werdende Genehmigungs- und Begutachtungsverfahren zu kompensieren.

Der Mehrzweckforschungreaktor (MZFR)

Der MZFR wurde als D₂O-modifizierter Natururanreaktor des Druckkesseltyps konzipiert und ab 1961 innerhalb von 3 1/2 Jahren errichtet. Nach mehreren Umbauten konnten bereits in den Jahren 1970/71 Verfügbarkeiten im Dauerbetrieb von ca. 86 % erreicht werden.

Die elektrische Leistung betrug 50 MW. Nach fast 20 Betriebsjahren erfolgte 1984 die Abschaltung und die Demontage des Sekundär- und Primärsystems einschließlich der Hilfsanlagen. Im Jahre 1998 begann der fernbediente Abbau des Reaktordruckbehälters. In den Beiträgen von Prechtl (S. 123) und Hildwein (S. 130) wird näher auf diesen Schritt eingegangen. Der Abschluss der Arbeiten wird für 2009 erwartet.

Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK)

Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) (Abb. 9) wurde 1966 bis 1971 als Versuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 58 MW errichtet und von 1971 bis 1991 betrieben.

Wie der Name bereits aussagt, handelt es sich um eine sehr verdichtete, auf kleinstem Raum gebaute Anlage. Diese räumliche Enge verbunden mit erheblichen Natriummengen im Kreislauf stellte die Demontagemannschaft vor besondere Herausforderungen. Von 1997 bis 2002 erfolgte der Abbau der Primär- und Sekundärsysteme. Für den fernbedienten Abbau war zunächst die Installation eines ca. 400 t schweren Abschirmcaissons oberhalb des Reaktors erforderlich. Auf die Demontearbeiten mit den projektspezifisch entwickelten Spezialmaschinen wird in den Beiträgen von Brockmann (S. 135) und Züfle (S. 141) eingegangen.

Auch bei diesem Projekt ist der Abschluss für das Jahr 2009 vorgesehen.

Die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK)

Die Demontage der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) wird aufgrund der Komplexität und der Notwendigkeit, den gelagerten hochradioaktiven Flüssigabfall (HAWC) durch Verglasung endlagergerecht zu behandeln, den größten Zeitraum aller Demontearbeiten benötigen. Das For-



Abb. 9: Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage wurde von 1966 bis 1971 errichtet, war bis 1991 in Betrieb und soll bis zum Jahr 2009 rückgebaut sein.

schungszentrum hat für die Verglasung ein eigenes Verfahren entwickelt, eine 1:1-Prototypanlage gebaut und über mehrere Jahre betrieben (s. Artikel Fanghänel, S. 166).

Die für die Verglasung der ca. 60 m³ hochradioaktiver Flüssigabfälle erforderliche Großanlage – die Ver-

glasungsanlage Karlsruhe – ist in den letzten Jahren unter der Verantwortung des Forschungszentrums gebaut worden (Abb. 10). Sie soll 2007 ihren heißen Betrieb aufnehmen (siehe Beiträge Fleisch, S. 172, und Wölfel, S. 177).

Die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe selbst soll ebenso wie die

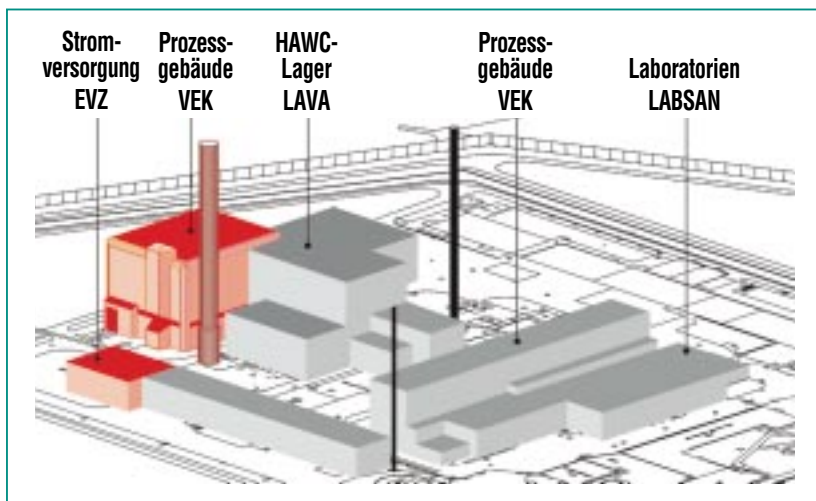


Abb. 10: In der Verglasungsanlage Karlsruhe (VEK) wurden 60 m³ hochradioaktiver, flüssiger Abfall aus der Wiederaufarbeitungsanlage in einen endlagergerechten Zustand gebracht.

fertig gestellte VEK in 2006 nach einer Neuordnung der Vertragsverhältnisse von den Energiewerken Nord (EWN) übernommen und bis ca. 2015 ebenfalls zur „grünen Wiese“ zurückgebaut werden. Alle Abfälle aus den Stilllegungsprojekten werden im Forschungszentrum Karlsruhe behandelt und endlagergerecht verpackt.

Die Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB) ist mit allen notwendigen Einrichtungen ausgestattet und lagert z. Zt. ca. 60 % aller in Deutschland lagernden schwach- und mittelaktiven Abfälle (Abb. 11 und 12). Davon mehr im Artikel von Valencia (S. 153).



Abb. 11: In der HDB lagert derzeit ein Abfallgebundevolumen von ca. 60 000 m³. Das entspricht 80 % aller radioaktiven Abfälle der HGF und 60 % aller in Deutschland lagernden radioaktiven Abfälle.



Abb. 12: In der Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe lagern zu Zeit rund 60 m³ schwach- und mittelaktive Abfälle, rund 60 % des in Deutschland lagernden Volumens.

Fazit

Als Fazit aus allen Stilllegungsaktivitäten des Forschungszentrums Karlsruhe lässt sich der Schluss ziehen:

Hier wurden nicht nur die unterschiedlichsten Reaktoranlagen und kerntechnischen Einrichtungen in kürzester Zeit errichtet und über viele Jahrzehnte sicher betrieben,

sondern auch im Rahmen der Stilllegungsprojekte gezeigt, dass eine vollständige, umweltverträgliche und sichere Demontage möglich ist. Das Forschungszentrum verfügt heute über das weltweit umfangreichste Know-how in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. An keinem Ort der Welt wurde an so unterschiedlichen Reaktoranlagen mit unterschiedlichsten Betriebsmitteln gezeigt, dass Bau,

Betrieb und Demontage von Kernkraftwerken bei entsprechendem technischen Know-how und der notwendigen Sicherheitskultur ohne gravierende Probleme möglich sind und die Technik sicher beherrschbar ist.

Auf Sichtweite mit der „Grünen Wiese“: Status des MZFR-Rückbaus

E. Prechtl, B. Eisenmann, Hauptabteilung Projekte (HAP-MZFR); W. Süßdorf, Studsvik®-IFM

Einleitung

Im Jubiläumsjahr 2006 blickt das Forschungszentrum Karlsruhe stolz auf sein 50-jähriges Bestehen zurück. Nur wenige Jahre jünger ist die Geschichte des damals weltweit größten Schwerwasserreaktors, des Mehrzweckforschungsreaktors „MZFR“, dessen Anfänge bis Ende der 50er Jahre zurückreichen.

Die Weichenstellung für eine Bauentscheidung des MZFR erfolgte am 13. Juni 1960 durch die deutsche Atomkommission. In Kooperation zwischen Staat, Forschung und Industrie wurde der MZFR in knapp vier Jahren Bauzeit auf dem Gelände der damaligen Gesellschaft für Kernforschung (GfK) errichtet.

Am 29. September 1965 erreichte die Anlage ihre erste Kritikalität. Auf die fast drei Jahre dauernde Inbetriebnahmephase folgte ein nahezu störungsfreier Betrieb bis zur endgültigen Abschaltung am 3. Mai 1984.

Nach dieser fast 19-jährigen Betriebszeit hatte der MZFR seine Zwecke, unter anderem:

- Testen von Natururan-Brennelementen
- Entwicklung von Reaktormaterialien
- Sammlung von Erfahrungen im Umgang mit Schwerwassersystemen
- Ausbildung von Reaktorphersonal

erfüllt. Neben den für die heutigen Leistungsreaktoren gewonnenen nutzbaren wertvollen Erfahrungen wurde aufgezeigt, dass Kernkraft-

werke unter Einhaltung aller sicherheitstechnischen Randbedingungen wirtschaftlich betrieben werden können.

Während für den MZFR nach dessen Abschaltung zunächst der sichere Einschluss der Anlage vorgesehen war, entschied man sich 1989 für einen schrittweisen, kompletten Rückbau. Das Stilllegungskonzept für die vollständige Beseitigung der Anlage bis zur grünen Wiese sieht acht Schritte vor. Für jeden der acht Stilllegungsschritte ist eine separate Stilllegungsgenehmigung erforderlich. Nach dem aktuellen Zeitplan wird das Ziel „Grüne Wiese“ Ende 2010 erreicht sein.

Der äußere Anschein trägt

Für einen Außenstehenden scheint die MZFR-Anlage seit Jahren nahezu unverändert „still zu liegen“, wie der Zustand einer kerntechnischen Anlage nach der Abschaltung von den Behörden bezeichnet wird. Die wenigen äußerlichen Anzeichen des Rückbaus waren im Jahre 1992 der Abriss der Kühltürme und im Jahre 1994 die Demontage der mit der Nachbaranlage „KNK“ (kompakte natriumgekühlte Kernreaktoranlage) gemeinsamen Objektsicherungseinrichtungen.

Nahezu unbemerkt von der Öffentlichkeit befindet sich der MZFR heute in einem weit fortgeschrittenen Rückbauzustand. Die meisten der ursprünglichen konventionellen und kerntechnischen Einrichtungen wurden demontiert und entsorgt. Von dem Kern der Anlage, dem Reaktor selbst, ist heute nur noch der inzwischen leer

geräumte Reaktordruckbehälter (RDB) übrig. Die Einbauten wurden weitestgehend demontiert, zerlegt und endlagergerecht verpackt. Trotz der enormen Reduzierung des Aktivitätsinventars im Laufe der letzten Jahre auf unter 10^{14} Bq ist diese Restaktivität immer noch einige Größenordnungen zu hoch, um die Freigabegrenzwerte nach Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) unterschreiten zu können. Bis diese Voraussetzungen gegeben sind, müssen noch der RDB vollständig zerlegt, der aktivierte Teil des Biologischen Schilddes abgebaut und noch vorhandene Kontaminationen in den Kontrollbereichen beseitigt werden.

Trotz diesem weit fortgeschrittenen Rückbau weist der MZFR nach fast zwei Jahrzehnten Rückbau immer noch ein Restaktivitätsinventar auf, das in der gleichen Größenordnung liegt, wie das des ehemaligen Kernkraftwerkes Niederachbach (KKN) vor Abbaubeginn im Jahre 1988. Das KKN, ebenfalls ein Prototypreaktor des Bundes, war eines der ersten Rückbauprojekte weltweit, welches – unter der Verantwortung des Forschungszentrums Karlsruhe – bis zur Grünen Wiese abgebaut worden ist [1].

Stand des MZFR-Rückbaus und Genehmigungssituation

Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage erfolgt in der Regel von den so genannten „kalten Bereichen“, den konventionellen Anlagenbereichen und Systemen hin zu den „heißen Bereichen“ mit immer höheren Aktivitäten bis zum Reaktor selbst.

Im MZFR-Stilllegungskonzept spiegelt sich diese Vorgehensweise in den bereits erwähnten acht Rückbausritten mit separaten Genehmigungen wieder.

So wurden nach Entfernung der Brennelemente und des Schwerelements aus der Anlage von 1984 bis 1987 nicht mehr benötigte Systeme außer Betrieb genommen sowie weiterhin benötigte Systeme modifiziert. Anschließend wurden die Kühltürme abgerissen und das Maschinenhaus ausgeräumt (1.–3. Schritt).

Bis Anfang 1997 wurden dann die Reaktorhilfssysteme demontiert und das Primärsystem dekontaminiert (4. Schritt). Dadurch war es neben dem parallel hierzu durchgeführten Abbau der Objektsicherungseinrichtungen (5. Schritt) möglich, das Primär-

system bis auf den Reaktor manuell zu demontieren. Dies erfolgte im Rahmen der 6. Stilllegungsgenehmigung. Weiterhin beinhaltet der 6. Schritt den Abbau aller Reaktorhilfsanlagen im Reaktorgebäude sowie die Dekontamination der ausgeräumten Bereiche im Hilfsanlagegebäude. Nach Abschluss dieser Arbeiten war das Reaktorgebäude bis auf den RDB und dessen Einbauten ausgeräumt.

Seit Dezember 1999 erfolgt die weitgehend fernbediente Demontage des aktivierten RDB mit seinen Einbauten in insgesamt fünf Abschnitten (7. Stilllegungsschritt). Die Ausführungsplanung und Durchführung obliegt einem Konsortium unter Führung der RWE NUKEM GmbH, wobei das Forschungszentrum als Genehmi-

gungsinhaber die Gesamtverantwortung trägt.

Der Genehmigungsantrag zum achten Schritt, dem Abbau des Biologischen Schildes, der Dekontamination und Freimessung der Anlage sowie dem konventionellen Abriss der Gebäude befindet sich in dem bereits weit fortgeschrittenen Genehmigungsverfahren. Mit der Genehmigung wird kurzfristig gerechnet.

7. Stilllegungsschritt: Zerlegung des RDB

Rückbaukonzept

Der im Jahre 1999 vor Beginn der Zerlegung mit nahezu 10^{16} Bq aktivierte RDB ist vollständig vom Biologischen Schild umgeben (Abb. 1). Bedingt durch die räum-

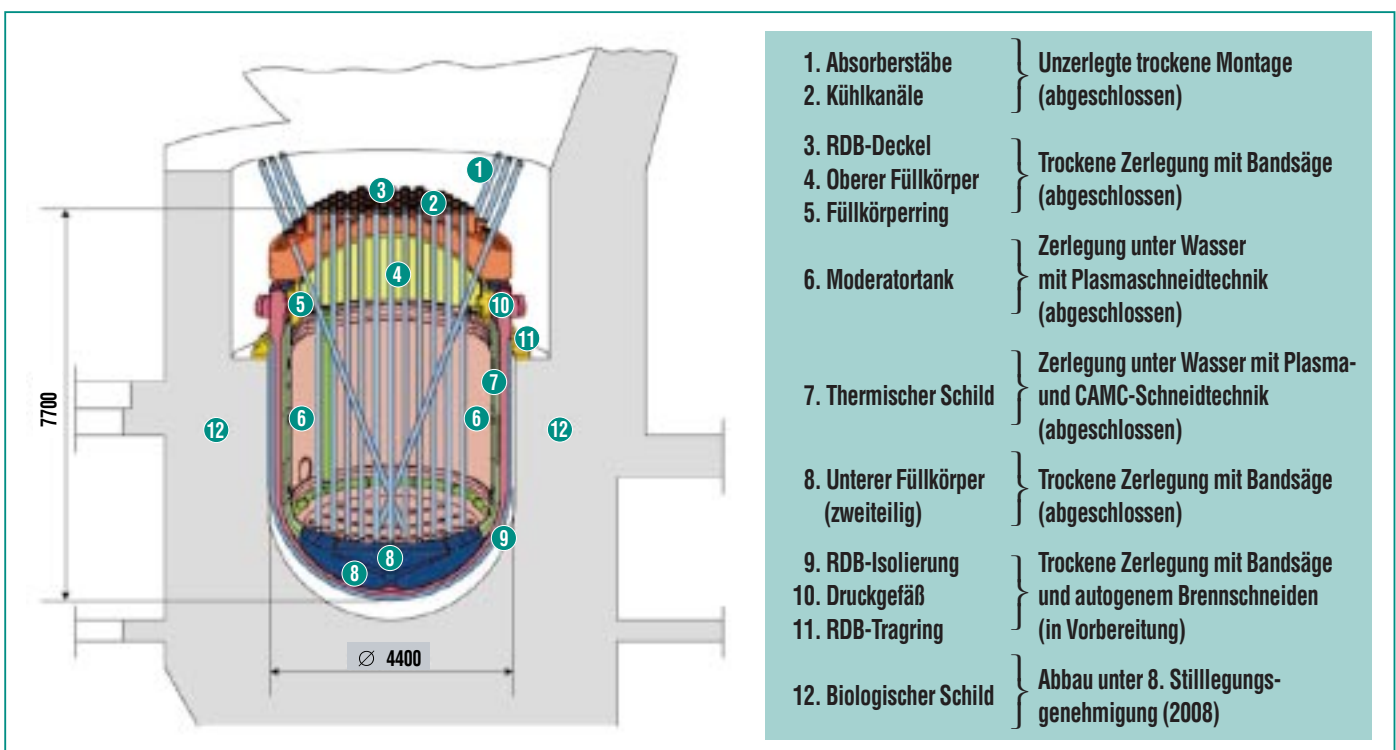


Abb. 1: Schnitt durch den Reaktordruckbehälter (RDB) mit Einbauten, eingebettet im Biologischen Schild.

liche Enge im Reaktorgebäude und weiteren Randbedingungen muss der mit Einbauten ca. 400 t schwere RDB in Einbaulage zerlegt werden. Das Zerlegekonzept sieht die Zerlegung von oben nach unten und von innen nach außen vor. Für die fernbediente Zerlegung und Verpackung in endlagerzugelassene Typ-II-Container bzw. MOSAIK-Behälter wurden auf der +10 m-Ebene des Reaktorgebäudes ein zusätzlicher Bereich mit Zerlege-, Verpackungs- und Interventionsraum eingerichtet sowie eine zusätzliche Lüftungsanlage mit einem Volumenstrom von 12.000 m³/h installiert.

Das durch diese Randbedingungen bestimmte Zerlegekonzept machte eine Strukturierung in die nachfolgend gelisteten fünf aufeinander folgenden Abschnitte erforderlich [2]:

1. Manuelle Demontage aller Komponenten oberhalb des RDB (Messleitungen, Steuerstabantriebe, etc.)
2. Fernbedienter, unzerlegter und trockener Ausbau der stabförmigen Einbauten (z. B. Absorberstäbe, Kühlkanäle), sowie Transport der Einbauten zur Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe und Nachzerlegung in der dortigen Zerlegestelle für mittelaktiven Abfall („MAW-Zelle“, middle active waste)
3. Fernbediente Demontage und Zerlegung an Luft mit einer Bandsäge des RDB-Deckels, des oberen Füllkörpers (Verdrängungskörper) und des Füllkörperringes

4. Fernbediente thermische Zerlegung des Moderatortanks und des Thermischen Schildes unter Wasser mittels Plasmaschneidverfahren

5. Fernbediente Demontage und Zerlegung der unteren Füllkörper sowie Zerlegung des Druckgefäßes an Luft mit der Bandsäge

RDB-Komponenten und Zerletechnik

Bedingt durch die Konstruktion des RDB war die Auswahl an einsetzbaren Zerletechniken stark eingeschränkt. Weiterentwicklungen etablierter Zerletechniken in Verbindung mit Spezialzerletechniken waren unverzichtbar.

Wegen der teilweise sehr hohen Aktivierung der RDB-Komponenten müssen thermische und mechanische Zerletechniken eingesetzt werden, die fernbedient von einem separaten, außerhalb

des Kontrollbereichs befindlichen Steuerstand gesteuert und überwacht werden.

Für die Demontage der stabförmigen Reaktoreinbauten wurden spezielle Demontage- und Transportvorrichtungen entwickelt, mit deren Hilfe die stabförmigen Reaktoreinbauten wie Kühlkanäle, Regelstäbe und deren Führungsrohre unzerlegt aus dem RDB gezogen und zur Nachzerlegung zur Hauptabteilung Dekontaminationsbetrieb transportiert werden konnten.

Die RDB-Komponenten wie RDB-Deckel sowie oberer und untere Füllkörper sind massive Bauteile aus ferritischen Werkstoffen mit austenitischen Plattierungen. Die Komponenten oberhalb des Reaktorkerns weisen dabei eine Vielzahl von Durchführungen für Kühlkanäle und Regelstäbe auf (Abb. 2). Diese Komponenten müssen unzerlegt demontiert und zum Zerle-

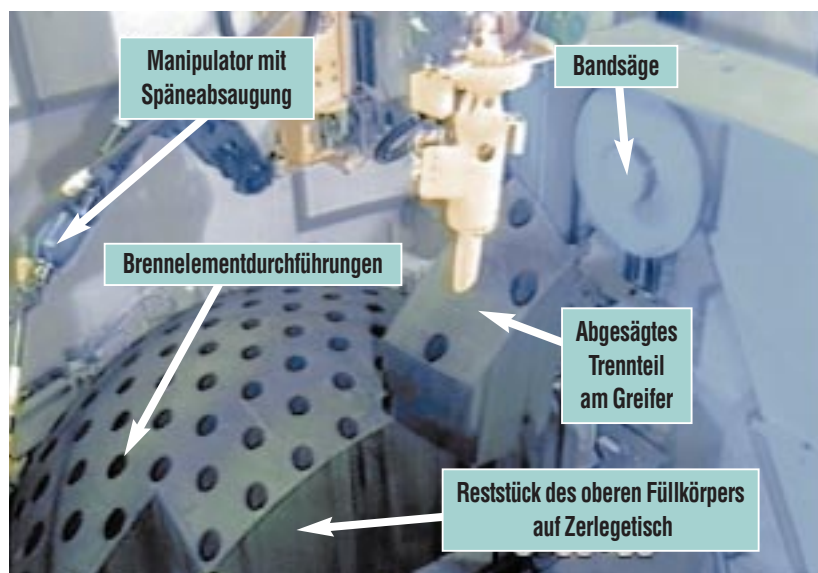


Abb. 2: Zerlegung des demontierten oberen Füllkörpers, der ursprünglich zwischen RDB-Deckel und Moderatortank montiert war und die Funktion eines Verdrängungs- und Abschirmkörpers hatte.

gebereich transportiert werden. Aufgrund der Aktivierung dieser Komponenten ist eine fernbediente Zerlegung notwendig. Als Zerlegeverfahren wurde das Sägen an Luft gewählt. Hierfür wurde eine am Markt verfügbare Bandsäge modifiziert und sicherheitstechnisch aufgerüstet (drehbares Sägeband, Sägebandkappvorrichtung, redundante Antriebe) so-

wie eine Späneabsaugung installiert.

Der Moderatortank als auch der Thermische Schild (s. Abb. 1) müssen aufgrund der hohen Aktivierung unter Wasser zerlegt werden [3]. Der Moderatortank ist ein rundum geschlossener Zylinder und eine der am höchsten aktivierten RDB-Komponente (s. Tab. 1). Der Thermische Schild ist ein aus fünf

Segmenten, so genannten „Schüssen“, aufgebauter offener Zylinder. Sein Durchmesser verringert sich im unteren Bereich stetig, während dort die Wanddicke von 70 mm auf 130 mm anwächst. Bedingt durch die engen Platzverhältnisse wird zur Unterwasserzerlegung ein fünffacher Werkzeugträger mit einer leistungsfähigen Steuerung für enge, geometrisch komplizierte Bereiche ein-

Zerlegeverfahren	Mechanische Demontage	Unzerlegte Demontage	Bandsäge		Plasmaschneidverfahren, CAMC, mech. Verfahren		Band-säge	Band-säge u. Autogenbrenner
	(manuell)	(fernbedient)	(fernbedient)		(fernbedient)		(fernbedient)	(fernbedient)
Verpackung	(Fässer, Konditionierung HDB *)	(Nachzerlegung HDB)	(KONRAD-Container Typ II Konditionierung HDB)		(MOSAIK + Typ II, Konditionierung HDB) oder direkte endlagergerechte Verpackung		(Typ II, Konditionierung HDB)	
Komponente	Messleitungen, Steuerstabantriebe	Absorber, Kühlkanal u.a.	RDB-Deckel	Oberer Füllkörper, Füllkörper-ring	Moderatortank	Therm. Schild	Unterer Füllkörper (2-teilig)	RDB-Unterteil (Druckgefäß)
Werkstoff	Austenite, Ferrite	Austenite, Zirkaloy	Ferrit plattiert	Ferrite plattiert	Austenit	Austenit	Ferrite plattiert	Ferrit plattiert
Gesamtaktivität (Co-60) [Bq]	2,0 E 11 (3,3 E 11)	2,2 E 14 (4,1 E 13)	2,3 E 11 (1,6 E 10)	7,2 E 12 (6,1 E 11)	7,9 E 15 (7,7 E 13)	9,8 E 12 (7,1 E 12)	2,9 E 13 (5,7 E 12)	3,4 E 13 (6,2 E 11)
Masse [Mg]	17	70	71	65	22	30	35	101
Zerlegezeitraum	Dez. 1999 – Jan. 2000	Apr. - Sept. 2000	Apr. - Okt. 2002	Dez. 2002 - Juli 2003	Sept. 2004 - Juni 2005	Juli - Nov. 2005	Jan. - Juni 2006	2007

*) HDB: Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe

Tab.1: RDB-Komponentenweisen, Daten und Fakten.

Grau: Unzerlegtes Ziehen der Einbauten, Nachzerlegung bei HDB;

Gelb: Zerlegung an Luft und Verpackung in endlagerfähige Container, Konditionierung bei HDB;

Blau: Fernbediente Unterwasserzerlegung, Konditionierung bei HDB oder direkte endlagergerechte Verpackung im MZFR.

gesetzt, der an einem in der Höhe verfahrbaren Schlitten montiert ist. Der Schlitten fährt an einem Mast, welcher in den RDB hineinragt und an einem Katzfahrwerk montiert ist, das in eine drehbare Brücke eingesetzt ist. Damit weist die Gesamtkinematik insgesamt acht Freiheitsgrade auf.

Mit Hilfe des Werkzeugträgers und einer Hochleistungsplasma-schneidanlage konnte der Moderator-tank und der Thermische Schild in beliebig große Teile zerlegt werden [4]. Der modular aufgebaute Hochleistungsbrenner mit Schnellwechselkopf (Abb. 3) wurde kombiniert mit einem Taster zum Teachen der Stützpunkte der jeweiligen Schneidbahn. Die Generierung der Schneidbahn erfolgte mit einer leistungsfähigen Steuerung. Bei der Zerlegung wurde die gespeicherte Schneidbahn im Automatikmodus abgefahren. Die Plasmaschneidtechnologie stieß am unteren Schuss des Thermischen Schildes jedoch an ihre verfahrensspezifischen Grenzen.

Für diesen Bereich wurde ein weiteres thermisches Verfahren in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover, Institut für Werkzeug-technik, qualifiziert: das Contact-Arc-Metal-Cutting, kurz (CAMC)-Verfahren [5]. Unter Nutzung eines Hochstromlichtbogens wird mit einer Graphitelektrode elektrisch leitendes Material aufgeschmolzen und die Schmelze von einem Hochdruckwasserstrahl weggespült. Der Elektrodenhalter wird an Stelle des Plasmabrenners am Werkzeugträger adaptiert. Ergänzend zur thermischen Unterwasserzerlegung wurden eine

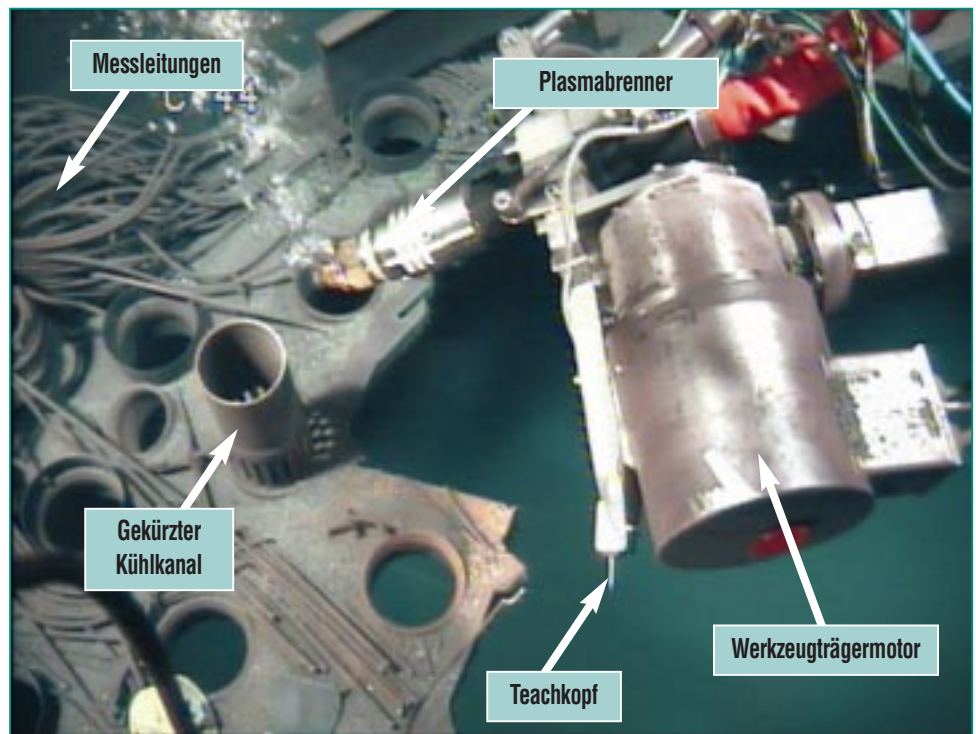


Abb. 3: Moderator-tank während der fernbedienten Zerlegung unter Wasser mit einem neu entwickelten Hochleistungsplasmabrenner

Hydraulikscherer und ein Unterwasser-trennschleifer eingesetzt.

Für den Transport der Komponenten und Zerlegeteile wurden Handhabungseinrichtungen wie Kräne und Manipulatoren installiert, die für spezifische Aufgaben mit besonderen Greifern ausgerüstet werden konnten.

Zur Kontrolle und Überwachung aller Arbeiten waren die Installation einer umfangreichen Videotechnik und Strahlenschutzinstrumentierung erforderlich.

Randbedingungen und Erschwernisse der RDB-Zerlegung

Der Rückbau einer Prototypanlage aus den 60er Jahren bringt vielerlei Erschwernissen mit sich. Know-how-Verlust des betreibenden Per-

sonals ist aus Altersgründen unvermeidbar. Eine unvollständige Anlagendokumentation erschwert die Planung.

Speziell bei der RDB-Zerlegung hatten die rückbauenden Spezialisten eine Vielzahl von Schwierigkeiten zu bewältigen. Nur einige hiervon sind nachfolgend aufgeführt.

- Enge räumliche Gegebenheiten im Reaktorgebäude bestimmten die Zerlegeteilgröße und damit das Verpackungskonzept.
- Stabförmige, dünnwandige Komponenten verformten sich im Neutronenfeld; einige waren nicht unzerlegt zu ziehen und mussten alternativ zerlegt werden (Abb. 4).

- Plattierung bei den massiven Komponenten lösten sich während des Sägevorgangs ab. Verklemmungen des Sägebandes waren die Folge.
- Geringe Fugenspalte mit Sedimenten aus der Betriebszeit erhöhten die Anforderungen an die einzusetzenden Trenn-

verfahren: Der Einsatz des Unter-Wasser-Plasmaschmelzscheidens stieß bei Wanddicken von 130 mm in acht Metern Wassertiefe und geringen Fugenspalten (= Freiräume für Schmelzmaterial) an verfahrensspezifische Grenzen, sodass hier die als Backup-Verfahren qualifizierte CAMC-Schneidtechnologie eingesetzt werden musste (Abb. 5).

- Sichttrübungen durch aufgewirbelte Sedimente und Algenwachstum machten Zusatzmaßnahmen zur Wasserreinigung erforderlich.

Um bei der RDB-Zerlegung dem Minimierungsgebot nach Strahlenschutzverordnung Rechnung zu tragen, wurden beispielsweise folgende, sich bewährende Maßnahmen getroffen:

- Kalterprobung aller Zerlege-, Hantierungs- und Verpackungsvorgänge (Abb. 6)
- Ausarbeitung von Berge-, Interventions- und Reparaturkonzepten

- Herstellung eines neuen, direkten Zuganges zum Zerlegeraum für Wartungs- und Interventionsarbeiten
- Erhöhung der abschirmenden Wasserüberdeckung um 1,5 m durch Installation einer Schürze auf dem RDB-Flansch

Schrittweise Zerlegung des RDB bedeutet: Sukzessive Verringerung des Gesamtaktivitätsinventars der MZFR-Anlage

Für die RDB-Zerlegung wurden intensive Vor- und Detailplanungen erforderlich. In Kooperation mit den industriellen Partnern von Studsvik®-IFM, RWE-Nukem und IABG wurde und werden die anspruchsvollen Aufgaben sicher gemeistert.

Unmittelbar nach Genehmigungserteilung im Januar 1999 wurde die Baustelleneinrichtung durchgeführt. Ein Überblick über die einzelnen Abschnitte der RDB-Zerlegung gibt Tab. 1.

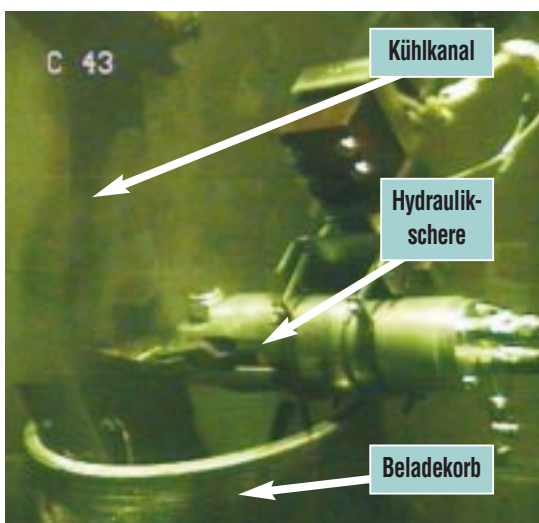


Abb. 4: Zersplitterung eines in vorangegangenen Demontagephasen nicht zerlegt demontierbaren Kühlkanals während der alternativen mechanischen Unterwasser-Zerlegung mit einer Hydraulikschere



Abb. 5: Einsatz des Contact-Arc-Metal-Cutting-(CAMC)-Zerlegeverfahrens für die Zerlegung des untersten Schusses des Thermischen Schildes. Linkes Bild: Beginn der Zerlegung. Rechtes Bild: vollständiger Trennschnitt nach ca. drei Stunden Schneiddauer und anschließender achtstündiger Wasserreinigung.

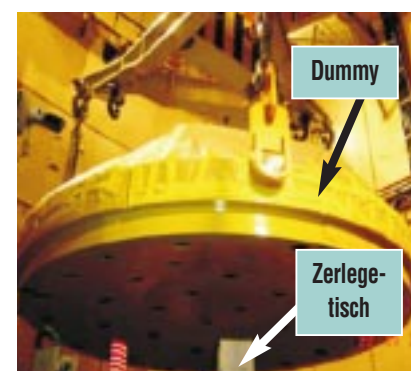


Abb. 6: Erprobung aller Demontage-, Transport- und Positionierungsvorgänge mit Hilfe von 1:1-Modellen (abgebildet: „Dummy“ oberer Füllkörper).

Als wesentliche Maßnahme zur Erhöhung der Systemverfügbarkeit und der Zuverlässigkeit haben sich die umfangreichen Erprobungen erwiesen (Abb. 6). Die im Testfeld durchgeführten Schritte in Entwicklung, Modifizierung, Optimierung und Qualifizierung der Zerlegeeinrichtungen, der Einsatz von Dummies mit Originalabmessungen und vergleichbaren Werkstoffen sowie die Erprobung und Abnahme im Beisein des Gutachters ermöglichten die zielgerichtete schrittweise Zerlegung des RDB.

Ausblick

Die Zerlegung des RDB wird bis Ende 2007 abgeschlossen sein. Ungefähr 400 Mg mit einer Gesamtaktivität von ca. 10^{16} Bq werden dann in je 100 Typ-II-Container und MOSAIK-Behälter endlagergerecht verpackt sein.

Zeitgleich sind in den Jahren 2006 und 2007 Erprobungen zum Abbau des aktivierten Bereiches des Biologischen Schildes geplant.

Die Genehmigung für die Durchführung des achten Schrittes wird kurzfristig erwartet, so dass ab 2008 die folgenden Arbeiten durchgeführt werden sollen:

- Fernbedienter Abbau aktivierter Teil Biologischer Schild

- Ausbau tritiumhaltiger Betonstrukturen (Reaktorgebäude)
- Sukzessive Demontage aller Systeme und Einrichtungen
- Dekontamination und Freimessung der Gesamtanlage
- Entlassung der Anlage aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes (AtG)
- Konventioneller Abriss der Gebäude

Zusammenfassung

Mit dem Entschluss zum vollständigen Rückbau des MZFR wagte sich das Forschungszentrum Karlsruhe auf ein damals unbekanntes Terrain vor. Von Anfang an war die Kompetenzerhaltung bei Eigen- und Fremdpersonal zur Durchführung dieses Rückbauprojektes von großer Bedeutung.

Bei dem Rückbau des MZFR hat sich die Bildung eines festen Stammes regionaler Fachplaner bewährt. Die straffe Bauleitung, Rückbau- und Betriebsführung unter Einbeziehung dieser Fachplaner ermöglichen ein konsequentes Abarbeiten der anstehenden Aufgaben.

Die eingesetzten Zerlegetechniken basieren auf industrieprobten Verfahren, um eine hohe Ver-

fügbare zu erzielen und eine optimierte Ersatzteilhaltung zu ermöglichen. Ergänzt werden diese durch Speziallösungen für die Zerlegung hoch aktivierter Reaktoreinbauten und -komponenten. Sowohl der Einsatz der Plasma- als auch der CAMC-Technologie sind einzigartig in dieser eingesetzten Leistungsklasse.

Stilllegungsverzögerungen konnten durch Risikobetrachtungen und intensive Erprobungen minimiert werden.

Die enge Einbindung von Gutachter und Behörde in Stilllegung und Restbetrieb wirkte sich positiv auf die Abwicklung des Projektes aus.

Literatur

- [1] L. Valencia, E. Prechtl, „Die Beseitigung des Kernkraftwerkes Niederaichbach bis zur ‚Grünen Wiese‘“. Abschlussbericht Forschungszentrum Karlsruhe (1995)
- [2] E. Prechtl, W. Demant, *Nachrichten des Forschungszentrums Karlsruhe Jahrgang 33, 3/2001, S. 245 ff.*
- [3] E. Prechtl, B. Eisenmann, *Tagungsband KONTEC 2005, Berlin, S. 204 ff.*
- [4] A. Loeb, *Jahrestagung Kerntechnik 2005, Nürnberg*
- [5] D. Stanke et al., *atw, Internationales Journal for Nuclear Power, March 2006, S. 170 ff.*

Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR): Rückbau des Reaktordruckbehälters in Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe, Hochschule und Industrie

P. Hildwein, RWE NUKEM GmbH

Einleitung

Der Mehrzweckforschungsreaktor MZFR ist ein Druckwasserreaktor, der von 1965 bis in die 1980er Jahre im Forschungszentrum

Karlsruhe zur Erprobung der Schwerwasser-Reaktorlinie betrieben wurde (Abb. 1).

Der MZFR besaß eine thermische Leistung von 200 MW. Während

des 19-jährigen Betriebes diente die Anlage vorrangig der Gewinnung von Betriebserfahrung mit einem D₂O moderierten/gekühlten Reaktor sowie der Erprobung von Brennelementen und der Untersuchung von Werkstoffen für diese Reaktorlinie. Im Mai 1984 wurde der Reaktor abgeschaltet.

Der Rückbau der Anlage erfolgt in acht einzelnen Schritten. Sechs dieser Schritte wurden bis 2002 abgeschlossen. 1997 wurde im Rahmen des siebten Rückbauschrittes die Demontage des Reaktordruckbehälters mit seinen Einbauten an ein Industriekonsortium unter Führung der RWE NUKEM vergeben. Das zur Zerlegung der Reaktortankeinbauten benötigte Equipment war teilweise nicht am Markt verfügbar und wurde deshalb in einer Kooperation zwischen Forschungszentrum, Hochschule und Industrie entwickelt.

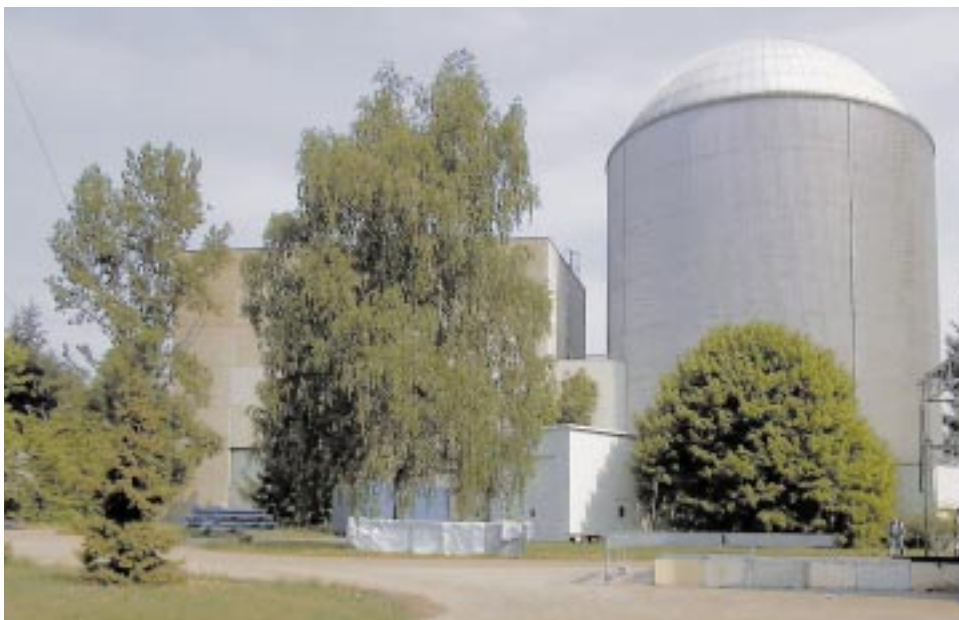
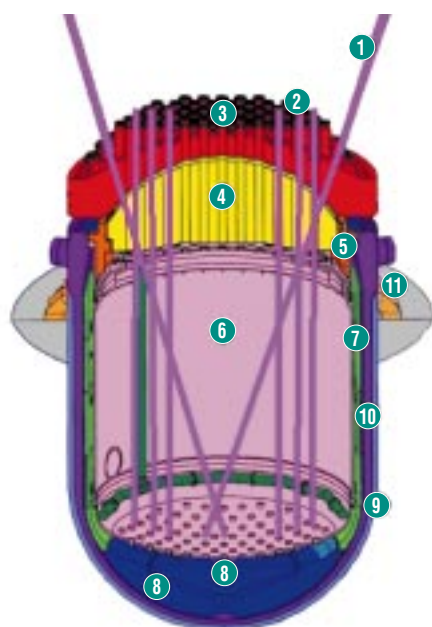


Abb. 1: Mehrzweck-Forschungsreaktor MZFR

Der Reaktordruckbehälter mit Einbauten

Der Reaktortank des MZFR (ca. 4,5 m Flanschdurchmesser, ca. 7,5 m Höhe) besitzt eine nicht alltägliche Innenstruktur: im eigentlichen Reaktordruckbehälter befindet sich ein zweiter, innerer Tank, der so genannte „Moderatorbehälter“. An die 70 „stabförmige Komponenten“ (ehemalige Rohre zur Aufnahme der Brennelemente), sind von oben durch den Tankdeckel und durch die Kalotte des Moderatorbehälters bis auf dessen Boden hinab geführt (Abb. 2) und vervollständigen das charakteristische Design des Reaktors.

Zwischen Oberseite des Moderatorbehälters und Deckel des Reak-



- 1 Absorber (18)
- 2 Kühlkanäle (121)
- 3 RDB-Deckel
- 4 Oberer Füllkörper
- 5 Füllkörperring
- 6 Moderatorbehälter mit Fall- und Ringleitung
- 7 Thermischer Schild
- 8 Untere Füllkörper
- 9 RDB-Isolierung
- 10 Druckbehälter
- 11 RDB-Tragring

Abb. 2: Reaktortank mit Einbauten

tortanks liegt ein massiver Verdrängungskörper (oberer Füllkörper).

Ein ungefähr 70 mm starkes „Thermisches Schild“, erstreckt sich entlang des zylindrischen Teiles zwischen Reaktortankwand und Moderatorbehälter. Im unteren Teil geht das Thermische Schild in einen 130 mm starken, gekrümmten Bereich über und schließt an die am Boden des Reaktortanks liegenden „unteren Füllkörper“ an.

Folgende Reihenfolge wurde für die Zerlegung des Reaktortanks festgelegt:

- Ausbau der stabförmigen Komponenten
- Lösen und Zerlegen des Reaktordeckels
- Ziehen und Zerlegen des oberen Füllkörpers
- Zerlegung des Moderatorbehälters
- Zerlegung des Thermischen Schildes
- Ziehen und Zerlegen der unteren Füllkörper
- Zerlegung des Reaktordruckbehälters

Randbedingungen für die Zerlegung

Sämtliche zu demontierenden Komponenten des Reaktortanks sind stark kontaminiert und zum großen Teil wegen der langen Reaktorbetriebszeit auch stark aktiviert. Aus diesem Grunde müssen fast alle Arbeiten fernbedient ausgeführt werden. Lediglich zu Umbau-, Wartungs- oder Interventionszwecken ist ein Zutritt zur Reaktorebene vorgesehen.

Auch die weitere Handhabung abgetrennter oder vorzerlegter Teile, wie zum Beispiel die Nachzerlegung auf transportgerechte Größe oder die Verpackung in Abfallgebinde geschehen aus radiologischen Gründen fernbedient.

Alle Zerlege- und Verpackungsarbeiten werden von einem Steuerstand aus durchgeführt und kontrolliert. Der Steuerstand ist außerhalb des Kontrollbereiches ca. 30 m entfernt vom eigentlichen Ort des Geschehens installiert. Bis zu 50 Video-Einrichtungen überwachen von hier aus die Abläufe vor Ort.

Elektronische Steuereinrichtungen und Datenerfassungssysteme dienen zur Ausführung und Auswertung aller Hantierungsvorgänge.

In der so genannten „Trockenzerlegung“ werden folgende Arbeiten ausgeführt:

- Ausbau der stabförmigen Komponenten
- Zerlegung des Reaktordeckels und der Füllkörper, sowie die
- Zerlegung des eigentlichen Reaktortanks

Die technisch anspruchsvollsten Arbeiten fallen in die „Nasszerlegung“. Die Arbeiten in dieser Phase wurden wegen der hohen Dosisleistung der Komponenten unter Wasser durchgeführt. Hierzu zählen:

- Der Ausbau von Reststrukturen, wie z. B. von Messleitungen und so genannten „Trennröhren“ oberhalb und innerhalb des Moderatorbehälters
- Die Zerlegung des Moderatorbehälters und

- Die Zerlegung des Thermischen Schildes

„Ausbau unter Wasser“ bedeutet, dass die Komponenten innerhalb des Reaktortanks in ihrer Einbaulage bei geflutetem Reaktorbehälter zerlegt werden mussten.

Entwicklungsbedarf

In der Trockenzerlegung konnte auf Einrichtungen und Maschinen zurückgegriffen werden, die am Markt verfügbar waren oder die zumindest ohne zusätzliche Entwicklungsarbeit konstruiert und gefertigt werden konnten.

Dies war bei der Unterwasser-Zerlegung anders. Zwar war mit der vom Forschungszentrum Karlsruhe getroffenen Festlegung auf das Plasmaschneiden als Hauptzerlegungsverfahren grundsätzlich ein im Unterwassereinsatz bekanntes Verfahren ausgewählt worden, jedoch lagen am MZFR technische Randbedingungen vor, die mit den am Markt verfügbaren Geräten nicht geleistet werden konnten.

Hier kam es zu einer Überlagerung von Einflüssen durch die Wassertiefe, die Materialstärke und durch geometrische Besonderheiten wie zum Beispiel Doppelwandstrukturen.

Die sich daraus ergebende Situation bedurfte einer gemeinsamen Anstrengung durch Forschung und industrieller Entwicklung, um letztendlich Trennverfahren einsetzen zu können, mit denen die Zerlegung der unter Wasser befindlichen Bauteile des MZFR-Reaktortanks zuverlässig durchgeführt werden konnte.

Entwicklung und Erprobung des Manipulator-Trägersystems

Eine grundsätzliche Anforderung an jedes, bei der Unterwasser-Zerlegung einzusetzende Schneidverfahren besteht darin, das Schneidwerkzeug (hier die Düse des Plasmaschneiders) exakt zur Oberfläche des Werkstückes zu positionieren und mit ihm die Kontur des geplanten Schnittes abzufahren. In der Praxis hat man es hier vielfach nicht mit einer Werkzeugführung in der Ebene (flache Geometrie, linearer Schnittverlauf) zu tun, sondern mit gekrümmten Geometrien, die Störkanten aufweisen und zum Teil schlecht einsehbar sind. In solchen Situationen ist der Einsatz eines Mehrachsen-Manipulators sinnvoll, der das Trennwerkzeug trägt. Der Manipulator muss seinerseits auf einem Manipulatorträger montiert werden, um ihn an die Schneidposition heranzufahren zu können.

Aus diesen Anforderungen ergab sich ein relativ komplexes Hantierungssystem, bestehend aus Manipulatorbrücke, drehbarer Manipulatorbühne und Manipulator-Trägersystem.



Abb. 3: Manipulatorbrücke mit Aufbauten

Die Manipulatorbrücke ist oberhalb des Reaktortanks positioniert. Sie stützt sich auf der Betonstruktur des Bioschildes ab. Auf diese Brücke ist eine drehbare Bühne aufgesetzt, von der aus ein verlängertbarer Mast mit Rechteckprofil nach unten in den Reaktortank abgehängt wurde. Entlang des Mastes kann auf einer Schlitzenführung der Manipulatorträger zugestellt werden. Mit Hilfe dieser Konstruktion konnte im Prinzip jede Position innerhalb des Reaktortanks mit dem Trennwerkzeug angefahren werden.

Die Entwicklung der Software zur Steuerung des 5-achsigen Manipulators war mit einem besonderen Aufwand verbunden, weil unter den vorliegenden Einsatzbedingungen der Plasmaschneider im Bereich sehr enger Toleranzen geführt werden musste. Zur Lösung dieser Problematik war eine enge Kooperation mit hochspezialisierten Industrieunternehmen erforderlich.

In der Praxis wurde die geplante Schneidbahn des Brenners zunächst in einem als „Teachen“ bezeichneten Vorgang abgefahren. Dieser Vorgang, der manuell gesteuert wurde, diente der exakten Ermittlung der Bahnparameter. Der anschließende Schneidvorgang folgte damit exakt der zuvor programmierten und überprüften Bahn und stellte damit u. a. auch sicher, dass Kollisionen mit Störkanten ausgeschlossen werden konnten.

Der komplette Brückenmanipulator mit Mast, Manipulatoren, Brenner und Steuerungseinrichtung wurde vor Auslieferung an den MZFR in einem umfangreichen Kalterprobungsprogramm im Un-

terwasserteststand des Versuchsa-
tomkraftwerkes Kahl (VAK) er-
probt (Abb. 3).

Entwicklung und Erprobung der Plasmaschneidanlage

Wie schon erwähnt, war bei Projektbeginn keine für die Aufgabenstellung am MZFR geeignete Plasmaschneidanlage am Markt verfügbar. Die Ertüchtigung vorhandener Systeme verlief zunächst erfolglos. Die Hauptprobleme, die zu lösen waren, resultierten aus der am Thermischen Schild vorliegenden großen Wandstärke (70 bis 130 mm), der geringen Spaltweite (10 bis 20 mm) zwischen Thermischem Schild und Reaktordruckbehälter und der großen Wassertiefe von bis zu 7 m.

Geringe Spaltbreiten erzeugen einen Staudruck im Plasmagas und behindern den Austrag der Schmelze aus der Schneidfuge. Beide Effekte können den Schneidprozess so stark beeinträchtigen, dass der Plasmabogen abreißt und der Schneidvorgang zum Erliegen kommt. Diese Effekte sind um so ausgeprägter, je dicker das zu schneidende Material wird.

Abhängig von Materialstärke und Wassertiefe ergaben sich auch starke Abhängigkeiten zwischen Gaszusammensetzung und Schneidleistung. Auch diesbezüglich gab es zunächst keine verlässliche am Markt verfügbare Lösung.

Im Verlauf der weiteren Erprobung wurde auch schnell deutlich, dass es für die Zerlegung des Thermischen Schildes neben dem Plasmaschneiden eines weiteren Zer-

legeverfahrens bedurfte, um insbesondere die Schnitte im untersten Ende des Thermischen Schildes ausführen zu können.

Wegen dieser schnell erkannten Problematik kam es zu einer gemeinsamen Entwicklungsarbeit zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe, der Industrie (RWE NUKEM, Kjellberg) und dem Unterwasser-Technikum (UWT) der Universität Hannover. Dazu wurde folgende Aufgabenverteilung vereinbart:

● **Forschungszentrum Karlsruhe:**

Finanzierung des Vorhabens, Beistellung der Geräte, gutachterliche Begleitung

● **UWT Hannover:**

Grundlagenermittlung, Basisentwicklung, Vorerprobung im Unterwasser-Becken

● **Industrie (RWE NUKEM):**

Umsetzung der Entwicklung in einsatzfähige Geräte, Kalterprobung und Funktionsnachweis in den Testständen VAK und MZFR

Schwerpunkte bei der Weiterentwicklung der Plasmaschneidanlage bildete die Leistungssteigerung durch eine parallel betriebene 900-A-Stromquelle, eine druckgesteuerte Gasmengenregelung sowie ein modulares Brennersystem mit fernhantierbarer Wechselmöglichkeit der Düse.

In nur 18 Monaten Entwicklungszeit gelang es, ein einsatzfähiges System zu entwickeln, zu erproben und am MZFR zum Einsatz zu brin-



Abb. 4: Plasmaschneider mit Trägersystem

gen. Die jetzt verfügbare Anlage ist in der Lage, Materialstärken von bis zu 120 mm problemlos auch in 10 m Wassertiefe zu schneiden (Abb. 4).

Entwicklung des CAMC-Verfahrens

Wie beschrieben, stieß das Plasmaschneiden unter den am MZFR vorhandenen Bedingungen ab Wandstärken von 130 mm an seine Anwendbarkeitsgrenze. Um die Mantelschnitte im unteren Bereich des Thermischen Schildes ohne Risiko ausführen zu können, wurde beschlossen, die Trennschnitte in dieser Zone mit dem so genannten CAMC-Verfahren (Contact Arc Metal Cutting) auszuführen.

Hierfür konnten die am Markt verfügbaren Systeme nicht eingesetzt werden. Bekannte Systeme benötigten Stromstärken von ca 7 kA, verursachten dadurch erhebliche EMV-Probleme und konnten nur mit sehr aufwendigen und teuren Elektroden betrieben werden.

Auch dieses Verfahren wurde in der oben genannten Kooperation zur Einsatzreife weiterentwickelt.

Die so entstandene Neuentwicklung kommt mit Stromstärken von

0,5 kA aus und läßt sich mit preiswerten Elektroden betreiben. Elektromagnetische Störeffekte spielen wegen der deutlich reduzierten Stromstärke keine Rolle mehr.

Entwicklung eines Hochleistungs-Trennschleifers für Unterwasser-Einsatz

Da zunächst nicht sicher schien, dass die Weiterentwicklung des CAMC zeitgerecht abgeschlossen sein würde, wurde parallel zum CAMC ein mechanisches Verfahren entwickelt, das im Bedarfsfall für den unteren Schuss des Thermischen Schildes hätte eingesetzt werden können. Dazu wurde ein Unterwasser-Trennschleifer durch die Kooperationspartner entwickelt. Der Trennschleifer musste in der Lage sein, ohne Blattwechsel einen kompletten Schnitt am unteren Ende des Thermischen Schildes ausführen zu können. Die Entwicklung umfasste den hydraulischen Antrieb, Auswahl und Erprobung der geeigneten Trennscheiben sowie die Demonstrationsversuche mit Gutachterabnahme am MZFR-Teststand. Zum Einsatz kam dieses Gerät nicht, weil die Entwicklung des CAMC rechtzeitig abgeschlossen werden konnte und sich der untere Schuss des Thermischen Schildes reibungslos mit CAMC zerlegen ließ.

Resumée einer erfolgreichen Kooperation

Die erfolgreich praktizierte Kooperation zwischen Forschungszentrum Karlsruhe, Hochschule und Industrie ermöglichte es, dass innerhalb weniger Monate technisch ausgereifte Verfahren ent-

wickelt wurden, mit denen in 14 Monaten der Moderatorbehälter mit Einbauten und das Thermische Schild des MZFR erfolgreich zerlegt werden konnten.

Der komplette Moderatorbehälter und der überwiegende Teil des Thermischen Schildes wurden dabei mit der Plasmaanlage in Segmente geschnitten. Erwähnenswerte Störungen traten beim Einsatz der Plasmaanlage nicht auf. Die Anlage hat sich als technisch ausgereift und damit als industriell einsetzbar erwiesen.

Das CAMC-Verfahren wurde genutzt, um den unteren, 130 mm starken Ringschuss des Thermi-

schen Schildes, in Einzelsegmente zu trennen (Abb.5). Auch mit dieser Anlage gab es keine technischen Probleme. Das Verfahren eignet sich hervorragend zur Ausführung von Materialschnitten an dickwandigen Geometrien. Es

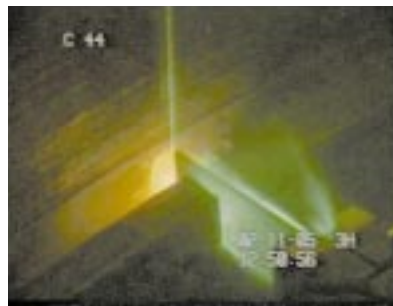


Abb. 5: CAMC-Schnitt am Thermischen Schild

zeichnet sich jetzt durch sein robustes Design und seine einfache Handhabungsweise aus.

Diese Beispiele zeigen, dass die eingegangene Kooperation zwischen Forschungszentrum Karlsruhe, Hochschule und Industrie nicht nur lang- oder mittelfristig zu Erfolgen führen kann, sondern, wenn die Situation es erfordert, innerhalb kürzester Zeit Problemlösungen ermöglicht und technisch ausgereifte Produkte zu generieren vermag, die sich ohne weitere Entwicklung zum Einsatz in ähnlichen Projekten eignen.

Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) – Stand des Projektes

K. Brockmann, HAP

Einleitung

Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) war ein Versuchsreaktor mit einer elektrischen Leistung von 20 MW. Er diente zur großtechnischen Erprobung des Kühlmittels Natrium in einer Kernreaktoranlage und zur Erprobung von Brennelementen für den Schnellen Brüter SNR300 in Kalkar.

Als 1991 die Brüterentwicklung und die Wiederaufarbeitung in der Bundesrepublik Deutschland eingestellt wurden, kam es auch zum Beschluss, die KNK abzubauen. Dies soll in 10 Schritten (Atomrechtliche Genehmigungen nach §7 Absatz 3 AtG) erfolgen.

Die Arbeiten zu den ersten acht Genehmigungen sind abgeschlossen und an der neunten Genehmigung, die den Abbau hoch aktivierter Teile des Reaktortanks und des biologischen Schildes beinhaltet, wird zurzeit gearbeitet.

Im Nachfolgenden werden wesentliche Meilensteine bei der Stilllegung der KNK an Beispielen beschrieben.

Aufbau des KNK

Der Aufbau des Natriumgekühlten Brüters KNK hatte einige Besonderheiten, die zunächst kurz beschrieben werden.

Das Kühlmittel Natrium erforderte besondere Beachtung, da es im flüssigen Zustand ($> ca. 100\text{ °C}$) unter Luft brennt und mit Wasser heftig zu Natronlauge reagiert.

Im **Reaktorgebäude** waren folgende Einrichtungen:

- **Reaktortank** mit den Brennelementen. Hier wurde das



Abb. 1: Die KNK während des Betriebes.

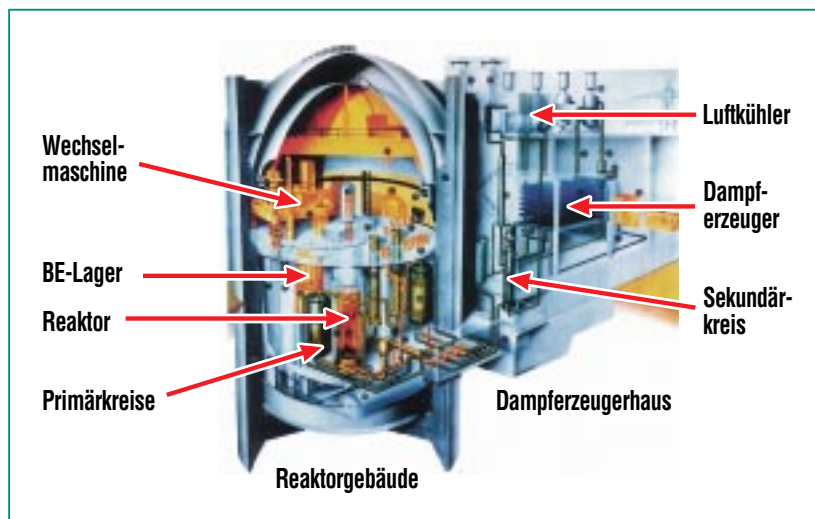


Abb. 2: Anordnung der Natrium-Systeme.

Natrium von 360 °C auf ca. 520 °C aufgeheizt.

- **2 Primärkreisläufe** mit Pumpen und Zwischenwärmetauscher zum Abtransport der Wärme.
- **Lager** für abgebrannte Brennelemente.
- **Wechselmaschine** zum Be- und Entladen der Brennelemente.

- **Primärreinigungs- und Ablasssystem** zum Reinigen und Zwischenlagern des Natriums.

Im **Dampferzeugerhaus** war das Sekundär-Natrium-System mit den Dampferzeugern und dem Luftkühler zur Nachwärmeabfuhr angeordnet.

Im **Maschinenhaus** war der Wasserdampfkreislauf mit der Turbine und dem Generator angeordnet.

Arbeiten unter der Betriebsgenehmigung

Der Stilllegungsbeschluss 1991 kam so überraschend, dass es kein Konzept und keine Genehmigung die KNK abzubauen, gab.

So wurde unter der Betriebsgenehmigung zunächst mit dem Abtransport der Brennelemente bei der abgebrannten Kerne begonnen. In Abb. 3 wird die Handhabung der Brennelementtransportflasche beim Ausschleusen aus dem Reaktorgebäude gezeigt.

Parallel wurde ein Stilllegungskonzept erarbeitet und mit der Aufsichtsbehörde abgestimmt. Danach wurde dann die erste Stilllegungsgenehmigung beantragt und erteilt.



Abb. 3: Handhabung von Brennelementen.

1. Stilllegungsgenehmigung

Nachdem die Brennelemente aus dem Reaktortank entladen waren, konnte mit dem Abbau des Wasserdampfkreislaufes im Maschinenhaus begonnen werden.

Der komplette Kreislauf einschließlich Turbine und Generator wurde nach Indien verkauft.

2. Stilllegungsgenehmigung

Die 2. Stilllegungsgenehmigung war gleichzeitig die 5. Genehmigung am Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR), da beide eine gemeinsame äußere Umschließung hatten.

Sie umfasste den Abbau aller äußeren Objektschutzmaßnahmen wie z. B. Objektschutzzaun und Objektschutzpersonal. Hierdurch konnten erhebliche Kosten eingespart werden.

3. Stilllegungsgenehmigung

Bei der Entsorgung des Natriums wurde mit dem Sekundärnatrium begonnen, das nur mit Tritium kontaminiert war. Hierzu wurde eine Natrium-Abfüllstation errichtet, in der vier 200-l-Fässer nacheinander mit Natrium unter Inertgas befüllt werden konnten. Das 200 °C warme Natrium wurde mit einer elektromagnetischen Pumpe vom Ablassstank in einen Dosierbehälter gepumpt und dann in das inertisierte Fass gefüllt. Die Fässer wurden in Containern nach Schottland transportiert, wo das Natrium zu Natronlauge umgesetzt wird.

4. Stilllegungsgenehmigung

In dieser Genehmigung wurden folgende wesentliche Maßnahmen durchgeführt:

- Entsorgung des Primärnatriums

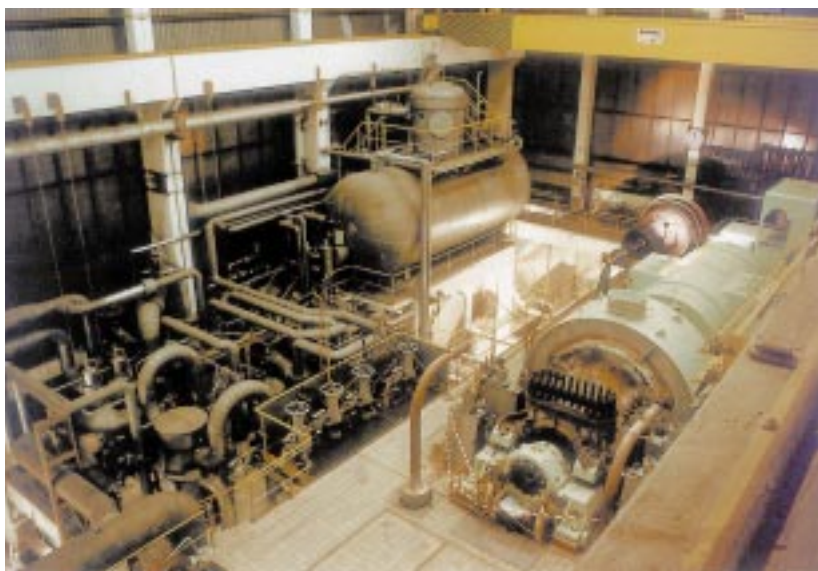


Abb. 4: Maschinenhaus.

- Abbau der Brennelement-Wechselmaschine
- Abbau des Kamins
- Auflösung der Wechselschicht.

Zunächst wurde mit der Entsorgung des Primärnatriums begonnen. Es wurde die gleiche Technik wie beim Sekundärnatrium verwendet. Sie wurde jedoch im Reaktorgebäude auf der Fahrbahnebene aufgebaut. Wegen der erhöhten Strahlung durch Cs-137 im Primärnatrium mussten zusätzlich Abschirmungen angebracht werden. Das Natrium musste vom Ablasstank 12 m hoch gepumpt werden.

Um genügend Platz auf der Fahrbahnebene zu haben, wurde zunächst der Teil der Wechselmaschine abgebaut, der sich oberhalb der Fahrbahnebene befand. Hier wartete eine besondere Herausforderung, da die Rohre der Argonkühlkreisläufe mit Natriumaerosolen belegt waren, die chemisch besonders reaktiv sind.

Nachdem das Natrium entsorgt und ein Störmeldesystem installiert war, konnte der Betrieb in Wechselschicht aufgehoben werden. Dies bedeutete, dass anstatt der sechs Schichten während des Betriebes (mit Freischicht und Ausbildungsschicht) nur noch eine Schicht vorhanden sein musste.

Außerhalb der normalen Tagschicht werden nun sicherheitstechnisch wichtige Signale der Anlagenüberwachung auf die Alarmzentrale des Forschungszentrums geschaltet.

Als letzter wesentlicher Schritt in dieser Genehmigung konnte der Kamin abgebaut werden. Hierzu

wurde im Genehmigungsantrag gezeigt, dass nach der Entsorgung des Natriums keine Störfälle mehr auftreten können, die einen Kamin erfordern. Der Kamin wurde in drei Schüssen abgebaut. Er wurde jeweils oberhalb der Abspannseile getrennt und dann der Schuss heruntergehoben.

5. Stilllegungsgenehmigung

In dieser Genehmigung wurden im Wesentlichen das Sekundär-Natrium-System und der Kühlturm abgebaut.

Der Kühlturm wurde nach der Trennung von der restlichen Anlage konventionell abgebaut.

Außerdem wurde das komplette Sekundär-Natrium-System im Dampferzeugerhaus abgebaut und die Komponenten vom Natrium gereinigt.

Zum Reinigen wurden die Komponenten und Rohrleitungen zersägt und auf einem Waschplatz im Freien der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, bis das Natrium abreagiert war. Zur Sicherheit wurden die zersägten Komponenten anschließend in ein Wasserbecken getaucht.

6. Stilllegungsgenehmigung

Nachdem die Elektroversorgung dem erforderlichen Stand des zukünftigen Energiebedarfes angepasst war, konnten die alten Transformatoren abgebaut werden. Gleichzeitig wurden in diesem Schritt alle Notstromdiesel abgebaut.



Abb. 5: Primär-Natrium-Abfüllstation.



Abb. 6: Zerlegen des Ablasstankes.

Danach wurden folgende Gebäude komplett abgerissen:

- Wasseraufbereitung
- Notdieselhaus
- Maschinenhaus
- Dampferzeugerhaus

7. Stilllegungs-genehmigung

In dieser Genehmigung wurden im Wesentlichen Vorbereitungen für den Abbau der Primär-Natrium-Systeme getroffen wie z. B.

- Anpassung der Schleuse zum Reaktorgebäude.
- Zusätzliche Eingänge in die Primärzelle.

Außerdem wurden die Schalt-schränke und Kabel der Reaktor-regelung und der Begleitheizung der Primär-Natrium-Systeme abgebaut.

8. Stilllegungs-genehmigung

Abb. 7 zeigt die Vorgehensweise beim Abbau der Primärsysteme. Es erfolgte in folgender Reihenfolge:

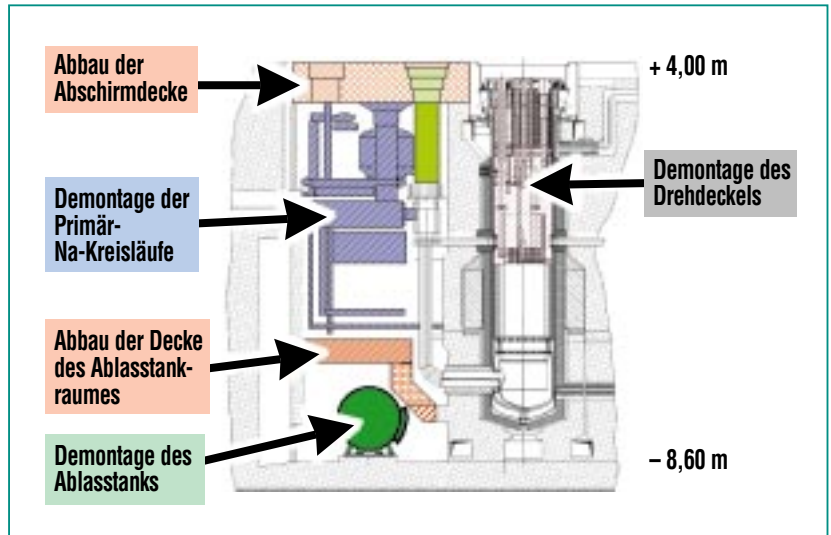


Abb. 7: Abbau Primärsysteme.

- Abbau der Abschirmdecke zur Primärzelle.
- Demontage der Primär-Natrium-Kreisläufe
- Abbau der Decke zum Ablass-tankraum
- Demontage des Ablass-tanks als Ganzes und Abtransport zur HDB (Na-Reinigung erfolgte in der HDB).

Teilweise parallel und nicht in Abb. 7 gezeigt wurden demontiert:

- Primärreinigungssystem mit der Cs-Falle. Nach dem Abtransport konnte der letzte innere Sicherheitsbereich aufgehoben werden.
- Lagertank für bestrahlte Brennelemente



Abb. 8: Zerlegen eines ZWT-Bündels.

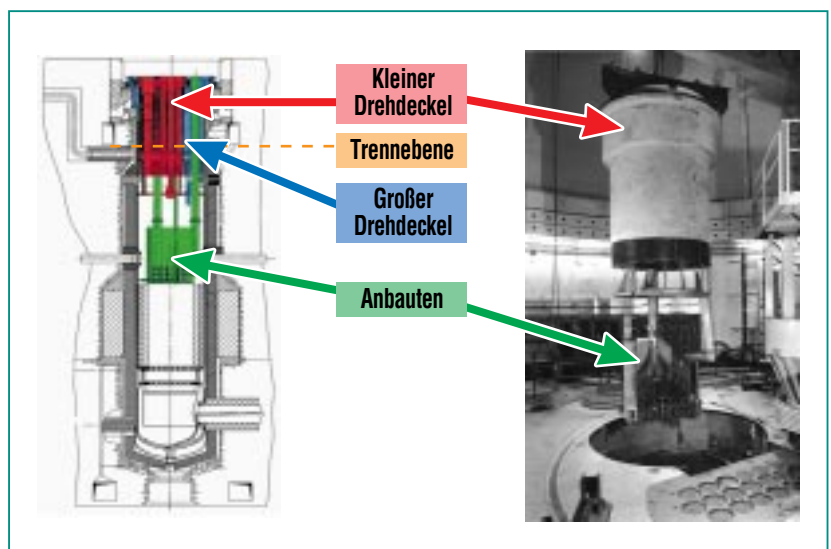


Abb. 9: Aufbau und Trennebenen der Drehdeckel.

Als Beispiel für die Zerlegung und Reinigung von Primärkreis-komponenten in der Natriumwaschan-lage zeigt Abb. 8 die Zerlegung ei-nes Bündels eines Zwischenwär-metauschers (ZWT) im Nachzerle-geplatz, der speziell dafür einge-richtet wurde.

Eine große Herausforderung so-wohl vom Strahlenschutz als auch von der Natriumsituation war die Demontage der beiden Drehdeckel mit Anbauten. Der Aufbau der Drehdeckel, der Anbauten und die Trennebenen gehen aus Abb. 9 hervor.

Zunächst wurden die Anbauten auf dem Reflektor abgesetzt, ge-sichert und von den beiden Dreh-deckeln getrennt. Danach wurden nacheinander der kleine Dreh-deckel, der große Drehdeckel und dann die Anbauten unter Stick-stoff gezogen und als Ganzes vom Natrium gereinigt (Abb. 10).



Abb. 10: Demontage des kleinen Drehdeckels.

9. Stilllegungs-genehmigung

Die 9. Stilllegungsgenehmigung umfasst drei Maßnahmen (Abb. 11):

- Abbau des Reaktortanks und des Doppeltanks
- Abbau der Primär-abschirmung
- Abbau des biologischen Schildes.

Es werden die in Tab. 1 zusam-mengefassten Massen und Akti-vitätsinventare abgebaut.

Die Einbauten des Reaktortanks werden von innen nach außen und von oben nach unten abgebaut. Der Reaktortank selbst wird wegen

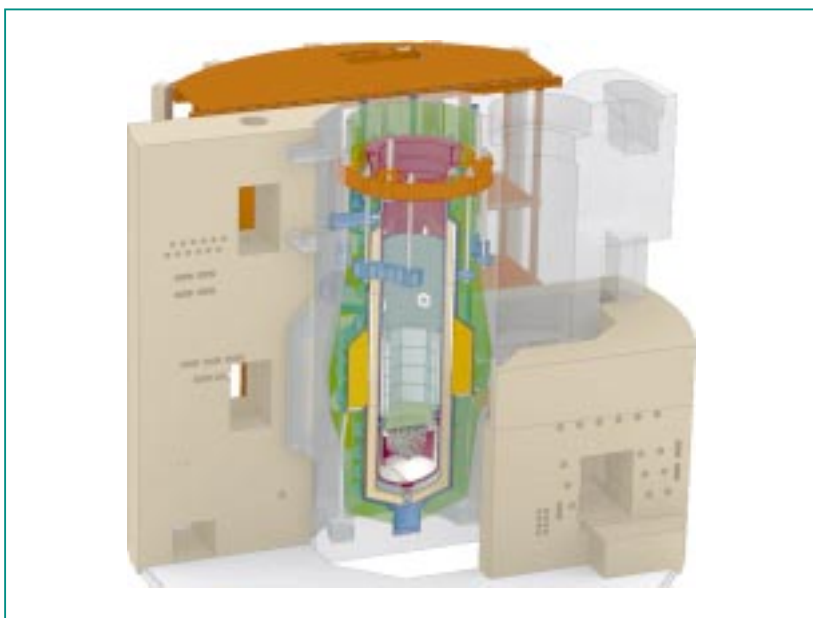


Abb. 11: Übersicht 9. SG, Anordnung Reaktortank, Primärabschir-mung und aktivierter Teil des Biologischen Schildes.

Komponente	Paket 1		Paket 2			
	Ein-bauten	Reaktor-tank	Wärme-isolierung	Primärab-schirmung	Biologischer Schild mit Einbauten	
Material	Stahl	Stahl	Schamotte	Grauguss	Schwer-beton	Stahl
Max. Co-60 Aktivität [Bq/g]	3 E 07	4 E 06	8 E 4	1 E 6	8 E 5	8 E 5
Masse [t]	26,2	16,6	28	90	330	45

Tab. 1: Massen und Aktivitäten, die in der 9. SG zurückgebaut werden.

seiner Aufhängung von unten nach oben abgebaut. Der Stand des Rückbaus geht aus Abb. 12 hervor.

Hier werden zurzeit die am höchsten aktivierten Komponenten zerlegt. Wegen des Restnatriums und möglicher chemischer Reaktionen geschieht dies mit mechanischen Trennverfahren unter Stickstoffatmosphäre.

Für die übrigen Arbeiten unter dieser Genehmigung laufen die Detailplanungen.

10. Stilllegungsgenehmigung

In der 10. Genehmigung werden die restlichen kontaminierten Systeme wie:

- Natriumwaschanlage
- Radioaktives Abwasser
- Lüftung

abgebaut.

Danach werden die Gebäude nach Strahlenschutzverordnung frei gemessen und dann konventionell abgerissen. Nach der heutigen Planung wird dies Ende 2010 abgeschlossen sein.

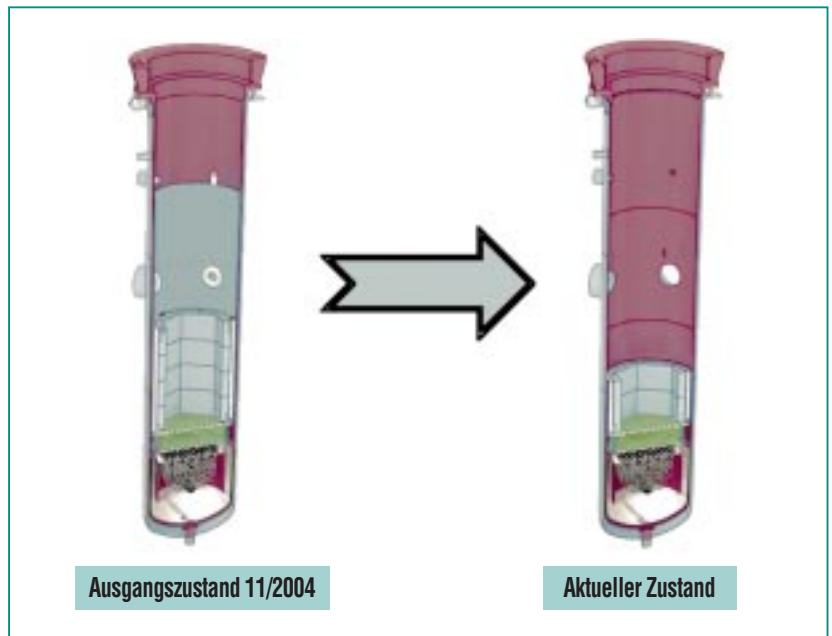


Abb. 12: Stand der Arbeiten zum Rückbau des Reaktortanks (06.12.2005).

Zusammenfassung

Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK) wurde bis 1991 als Versuchsreaktor zur Brüterentwicklung und zur Erprobung der Natriumtechnologie betrieben. Seitdem wird er in zehn Schritten zurückgebaut. Acht Schritte sind fertig gestellt und am neunten Schritt wird gearbeitet.

Alle Natriumsysteme sind abgebaut. Zurzeit wird der hoch aktivierte Reaktortank, der noch Restnatrium enthält, fernhandelt demontiert.

Der Abbau der Primärabschirmung und des aktivierten Teils des biologischen Schildes sind in der Detailplanung.

Ende 2010 soll das Projektziel „Grüne Wiese“ erreicht werden.

Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK): Beseitigung des Reaktortanks und der aktivierten Strukturen im Sicherheitsbehälter der KNK im Zuge der 9. Stilllegungsgenehmigung

E. M. Züfle, Westinghouse Electric Germany GmbH

Einleitung

Im März 2001 erteilte das Forschungszentrum Karlsruhe der Firma Westinghouse Electric Germany GmbH den Auftrag, den Reaktortank mit Einbauten und Blendenverstellereinrichtung, die Wärmeisolierung, die Primärabschirmung und den aktivierten Teil des Biologischen Schildes in der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK) zu beseitigen. Das Projekt gliedert sich in 2 Pakete. Paket 1: Komplette Demontage des Reaktortanks mit Einbauten und der Blendenverstellereinrichtung und Paket 2: Komplette Demontage der Wärmeisolierung, der Primärabschirmung und des aktivierten Teiles des Biologischen Schild.

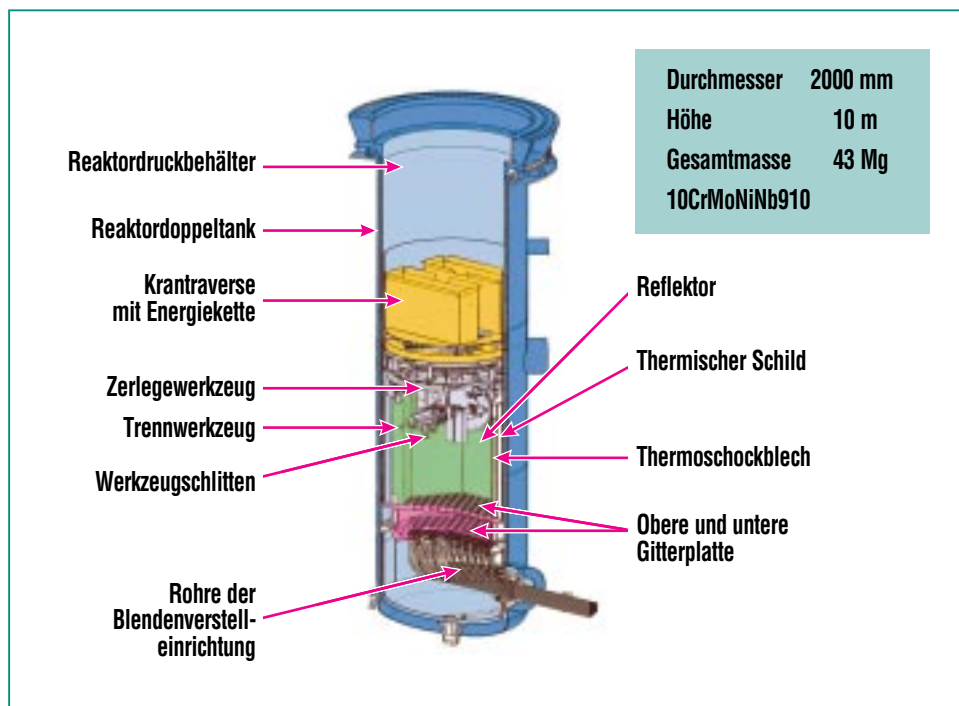


Abb. 1: Reaktortank mit Einbauten und Zerlegewerkzeug.

Anlagenbeschreibung

Auf Abb. 1 sind eine Übersicht des Reaktortanks mit Einbauten und die wesentlichen Komponenten für die Demontearbeiten gezeigt. Auszubauende Komponenten sind die Blendenverstellereinrichtung, Reflektor, Thermischer Schild, Thermoschockblech, Gitterplatten und schließlich der Reaktortank. Die wesentliche Rückbauapparatur ist das Zerlegewerkzeug, das über eine Adapterplatte mit Krantraverse und Energiekettenaufnahme an den Zellenkran angekoppelt wird. Eine besondere Herausforderung sind die engen räumlichen Verhältnisse: 10 m Tiefe und Tankdurchmesser von ca. 2 m.

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der Massen und Aktivitäten. Insgesamt werden ca. 43 Mg rückgebaut. Wegen der Natriumbelegung ist ein kaltes, trockenes Arbeits-

Komponenten	Masse [Mg]	Co-60-Aktivierung [Bq/g]	Abschirmung bis 350 mm Stahl Fernhantierte Demontage
Reflektor	11,8	3,1 E + 7	
Thermischer Schild	7,8	4,8 E + 6	
Thermoschockblech	3,8	4,2 E + 6	
Einbauten	2,8	1,2 E + 9	
Reaktortank	11,8	4,0 E + 6	
Reaktordoppeltank	4,8	2,2 E + 6	Arbeiten unter Stickstoff-Atmosphäre Kaltes, trockenes Arbeitsverfahren
Dosisleistungen			
Mittelachse des Reaktortanks		ca. 27 Sv/h	
Am Arbeitsplatz außerhalb der Einhausung		ca. 2 µSv/h	
Natriumbelegungen			
Erwartete Gesamt-Natrium-Menge		50 kg	
Schmelzpunkt von Natrium		97 °C	

Tab.1: Komponenten und Radiologie.

verfahren unter Stickstoffatmosphäre erforderlich.

Aufgrund der hohen Dosisleistung bis zu 27 Sv/h müssen sämtliche Tätigkeiten fernhantiert erfolgen und der Einbau einer Abschirmung mit 350 mm Stahl war erforderlich.

Einhausung in Heiße-Zellen-Technik

Abb. 2 stammt aus der 3D-Planung und zeigt die Einhausung,

die im Containment in Heiße-Zellen-Technik eingebaut wurde. Sie ist auf der Fahrbahnebene aufgebaut und dient neben der Abschirmung als Trägersystem für Kran und Manipulatoren sowie zur lufttechnischen Trennung für die Stickstoffatmosphäre. Der Sauerstoffgehalt wird im Reaktortank unter 2,5 % gehalten. Wie im Tank ist auch im Containment eine erhebliche räumliche Enge, sodass diverse Handhabungs- und Transportvorgänge im mm-Toleranzbereich ablaufen müssen. Abgebildet

- Abschirmung (bis 350 mm Stahl)
- Trägersystem für Kran und Manipulatoren
- Lufttechnische Trennung für Stickstoff-Atmosphäre



Abb. 2: Einhausung.

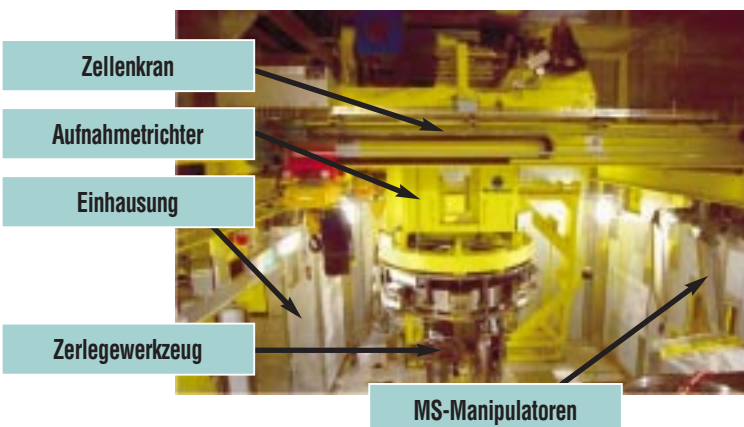


Abb. 3: Fernhantierungstechnik in der Einhausung – Zerlegewerkzeug.

sind weiterhin die Schleuse, die Interventionszelle, die Hantierungszelle und oben auf der Einhausung die Abschirmglocke, in der jeweils ein Waschkorb mit natriumbenetzten Teilen transportiert werden kann. Die Masse der Einhausung beträgt ca. 500 Mg, das entspricht in etwa dem Gewicht aller rückzubauenden Komponenten.

Hantierungszelle und Zerlegewerkzeug

Auf Abb. 3 ist die Hantierungszelle mit dem Zerlegewerkzeug zu erkennen. Im oberen Bildbereich ist die Katze des Zellenkranes zu sehen mit der Querbewegungen gefahren werden und darunter die Brücke für Längsbewegungen. Über eine formschlüssige Verbindung wird das Zerlegewerkzeug adaptiert. Zwei Aufnahmetrichter nehmen die Energiekette auf. Über eine Hubhöhe von 16 m wird die Hydraulik-, Pneumatik- und Stromversorgung inklusive Audio- und Videoversorgung des Zerlegewerkzeuges sichergestellt. Nach aktueller Kenntnis ist solch eine Lösung erstmalig in dieser Form realisiert worden. Die abgeschnittenen Teile werden mit einem Schwerlastmanipulator gehandhabt, der Lasten bis max. 500 kg aufnehmen kann. Fässer und Waschkörbe werden mit einem Containerbeladekran gegriffen und transportiert.

Interventionszelle

Die Interventionszelle ist mit einem Hebzeug und Manipulatoren ausgerüstet. Hier werden Wartungs- und Reinigungsarbeiten an den Werkzeugen durchgeführt sowie Werkzeugmodule gelagert. Zu

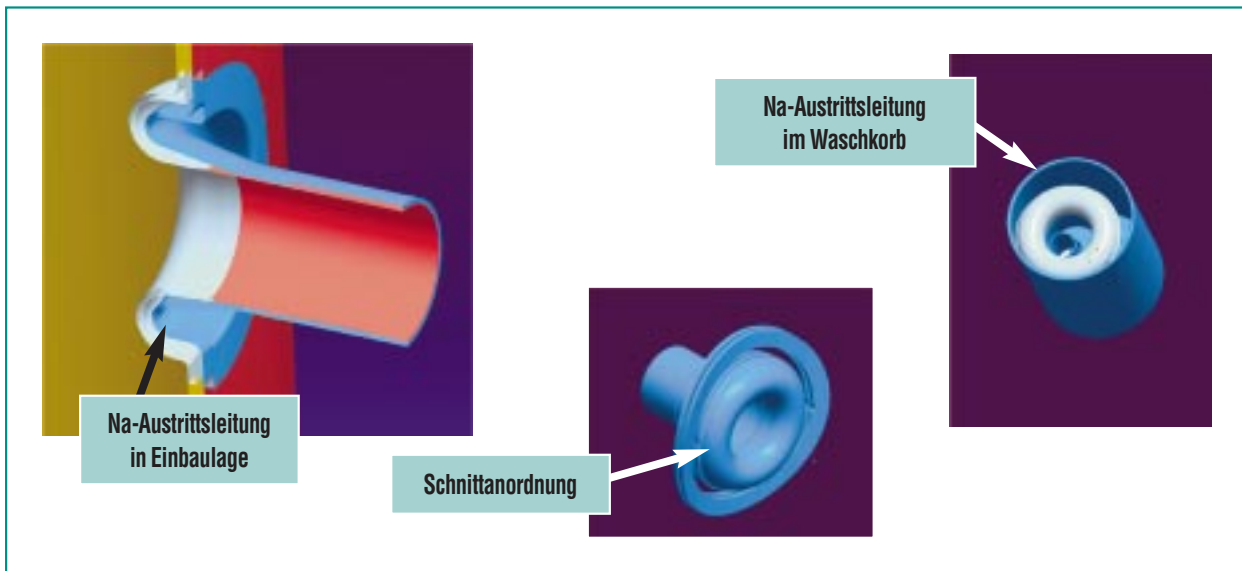


Abb. 4: Planerische Vorgabe zum Ausbau eines Rohrstopfens.

Interventionsmaßnahmen sind Bergestangen vorgesehen, mit denen Reparaturen und Manipulationen am Zerlegewerkzeug im Reaktorschacht gemacht werden können.

Erprobungsphase

Vor dem Einsatz des Werkzeuges erfolgte eine umfangreiche Erprobung. Zu diesem Zweck wurde ein Mock-up gebaut: eine Nachbildung der Hauptkomponenten des Reaktortanks im Durchmesser-verhältnis 1:1. Zielsetzungen der Erprobung waren die technische Verbesserung des Zerlegewerkzeuges, Optimierung des Zerlegeprozesses und der peripheren Komponenten, Verifikation der Lebensdauer der Werkzeuge, Verifikation und Optimierung der Prozess-, Zerlege- und Handhabungszeiten, Vorbereitung der Kalten und Heißen Inbetriebsetzung und die Überprüfung des Berge- und Interventionskonzeptes. Neben der Ausführung dieser Punkte konnte insbesondere das Zu-

sammenspiel der Hauptkomponenten optimiert werden. Kunde und Gutachter haben diese Phase eng begleitet.

Planung und Durchführung von Schnitten

Alle komplexen Zerlegeschritte wurden in einem 3D-Modell geplant. Unter Berücksichtigung der

Tankgeometrie, den Werkstoffeigenschaften sowie eines optimierten Verpackungskonzeptes sind Schnittlinie, Werkzeug und Fahrplanweisungen für die Operateure beschrieben.

Exemplarisch ist auf Abb. 4 die planerische Vorgabe zum Ausbau eines Rohrstopfens gezeigt. Abb. 5 illustriert die Umsetzung, und als

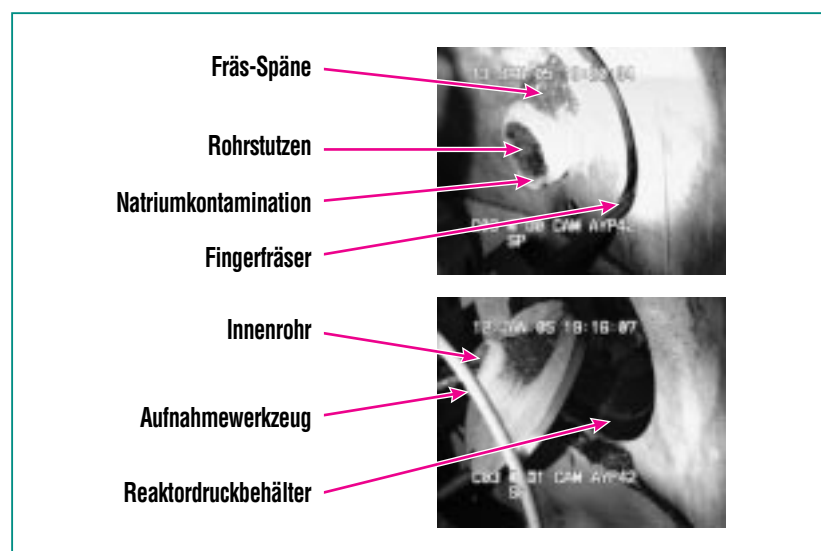


Abb. 5: Zerlegung und Entfernung des Rohrstopfens.

Tool kommt hier ein Fingerfräser zum Einsatz. Generelle Zielsetzung ist die 100%ige Umsetzung der planerischen Vorgabe, wobei es typisch für Rückbauprojekte ist, dass die Realität von den Zeichnungen abweicht und Anpassungen erforderlich werden. Das effektive Zusammenspiel von Anlagenkenntnis, Technik und Projektmanagement ist hierfür unabdingbar.

Zerlegephase

Bei der Zerlegearbeit verspannen Hydraulikstempel das Werkzeug im Tank. 15 Tools, die auf Werkzeugträgern (oder Modulen) montiert sind und je nach Anforderung zum Einsatz kommen, stehen zur Verfügung. Zwei Drehachsen und

vier Längsachsen ermöglichen alle erforderlichen Schnittgeometrien.

Das Steuerpult steht vor der Einhausung und von dort fährt der Operateur die Maschine gemäß einer Schnitvorgabe. Neben der visuellen Überwachung ist auch ein Audiosystem installiert, was sich als sehr hilfreich herausgestellt hat. Am Ton erkennen die Fachleute, ob die Fräsung optimal läuft und können ggf. nachjustieren, z.B. den Vorschub. Die anfallenden Späne werden in Intervallen mit einem Spangreifermodule oder Späne-sauger geborgen.

Nachdem ein Teil des Reaktortanks herausgetrennt ist, wird es auf einer Übergabestation abgesetzt und mittels des Schwerlastmanipulators in den Waschkorb eingestellt. Auch für die Beladung

der Waschkörbe bzw. der 200-l-Fässer liegt eine Planung vor. Natriumbenetzte Teile müssen vor dem Transport zur Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe in der Natriumwaschanlage gereinigt werden. Insgesamt werden ca. 1300 Teile erwartet, die in vorgegebener Reihenfolge herausgetrennt und verpackt werden.

Personal

Zwei Schichten (Früh- und Spätschicht) sind mit der Demontage betraut. Die am Mock-up trainierten und qualifizierten Zerleger fräsen die Teile und legen sie auf der Übergabestation ab. Von dort bis zum Ausschleusen verantwortlich der Logistiker den sicheren Transport. Arbeitsverantwortliche und Schichtleiter überwachen und be-

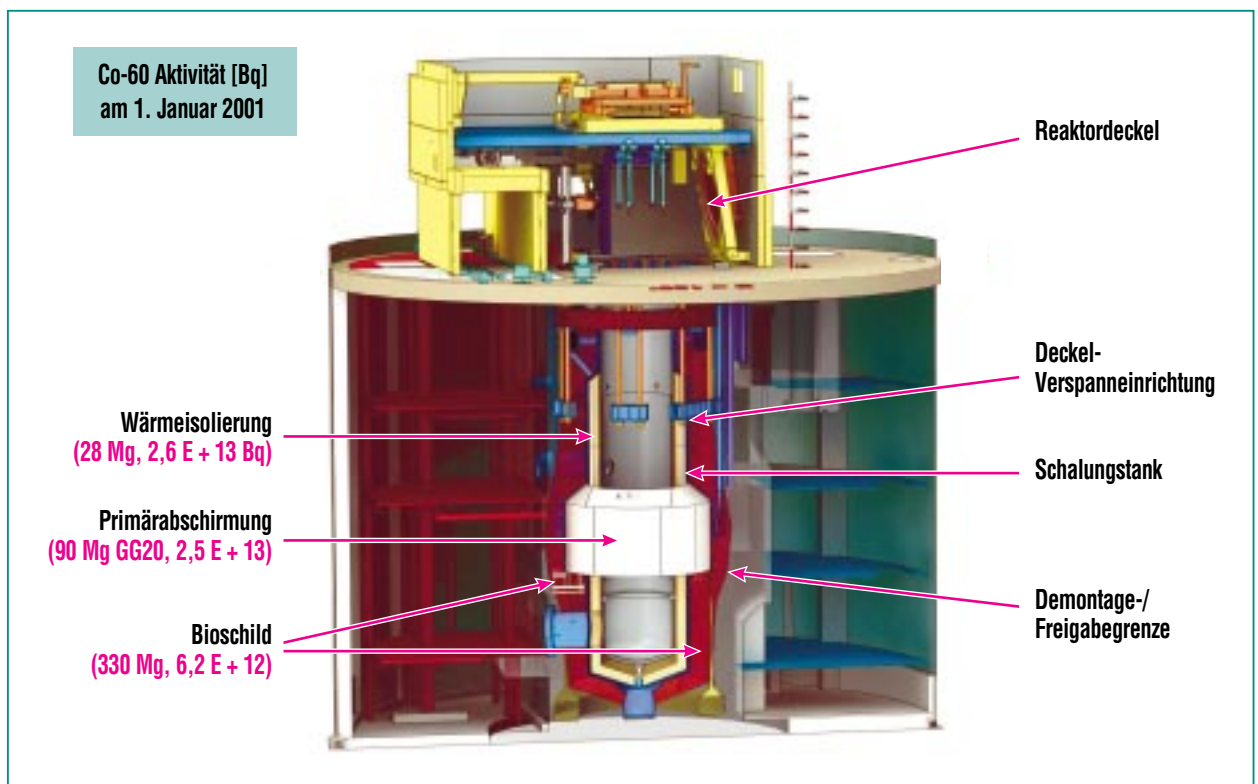


Abb. 6: Wärmeisolierung, Primärabschirmung, Biologischer Schild.

treuen die Arbeiten. Die Einhaltung von sämtlichen Anforderungen des Strahlen- (und auch Arbeits-) Schutzes hat selbstverständlich die oberste Priorität.

Der Stand der Arbeiten im Paket 1 lässt sich wie folgt zusammenfassen: Nach erfolgreicher Planungs-, Genehmigungs-, Beschaffungs- und Montage/IBS-Phase laufen die Rückbauarbeiten. Rohrstützen wurden entfernt, ebenso Thermochockblech und aktuell wird am Reflektor und Thermischen Schild gearbeitet.

Paket 2

Abb. 6 zeigt die wesentlichen Komponenten des zweiten Abbauabschnitts, der zeitlich an Paket 1 anschließt. Die Konzepterstellung und Planung ist nahezu abge-

schlossen. Zu demontieren sind die Wärmeisolierung, die Primärabschirmung und das Biologische Schild bis zur Freigabegrenze. Massen und Aktivitäten können ebenfalls der Abb. 6 entnommen werden. Die Wärmeisolierung besteht aus Glaswolle und Schamottsteinen, die Primärabschirmung aus Grauguss und das Bioschild aus Schwerbeton. Im oberen Bildbereich ist die Einhausung erkennbar, an der diverse Anpassungen und Modifikationen vorzunehmen sind, um z.B. den Einsatz des Reaktorkranes zu ermöglichen.

Die weitere Ausführung konzentriert sich auf die Primärabschirmung. Die Graugussteile wiegen ca. 16 Mg und sind in einer Tiefe von ca. 8 m positioniert. Das „Einfädeln“ der Teile wurde beim Ein-

bau manuell erledigt. Aufgrund der Enge und Tiefe ist der fernhantierete Ausbau eine technische Herausforderung. Wiederum wird eine präzise 3D-Planung eingesetzt. Positioniert in einer Nische des Schalungstanks umgibt die Primärabschirmung die Wärmeisolierung im Bereich des Reaktorkerns. Der Lastabtrag erfolgt über ein vergossenes Stahlfundament. Es gilt insgesamt 8 zylindrische und 4 konische Segmente zu bergen, und zwar wie beim Einbau, nur in umgekehrter Reihenfolge.

Die Entwicklung des Aushebewerkzeuges (Abb. 7) ist nahezu abgeschlossen. Aufgrund der Massen der Segmente (16 Mg) wird es an den Reaktorkran angeschlossen. Die einzelnen Segmente werden in die Mitte des Tanks manövriert und dann nach oben in

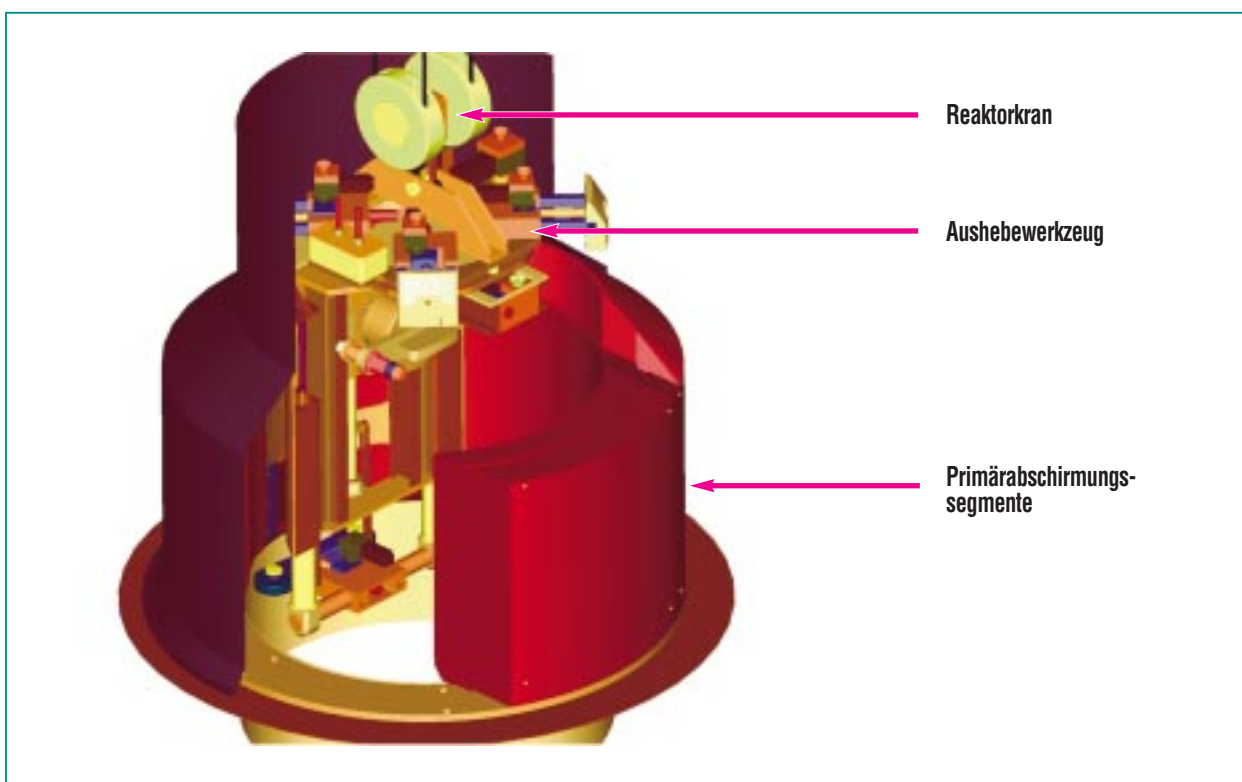


Abb. 7: Primärabschirmung, Planung des Ausbaus.

die Einhausung gezogen. Dazu ist eine anspruchsvolle Mehrachsenmechanik erforderlich.

Der Reaktordeckel wird im Vergleich zum Paket 1 umgebaut und zur Arbeitsplattform ertüchtigt. Die Teile werden auf dieser Plattform mit Hilfe einer Bandsäge in gebündelte Teile zersägt und ausgeschleust. Schließlich werden Teile von max. 1,5 Mg in Container verpackt und zur HDB transportiert.

Zusammenfassung

Das Projekt ist aufgrund der räumlichen Enge und Tiefe, der hohen Strahlenbelastung und der Natriumbelastung eine erhebliche technische Herausforderung. Neben profunder technischer Kompetenz und Erfahrung auf der Lieferantenseite ist insbesondere die Anlagenkenntnis und die effiziente Zusammenarbeit mit dem Anlagenpersonal ursächlich für den Er-

folg des Projektes. Die speziell entwickelte und erfolgreich eingesetzte Fernhandlungs- bzw. Zerlegetechnik und die Errichtung einer Einhausung mit Stickstoffatmosphäre sind Innovationen, die durchaus auch bei weiteren Stilllegungsprojekten zum Einsatz kommen können.

Entwicklung und Einsatz von Zerlegewerkzeugen für den Rückbau nuklearer Anlagen

Fr.-W. Bach, G. Kremer, T. Rümenapp, Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover

Einleitung

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen stellt aufgrund komplexer Randbedingungen, wie Strahlenbelastung, räumliche Zugänglichkeit, Bauteilgeometrie, sowie Materialdicke und -zusammensetzung eine große Herausforderung für leistungsfähige Unterwasser-Schneidverfahren dar.

An der speziellen Aufgabenstellung des sicheren Rückbaus des Moderatortanks und des Thermischen Schildes des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR) Karlsruhe soll die Entwicklung und der Einsatz von thermischen Zerlegewerkzeugen, hier das Unterwasser-Plasmaschneiden und das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennen (CAMC), gezeigt werden. Beide Verfahren waren für diesen Einsatzbereich, bis 130 mm CrNi-Stahl in bis zu 8 m Wassertiefe zu trennen, nicht Stand der Technik.

Im Folgenden wird zunächst die Zerlegung mittels Plasmaschneiden betrachtet.

MZFR Karlsruhe – Zerlegung Moderatortank und Thermischer Schild

Der Rückbau des Moderatortanks und des Thermischen Schildes (35–130 mm CrNi-Stahl) des MZFR Karlsruhe (Abb. 1) stellte völlig neue Anforderungen an die Plasmaschneidtechnologie. Zwar existieren bereits seit einigen Jahren leistungsstarke Anlagen für den Zuschneidbetrieb von Dickblechen unter Wasser, doch zeigten die besonderen Randbedingungen dieser Aufgabe, u. a. Schneiden in Zwangslage, Wandstärken zwi-

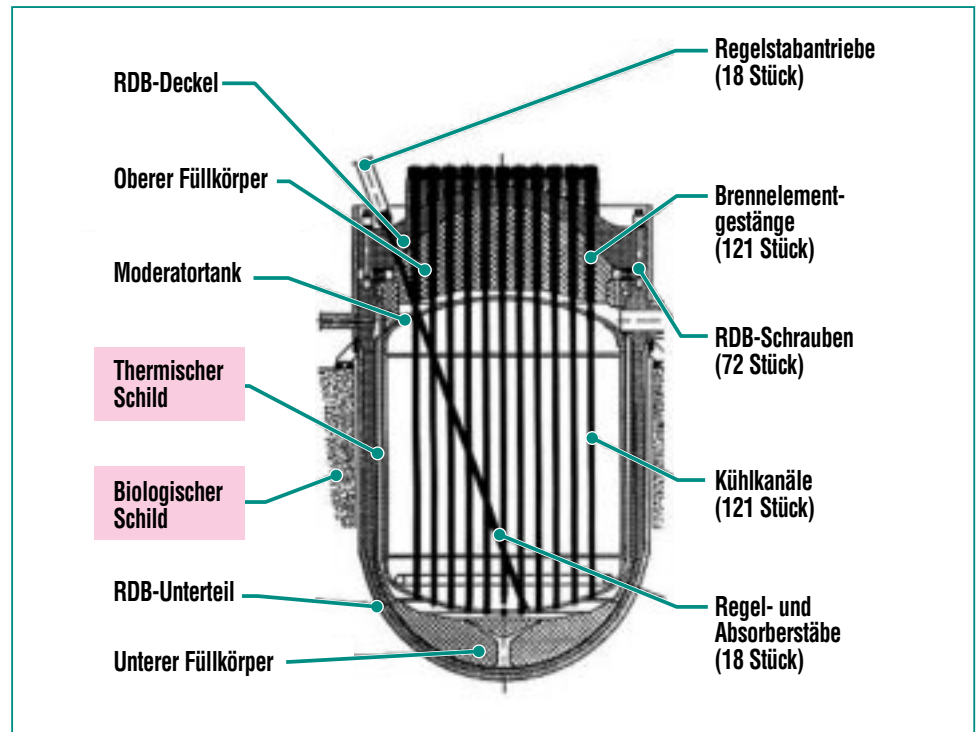


Abb. 1: Reaktor Druckbehälter (RDB) und Thermischer Schild.

schen 25 und 130 mm, geringer Spalt zwischen Thermischem Schild und Reaktor Druckbehälter (RDB), Wassertiefen bis zu 8 m, vollständig fernbedienter Betrieb, schnell die Grenzen dieser konventionellen Anlagen.

Die Gründe hierfür werden deutlich, wenn man die Grundlagen des Plasmaschneidens betrachtet. Zu Prozessbeginn wird im Plasma-brenner mittels Hochspannung ein nicht übertragener Pilotlichtbogen gezündet, der zwischen Kathode und Schneiddüse (Anode) brennt. Bei entsprechendem Abstand zwischen Werkstück und Plasma-brenner, wird der übertragene Hauptlichtbogen gezündet. Das Werkstück wird aufgeschmolzen, teilweise verdampft und die Schmelze durch die kinetische Energie des Gasstrahls aus der Schnittfuge geblasen.

Abb. 2 zeigt ein Modell des Plasmaschneidens an einem 80-mm-Werkstück zur Erläuterung des Schneidprozesses.

Es bilden sich im Werkstück drei charakteristische Zonen aus. In der oberen Zone I wird die Schnittfuge durch die Konvektions- und Strahlungswärme des Plasmastrahls erzeugt, wobei der schmelzflüssige Werkstoff durch die kinetische Energie der Gasströmung aus der Schmelzzone getrieben wird [1]. In der mittleren Zone II befindet sich der Fußpunkt des Lichtbogens. Hier findet der quantitativ höchste Energieeintrag in der Schnittfuge statt. Infolge der Gasströmung wandert der Lichtbogenfußpunkt nach unten, reißt dort bei Überschreitung einer kritischen Länge ab und etabliert sich im oberen Bereich der Zone II wieder (Shuntierung) [1,2,4,5]. Die Zo-

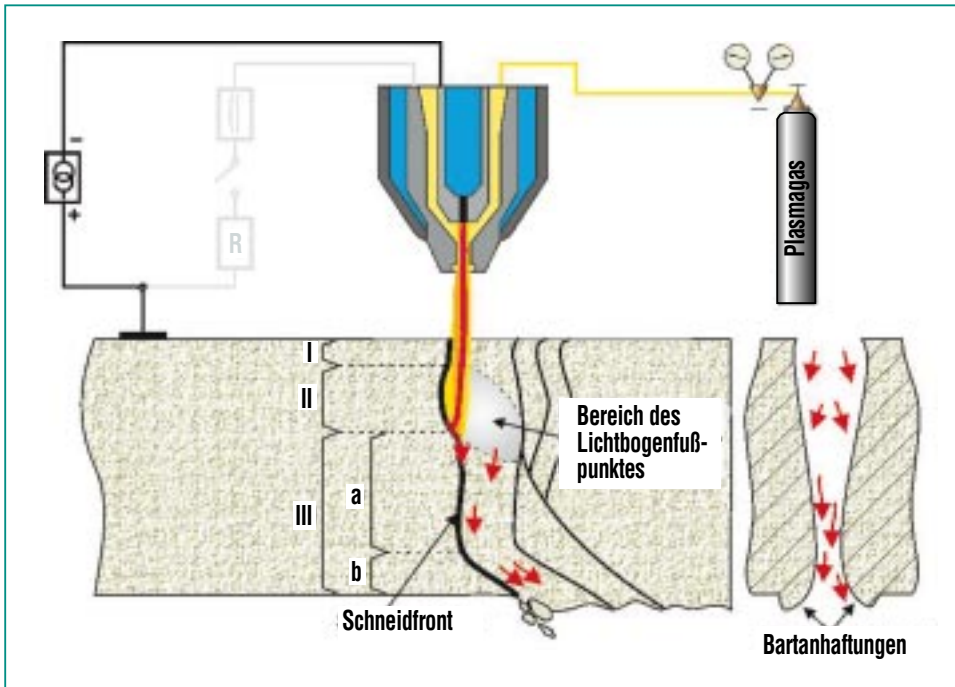


Abb. 2: Plasmaschneiden – 3-Zonen-Modell (Nishiguschi).

ne III zeichnet sich durch den geringsten Wärmeeintrag aus. Der direkte Lichtbogen erreicht diese Zone nicht mehr, so dass hier das Material hauptsächlich durch Konvektion und Strahlung der überhitzten Schmelze erwärmt und ausgetrieben wird [1].

Um dickeres Material schneiden zu können, muss die von der Schneidspannung abhängige maximal erreichbare Lichtbogenlänge erhöht werden [3].

Aus diesem Grund hat die Firma Kjellberg eine Plasmapstromquelle entwickelt, die statt mit der üblichen Schneidspannung von ca. 210 V mit einer um 20 % höheren, von ca. 250 V, arbeitet.

Gemeinsam mit dem MZFR Karlsruhe und der RWE Nukem Group wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, in dem alle zu erwartenden Schneidsituationen untersucht

werden konnten. Analog zur Real-situation wurde mit 35–130 mm CrNi-Stahl gearbeitet und die Schnitte senkrecht von oben nach unten (Wandposition) durchgeführt. Die Komplexität der Mock-Ups (Modelle) nahm dabei zu, vom geraden, über ein treppenförmiges, bis zu einem keilförmigen Mock-Up. Zusätzlich wurde für 35-mm-Material ein 45°-Überkopfschnitt realisiert.

Die erforderlichen Schneidstrategien für die unterschiedlichen Zerlegeaufgaben wurden ermittelt und deren Wirksamkeit an Mock-Ups nachgewiesen.

Beim Anschnitt von großen Blechdicken konnte der Pilotlichtbogen nicht bei vollem Plasmagas-Volumenstrom gezündet werden, da dieser „ausgeblasen“ wurde. Die aus diesem Grund neu entwickelte Gasmengenregelung realisiert für den Pilotlichtbogen ein anderes

Gasgemisch, andere Gasdrücke und -volumenströme, als für den Hauptlichtbogen.

Darüber hinaus sind die für einen vollständigen Schnitt notwendigen Vorschubgeschwindigkeiten festgelegt worden. Zum Schneiden von Ecken (L-Schnitt) ist es wegen des nachlaufenden Lichtbogens notwendig, die Geschwindigkeiten zu reduzieren, so dass die Ecke vollständig geschnitten wird, jedoch der Lichtbogen nicht abreißt.

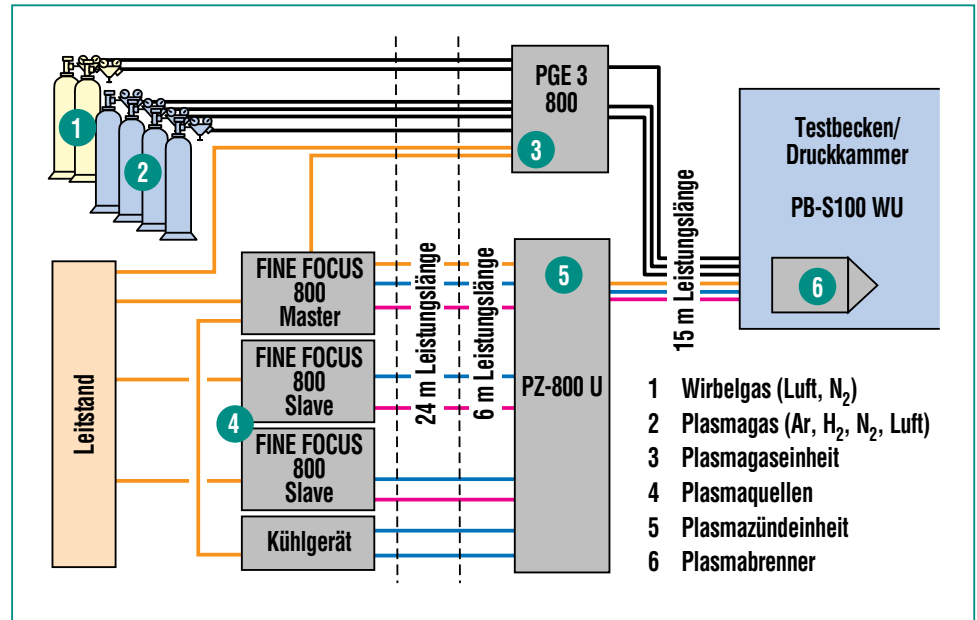
Im oberen Bereich des Thermischen Schildes gab es Überlappungen der einzelnen Ringsegmente, die beim Schneiden nicht miteinander verschweißen sollten. Untersuchungen zeigten, dass kaum Verschweißungen auftraten und diese zudem durch geringe mechanische Kräfte aufgebrochen werden konnten.

Mit dem bisher verwendeten 600-A-Brenner war ein Durchschneiden von Blechdicken > 100 mm trotz der erhöhten Schneidspannung nicht möglich. Die Schlacke wurde in Richtung Brennerkopf herausgedrückt und zerstörte diesen. Aus diesem Grund wurde die Leistung der Plasmaschneidanlage um 1/3 erhöht (Schneidstrom von 600 A auf 900 A). Die hieraus resultierende höhere thermische Belastung des Brenners (elektrische Leistung von 225 kW) machte eine konstruktive Überarbeitung notwendig. So konnte z. B. die Abdichtung der Düsenelemente nicht wie sonst üblich mit O-Ringen erfolgen, sondern musste gelötet werden. Zur Qualitätssicherung dieser anspruchsvollen Lötteile wurden sie einer Röntgenanalyse unterzogen.

Nach Abschluss der Entwicklung wurde ein Anlagenkonzept (Abb. 3) erstellt und das Plasmaschneidsystem aufgebaut und am Unterwassertechnikum (UWTH) des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover getestet.

Das Kernstück dieser Plasmaschneidanlage bilden drei modifizierte Plasmaschneidquellen Fine Focus 800 mit insgesamt 900 A Schneidstrom. Die Gasversorgungseinheit, die erstmals eine prozessintegrierte Gasmengenregelung erlaubt, wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem UWTH und der Firma Kjellberg Finsterwalde entwickelt und aufgebaut.

Es gelang innerhalb kürzester Zeit die bis dahin leistungsstärkste Plasmaschneidanlage für den Unterwassereinsatz zu entwickeln und zu bauen (Abb. 4), sowie die zur Gewährleistung von sicheren



Schnitten notwendigen Parameter für alle erwarteten Schneidaufgaben zusammenzustellen. Da in allen Stadien dieses Projektes auch die Gutachter beteiligt wurden, er-

folgte die Abnahme der Gesamtanlage im UWTH ohne Probleme. Das gelieferte System wurde im stillgelegten Versuchsatomkraft-



Abb. 4: Anlagen, Brenner und Kalterprobung (Bedienpult, Plasmaquellen (900 A, 225 kW) und Kühler, Wechselbrenner, Kalterprobung im VA Kahl).

werk Kahl erprobt. Zur Reduzierung der zu erwartenden Strahlenexposition wurde der Brenner zusätzlich noch als Wechselkopfbrenner ausgeführt (Wechselzeit < 3 min) (Abb. 4). Als größte Herausforderung erwies sich nicht die 130 mm Blechdicke an sich, diese war in 4 m Wassertiefe gesichert schneidbar, sondern der nur ca. 20 mm breite Spalt zwischen Thermischem Schild und RDB. Dieser behindert den Schlackeaustrieb. Ein Anstellen des Plasmaprenners sowohl horizontal als auch vertikal zwischen 0 und 30° oder ein zusätzlicher Austrieb durch die kinetische Energie von Druckluft oder Wasser brachte nur geringe Verbesserungen des Schlackeaustriebs.

Thermisches Verfahren – CAMC (Alternativverfahren)

Für den Fall, dass das Schneiden der 130 mm Wandstärke des thermischen Schildes mit der besonderen Randbedingung des geringen Spaltes zum RDB, mit Plasma nicht oder nur schwer möglich ist, wurden Alternativ-Verfahren untersucht, neben Schleifen und Sägen mit rotierendem Werkzeug, worauf hier nicht eingegangen werden soll, das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennen, CAMC.

CAMC ist ein elektrothermisches Trennverfahren mit einfacher Gerätetechnik und kompaktem Werkzeug, das geringe Rückstellkräfte sowie eine hohe Prozesssicherheit aufweist und geringe Anforderungen an die Werkzeugführung stellt. Somit ist es für fernbediente durchzuführende Zerlegeaufgaben in für Menschen unzugänglichen

und/ oder gefährlichen Umgebungen, wie z. B. beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen oder Offshore-Strukturen hervorragend einsetzbar.

CAMC eignet sich besonders zur Zerlegung dickwandiger Werkstücke. Bei bisherigen Untersuchungen wurden unterschiedliche Bauteilgeometrien bei maximalen Werkzeugeingriffstiefen von bis zu 500 mm getrennt. Insbesondere

komplexe Werkstückgeometrien mit Hohlräumen und/oder Hinterschnidungen sowie metallische Sandwichstrukturen können bei hoher Schneidleistung und mäßiger Oberflächenqualität der Schnittkante in einer linearen Schnitfführung getrennt werden.

Der Aufbau (Abb. 5) besteht aus einer Stromquelle, dem Elektrodenhalter, der Schneidelektrode, Stromleitungen zwischen Strom-

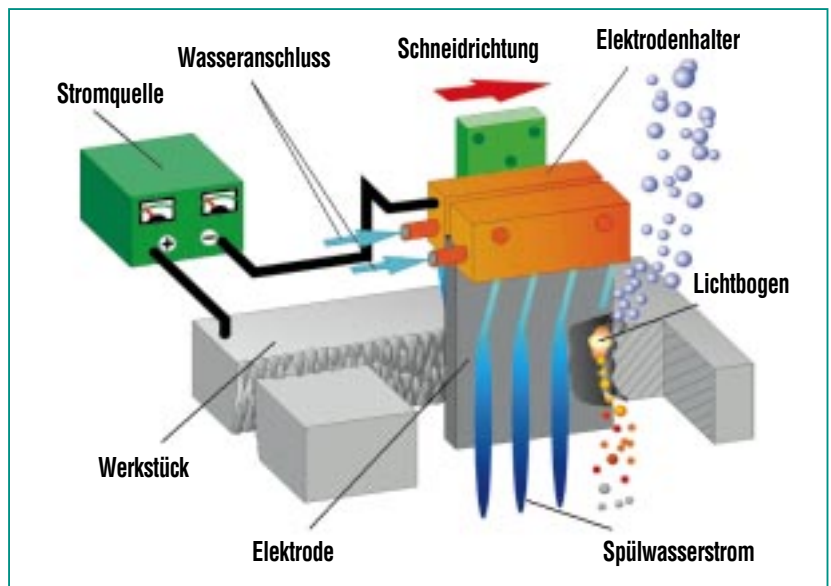


Abb. 5: Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC) – Prinzip.



Abb. 6: CAMC-Schnitt in Mock-Up – Reduzierung des Elektrodenverschleißes auf 1/10.

quelle und Werkstück sowie Werkzeug und einem Wasserkreislauf zur Spülung und Kühlung der Elektrode. Der Prozess findet unter Wasser statt. Für die Bewegung des Elektrodenhalters ist eine Führungseinrichtung notwendig.

Für den Einsatz dieses Verfahrens als Alternative zum Zerlegen des Thermischen Schildes im MZFR Karlsruhe, wurde zunächst untersucht, ob der bis dato noch sehr hohe Verschleiß der Elektroden durch Parametervariation und Modifikationen an der Stromquelle soweit reduziert werden kann, dass ein erfolgreicher Schnitt der 130 mm Blechdicke mit einer Elektrode möglich ist. Neben einer kleineren, geregelten Stromquelle kam eine leistungsfähigere Pumpe für den Spülwasserstrom zum Einsatz und der Elektrodenwerkstoff wurde von faserverstärktem Graphit zu Reinstgraphit verändert. Es konnte eine signifikante Reduzierung des Elektrodenverschleißes, um 90 %, erreicht werden.

Der Versuchsaufbau wurde an die Bedingungen der Realsituation im MZFR Karlsruhe angepasst, indem mit einer 20 mm entfernten Rückwand und einer simulierten Federsteifigkeit des Handhabungssystems gearbeitet wurde.

Die Erwartungen an das Verfahren wurden erfüllt. Der Verschleiß der Elektroden war so gering, dass noch mehr als 2/3 der Elektrodenbreite als Reserve zur Verfügung stand. Der vollständige Schnitt ist in Abb. 6 links und typische Verschleißbilder rechts erkennbar.

Um zu überprüfen, ob die beim CAMC-Verfahren entstehenden Hydrossole von der im MZFR ein-

gesetzten Filtertechnik (Pall-Filterkerzen Duo-Fine II DFNT 0.45) beherrschbar sind, wurden Untersuchungen zur Sediment- und Hydrossolemission sowie Filtertests durchgeführt.

Abb. 7 zeigt die Partikelgrößenverteilung der Sedimente (> 20 µm) für einen Schnitt des Mock-Ups mit einer faserverstärkten Graphitelektrode. Bei den analysierten Partikeln handelt es sich um ab-

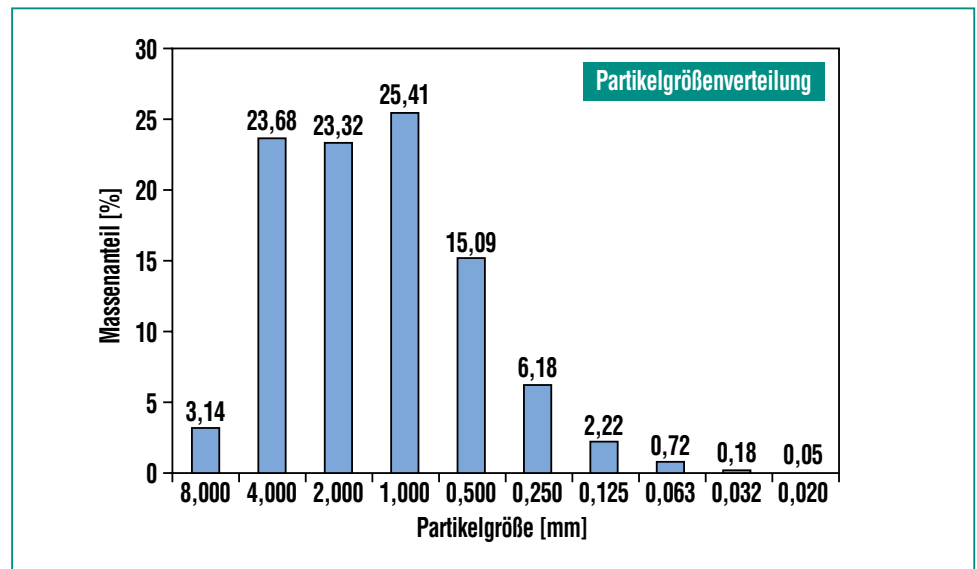


Abb. 7: Eignungstest Filteranlage – Partikelgrößenverteilung bei repräsentativen Schnitt.

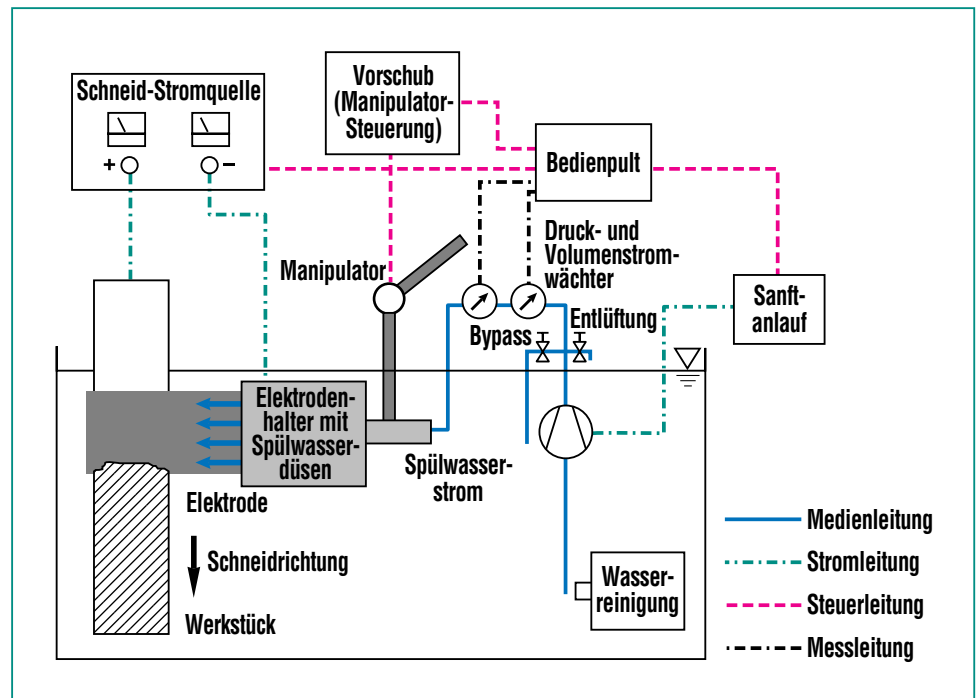


Abb. 8: Systemübersicht MZFR-CAMC-Schneidanlage.

gesunkenes Werkstück- und Elektrodenmaterial. Die im Wasser verbliebenen Schwebstoffe (Hydrosole), ca. 5 % der Schnittfugenmasse, sind in dem Diagramm nicht berücksichtigt. Bei einer durchschnittlichen Schnittfugenbreite von 12 mm bedeutet dies eine spezifische Partikelemission von ca. 0,47 g cm⁻². Das Wasser kann mit den eingesetzten Filtern ohne Schwierigkeiten gereinigt werden.

Neben der Erstellung eines auf die Kundenwünsche angepassten Gesamtsystems (Abb. 8), wurde ein Elektrodenhalter entwickelt und gebaut.

Abb. 9 zeigt den neu entwickelten und an die Schneidaufgabe angepassten Elektrodenhalter mit Elektrode. Wichtige Merkmale sind die integrierte Medienzuführung (Schneidstrom- sowie Wasserversorgung in der Halterung) und die einfach handhabbare mechanische Elektrodenklemmung.



Abb. 9: CAMC-Werkzeug – Elektrodenhalter mit Elektrode.

Die TÜV-Abnahme sowie die Erprobung des Gesamtsystems erfolgte im UWTH. Auch mit Berücksichtigung der Federsteifigkeit des Führungssystems am MZFR kam es bei keinem Schnitt zu einem Bruch der Elektrode. Damit konnte nachgewiesen werden, dass das Mock-Up des thermischen Schildes mit Rückwand mit diesem CAMC-System sicher trennbar und somit als Backup-System für die Plasmaanlage geeignet ist.

Inzwischen hat sich die Anlage im Realeinsatz beim Zerlegen des Thermischen Schildes hervorragend bewährt. Nach der Implementierung des CAMC-Systems in die MZFR-Anlage, konnte die Aufgabe innerhalb der vorgegebenen Zeit problemlos erfüllt werden.

Literatur

- [1] H. Bienia, *Plasma-Autogen-Hybridschneiden. Dissertation, Reihe: Berichte aus dem IW, Bandnummer: 01/2004 IW, Verlag PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen, 2004, ISBN 3-936888-52-3*
- [2] M. Niemeyer, *Beschreibung der physikalischen Vorgänge beim atmosphärischen Plasmaschmelzschneiden. Dissertation, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 2 – Fertigungstechnik, Nr. 494, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998 – ISBN 3-18-349402-7*
- [3] G. Hertz, R. Rompe, *Einführung in die Plasmaphysik und ihre technischen Anwendung. 2. erw. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin, 1968*
- [4] K. Nishiguschi, T. Ohij, K. Matsuyama, *Fundamental studies on cutting phenomena in plasma arc cutting. In: 1. Report, Journal of the Japan Welding Society, Jg. 41, Heft 7, S.781-791, 1972*
- [5] T.-J. Lho, D.-G. Um, S.J. Na, *A study on arc characteristics and its applications to height control in plasma arc cutting. In: Welding Journal, S. 277-282, 1992*
- [6] Fr.-W. Bach, H. Bienia, C. Redeker, R. Verseemann, P. Wilk, J. Lindemaier, *Abtrag- und Zerlegetechniken für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. In: atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 46. Jg. (2001) Heft 2 – Februar, S. 112-117*

Behandlung und Entsorgung von Großkomponenten und radioaktiven Reststoffen

L. Valencia, HDB

Einleitung

Bei der Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen fallen radioaktive Reststoffe und Abfälle an, die sich stark von Betriebsabfällen unterscheiden. Deren schadlose Verwertung oder geordnete Entsorgung erfordert spezielle Verfahren und Einrichtungen.

Stilllegungsabfälle unterscheiden sich vor allem in ihrer Art, Größe und Aktivität von den Betriebsabfällen. Die klassischen Betriebsabfälle sind brennbare bzw. pressbare Mischabfälle, die über Verbrennung und Hochdruckkompaktierung zu radioaktiven Abfallprodukten behandelt werden. Bei der Stilllegung fallen neben diesen Mischabfällen auch Großkomponenten, Reaktoreinbauteile und kontaminierte Betonstrukturen an, die ebenfalls fachgerecht entsorgt werden müssen.

Die HDB hat seit Beginn der Rückbautätigkeiten des Forschungszentrums eine Vielzahl von Stilllegungsabfällen angenommen und bearbeitet. Dazu gehören insbesondere auch ausgebaute Großkomponenten, wie z. B. die Dampferzeuger und die Kerneinbauteile des Mehrzweckforschungsreaktors bzw. der Natrium-Abblasstank und der Drehdeckel der Kompak-

ten Natriumgekühlten Kernanlage oder kontaminierte Betonstrukturen aus dem Rückbau des heißen Zellenkomplexes der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe.

Besonderheiten bei der Bearbeitung von Rückbauabfällen

Stilllegungsabfall unterscheidet sich von Betriebsabfällen im Wesentlichen durch seine Abmessungen, seine Masse und seine Radiologie. Die Verarbeitungsanlagen müssen dafür ausgelegt sein, große Komponenten bis zu einer Masse von 200 Mg und einer Länge von 15 m handhaben und verarbeiten zu können. Dies setzt eine geeignete Statik bei der Lagerung und Bearbeitung voraus, zum anderen müssen auch die Werkzeuge wie z. B. Sägen und Schneidwerkzeuge den Dimensionen angepasst werden. Auch die von den Betriebsabfällen unterschiedliche Radiologie der Stilllegungsabfälle beeinflusst deren Bearbeitung. Da die beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage anfallenden Komponenten meist in Bereichen mit höherem Kontaminationsniveau bzw. Neutronenfluss eingesetzt waren, treten Dosisleitungen bis zu 200 mSv/h auf. Daher muss bei

der Zerlegearbeit abgeschirmt und fernhantiert vorgegangen werden.

Beim Rückbau z. B. von Forschungsreaktoren wird man überdies oft noch mit konventionellen Gefahrstoffen und Chemikalien konfrontiert etwa mit Asbest oder beim schnellen Brüterprototyps KNK mit Natrium.

Bearbeitung der Rückbaukomponenten des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR)

Im Rahmen der einzelnen Rückbauschnitte des MZFRs sind verschiedene Großkomponenten wie z. B. zwei Dampferzeuger, zwei Moderator Kühler, Lademaschine und Schwenkkammer sowie sämtliche Trenn- und Führungsrohre zur weiteren Verarbeitung an die HDB abgegeben worden. Die Verarbeitung dieser Komponenten wird im Folgenden beispielhaft näher erläutert.

Bearbeitung der Dampferzeuger

Der MZFR verfügte über zwei Dampferzeuger mit einer Masse von jeweils 55 Mg und einer Länge von 10 m bei einer maximalen Breite von 2,5 m, die nacheinander zur HDB geliefert und dort weiterverarbeitet wurden (Abb. 1). Um die



Abb.1: Antransport und Verarbeitung der Dampferzeuger des MZFR.

Dosisexposition des Personals bei der Verarbeitung und das Kontaminationsniveau insbesondere im Primärsystem so weit wie möglich zu reduzieren, wurde das Rohrbündel im Vorfeld über einen Säurekreislauf dekontaminiert. Dabei wurde ein durchschnittlicher Dekontaminationsfaktor von drei erreicht. Für die eigentliche Zerlegung des Dampferzeugers wurde dieser in ein Abschirmgerüst eingehängt. Nach dem der Dampferzeugermantel entfernt war, begann die fernhantierte Zerlegung des Rohrbündels im Primärsystem. Die Rohre wurden weitgehend automatisiert entlang der Rohrführungsbleche abgeschnitten. Nachdem die Röhre und Rohrdurchführungsbleche komplett entfernt und für die weitere Verarbeitung in Abschirmkisten verpackt waren, konnten die verbleibenden Dampferzeugerteile thermisch zerlegt werden.

Um das Volumen zu reduzieren wurden Rohre, Rohrführungsbleche und die restlichen Dampferzeugereinbauten unter Hochdruck verpresst. Der Rest des Dampferzeugers wurde dekontaminiert und das Material mit atomrechtlicher Genehmigung entweder zum Einschmelzen oder zur schadlosen Wiederverwertung abgegeben. So konnten von den angelieferten 110 Mg ca. 40 % wiederverwertet werden, während 6 % eingeschmolzen werden konnten.

Bearbeitung von stabförmigen Komponenten

Beim Rückbau des MZFR ist eine Vielzahl von stabförmigen Komponenten (121 Trennrohre, 120 Brennelementgestänge, 17 Regel- und Absorberstäbe und 18 Führungs-

rohre) angefallen, die eine maximale Dosisleistung von ca. 5 Sv/h und eine Gesamtaktivität von $1 \text{ E}+13 \text{ Bq}$ hatten. Deren Transport erfolgte in einem speziell konstruierten Abschirmbehälter, der an die Schleuse der MAW-Verschrottung angedockt werden konnte. Die Entladung erfolgte mit Hilfe von Manipulatoren. Die massiven Kopfteile der Brennelementgestänge aus Zirkaloy wurden zunächst abgesägt und direkt in 200-l-Fässer verpackt und mit Beton vergossen. Eine Volumenreduktion durch Verpressen war hier nicht möglich. Der Rest der Brennelementgestänge und die anderen stabförmigen Komponenten wurden mit einer Hydraulikschere in kleine Stücke zerschnitten, die fernhantiert in Paketiertrommeln verpackt und mit einer Presskraft von 2.000 Mg hochdruckkompaktiert wurden. Insgesamt sind bei der Verarbeitung der 276 stabförmigen Komponenten 82 Abfallprodukte entstanden, die den Endlagerbedingungen KONRAD entsprechen.

Bearbeitung der Rückbaukomponenten der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK)

Zwei Großkomponenten, die beim Rückbau der KNK angefallen sind und die eine besondere Aufmerksamkeit in der Verarbeitung bedurften, waren der Natrium-Ablasstank und der Reaktordrehdeckel.

Bearbeitung des Natrium-Ablasstankes

Das Problem bei der Bearbeitung des Natrium-Ablasstankes der

KNK waren nicht seine Abmessungen (Länge 9 m, Durchmesser 2,2 m), sondern die noch im Tank befindlichen ca. 150 kg metallisches Natrium bei einem Tankvolumen von 32 m^3 . Neben dem metallischen Natrium befanden sich auch noch Spuren von Natriumoxid und Natriumhydroxid im Behälter. Durch den Betrieb des Reaktors war das Natrium radioaktiv kontaminiert, hauptsächlich mit Cs-137, Co-60 und Na-22. Somit musste vor der eigentlichen Bearbeitung des Natrium-Ablasstankes zunächst sämtliches Natrium entfernt werden. Dies erfolgte durch eine kontrollierte chemische Umsetzung von Natrium mit Wasser zu Natronlauge und Wasserstoffgas. Damit die Natronlauge den Tank verlassen kann, wurde am tiefsten Punkt des Tankes ein Stutzen angebracht. Um die Bildung eines zündfähigen Gemisches oder eines Natriumbrandes zu vermeiden, wurde durch Spülung mit Stickstoff eine inerte Atmosphäre hergestellt und der Wasserstoff kontrolliert abgeführt. Für die kontrollierte Umsetzung des Natriums mit Wasser wurden im Tank, nachdem eine Videoinspektion durchgeführt wurde, mehrere Sprühdüsen so angebracht, dass die komplette Tankinnenfläche nach und nach mit einem feinen Wasserdampfnebel besprüht wurde (Abb. 2). Während des gesamten Sprühvorganges wurde die Wasserstoffkonzentration innerhalb des Tankes kontinuierlich gemessen. Bei der Umsetzung durfte eine mittlere Wasserstoffkonzentration von 1 Vol.-% nicht überschritten werden. Ansonsten musste die Sprühbefeuchtung solange eingestellt werden, bis die Wasserstoffkonzentration wieder unter den ein-

gestellten Maximalwert gesunken war. Nachdem das gesamte Natrium auf diese Art zu Natronlauge umgesetzt war, war auch die Dosisleistung des Tanks soweit reduziert, dass eine Weiterverarbeitung problemlos möglich war. Der Tank wurde daraufhin thermisch in handhabbare Stücke zerlegt und dekontaminiert bzw. hochdruckverpresst.

Bearbeitung des Reaktordrehdeckels

Vor der Anlieferung des Reaktordrehdeckels vom KNK zur HDB wurde sämtliches noch anhaftendes Restnatrium vollständig entfernt, so dass dieses bei der Verarbeitung nicht zu Problemen führte. Der Drehdeckel mit einer Länge von 6 m und einem Durchmesser von 2,3 m und einer Masse von 25 Mg, bestand aus mehreren Kammern, die mit verschiedenen Materialien gefüllt waren, um eine optimale Abschirm- und Dämmwirkung zu erzielen (Abb. 3). Die Kammern waren u. a. mit Schwerstbeton, Basaltgranulat und Steinwolle gefüllt. Da der Drehdeckel Dosisleistungen bis zu 22 mSv/h aufwies, mussten die Arbeiten in einem abgeschirmten Bereich mit minimalem Personaleinsatz durchgeführt werden. Daher wurde entschieden, dass die Vorzerlegung des Drehdeckels in handhabbare Stücke und die Trennung der Materialsorten mit einer Seilsäge erfolgte (Abb. 4). Problematisch bei der Zerlegung des Drehdeckels mit Hilfe der Seilsägetechnik war, dass dieser nicht aus Vollmaterial bestand, sondern rohrförmige Einbauten hatte. Somit musste die Seilsäge so ausgelegt werden, dass das Seil während des ge-



Abb. 2: Natrium-Ablasstank während der Sprühbefeuchtung zum Umsetzen des Natriums bei kontinuierlicher Überwachung der Wasserstoffkonzentration.

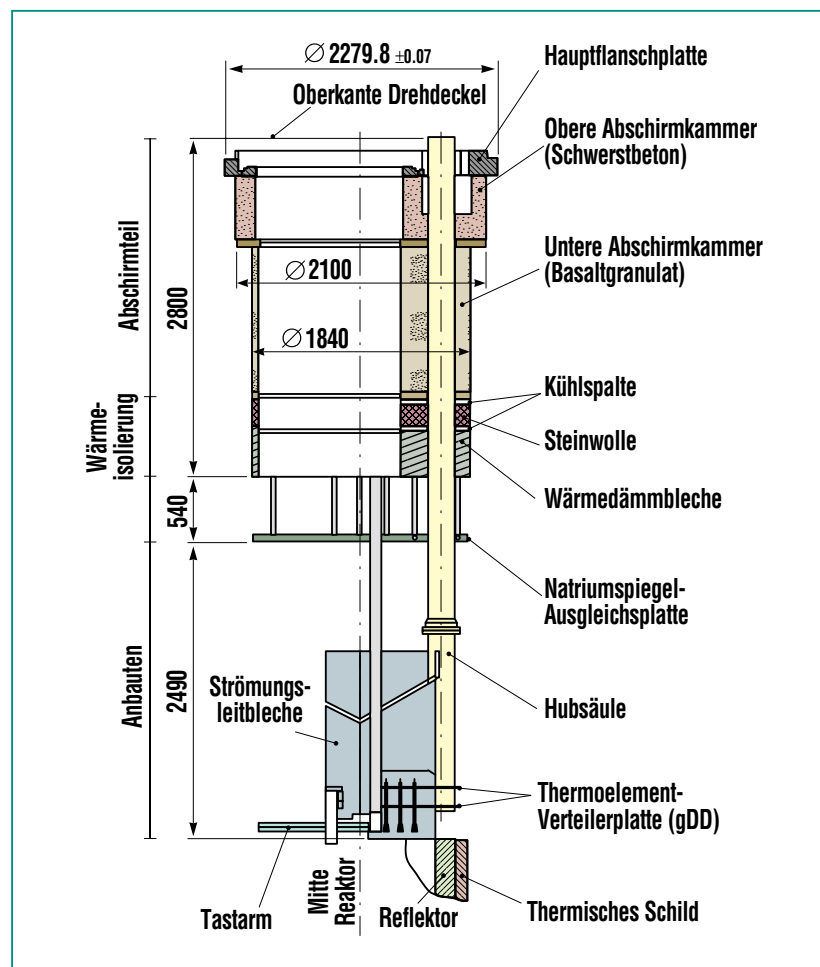


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Reaktordrehdeckels.



Abb. 4: Zerlegung des Reaktordrehdeckels und seiner Einbauten mit einer Seilsäge (Mock-up).

samt den Schneidevorganges durch verschiedene Materialarten nicht reißen würde.

Bearbeitung von Betonstrukturen

Beim Rückbau von heißen Zellen werden die Decken- und Wandstrukturen oft mit Hilfe einer Seilsäge in Blöcke geschnitten. Die Blöcke werden verpackt und zur weiteren Bearbeitung zu einer externen Behandlungseinrichtung geschickt. Die HDB hat in den letzten Jahren u. a. mit der Behandlung von Betonblöcken aus dem Rückbau der heißen Zellen bei der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) Erfahrungen gesammelt. Diese waren durch eine Alpha-Kontamination und eine hohe Dosisleistung gekennzeichnet.

Bearbeitung der Betonblöcke der WAK

Im Rahmen der Rückbauarbeiten in der WAK wurden die Wände der bereits geleerten Zellen zerlegt. Problematisch bei der Zerlegung war, dass die Wände mit verschiedenen Durchführungen bzw. Rohrleitungen durchsetzt waren. Die Durchführungen bzw. Rohrleitungen dienten zum Transport der Versorgungsmedien bzw. von HAW flüssig in die einzelnen Zellen. Die Durchführungen hatten in der Wand ein leichtes Gefälle und verfügten über Strahlungsfallen.

Die Durchführungen verliefen von der Zellenaußenseite zur Zelleninnenseite und wurden vor der Demontage abgetrennt und auf der Zellenaußenseite verschlossen. Auf der Zelleninnenseite waren die Durchführungen nur zugequetscht. Auf beiden Seiten standen die Durchführungen ca. 10 cm aus dem Beton heraus. Auf der Zelleninnenseite war der Beton mit Epoxidharz beschichtet.

Die bei der Zerlegung der Wände entstehenden Betonblöcke wurden in Container verpackt und zur HDB zur weiteren Bearbeitung transportiert. Dort erfolgte eine Nachzerlegung der Blöcke, um ei-

ne volumenoptimierte Verpackung in KONRAD-Container unter Berücksichtigung der Grenzwerte zu erreichen. Restvolumen in den Containern wurde mit losem Bauschutt aufgefüllt. Aufgrund der hohen Alpha-Kontamination der Blöcke war es nicht möglich, Teile der schadlosen Wiederverwertung zuzuführen.

Zwei der angelieferten Blöcke waren so stark Alpha-kontaminiert, dass diese aufgrund ihrer hohen Dosisleistung und ihres Aktivitätsinventares nicht direkt in KONRAD-Container eingelegt werden konnten. Sie wurden zuerst fernhandelt dekontaminiert (Abb. 5). Nach dem Ausladen der Blöcke aus der Transportabschirmkiste wurden sie in einen kameraüberwachten, abgeschirmten Verarbeitungscaisson gelegt. Dort wurde die Kontamination mit Hilfe eines Stockermeißels, der an einem ferngesteuertem Meißelbagger angebracht war, entfernt. Die Abplatzungen und der entstehende Staub wurden abgesaugt und direkt in Paketiertrommeln gesammelt, die anschließend hochdruckverpresst wurden. Nachdem ca. 10 cm der Oberfläche entfernt waren, konnten die Blöcke wie geplant direkt in KONRAD-Container verpackt und



Abb. 5: Bearbeitung der Alpha-kontaminierten Betonblöcke der WAK.

gemäß den Endlagerbedingungen KONRAD konditioniert werden.

Behandlung eines PKWs aus dem WAK-Nachsorgefall

Im Rahmen des Entwendungsfalles von radioaktivem Material aus der WAK wurde das Fahrzeug des Täters radioaktiv kontaminiert. Es handelte sich dabei um einen BMW mit einer Alpha-Kontamination von maximal $2,5 \text{ Bq/cm}^2$ und einer Beta-Kontamination von maximal $1,4 \text{ Bq/cm}^2$. Aufgrund dieser Kontamination musste das Fahrzeug als radioaktiver Reststoff behandelt und entsorgt werden.

Die Hauptkontamination im Fahrzeug war im Bereich der vorderen Sitze (Abb. 6) zu finden. Da jedoch auch in anderen Bereichen Kontaminationen nachweisbar waren und es nicht auszuschließen war, dass sich auch Kontamination im Lüftungsbereich befand, musste das gesamte Fahrzeug demontiert werden. Zunächst wurden sämtliche Flüssigkeiten, wie z. B. Restbenzin, Kühlflüssigkeit usw. abgelassen und konnten nach Beprobung und Analyse für die schad-

lose Wiederverwertung freigegeben werden. Bei der anschließenden Demontage des Fahrzeuges wurde bereits versucht, eine Trennung von kontaminierten und nicht kontaminierten Teilen durchzuführen. In einem ersten Demontageschritt wurden die Sitze, die Innenverkleidung des Bodens, der Türen und des Himmels und die Ablagen demontiert. Aufgrund der Materialbeschaffenheit war keine Dekontamination dieser ausgebauten Teile möglich und somit musste dieses Material komplett als radioaktiver Abfall behandelt werden.

In einem nächsten Bearbeitungsschritt wurde der gesamte Motorraum demontiert. Die Lüftungskomponenten wurden dabei getrennt gesammelt und ebenfalls als radioaktiver Abfall entsorgt. Die restlichen Bestandteile des Motorraumes konnten freigemessen und der schadlosen Wiederverwertung zugeführt werden. Als letzter Schritt wurden noch sämtliche im Innenraum verbliebenen Bestandteile wie Armaturen, Scheiben und Ablagen demontiert. Die Innenverkleidung des Kofferraumes musste ebenfalls ausgebaut wer-

den. Um eine Freimessung der nun verbliebenen Karosserie des Fahrzeuges durchführen zu können,

wurden auch die Reifen und Achsen des Autos demontiert.

Im Rahmen der Demontage des Fahrzeuges (Gesamtgewicht ca. 1800 kg) konnten der Motor, die Achsen, die Karosserie, die Scheiben, die Felgen und die Flüssigkeiten (Masse ca. 980 kg) freigemessen werden, während die Teppiche, Sitzpolster, Ablagen, Türinnenverkleidungen und das Armaturenbrett als radioaktiver Abfall (Masse ca. 100 kg) verbrannt werden mussten. Die restlichen Komponenten (Masse ca. 720 kg) mussten hochdruckverpresst werden.

Zusammenfassung

Seit dem Beginn der Stilllegung von Forschungsreaktoren musste sich die HDB den neuen Aufgaben anpassen und sich auf die Verarbeitung von Stilllegungsabfällen, insbesondere auf die Behandlung von Großkomponenten, einrichten. Die Erfahrungen, die dabei im Forschungszentrum Karlsruhe gemacht wurden, zeigen, dass es für



Abb.6: Behandlung des kontaminierten Fahrzeuges aus dem WAK-Nachsorgefall.

die Rückbauprojekte vorteilhaft ist, größere Komponenten nach ihrem Ausbau nicht selbst zu zerlegen, sondern an die HDB abzugeben. Zum einen sind die Rückbauprojekte räumlich sehr beschränkt, so dass eine Zerlegung vor Ort meist nicht möglich ist, zum anderen kann nach dem Abtransport der Komponenten der Rückbau zügig fortgesetzt werden und somit die Projektabwicklung beschleunigt werden.

Um Stilllegungsabfällen technisch sinnvoll und wirtschaftlich günstig bearbeiten zu können, ist eine enge Zusammenarbeit mit den Rückbauprojekten erforderlich. Eine frühzeitige Detailplanung der jeweiligen Vorgehensweise erleichtert die Durchführung und reduziert damit die Dosisexposition des Personals und die Kosten. Oft ist es notwendig, Spezialwerkzeuge anzufertigen, die Arbeitsplätze u. a. mit speziell hergestellten Lasttra-

versen und Abschirmungen auszustatten und das Personal zu schulen. Eine flexible Anpassung der Arbeitsplätze und der Vorgehensweise sind unerlässlich.

Stand und Perspektiven der Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) – Neustrukturierung des Projektes

W. Pfeifer, G. Katzenmeier, WAK

Einleitung

Die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen zur Schließung des nuklearen Kernbrennstoffkreislaufes wurde ab Anfang der 60er Jahre aktiv verfolgt. Sie war Bestandteil des Energiekonzeptes der Bundesrepublik Deutschland. Ziel war die Gewinnung des in den bestrahlten Kernbrennstoffen enthaltenen, spaltbaren Rest-Uran-235 und des erbrüteten Plutoniums. In Verbindung mit den Entwicklungen und dem Bau von natriumgekühlten schnellen Brutreaktoren sollte langfristig die Unabhängigkeit von Lieferungen an Natururan erreicht werden.

Das Forschungszentrum Karlsruhe wurde von dem damaligen Bundesministerium für Forschung beauftragt, die Grundlagen für die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen durch Entwicklung von Verfahren zu schaffen. Mit dem Bau und Betrieb einer Prototypanlage sollten Erfahrungen für eine industrielle Wiederaufarbeitungsanlage geschaffen werden.

Unter der Projektleitung des Forschungszentrums Karlsruhe wurde 1967 mit dem Bau der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe („WAK“) als Prototypanlage begonnen. Hierzu wurde für den Betrieb der Anlage eine Betreibergesellschaft, die Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (GWK) mit Firmen aus der chemischen Industrie als Gesellschafter gegründet. Hilfreich waren Kenntnisse aus der deutschen Beteiligung an der internationalen Wiederaufarbeitungsanlage EUROCHEMIC in Dessel, Belgien. Die WAK wurde 1971 in Betrieb genommen. 1979 schied die chemische Industrie als Gesellschafter

aus und die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe Betriebsgesellschaft (WAK BGmbH) als neue Betreibergesellschaft wurde von der Deutschen Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (DWK), einer Gesellschaft der deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU), übernommen.

Schwerpunkte für den Anlagenbetrieb waren

- der Nachweis kommerzieller Wiederaufarbeitung von bestrahlten Kernbrennstoffen aus Leistungsreaktoren. Es wurden Brennelemente bis zu einem Abbrand von 55.000 MW/MgU aufgearbeitet, darunter auch Elemente mit bereits wiederaufgearbeiteten Uran-(WAU)- und Mischoxid-(MOX)-Brennstoffen.
- die Erprobung neuer Techniken für den Einsatz in der geplanten industriellen Anlage in

Wackersdorf (WA-350). Im Mittelpunkt standen elektrolytische Extraktionsprozesse bei der Trennung von Plutonium und Uran von der Spaltproduktlösung und Rückhalte-techniken für Iod und Schwefelstoffe aus dem Abgas.

- die Ausbildung von Personal für den Betrieb der industriellen Anlage.

1989 entschieden die EVU's, die in Bau befindliche WA-350 nicht weiter zu realisieren. Die Bundesregierung beschloss 1991 weiterhin, den fertig gestellten Schnellen Brutreaktor in Kalkar (SNR-300) nicht in Betrieb zu nehmen.

Mit diesen Entscheidungen war die Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen entzogen. Der Betrieb der WAK wurde 1991 eingestellt, die Anlage sollte vollständig rückgebaut werden (siehe Abb. 1).

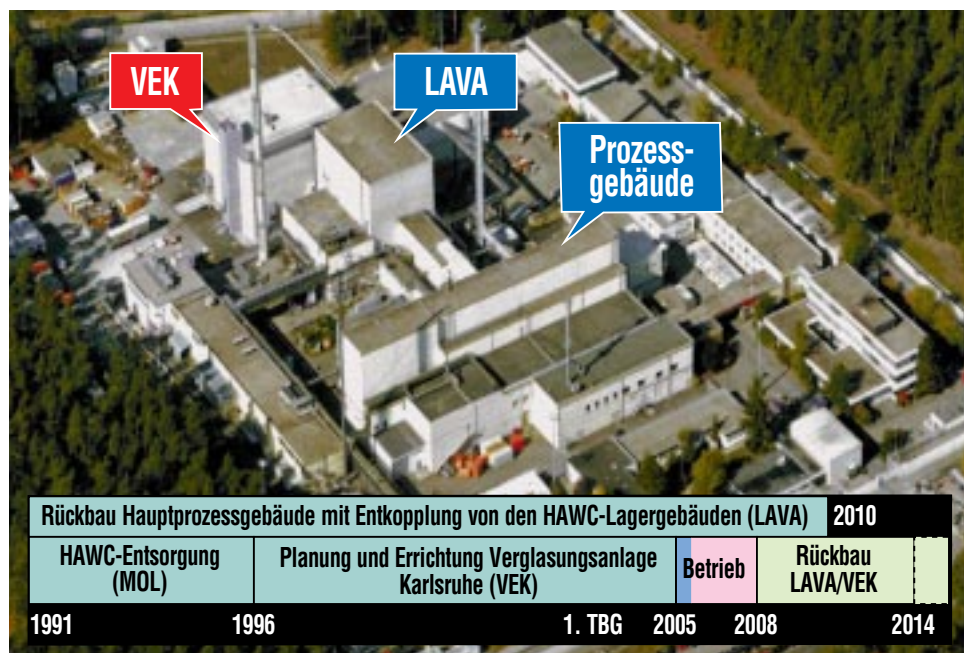


Abb. 1: WAK-Gelände mit den wichtigsten Projektmeilensteinen.

Ausgangslage 1991

Grundlage für den Rückbau der WAK war der zwischen den beteiligten Parteien, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Land Baden-Württemberg (BW), der DWK, dem Forschungszentrum Karlsruhe und der WAK, vereinbarte Stilllegungsvertrag mit folgenden wesentlichen Inhalten:

- DWK (EVU's) und Bund/Land zahlen je eine Milliarde DM in einen Stilllegungsfonds ein. Dies waren die damals geschätzten Kosten der Stilllegung einschließlich Entsorgungsbeitrag. Kostenerhöhungen gehen zu Lasten von Bund und Land.
- Das Forschungszentrum Karlsruhe ist federführender Projektverantwortlicher und Fondsverwalter.
- WAK BGmbH ist verantwortlich für die Durchführung von Restbetrieb und Rückbau.
- Alle radioaktiven Reststoffe und Abfälle werden zur Behandlung und endlagergerechten Verpackung an die Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB) des Forschungszentrums abgegeben.

Für den Rückbau waren zum Projektbeginn folgende Randbedingungen von Bedeutung:

- Die Anlage war kernbrennstofffrei und gespült; restliche Kernbrennstoffe aus den dem Bund gehörenden stillgelegten Anlagen, wie Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR) und dem Forschungsschiff Otto Hahn, konnten noch aufgear-

beitet werden. Im Brennelementeingangslager befindliche Kernbrennstoffe von Leistungsreaktoren wurden zur Wiederaufarbeitung in die COGEMA Wiederaufarbeitungsanlage nach La Hague, Frankreich transportiert.

- Ein erstes, grobes Rückbaukonzept, lag vor.
- Für die Entsorgung des noch lagernden flüssigen, hochaktiven Wastekonzentrats (HAWC) war das Projekt „Transport und Verglasung in der PAMELA-Anlage, Mol“ weit fortgeschritten.

Erfahrung bei der Durchführung der Rückbauarbeiten im Hauptprozessgebäude

Genehmigungsverfahren

Geprägt durch das Genehmigungsverfahren für den Rückbau des Versuchskraftwerkes Niederaichbach (KKN) ging man anfangs davon aus, in einem Antrag und dazugehörigem Öffentlichkeitsverfahren den Rückbau genehmigen zu lassen. Diese Praxis wurde Anfang der 90er Jahre verlassen. In Anlehnung an den damals neuen Leitfaden zur Stilllegung nuklearer Anlagen wurde der Rückbau in eine Anzahl von technisch überschaubaren, in sich geschlossenen Genehmigungen unterteilt, die durch das „Gesamtkonzept Stilllegung der WAK“ verbunden sind.

Der Rückbau des Prozessgebäudes ist aktuell in 12 Stilllegungsgenehmigungen (SG) unterteilt, die alle Arbeiten bis zur Aufhebung des Kontrollbereiches im Prozessgebäude umfassen.

Deregulierung

Die Zeit vom Betriebsende der WAK bis zur Genehmigung der ersten Abbauschritte dauerte 5 Jahre, bedingt dadurch, dass Antragsteller, Genehmigungsbehörde und Gutachter sich auf die durch den Rückbau geänderten Rahmenbedingungen einstellen mussten.

In dieser Zeit wurden

- die Außerbetriebnahme von nicht mehr benötigten Systemen
- die Anpassung der Anlagendokumentation an den Istzustand mit gutachterlicher Feststellung und Prüfung sowie
- die Anpassung der Organisation an den neuen Anlagenzustand

durchgeführt.

Ende 1996 wurde der Vertrag zwischen der WAK BGmbH und dem Forschungszentrum dahingehend modifiziert, dass

- der WAK BGmbH zusätzlich die Verantwortung für die Rückbauplanung und -genehmigung übertragen wurde und
- das Forschungszentrum nach der Entscheidung, die Transportlösung für die HAWC-Entsorgung zu verlassen, die Errichtung einer Verglasungsanlage vor Ort eigenverantwortlich übernahm. Dies war konsequent, da das Forschungszentrum mit dem Institut für nukleare Entsorgung (INE) über entsprechendes Know-how verfügt und Neuentwicklungen des Schmelzofens zur Verfügung standen.

Manuelle Demontage von peripheren Einrichtungen des Prozessgebäudes

Von 1996 bis 1997 wurden auf der Grundlage der zwei ersten Rückbaugenehmigungen 15 Systeme abgebaut, die entweder mit den vorhandenen Einrichtungen – Kräne, Manipulatoren u. a. – oder im direkten Einsatz manuell demontiert werden konnten. Hierzu gehörten

- die Entfernung von Einbauten im Brennelementlagerbecken mit der zugehörigen Beckenwasserreinigung
- Demontagen von Einrichtungen in der Brennelement-Zerlegezelle
- Rückbau von Einrichtungen der Plutonium- und Uranreinigung mit den jeweiligen Produktlagern.

Insgesamt wurden 550 Mg Demontagegut mit einer Aktivität von 1,5 E14 Bq ausgebracht. Die Vorgehensweise und die Ausführung richteten sich nach den erprobten Instandhaltungsabläufen aus der Betriebszeit.

Fernhantierte Demontage der Prozesszellen

Schwerpunkt in den Jahren 1999 bis 2001 war die fernhantierte Demontage aller hochkontaminierten Einrichtungen in den Prozesszellen. [4]

In Abb. 2 sind die für die vertikale Demontage verwendeten Gerätschaften aufgezeigt.

Folgende Neueinrichtungen kamen hierbei zum Einsatz:

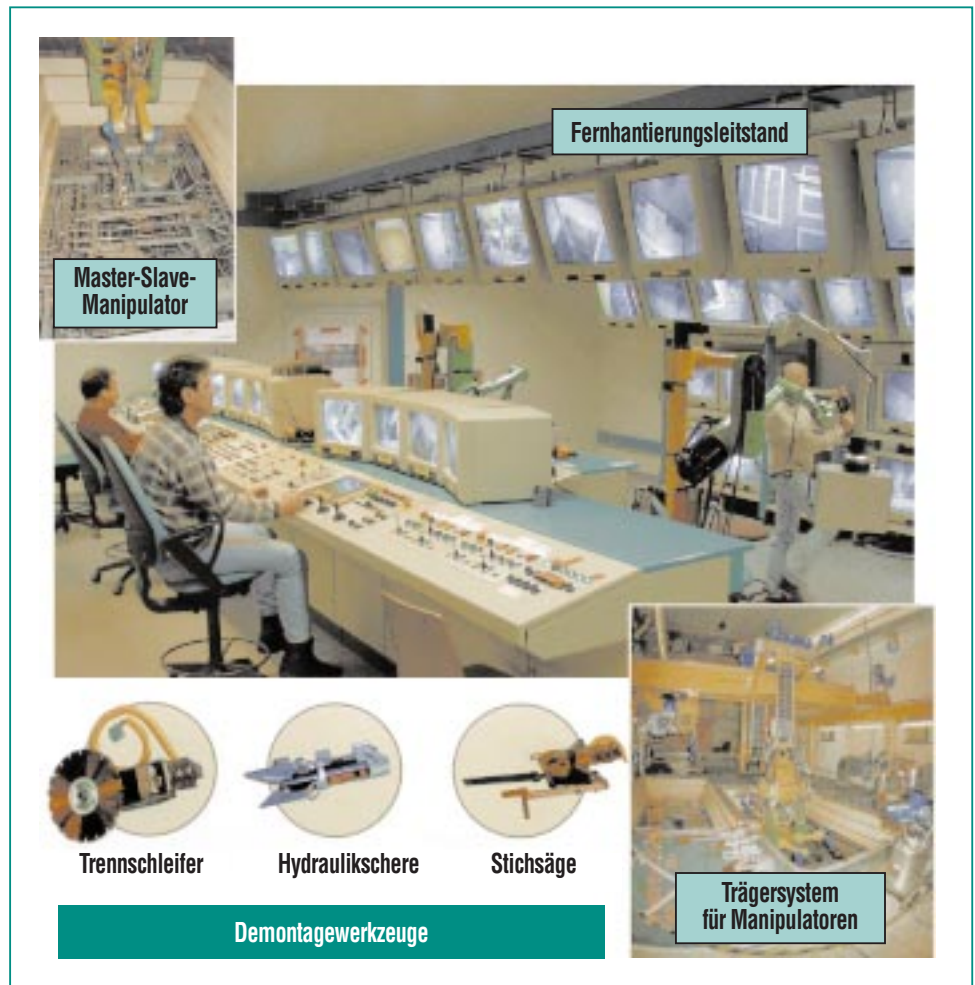


Abb. 2

- Manipulator-Trägersystem: Brückenkran und Hebeeinrichtung zur Aufnahme der Master-Slave-Manipulatoren
- Fernhantierungsleitstand mit zwei Mastermanipulatoren und Bildschirmen
- Demontagewerkzeuge (kommerziell verfügbare Geräte, die den Bedürfnissen der Fernhantierung angepasst wurden) mit Hydraulikschere, Trennschleifer, Sprühlanze für Faserbindemittel zur Staubfixierung
- Zellenhallenkran: Spezialkran mit Hebezeug in Schutzeinhausung für Transportvorgänge
- Zellenhallenhilfskran (auf Fernhantierung umgerüsteter, bereits vorhandener Brückenkran als Hilfskran für Bergungsaktionen für Werkzeuge oder Einrichtungen)
- Hilfsmanipulator (am Zellenhallenhilfskran angehängt zum Einsatz bei Bergungsaktionen)
- Schleusen zum Transport der Werkzeuge und Reststoffe.

Kerngerät ist der seilgeführte, elektromechanische Master Slave Manipulator mit Kraftrückfluss. Die Grundbausteine sind auf Entwicklungsarbeiten des Forschungszentrums in den 80er Jahren für den Einsatz in kerntechnischen Heißzellenanlagen zurückzuführen.

Die Gerätschaften wurden in einem „kalten“ Mock-up im Maßstab 1:1 von 1994 bis 1998 getestet, qualifiziert und das Bedienungspersonal ausgebildet. Im heißen Einsatz wurden im 3-Schichtbetrieb in nur 18 Monaten ca. 130 Mg Material an Rohrleitungen und Behältern ausgebracht. Die Verfügbarkeit der Gerätschaften war über 90 %, dementsprechend gering die Kollektivdosis für Interventionen von nur 2,5 mSv. [4, 5]



Abb. 3: Blockziehen in Zellen.



Abb. 4: Wandshaver im Einsatz.

Entwendungsfall

Im Jahre 2001 wurde bei einem Fremdfirmenmitarbeiter Inkorporation bei einer Routineuntersuchung in nicht erklärbarer Höhe gefunden. Es stellte sich heraus, dass der Fremdfirmenmitarbeiter radioaktiv kontaminierte Wischtests aus der Anlage unbemerkt entwendet hat. Die Folgewirkung war feststellbare Kontamination in seiner Wohnung und seinem Umfeld.

Der Fremdfirmenmitarbeiter wurde rechtskräftig verurteilt, seine Beweggründe für den Diebstahl sind bis heute nicht bekannt.

Die Konsequenzen waren sicherheits- und sicherungstechnische Nachrüstungen aller Barrieren mit Kontaminationsüberwachung und getrennte Zugangsbereiche. Der Rückbau musste für ca. 1 1/2 Jahre eingestellt werden. Die zusätzlichen Überwachungsmaßnahmen reduzieren die verfügbare produktive Arbeitszeit vor Ort erheblich.

Demontage der Restsysteme, Grob- und Feindekontamination mit anschließender Freimessung

Parallel und schwerpunktmäßig nach der fernhantierten Zellendemontage wurde bis Ende 2005 ein Großteil der verfahrens- und versorgungstechnischen Hilfseinrichtungen in den ca. 60 Räumen um die Zellen manuell demontiert. Dazu gehören insbesondere: [6]

- die Installationen der Ventil- und Probenahmegalerie
- die vollständigen Einrichtungen der Schwach-, Mittel- und Hochaktivlabors

- die MAW- und HAWC-Leitungen zwischen Prozessgebäude und HAWC-Lager
- Medien- und Lüftungsleitungen, Kabeltrassen, Schleusen usw.

Wie in Abb. 3 zu sehen ist, wurden nach dem fernbedienten Abbau auch über 200 Betonblöcke mit kontaminierten Durchführungsrohrleitungen aus den Zellenwänden herausgeschnitten und die kontaminierten Oberflächen der Zellenwände mit einem Shaver (rotierende Stahlwalze) abgetragen (Abb. 4).

Insgesamt wurden bei diesen Demontage- und Dekontaminationsarbeiten ca. 3.500 Mg radioaktive Reststoffe ausgebracht und an die HDB entsorgt.

Grundlage für die Freimessprozedur zur Aufhebung der Kontrollbereiche in der WAK ist die In-situ-Technik. Die In-situ-Gammaspektrometrie wurde im Zeitraum 1997 bis 2004 durch die WAK BGmbH weiterentwickelt und erprobt. In der Praxis wurden bereits über 40 Räume freigemessen mit einer Fläche von rund 7.000 m². [7]

Noch ausstehende Aufgaben im Prozessgebäude sind:

- restliche Kabeldemontage und Demontage von Hilfseinrichtungen
- Restdemontage Liner, Bodenwannen, Dübel u. a.
- Umbau der Lüftung zur Einrichtung einer rückbaugerichteten, vereinfachten Führung durch parallele Raumstränge

- Demontage der Zu- und Ab-
luftanlage nach Ersatz durch
mobile Geräte
- Feindekontamination und Frei-
messung von ca. 50.000 m²
Wand- und Deckenflächen.
Die Genehmigung zur Frei-
messung und Kontrollbe-
reichsaufhebung unter Beach-
tung des Verfahrens nach § 29
StrlSchV liegt vor.

Planung und Vorbereitung für den Rückbau der HAWC-Lager und der VEK

Im Zeitbereich 1999 bis 2001 wur-
de ein geschlossenes technisches
Konzept für die fernhantierte und
manuelle Zerlegung der HAWC-
Lagerbehälter (Abb. 5 und 6) und
der Installationen der VEK ausge-
arbeitet. Die Zerlegung selbst kann
frühestens nach dem Verglasungs-
ende beginnen. Das Konzept ist
durch folgende Merkmale ge-
kennzeichnet: [3, 8]

- horizontaler, ebenerdiger An-
griff auf die MAW- und HAWC-
Behälter über einen neuen Zu-
gang „HWL-Anbau Süd“
- Behälterdemontage und -zer-
legung mit einem fernbedien-
ten, raupengetriebenen Bag-
ger als Manipulatorträger (sie-
he Abb. 7); Manipulatoren wie
im Prozessgebäude
- Einsatz von im Prozessgebäu-
de bewährten, primär nicht
thermischen Trennwerkzeu-
gen.

Die ersten drei von insgesamt zehn
geplanten Genehmigungsanträ-
gen wurden gestellt, zwei Geneh-

migungen – Errichtung HWL-An-
bau Süd, und Demontage MAW-
Behälter – sind erteilt. Die Errich-
tung des HWL-Anbaus Süd steht
kurz vor der Fertigstellung.

Parallel wurde die neue Fernhan-
tierungstechnik (Bagger) ausge-
legt und prototypisch erfolgreich
erprobt. Leistungsfähige Zerlege-
werkzeuge für Rohre, Behälter und
Beton wurden entwickelt und sind
weitgehend bereitgestellt. Die
wichtigsten Arbeitsvorgänge bei
der Zerlegung der HAWC-Behälter
wurden zur Planabsicherung mit-
tels CAD-Simulation überprüft.

Neustrukturierung des Stilllegungsprojektes WAK (StiWAK)

Gegenüber der Ursprungsplanung
von 1991 hat sich das Projekt er-
heblich verteuert und verlängert.
Die Gründe sind:

- technisches Neuland, vor al-
lem in der Entwicklung und
Anwendung der Fernbedie-

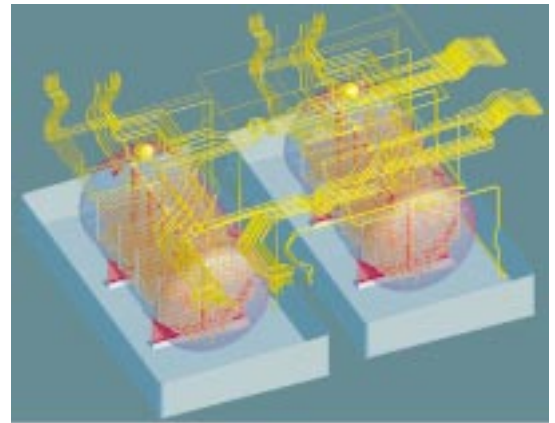


Abb. 5: HAWC-Lagerbehälter vertikal.

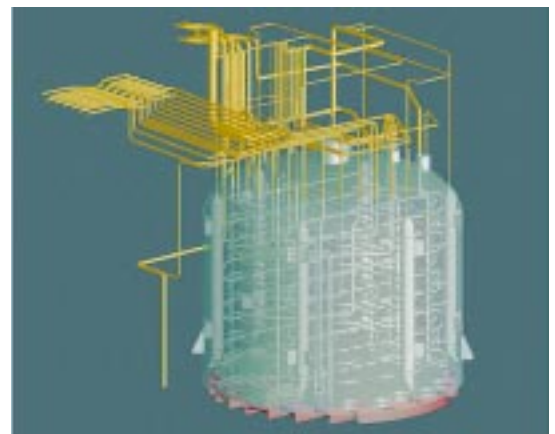


Abb. 6: HAWC-Lagerbehälter horizontal.



Abb. 7: Bagger mit Fernhantierungseinrichtungen.

nungstechnik für den Einsatz in α -kontaminierten Anlagenbereichen

- Änderung der HAWC-Entsorgungsstrategie mit Bau der VEK
- Rückbaustopp über 1 1/2 Jahre nach Entwendung von radioaktiven Materialien
- Erhöhter Aufwand in der Dekontamination von Zellenwänden aufgrund nicht bekannter Eindringtiefen der Aktivitäten.

Die Geldmittel im Stilllegungsfonds wurden vorzeitig verbraucht, so dass ab 2005 die Anschlussfinanzierung ausschließlich durch Bund und Land sichergestellt werden müssen. Durch die Partner des Stilllegungsvertrages von 1991 (Bund, Land BW, FZK, DWK, WAK) wurde eine Neubewertung des Projektes vorgenommen mit dem Ziel, bestehende Schnittstellen in den Bereichen operationelle, finanzielle, atom- und gesellschaftsrechtliche Verantwortung zu minimieren. Folgende übergeordnete Aspekte waren die Randbedingungen, den Stilllegungsvertrag von 1991 (Rahmenvereinbarung I) durch einen neuen Vertrag (Rahmenvereinbarung II) zu ersetzen:

- Bund und Land beabsichtigen, ihre Stilllegungsaktivitäten von nuklearen Anlagen in eine bundeseigene Gesellschaft zu integrieren. Die Energiewerke Nord (EWN) mit den Verpflichtungen für den Rückbau der Reaktoren in Greifswald und Rheinsberg sowie des Atomversuchsreaktors (AVR) in Jülich bot sich hier an.

- Das Forschungszentrum konzentriert sich auf FuE-Aktivitäten, nachdem die eigenen 5 Versuchsreaktoren vollständig bzw. weitestgehend zurückgebaut sind.

- Die EVU sind auf dem Gebiet der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen nicht mehr tätig. Die Erfahrungen aus dem Rückbau einer α -kontaminierten Anlage lassen sich nur sehr bedingt auf den Rückbau von Leistungsreaktoren übertragen.

Wesentliche Inhalte der im Oktober 2005 durch alle Vertragspartner unterzeichneten Rahmenvereinbarung II sind:

- DWK scheidet als Gesellschafter der WAK BGmbH aus, EWN tritt ein.
- Die Projektverantwortung (StiWAK) geht vollständig vom Forschungszentrum auf die WAK BGmbH über.
- Das Eigentum der Anlage WAK wurde vom Forschungszentrum auf die WAK BGmbH übertragen. Die Entlassung des Forschungszentrums aus der atomrechtlichen Mitgenehmigungsinhaberschaft erfolgt mit der Genehmigung des entsprechenden Antrags.
- Die WAK BGmbH wird zuständig für alle radioaktiven Abfälle aus der Betriebszeit und Stilllegung der WAK-Anlage. DWK bleibt Eigentümer der in ihrer zuständigen Betriebszeit von 1983 bis 1991 entstandenen radioaktiven Abfallprodukte. Hierzu hat sie WAK beauftragt, die Zwischenlagerung, Nachqualifizierung der Abfallpro-

dukte und die Bereitstellung für die Abgabe an ein Endlager zu übernehmen.

Der Gesellschafterwechsel wurde am 2. März 2006 nach Behandlung im Haushaltsausschuss des Bundestages mit Erteilung einer Finanzierungszusage vollzogen. Der neue Name der Gesellschaft ist WAK Rückbau- und Entsorgungsgesellschaft (WAK GmbH).

Ausblick

Mit der Übernahme durch den neuen Gesellschafter wurden die folgenden Akzente gesetzt:

- Die **Integration der Vergleichsanlage (VEK) in den Betrieb der WAK** hat Vorrang. Jede Verzögerung oder Reduzierung der geplanten Verfügbarkeit trägt zur Projektlaufzeitverlängerung und damit zur Erhöhung der Gesamtprojektkosten bei. Um sich auf diese Aufgabe voll zu konzentrieren, wurden die weiteren Rückbauarbeiten im WAK-Prozessgebäude als zeitlich unkritisch unterbrochen.
- **Neuordnung der Projektarbeiten und der Gesamtplanung**
Die Projektaktivitäten werden ausgerichtet auf
 - Erstellung der Antragsunterlagen zur Deregulierung von technischen Anlagenteilen und der Betriebsorganisation nach Abschluss der Verglasung. Hiermit werden heutige Betriebskosten und Personalaufwendungen erheblich reduziert. Alle in Verbindung mit der sicheren Lagerung des HAWC stehen-

den sicherheitstechnisch wichtigen Systeme, wie Wasserrückkühlanlagen, Teile der Stromversorgung und Objektschutzeinrichtungen, werden nicht mehr benötigt.

– Das Demontagekonzept der HAWC-Behälter als zentrale technische Aufgabe wird auf Optimierungen hin untersucht. Hier fließen die Erfahrungen der EWN zur ganzheitlichen Demontage von

Großkomponenten mit anschließender örtlich und zeitlich entkoppelter Zerlegung und Abfallbehandlung mit ein.

– Die bisherigen Termin- und Kostenplanungen werden überprüft.

Mit der Integration der WAK Rückbau- und Entsorgungsgesellschaft (WAK GmbH) in den EWN-Konzern sind weitere Perspektiven der Übertragung von Rückbau- und

Betriebs- (Verglasungs-) Knowhow der WAK auf andere Projekte gegeben. Die Übernahme von neuen Aufgaben gibt der Gesellschaft und den Mitarbeitern Perspektiven, die über das Ende der reinen Rückbautätigkeiten hinausgehen.

Literatur

- [1] C. Hanschke, L. Finsterwalder, A. Sahm, H. Wiese, *Rückbau der Wiederaufarbeitungsanlage (WAK)*, *Atomwirtschaft* 47, 322, 2002
- [2] W. Pfeifer, J. Fleisch, G. Katzenmeier, *Decommissioning of the Karlsruhe reprocessing plant (WAK)*, *IAEA Technical Specialists Meeting „Innovative Nuclear Fuel Cycle Technologies“*, Wien, April 2003
- [3] K.-J. Birringer, G. Katzenmeier, B. Hosemann, G. Hammer, *Technisches Konzept zum fernhantierten Rückbau der Lagerbehälter für hochaktiven Flüssigabfall in der WAK*, *KONTEC-Tagung, Berlin, März 2003*
- [4] W. Pfeifer, K. Hendrich, G. Katzenmeier, G. Hammer, W. Süßdorf, J. Thiess, *Erfahrungen in der fernbedienten Demontage von kerntechnischen Anlagen des Forschungszentrums Karlsruhe, ManiRob 2003*, Bonn, November 2003
- [5] Fr.-W. Bach, W. Pfeifer, R. Verseemann, P. Wilk, L. Valencia, B. Eisenmann, G. Hammer, *Decommissioning technologies, including recent developments and special features of the dismantling of nuclear research and prototype facilities*, *Kerntechnik* 70 (2005) 1-2, S. 31 – 46
- [6] G. Dutzi, H. Praxl, *Stand der laufenden Rückbaumaßnahmen im Prozessgebäude der WAK*, *KONTEC-Tagung, Berlin, April 2005*
- [7] *Messstrategien für die In-situ-Gammasspektrometrie bei Freimessungen von Gebäuden und Bodenflächen nach § 28 StrlSchV*, *Ministerium für Umwelt und Verkehr, FZK, WAK, TÜV, Februar 2005*, Veröffentlicht bei der *KONTEC-Tagung, April 2005*
- [8] K.-J. Birringer, K. Heger, K. Hendrich, W. Lumpp, M. Weishaupt, *Nach dem Verglasungsbetrieb kommt die Stilllegung – Umsetzung von Rückbauerfahrungen beim Anlagenbau am Beispiel der Verglasungsanlage Karlsruhe VEK*, *Jahrestagung Kerntechnik, Nürnberg, Mai 2005*

Die Verglasung von hochradioaktiven Flüssigabfällen – ein Weg zu mehr Sicherheit in der nuklearen Entsorgung

T. Fanghänel, G. Roth, INE

Einleitung

Bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe zur Rückgewinnung von Uran und Plutonium fallen hochradioaktive, salpetersaure flüssige Abfälle an, die mehr als 99 % der ursprünglichen nichtflüchtigen Radioaktivität des Kernbrennstoffs und bis zu 50 verschiedene chemische Elemente enthalten. Neben den im Reaktor erzeugten Actiniden und Spaltprodukten zählen hierzu auch Korrosionsprodukte aus den Apparaten und Anlagen der Wiederaufarbeitung sowie chemische Zuschlagsstoffe aus dem Wiederaufarbeitungsprozess. Die hochradioaktiven Flüssigabfälle (engl. High Level Liquid Waste, HLLW) werden nach Aufkonzentrierung durch Eindampfen in abgeschirmten Lagertanks aus Edelstahl zwischengelagert. Die Lagerung der Flüssigabfälle ist Stand der Technik und wird seit ca. 50 Jahren international angewendet. Sie erfordert einen hohen sicherheitstechnischen Aufwand, da Vorkehrungen zur Abfuhr der Zerfallswärme der Radionuklide, zur ständigen Homogenisierung des Tankinhaltes und zur Vermeidung der Akkumulation von explosiven Gasen aus Radiolysereaktionen zu treffen sind. Darüber hinaus sind redundante Einrichtungen zur Messung von Füllvolumen, Dichte, Temperatur sowie zur Probenahme notwendig. Auch die Behälterkorrosion wird überwacht.

Für die sichere Zwischen- und Endlagerung muss der hochradioaktive flüssige Abfall verfestigt werden. Weltweit findet dabei die Verglasung Anwendung, bei der die Abfallbestandteile in einer Glasmatrix

fixiert werden. Das Glasprodukt wird in Edelstahlbehälter (Kokillen) abgefüllt und für mehrere Jahre zwischengelagert, bis die Zerfallswärme so weit abgeklungen ist, dass die Kokillen sicher endgelagert werden können. Im Folgenden wird auf die Prozessschritte der Verglasung von hochradioaktivem Flüssigabfall eingegangen und die angewendeten Prozesstechnologien sowie der internationale Status auf diesem Gebiet werden skizziert.

Prozessschritte der Verglasung

Zur Immobilisierung der radioaktiven Elemente hat sich die Einschmelzung in Alkaliborosilikatgläser durchgesetzt, die bereits bei relativ niedrigen, prozess- und materialverträglichen Temperaturen von 1150–1200 °C erschmolzen werden können. Solche Gläser erlauben den Einbau einer Vielzahl chemischer Elemente in variablen Mengenverhältnissen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verglasung von hochradioaktivem Flüssigabfall sind in ei-

ner Reihe von Ländern bereits Mitte der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts begonnen worden und haben im Laufe der letzten 25 Jahre zu anwendungsreifen Technologien geführt.

Die Immobilisierung hochradioaktiver Flüssigabfälle in einer Glasmatrix erfolgt in einem Hochtemperaturprozess. Die im Flüssigabfall gelösten oder suspendierten Abfallelemente werden durch glaschemische Reaktionen in die Alkaliborosilikatglasschmelze eingebunden. Von der flüssigen Phase bis zu den Schmelzreaktionen durchlaufen die Abfallelemente einen Temperaturbereich von 100–1000 °C. Die Übergangsstadien sind durch mehrere simultan ablaufende physikalisch-chemische Prozesse gekennzeichnet, an deren Ende die Abfallbestandteile als Oxide vorliegen, die mit den zugegebenen Glasbildnern (in Form von Chemikalien oder als vorge-schmolzene Glasfritte) reagieren.

Die physikalisch-chemischen Prozesse lassen sich in mehrere Schritte untergliedern, wie sie schematisch in Abb. 1 dargestellt

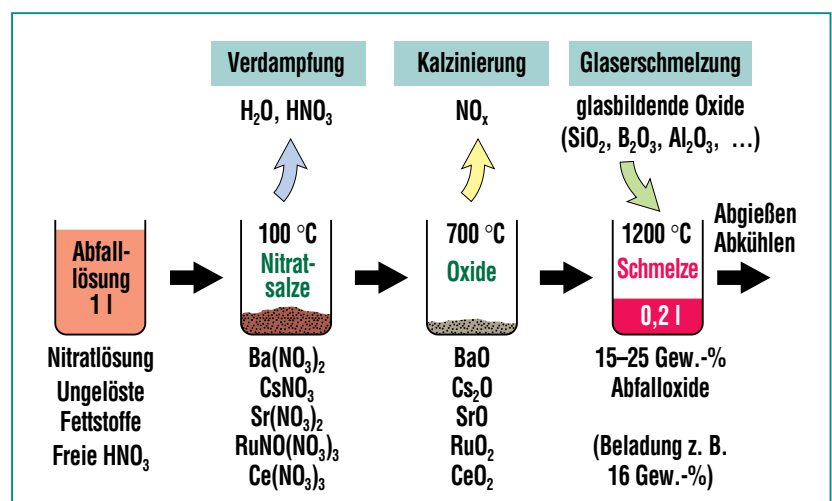


Abb. 1: Prozessschritte der Verglasung (schematisch).

sind. Zuerst verdampfen bei Temperaturen bis ca. 120 °C der Wasser- und Salpetersäureanteil des hochradioaktiven flüssigen Abfalls. Der sich bildende trockene Rückstand besteht vorwiegend aus Nitratsalzen, von denen einige schon bei Temperaturen oberhalb 200 °C Nitratsalzschnmelzen bilden können. Im Temperaturbereich 200–700 °C wandeln sich die Nitratsalze unter Abgabe von Stickoxiden und Sauerstoff (Kalinierung) in Oxide um, die mit den zugegebenen glasbildenden Stoffen reagieren. Die glaschemischen Reaktionen setzen oberhalb 800 °C verstärkt ein und sind bei ca. 1100–1150 °C abgeschlossen. Bei höheren Glaserschmelzungstemperaturen käme es zunehmend zu Verdampfungsverlusten an flüchtigen Bestandteilen aus der Schmelze (wie z. B. von radioaktiven Cäsium- und Technetium-Verbindungen). Die Beschränkung auf Gläser mit relativ niedrigen Schmelztemperaturen wie hier den Alkaliborosilikatgläsern ist deshalb sinnvoll.

Die Prozessschritte der Verglasung lassen sich sowohl in einem einstufigen als auch in einem zweistufigen Verfahren durchführen. Beim einstufigen Verfahren wird der flüssige Abfall ohne Vorbehandlung in den Glasschmelzofen eingespeist. Die gesamte Stoffumwandlung von der Verdampfung der Flüssiganteile bis hin zum Einschmelzen der Abfalloxide ins Glas findet in einem Apparat statt. Beim zweistufigen Verfahren wird in der ersten Stufe der hochradioaktive flüssige Abfall getrocknet und der Trockenrückstand in Oxide umgewandelt, die dann als Kalzinatpulver in die zweite Stufe

transferiert werden. In dieser zweiten Stufe werden die Oxide zusammen mit den Glasbildnern zum Glasprodukt erschmolzen.

Weitere Grundoperationen beim Verglasungsprozess sind die Dosierung der beiden Eingangsströme Abfall und Glasbildner in den Schmelzofen, die Reinigung des Schmelzofenabgases sowie die Abfüllung der Glasschmelze in Korkillen und deren Weiterbehandlung (vgl. Abb. 2). Die Einhaltung der in einem Qualifikationsverfahren festgelegten und spezifizierten Eigenschaften des Glasproduktes erfordert eine zuverlässige Kontrolle der Stoffströme. Ebenso ist die Einhaltung relevanter Schmelzbedingungen, die Einfluss auf die Glasqualität haben, wie z. B. Temperatur und Verweilzeit, erforderlich. Die Prozessabgase müssen soweit von Radioaktivitätsträgern und anderen toxischen Bestandteilen wie den Stickoxiden gereinigt werden, dass bei ihrer Freisetzung in die Umgebung

die gesetzlich festgelegten Grenzwerte eingehalten werden.

Mit den bestehenden Verglasungstechnologien lassen sich mehr als 99,9 % der ursprünglich im Flüssigabfall enthaltenen Radioaktivität im Glasprodukt immobilisieren. Der verbleibende Rest gelangt in schwachaktive Sekundärabfälle, die z. B. durch Zementierung für die Zwischen- und Endlagerung konditioniert werden.

Technologie der Verglasung

Von einer Vielzahl der in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelten Verfahren werden heute zwei im industriellen Maßstab angewendet. Dies sind:

- Der flüssiggespeiste, elektrisch direkt beheizte keramische Glasschmelzofen (engl. Liquid-Fed Ceramic Melter, LFCM), in dem alle Prozessschritte der Verglasung simultan und kontinuierlich ablaufen. Dieses einstufige Verfahren

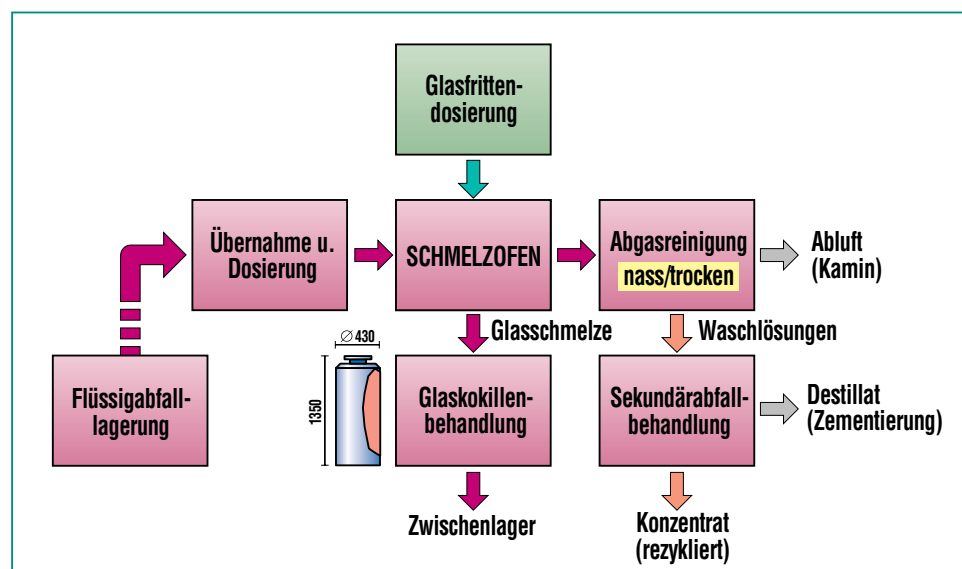


Abb. 2: Vereinfachtes Schema des Hauptprozesses der Verglasung.

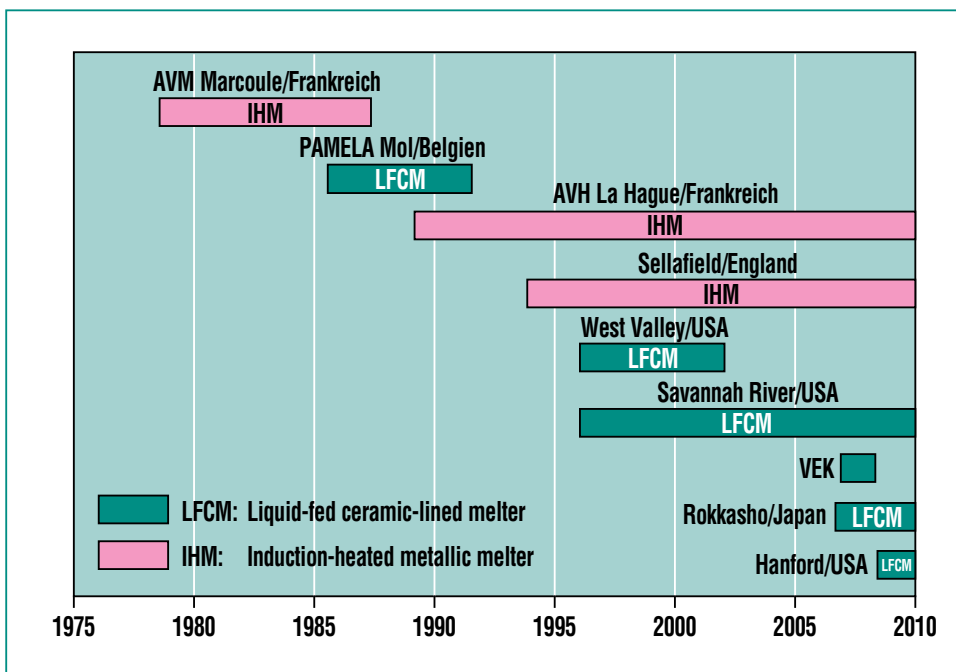


Abb. 3: Übersicht über Verglasungsanlagen weltweit.

ren wurde zur Immobilisierung hochradioaktiver Abfälle zuerst von Deutschland, dann von USA, Japan und Indien angewendet.

- Der Drehrohrkalzinator kombiniert mit einem angekoppelten induktiv beheizten metallischen Schmelztiegel (Induction-Heated Melter, IHM). Dieses zweistufige Verfahren wurde in Frankreich entwickelt und findet in Frankreich und in Lizenz auch in England Anwendung.

Abb. 3 gibt einen Überblick über Verglasungsanlagen, die weltweit in Betrieb bzw. in Planung sind oder bereits wieder stillgelegt wurden. Die Gesamtzahl beläuft sich bei Mitbetrachtung der nicht aufgeführten russischen Anlagen auf ein knappes Dutzend. Der überwiegende Teil der Anlagen basiert auf dem LFCM-Prinzip.

Prozessentwicklung im Forschungszentrum Karlsruhe

Im Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Forschungszentrums Karlsruhe wurde bereits 1975 die Prozessentwicklung auf Basis eines flüssiggespeisten, keramisch ausgekleideten Schmelzofens mit direkter elektrischer Schmelzbadbeheizung begonnen. Die erste industrielle Anwendung des LFCM weltweit erfolgte mit INE-Technologie in der PAMELA-Anlage im belgischen Mol [1], die 1985 ihren Betrieb aufnahm. Bis zum Betriebsende 1991 wurden die rund 900 m³ hochradioaktive flüssige Abfälle aus dem Betrieb der ehemaligen europäischen Wiederaufarbeitungsanlage EUROCHEMIC verglast. Eine aktuelle Anwendung der Technologie findet derzeit in der Verglasungsanlage Karlsruhe (VEK) statt [2], die für die Entsorgung

von ca. 60 m³ HAWC (High Active Waste Concentrate) auf dem Gelände der ehemaligen Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) errichtet wurde. Der heiße Betrieb ist für 2007/2008 vorgesehen.

Abb. 4 zeigt den Aufbau und das Funktionsprinzip des im INE für den Einsatz in der VEK entwickelten, relativ kleinen flüssiggespeisten keramischen Glasschmelzofens. Seine Struktur besteht vorwiegend aus keramischen Materialien. Die Glasbadwände bestehen aus einer glasresistenten, hochtemperaturbeständigen Keramik. Nach außen hin tragen mehrere unterschiedliche keramische Isolationsschichten zu einem kontrollierten Abfall der Wandtemperatur bis zum Edelstahlgehäuse des Schmelzofens bei. Vom Gasraum oberhalb der Schmelze werden die Prozessabgase in das Schmelzofenabgasreinigungssystem abgesaugt.

Die elektrische Beheizung der Glasschmelze auf Temperaturen bis 1200 °C erfolgt durch Wärmefreisetzung nach dem Joule'schen Prinzip. Zum Energieeintrag in die elektrisch leitfähige Glasschmelze dienen in die Schmelze eingetauchte, sich gegenüberliegende metallische Elektroden, an die eine Wechselspannung angelegt wird. Dies führt zur Ausbildung eines elektrischen Feldes in der Schmelze, dessen lokale Intensität zusammen mit der lokalen elektrischen Leitfähigkeit die örtliche Wärmefreisetzung bestimmt. Durch die Schmelzbadbeheizung wird neben dem Energieeintrag zur Aufrechterhaltung der Schmelztemperaturen auch die Erzeugung eines thermischen Konvektions-

feldes im Glasbad bewirkt. Das Konvektionsfeld unterstützt den Wärmetransport zur energieintensiven Prozesszone auf der Schmelzbadoberfläche. Als Elektrodenmaterial hat sich die hochtemperaturbeständige Chrom-Nickel-Legierung mit der Bezeichnung Inconel 690[®] bewährt, deren Schmelzpunkt bei 1365 °C liegt. Als Schutzmaßnahme gegen vorzeitige Hochtemperaturkorrosion wird die Glaskontakttemperatur durch Luftkühlung im Elektrodeninnern auf Werte um ca. 1000 °C begrenzt.

Die Einspeisung von flüssigem hochaktivem Abfall erfolgt kontinuierlich über eine zentrale wassergekühlte Aufgabestelle in der Schmelzofendecke. Durch die kontinuierliche Flüssigeinspeisung des Abfalls bildet sich auf der Oberfläche der heißen Schmelze im stabilen Betrieb eine relativ kühle Prozesszone (engl. „cold cap“), in der die in Abb. 2 schematisiert dargestellten Stoffumwandlungen erfolgen. In der obersten Schicht der Prozesszone verdampfen die flüssigen Abfallbestandteile. Darunter erfolgt die Umwandlung der salzartigen trockenen Rückstände in Oxide. Diese reagieren dann in tieferen Zonen mit der ebenfalls in den Schmelzofen eingegebenen Glasfritte bzw. den glasbildenden Stoffen und verschmelzen zum Abfallglas. Die Aufrechterhaltung einer Schmelzbadbedeckung von 80–90 % mit einer solchen Prozesszone führt wegen deren Barrierewirkung gegen den Oberofengasraum zu einer Minimierung des Austrags radioaktiver Elemente aus der Schmelze, insbesondere von flüchtigen Technetium- und Cäsium-Verbindungen.

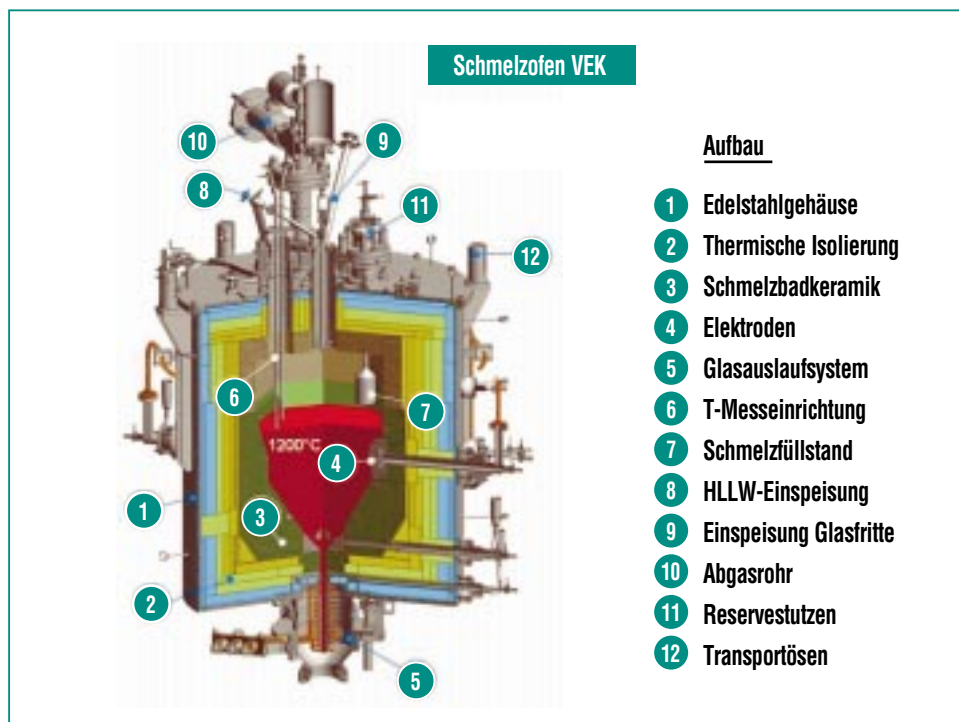


Abb. 4: Im INE für den Einsatz in der VEK-Anlage entwickelter flüssiggespeicherter Glasschmelzofen.

Die Abfüllung der Glasschmelze in Edelstahlkokillen erfolgt diskontinuierlich über ein Bodenauslaufsystem (siehe Abb. 5). Dabei wird nur ein Teil (ca. 25–30 %) des Schmelzbadinventars entnommen, da die Elektroden vollständig in die Schmelze eingetaucht bleiben müssen. Das Glasentnahmesystem im zentralen unteren Teil der Glaswanne arbeitet nach dem Prinzip eines thermischen Ventils. Der Glasentnahmekanal besteht im oberen Bereich aus Hochtemperaturkeramik wie die Glasbadwände und im unteren Bereich aus einem dickwandigen Rohr aus Inconel 690[®]. Zum Ablassen der Glasschmelze wird der Glasentnahmekanal beheizt, bis das Glas schmelzflüssig wird. Die Beheizung des metallischen Kanals geschieht durch eine 10-kHz-Mittelfrequenz-(MF)-Induktionsheizung.

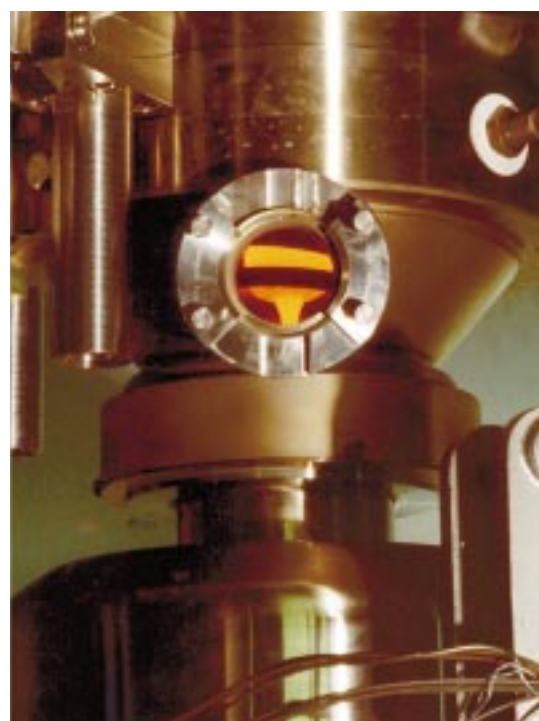


Abb. 5: Induktionsbeheiztes Glasabfüllsystem.

Bis zum Einsetzen des Glasflusses wird das Glas im oberen keramischen Kanal für eine begrenzte Zeit (wenige Minuten) elektrisch beheizt. Danach erfolgt die Kontrolle der Glasflussrate in die Kokille (Sollwert ca. 100–120 kg/h) nur noch über die induktive Beheizung. Zur Beendigung des Glasabstiches wird die induktive Beheizung erst schrittweise vermindert und dann abgeschaltet, so dass das Glas im Kanal erstarrt. Die sichere Auslegung gewährleistet, dass der Glasfluss nur durch externe Beheizung aufrechterhalten werden kann.

Die Bodenelektrode auf dem Schmelzofenboden bildet den Glaseinlauf in das Bodenauslaufsystem. Sie ist mit zwölf seitlichen Öffnungen sowie einem zentralen Zulaufkanal versehen, um einen ungehinderten Austrag von sich eventuell bildenden Sedimenten, wie z. B. höherviskosem Edelmetallschlamm, sicherzustellen. Die Sedimente werden durch geeignete Wände in den unteren Teil der Schmelzwanne geleitet und dort in der Zeit zwischen den Glasabstichen gesammelt. Der Durchgang durch die Kanäle ist strömungstechnisch optimiert, sodass ein leichter Zulauf der Schmelze und höherviskoser Anteile zum Glasauslaufkanal gewährleistet ist.

Anwendung der Technologie in der VEK

Die INE-Technologie wird zurzeit in der VEK angewandt, die zur Verglasung der 60 m³ hochradioaktiven flüssigen Abfalls der WAK errichtet wurde. Dieser Abfall weist eine β/γ -Aktivität von insgesamt ca. $7,7 \times 10^{17}$ Bq auf, die in 50

Tonnen Glas immobilisiert werden soll.

Der Verglasungsprozess wird aufgrund des hohen Strahlungspiegels in abgeschirmten heißen Zellen unter Fernhandlungsbedingungen durchgeführt. Neben der kompletten Fernbedienbarkeit ermöglicht die Prozess- und Zellentechnik, hochbelastete Schlüsselkomponenten, wie beispielsweise den Schmelzofen bei Bedarf auszutauschen. Die wichtigste Zelle ist die Schmelzofenzelle, in der der einstufige Verglasungsprozess stattfindet. Sie enthält neben dem Schmelzofen noch den Dosierbehälter zur Einspeisung des Flüssigabfalls in den Schmelzofen sowie zwei Komponenten zur Vorreinigung des Schmelzofenabgases. Abb. 6

zeigt einen Blick von oben in die Schmelzofenzelle der inaktiven Prototypverglasungsanlage (PVA) des INE, mit der die Hauptprozessstechnik für die VEK in umfangreichen Langzeitbetriebstests erprobt wurde. Es konnte durch den Verglasungsbetrieb mit chemisch simuliertem Abfall nachgewiesen werden, dass die VEK-Technologie alle Anforderungen hinsichtlich Sicherheit des Prozesses und der Technik, Qualität des Glasproduktes, Reinigung der Schmelzofenabgase und Fernbedienbarkeit des Prozesses voll erfüllt. Aufgrund dieser Erfahrungen darf erwartet werden, dass mit dem Betrieb der VEK ein Schritt in Richtung sicherer Entsorgung des HAWC getan wird.



Abb. 6: Blick in die Schmelzofenzelle der Prototypverglasungsanlage (PVA) des INE.

Literatur

- [1] G. Höhlelein, E. Tittmann, S. Weisenburger, H. Wiese, „Vitrification of high-level radioactive waste-operating experience with the PAMELA plant“, *Waste Management' 86, Vol. 2, Tucson AZ (USA), University of Arizona, 1986, 413-420*
- [2] G. Roth, S. Weisenburger, J. Fleisch, M. Weishaupt, „Process Technique and Safety Features of the German VEK Vitrification Plant Currently under Commissioning“, *Proceeding of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9-13, 2005, Paper No. 296 (CD)*
- [3] G. Roth, S. Weisenburger, „Verglasungstechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe für hochradioaktive flüssige Abfälle“, *in: Radioaktivität und Kernenergie, Forschungszentrum Karlsruhe, 103-116 (2001), ISBN 3-92-3704-26-7*

HAWC-Entsorgung der WAK – eine mit der VEK zu lösende Aufgabe

J. Fleisch, M. Weishaupt, WAK; G. Roth, S. Weisenburger, INE

Einführung in das VEK-Projekt

Die Verglasungsanlage Karlsruhe (VEK) wird eine der nächsten Anlagen ihrer Art sein, die weltweit den heißen Betrieb aufnimmt. Sie ist konzipiert zur zwischen- und endlagergerechten Konditionierung der ca. 60 m³ hochradioaktiver flüssiger HAWC-Lösung (High Active Waste Concentrate) mit einer Gesamtaktivität von $7,7 \cdot 10^{17}$ Bq, die aus dem Betrieb der ehemaligen, zwischenzeitlich im Rückbau befindlichen Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK), hervorging. Weitere Rückbaumaßnahmen im HAWC-Lagerbereich sind abhängig von der vollständigen Entsorgung der HAWC-Lösung.

Hierzu wurde in den Jahren 2000 bis 2005 die Anlage VEK errichtet (siehe Abb. 1) und nach Durchführung aller Funktionstests inzwischen in einen betriebsbereiten Zustand überführt, so dass ein

Kalttestbetrieb der Gesamtanlage durchgeführt werden kann [1]. Die hierzu erforderliche Betriebsgenehmigung zur Verglasung von ca. 15 m³ Simulat-Lösung liegt vor und wird derzeit mit der Installation von Provisorien für den Kalttestbetrieb und Demonstration der fernhantierten Instandhaltung in den heißen Zellen umgesetzt.

Im Projektbereich VEK, zuständig für das Projekt- und Qualitätsmanagement, wurden die Entwicklungen des Institutes für Nukleare Entsorgung (INE) zur Verglasungstechnologie einerseits und die nuklearen Betriebs- und Stilllegungserfahrungen der WAK Betriebsgesellschaft (WAK BGmbH) andererseits zusammengeführt, um in kurzen Planungs- und Genehmigungszeiträumen die notwendigen Voraussetzungen für Bau und Betrieb der Anlage zu schaffen. Diese Kooperation wird auch nach der Neustrukturierung des Projektes Stilllegung und Entsorgung der WAK (StiWAK) mit der

Inbetriebsetzung und dem heißen Betrieb der VEK fortgeführt, in dem das aus der Errichtungsphase erfahrene Personal in die Betriebsorganisation der WAK BGmbH eingebunden wird, um einen reibungslosen Übergang nach Fertigstellung der Anlage in den heißen Betrieb zu ermöglichen.

Schutzziele und sicherheitstechnische Auslegung

Voraussetzung für Errichtung und Betrieb der VEK waren in allen Genehmigungsschritten Nachweise für die nach dem Stand der Wissenschaft und Technik erforderlichen Vorsorgemaßnahmen gegen Schäden für Personen und Umwelt. Das Vorgehen orientierte sich hierbei an den Schutzzielen

- sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe,
- Einhaltung der Unterkritikalität,
- sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme,
- Begrenzung der Strahlenexposition zum Schutz der Bevölkerung, der Umgebung und des Betriebspersonals.

Neben der Einhaltung dieser übergeordneten Schutzziele waren mit dem VEK-Projekt weitere technische Herausforderungen zu lösen. So sollte das Prozessgebäude in unmittelbarer Nähe des HAWC-Lagers errichtet werden und die komplexe Prozesstechnik in einer Struktur von heißen Zellen zweckmäßig angeordnet werden. Gebäudestruktur und die prozesstechnische Einrichtungen waren derart auszulagern, dass auch Einwirkungen aus induzierten Erschütterungen nach



Abb. 1: Fertiggestelltes VEK-Prozessgebäude – Ansicht von Südwesten.

Erdbeben oder Flugzeugabsturz die jeweils erforderlichen Schutzfunktionen erhalten. Hinsichtlich des Verglasungsbetriebes sollte die Auslegung einen möglichst störungsfreien und sicheren Betrieb mit kurzen Betriebszeiten ermöglichen, wobei für die HAW-Glasgebäude spezifizierte Parameter für die Zwischen- und Endlagerfähigkeit einzuhalten sind.

Aus diesen Anforderungen resultiert eine sicherheitstechnische Auslegung der VEK mit folgenden Merkmalen [2]:

- Der Schutz der Bevölkerung wird durch Minimierung der radioaktiven Emissionen mit Erwartungswerten für die effektive Jahresdosis $< 2 \mu\text{Sv}$ gewährleistet. Gleiches gilt für den

Schutz des Betriebspersonals durch eine weitgehend fernhantierte Prozessführung mit Erwartungswerten am ständigen Arbeitsplatz von $< 4 \text{ mSv/a}$.

- Anlage und Einrichtungen sind gegen Erdbeben bis zur Stärke 7/8 (Richterskala) geschützt. Der Erhalt der Funktionsfähigkeit von Einrichtungen und der Weiterbetrieb, ggf. nach einzelnen Reparaturen wurde nachgewiesen.
- Es besteht Penetrationsschutz des Gebäudes gegen den direkten Flugzeugtreffer (1,80 m / 2,10 m Wand/Deckenstärke). Die Integrität von radiologisch wichtigen Komponenten wie HAWC-Behälter, Schmelzofen, Zellenauskleidungen bleibt auch

nach diesem unterstellten Lastfall erhalten.

Prozesstechnik und Gebäudestruktur

VEK-Verglasungsprozess

Die Verglasungsanlage umfasst neben den Systemen des Hauptprozesses mit Lüftungsanlage, Medien- und Stromversorgung insgesamt 28 technische Systeme. Die folgenden im vereinfachten Fließbild der Abb. 2 dargestellten Systeme werden dem Hauptprozess der Verglasung zugeordnet:

- Das Übernahmesystem zur Förderung des HAWC aus den Lagerbehältern der LAVA, in die Übernahmebehälter der VEK.

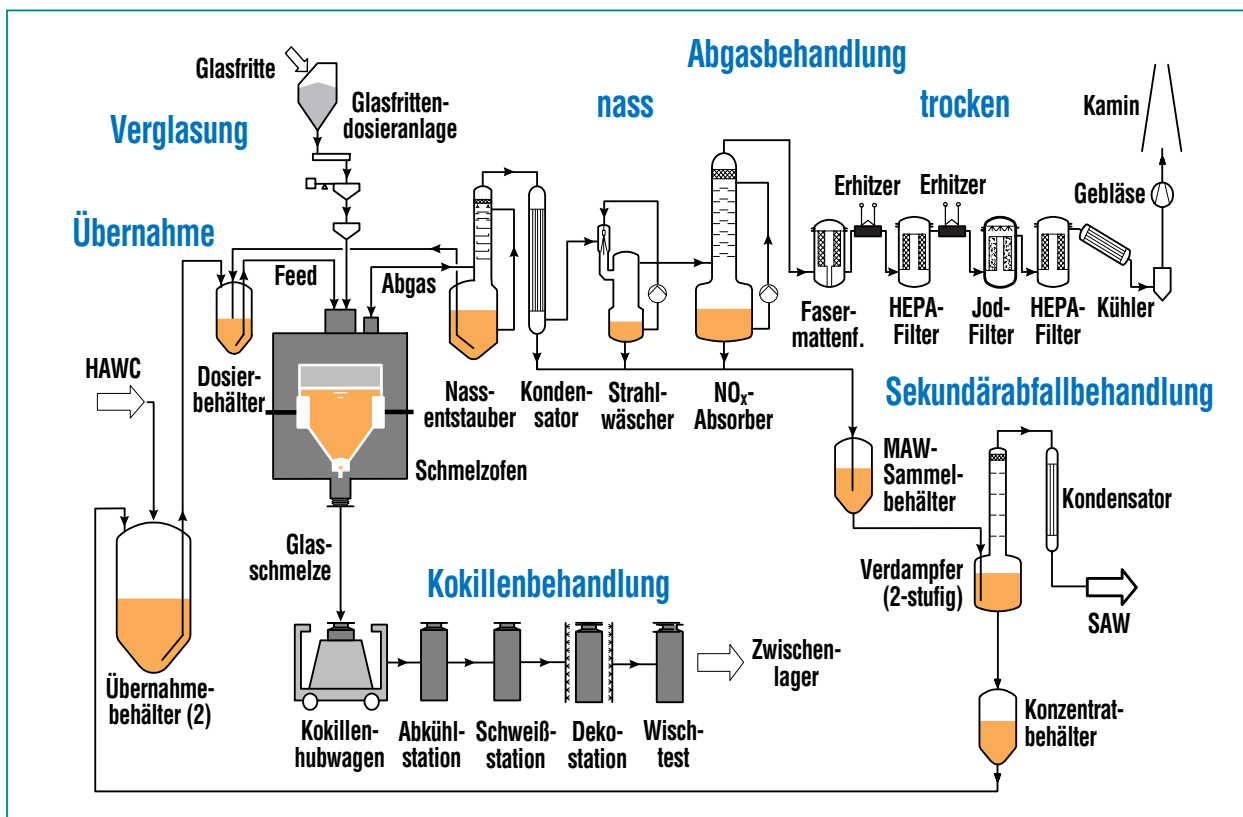


Abb. 2: Vereinfachtes Fließbild des VEK-Verglasungsprozesses.

- Das Verglasungssystem mit dem Schmelzofen und den Dosiereinrichtungen zur Zuführung von HAWC und Glasperlen in den Schmelzofen.
- Die Kokillenbehandlung mit den Einzelschritten der Abkühlung, des Aufschweißens des Kokillendeckels und der Dekontamination.
- Die nasse Abgasreinigung mit Waschkolonnen, einem Strahlwäscher und einem Kondensator.
- Die trockene Abgasreinigung (2-strängig) mit verschiedenen Stufen der Feinfiltration (Fasermattenfilter, HEPA-Filter, Jod-Filter).
- Die MAW-Behandlung mit Behältern zum Sammeln von MAW-Flüssigkeiten, Aufkonzentrierung in einer zweistufigen Verdampfungsanlage und Rückführung in den Prozess.

Die in der VEK angewandte Verglasungstechnologie basiert auf einem flüssig gespeisten elektrisch beheizten keramischen Schmelzofen mit einem Schmelzbadinhalt von 430 kg [3]. Die kontinuierliche Einspeisung der HAWC-Abfalllösung erfolgt mit einem Durchsatz von ca. 10 l/h aus einem Dosierbehälter über ein Airliftsystem. Die erforderlichen glasbildenden Stoffe werden in Form einer perlenförmigen Glasfritte über einer Dosierstation periodisch dem Schmelzofen zugeführt. Die Abfüllung des Produktglases in Edelstahlkokillen erfolgt über ein induktiv beheiztes Bodenauslaufsystem in Chargen von ca. 100 kg nach jeweils ca. 15 h. Zur Befüllung einer Kokille sind jeweils vier Chargen erforderlich.

Anordnung der Prozesstechnik in Heißen Zellen

Die Abb. 3 zeigt die Anordnung der Systeme in den heißen Zellen

des Prozessgebäudes. Die prozesstechnischen Einrichtungen zur Übernahme des HAWC und der Konzentrierung der sekundären flüssigen Abfälle sind in der Übernahmezelle angeordnet. Für den Fall von möglichen Leckagen sind diese, wie auch die übrigen Zellen, mit entsprechenden Leckageauffang- und Beseitigungseinrichtungen ausgestattet.

Die Anordnung der Prozesskomponenten der Schmelzofenzelle sowie die fertig gestellte heiße Zelle sind in Abb. 4 dargestellt.

Über Gewichtsmessungen am Kokillenhubwagen werden bei der Glasabfüllung sowohl die Glasflussrate als auch das Gebindengewicht kontrolliert und durch Sicherheitsabschaltungen eine Überfüllung der Kokille ausgeschlossen. Nach mehrtägiger Abkühlung der befüllten Kokille in der Kokillenbehandlungszelle erfolgen jeweils fernhandelt Verschweißung, Dekontamination und radiologische Vermessung im gleichen Zellenbereich. Für die Verschweißung kommt ein qualifiziertes Verfahren zum Einsatz, bei dem (ggf. in mehreren Lagen) ohne Zuführung von Schweißzusatzwerkstoffen der Kokillendeckel automatisiert mit dem Grundkörper dicht verschweißt wird. Zur Dekontamination der Gebindeoberfläche stehen ein mit Ultraschallgeneratoren ausgerüstetes Säurebad sowie ein Spülbad zur Verfügung (siehe Abb. 5).

Vor der Ausschleusung der HAW-Abfallgebände in das anlageninterne Pufferlager (Kapazität 36 Glaskokillen), werden die Gebindeoberfläche auf Restkontamination sowie die Dosisleistungen (n , β/γ) im Hinblick auf Überein-

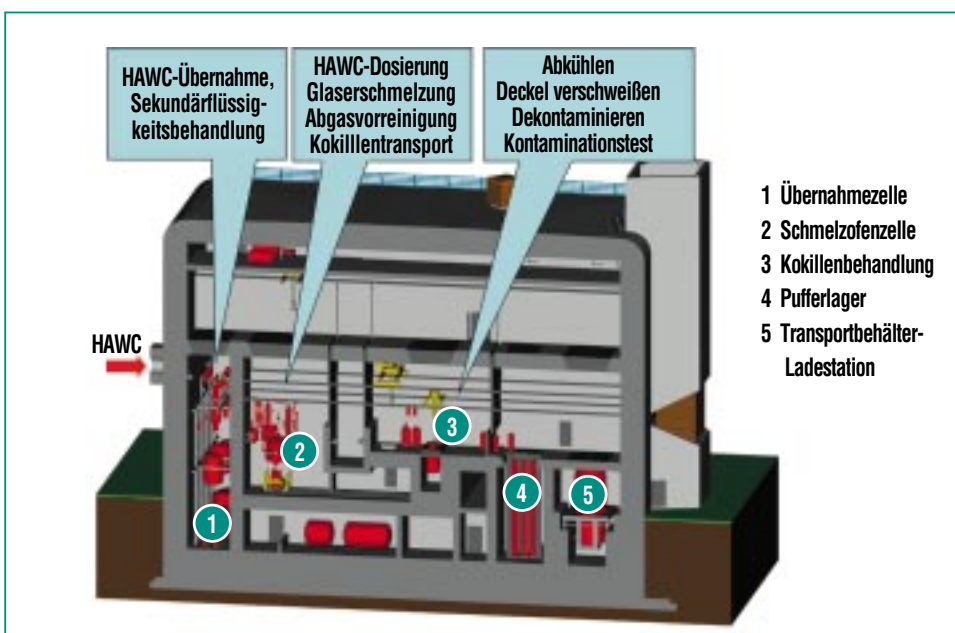


Abb. 3: Längsschnitt durch das VEK-Prozessgebäude – Anordnung der heißen Zellen und Funktionsbereiche.

stimmung mit den Produktdaten überprüft. Die Auslagerung der produzierten Glaskokillen erfolgt nach ca. zwei bis drei Monaten in der Transportbehälterladestation in CASTOR-Behälter.

Inbetriebsetzung und Übergang zum heißen Betrieb

Schritte der Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der VEK erfolgt nach geprüften und freigegebenen Funktionsprüf- und Inbetriebnahmeprogrammen, jeweils getrennt für die einzelnen Systeme und abschließend im Verbundbetrieb. Folgende Schritte werden durchlaufen:

- Funktionsprüfungen der Einzelkomponenten (Armaturen, Ventile, Pumpen etc.)
- Funktionsprüfung von Baugruppen mit mehreren Komponenten (Probenahmeeinrichtungen, Fördereinrichtungen, Glasrittendosieranlage etc.)
- Funktionsprüfung an Systemen (SAW-Behandlung, Lüftungsanlage, Übernahmesystem, Schmelzsystem etc.).

Bei Funktionsprüfungen, die mit Flüssigtransfers verbunden sind, wird Wasser anstelle chemisch simulierter inaktiver Prozessflüssigkeit verwendet. Voraussetzung für die Inbetriebnahme von Systemen, ist die mängelfrei nachgewiesene Funktion der Einzelkomponenten und Baugruppen. Die Inbetriebnahme von Systemen dient auch zur Voreinstellung und Bestätigung wichtiger Betriebsparameter, dem Nachweis des Verbundbetriebs

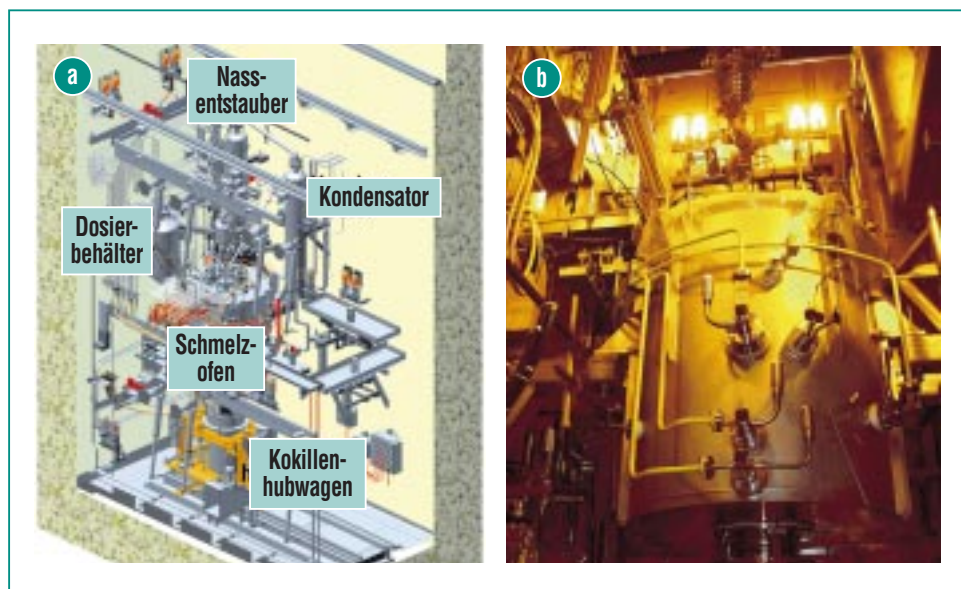


Abb. 4: a) 3-D-Ansicht der Schmelzofenzelle – b) Foto nach Montageende.

von Einzelkomponenten verschiedener Systeme und dem Nachweis der Prozessüberwachung über das Prozessleitsystem.

Eine Besonderheit stellt die Funktionsprüfung des Schmelzofens dar. Hierzu bedarf es bis auf wenige Prüfschritte der Inbetriebnahme des Schmelzofens, d. h. der Aufheizung auf 1000 °C mit Hilfe von SiC-Startheizelementen, die in den Schmelzofen eingesetzt werden. Nach Befüllung des Schmelzofens mit niedrig schmelzendem Startglas und der Inbetriebnahme der Joule'schen Beheizung erfolgen die restlichen Funktionsprüfungen, wie z. B. die Glasabfüllung.

Kalttestbetrieb

Ziel des Kalttestbetriebes ist die Demonstration der vollen Funktionsfähigkeit der Anlage. Der Betrieb läuft in dieser Phase bereits weitgehend nach den Regularien und Bedienungsanweisungen des

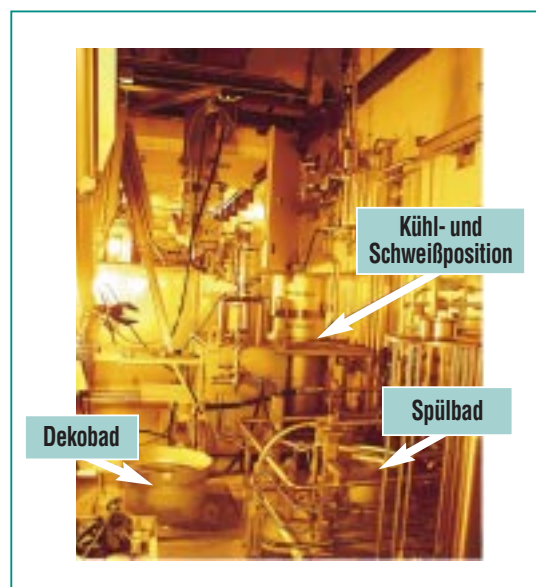


Abb. 5: Blick in die Kokillenbehandlungszelle.

heißen Betriebs ab. Wesentliche Unterschiede zum heißen Produktionsbetrieb bestehen darin, dass die HAWC-Leitung zum Tanklager noch verschlossen ist und ein HAWC-Simulat verglast wird, das über Provisorien in die Übernahmehälter der VEK eingespeist wird.

Der Kalttestbetrieb umfasst einen Zeitraum von mehreren Monaten, wobei ca. 15 m³ HAWC-Simulat im 24-h-Schichtbetrieb verglast werden. Die dabei produzierte Glasmenge von über ca. 11 t wird in ca. 29 Kokillen abgefüllt. Der Betrieb der Anlage geschieht in Anlehnung an das chemische Fließbild mit einer Glasproduktionsrate von 7 kg/h.

Heiße Inbetriebnahme

Nach Beendigung des Kalttestbetriebes werden alle Provisorien entfernt und nach Erteilung der zweiten Betriebsgenehmigung die heißen Anschlüsse zum HAWC-Lager (LAVA) hergestellt. Zur Durchführung der heißen Inbetriebnahme wird ein geringes Volumen von wenigen 100 l HAWC aus der LAVA in einen der Übernahmebehälter gefördert und dort mit HAWC-Simulat vermischt. Diese radioaktive Mischung wird analog zum Vorgehen beim Kalttestbetrieb verglast. Die Dauer der heißen Tests belaufen sich auf wenige Wochen. Nach Beendigung der heißen Inbetriebnahme kann dann der heiße Produktionsbetrieb mit der Übernahme der ersten Charge von ca. 1,6 m³ HAWC und der nachfolgenden Verglasung beginnen.

Die Erzeugung spezifikationsgerechter Glaskokillen wird durch Einhaltung wesentlicher Prozess-

Parameter	Nominalwert	Garantiewert
Glasbeladung (Abfalloxide)	16 Gew.-%	≤ 19 Gew.-%
Gebindemasse	495 kg	≤ 550 kg
Gesamt-α-Aktivität	5,6 E13 Bq	≤ 8,6 E13 Bq
Gesamt-β/γ-Aktivität	6 E15 Bq	≤ 9,6 E15 Bq
Uran-Menge	3977 g	≤ 7200 g
Plutonium-Menge	132 g	≤ 190 g
Wärmeleistung	520 W	≤ 734 W

Tab. 1: Produktionsdaten und garantierte Kenngrößen der VEK-Glaskokille.

parameter mit Hilfe des Prozessleitsystems sichergestellt. In Tab. 1 sind die Produktionsdaten mit wesentlichen Garantiewerten der HAW-Glaskokille im Vergleich zu den Nominalwerten dargestellt.

Ausblick

Die VEK steht unmittelbar vor der Herstellung der Betriebsbereitschaft. Nach Abschluss der letzten Funktionsprüfungen am Schmelzsystem ist in Kürze das Aufheizen des Ofens und der nachfolgende kalte Verbundbetrieb vorgesehen. Die Anlage befindet sich danach im Stand-by-Zustand.

Die Erteilung der zweiten Teilbetriebsgenehmigung ist Voraussetzung für die Einrichtung der Kontroll- und Sicherungsbereiche. Die anschließende heiße Inbetriebset-

zung beginnt mit der Endmontage der Rohrleitungsverbindungen zwischen VEK und LAVA, dem Anschluss der Probenrohrpostleitung an die Hochaktiv-Boxen der LAVA und an die Behälterabgasleitung der LAVA sowie den Anschluss des VEK-Fortluftkanals an den LAVA-Kamin.

Organisatorisch steht eine durch die Funktionsprüfungen und die kalte Inbetriebsetzung geschulte gemeinsame Betriebsmannschaft der WAK BGmbH und des Forschungszentrums zur Verfügung. Bereits am Standort befinden sich die fünf CASTOR-Behälter, die zum späteren Abtransport der während des etwa einjährigen Betriebs der VEK produzierten ca. 130 HAW-Kokillen erforderlich sind.

Literatur

- [1] G. Roth, S. Weisenburger, J. Fleisch, M. Weishaupt, „Process Technique and Safety Features of the German VEK-Vitrification Plant Currently under Commissioning“, *Proceedings of Global 2005, Tsukuba, Japan, October 9-13, 2005, Paper no. 296*
- [2] J. Fleisch, H. Kuttruf, G. Roth, S. Weisenburger, „Protection of Operators and Environment – The Safety Concept of the Karlsruhe Vitrification Plant VEK“, *Proceedings WM '02 Conference, Tucson (AZ), USA, February 24 – 28, 2002*
- [3] G. Roth, S. Weisenburger, „Verglasungstechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe für hochradioaktive flüssige Abfälle“, *In: Radioaktivität und Kernenergie, Forschungszentrum Karlsruhe, 103-116, 2001, ISBN 3-92-3704-26-7*

Auslegung der VEK gegen EVA – eine Herausforderung

H. P. Wölfel, Wölfel Beratende Ingenieure H \ddot{o} chberg und Fachgebiet Maschinendynamik TU Darmstadt

Einleitung

Aufgrund des hoch radioaktiven Inventars ist die Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) auch gegen EVA auszulegen. Dabei ist nat \ddot{u} rlich nicht die Verf \ddot{u} hrerin aus dem Paradies gemeint, EVA ist vielmehr der Oberbegriff f \ddot{u} r die drei extremen Einwirkungen Erdbeben (Bemessungserdbeben, BEB), Flugzeugabsturz (FZA) und Explosionsdruckwelle (EDW); es ist die Abk \ddot{u} rzung von „Einwirkungen von au \ddot{u} ßen“. Die Herausforderung liegt aber nicht in diesen Lastf \ddot{a} llen selbst. Denn hier spannt sich – wie Abb. 1 deutlich macht – ein Bogen \ddot{u} ber 35 Jahre, von der Auslegung des Geb \ddot{a} udekomplexes LAVA in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK), an der W \ddot{u} lfel Beratende Ingenieure seit Anfang der 70er Jahre gearbeitet hat, bis zur VEK, die in dieser Hinsicht einen H \ddot{o} hepunkt darstellt. Dazwischen liegen s \ddot{a} mmtliche EVA-bezogenen Aufgabenstellungen, die beim Forschungszentrum Karlsruhe (ehemals

Kernforschungszentrum Karlsruhe) und bei der WAK anfielen.

Die Herausforderung liegt vielmehr darin, dass sich in den letzten Jahren abzeichnende Wege der Auslegungs- und Nachweisberechnungen – insbesondere f \ddot{u} r FZA – hier konsequent zu Ende gegangen werden mussten. Dies war einerseits n \ddot{o} tig wegen der komplexen bau- und komponentenseitigen Strukturen und andererseits m \ddot{o} glich wegen der weiterentwickelten Ingenieur- und Rechentechnik. Die dabei verwendeten Modelle kann man „Integralmodelle“ nennen, da sie viele, fr \ddot{u} her separat angegangene Teilaufgaben integrieren, mit gro \ddot{u} dem Nutzen, aber auch mit Konsequenzen. Denn die umfangreicheren Modelle f \ddot{u} hren zu entsprechend umfangreicheren Ergebnissen, die kontrolliert, bewertet und zur Weiterverarbeitung aufbereitet werden m \ddot{u} ssen. Weiterhin ergeben sich durch solche Integralmodelle andere Schnittstellen, an denen das Zusammenwirken der Beteiligten neu festgelegt werden muss.

Konzept Integralmodell

Das VEK-Geb \ddot{a} ude selbst, Ziel und Zweck der Anlage sowie die Verfahrenstechnik sind in den anderen Beitr \ddot{a} gen detailliert erl \ddot{a} utert. Deswegen wird hier nur auf die strukturelle Aspekte eingegangen. Dazu seien als Hauptdaten genannt:

- **Au \ddot{u} enabmessungen**
 $L \times B \times H \approx 36 \times 29 \times 22 \text{ m}$
- **Gesamtmasse** ohne Hochdruck-Injektions-(HDI-)Sohle
 $M \approx 44.000 \text{ t}$
- **Wandst \ddot{a} rken**
au \ddot{u} en $t = 2,2 / 1,8 \text{ m}$,
innen $t \approx 1,1 \text{ m}$.

F \ddot{u} r die Berechnungen zur globalen Auslegung des Geb \ddot{a} udes f \ddot{u} r Betriebs- und Sonderlasten wurde als „Integralmodell“, ein detailliertes 3D-Finite-Elemente-(FE)-Schalenmodell entwickelt, das Statik, Dynamik und Bemessung (Ermittlung der Bewehrung) integriert. Abb. 2 zeigt rechts die gew \ddot{a} hlte Elemententeilung der Au \ddot{u} en-

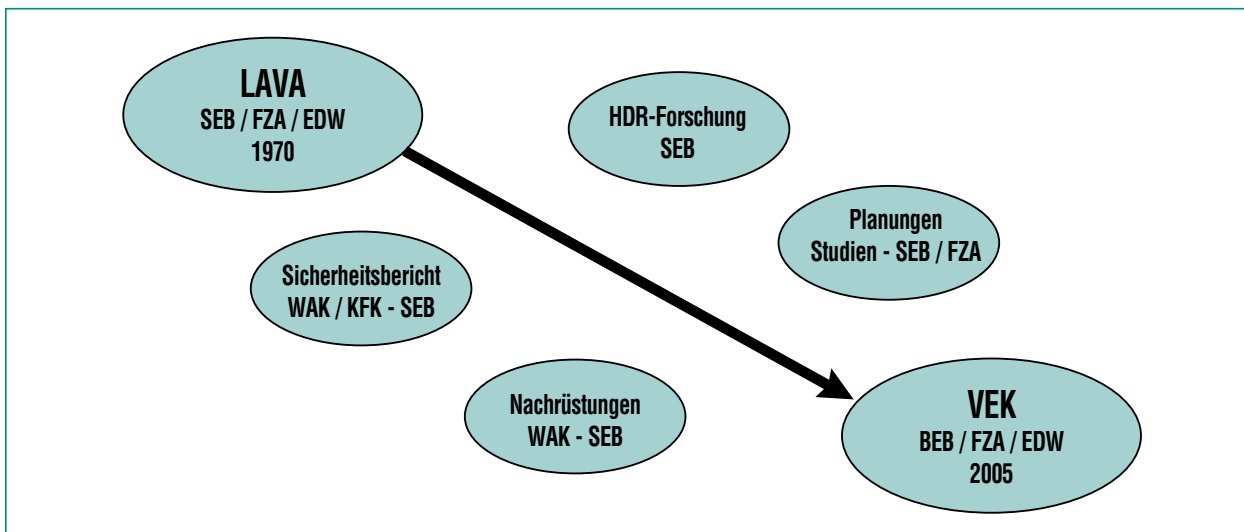


Abb. 1: 35 Jahre EVA-Auslegung im Forschungszentrum Karlsruhe.

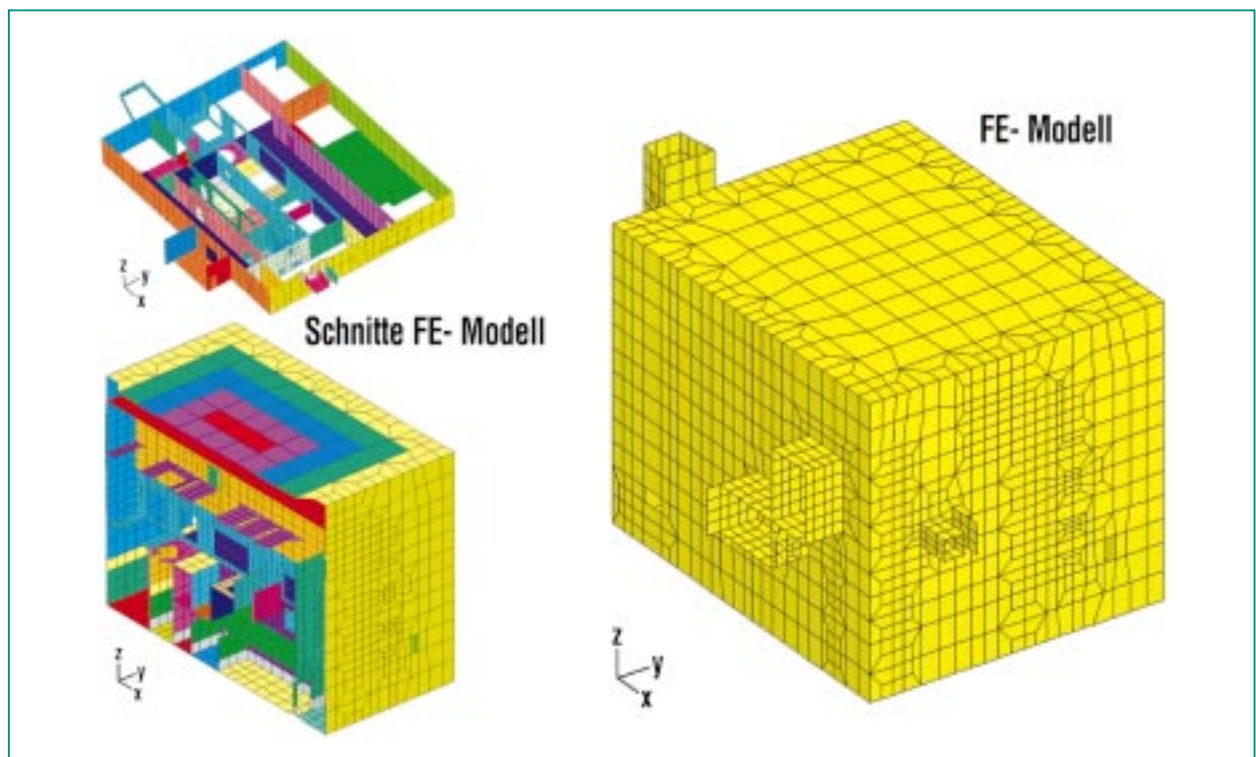


Abb. 2: Finite-Elemente-Modell der VEK, Integralmodell.

struktur. Im Bereich möglicher Auftreffpunkte eines abstürzenden Flugzeugs ist das Raster verfeinert. Die zusätzlichen Schnitte links in Abb. 2 geben eine gute Übersicht über den erreichten Grad der wirklichkeitsnahen Abbildung des Gebäudes. Das Baugrund-Modell ist in Abb. 2 nicht dargestellt.

Ein (strukturmechanisches) Integralmodell bietet bei derartigen Projekten erheblichen Nutzen:

- Alle globalen betrieblichen Einwirkungen (Eigenlast, ... , Temperatur) und die Einwirkungen von außen (EVA) können an einem Modell berechnet werden, einschließlich Einwirkungskombination und Bemessung.
- Bei einem Zellenbau wie der VEK ist nur so eine wirklich-

keitsnahe Ermittlung der räumlichen Beanspruchungen möglich. Das gilt vor allem für die Einwirkungen Temperatur und FZA. Ungenauigkeiten und Überkonservativitäten an sonst notwendigen Schnittstellen werden vermieden.

- Es besteht die Möglichkeit der völdynamischen Bemessung, d. h. Bewehrungsermittlung zu jedem Zeitschritt der dynamischen Berechnung aus der in diesem Augenblick maßgebenden Einwirkungskombination. Nur so lässt sich bei einem Zellenbau wie der VEK für FZA global eine realistische Bewehrung ermitteln.

Ein Integralmodell hat aber auch Konsequenzen:

- Es ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten erforderlich. Geometrie, Randbedingungen und Einwirkungen müssen frühzeitig festliegen, da Änderungen einen hohen Aufwand bedeuten.
- Es ergeben sich andere Schnittstellen zwischen den Beteiligten, sowohl auf der Aufstellerseite der Nachweise als auch bei deren Prüfung und Begutachtung.
- Die Ergebnisse des Integralmodells können direkt für die Bemessung verwendet werden, soweit die Feinheit des Modells dafür lokal ausreicht. Wo dies nicht gegeben ist, muss der Aufsteller dem Statiker bzw. Anlagenbauer präzise Angaben für die Weiterarbeit, insbesondere die Zuschärfung

der lokalen Bemessung, machen.

- Die Auswirkungen wesentlicher Änderungen müssen vom Aufsteller des Integralmodells bewertet werden. Für kleinere Änderungen muss er den Beteiligten Angaben zum weiteren Vorgehen machen und Bewertungskriterien definieren.

Natürlich gilt all das, was hier anhand des Gebäudemodells über Nutzen und Konsequenzen eines Integralmodells gesagt wurde, auch für entsprechende Strukturmodelle der Anlagentechnik (siehe S. 182 – Auslegung der Komponenten).

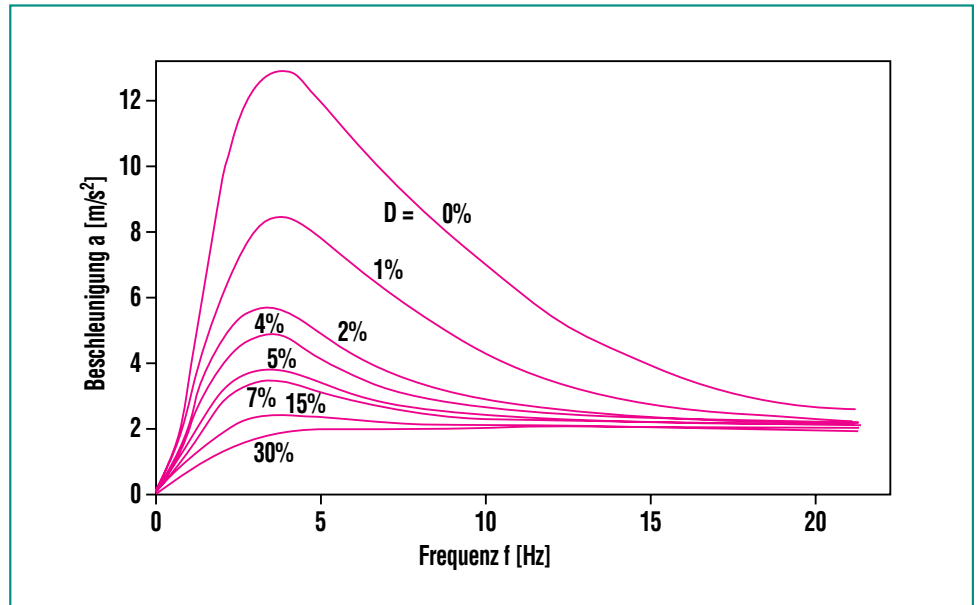


Abb. 3: Beschleunigungs-Antwortspektrum des Bodens.

Einwirkungen

Die Auslegung der VEK wird dominiert durch Temperatur (Heiße Zellen) und Einwirkungen von außen (EVA). Die maximalen Temperaturen auf der Oberfläche der

Sohlplatte erreichen zwischen 50 und 60 °C und führen zu erheblichen Zwängungsbeanspruchungen in der Betonstruktur.

Die Belastungsvorgabe für BEB in Form eines Beschleunigungs-Ant-

wortspektrums des Bodens mit einer maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung $a = 2,0 \text{ m/s}^2$ zeigt Abb. 3. Das Spektrum gilt hier für die steifere Kiesschicht auf etwa Kote -10 m, in die die HDI-Verstärkung des Bodens einbin-

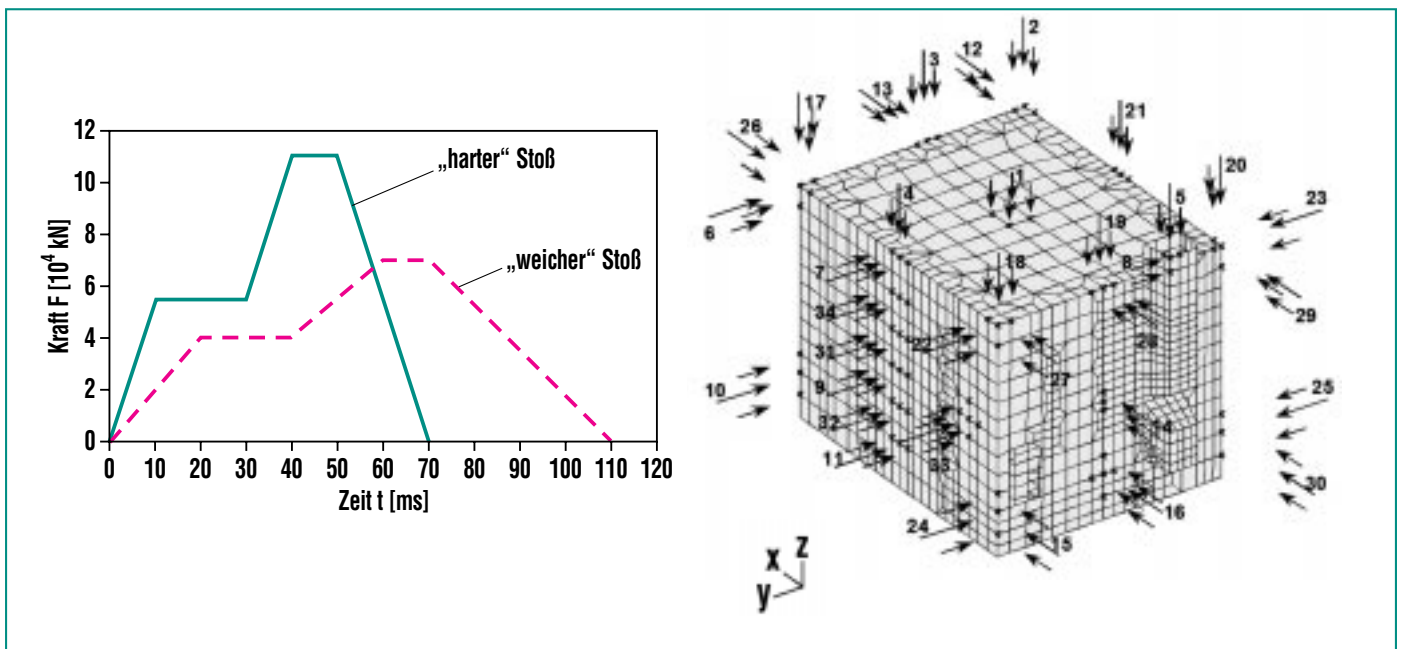


Abb. 4: Einwirkungen (Stoßkräfte) aus Flugzeugaufprall.

det. Die Höhendifferenz wurde im Rechenmodell durch Hilfselemente überbrückt. Ein Beschleunigungs-Antwortspektrum gibt die maximale Beschleunigungs-Antwort eines Schwingers mit einem Freiheitsgrad einer bestimmten Frequenz f und eines bestimmten Dämpfungsgrades D in Prozent der kritischen Dämpfung an.

Der Lastfall EDW ist charakterisiert durch einen Druck-Zeitverlauf, der einschließlich Reflexionserhöhung im Maximum 45 kPa erreicht. EDW ist hinsichtlich Auslegung von Bauwerk und Komponenten der VEK durch BEB / FZA abgedeckt. Daher wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Der Flugzeugabsturz hat dagegen für die Auslegung der VEK besondere Bedeutung: Zum Einen liefert er bis auf wenige Ausnahmen die maßgebenden Ergebnisse für die Bemessung des Gebäudes und

die Auslegung der Anlagenteile. Zum Anderen handelt es sich hierbei nicht um einen Lastfall, sondern um eine Vielzahl von Einzel-Lastfällen entsprechend den möglichen Auftreffpunkten des Flugzeugs. Abb. 4 zeigt links die vorgegebenen Last-Zeitfunktionen mit einer Lastspitze von 110 MN bei hartem Stoß (auf Wandscheiben) und von 70 MN bei weichem Stoß (z. B. auf die Dachplatte). Rechts in Abb. 4 sind die betrachteten 32 Einzel-Stoßpunkte eingezeichnet. Die Verteilung der Last erfolgt jeweils auf mehrere Knoten entsprechend der Größe der Auftreff-Fläche.

Für den Lastfall FZA ist wegen der vielen Einzellastfälle ein spezielles Konzept zur ingenieurmäßigen Weiterverarbeitung der Teilergebnisse erforderlich, einschließlich Routinen zur systematischen Einhüllung von Ergebnissen und von Analogiebetrachtungen für nicht direkt gestoßene Gebäudebereiche.

Dynamische Berechnungen

Alle relevanten Beanspruchungen aus den dynamischen Einwirkungen wurden mit Hilfe der modalen Zeitablaufmethode ermittelt. Basis hierfür sind die Eigenschwingungen der Struktur mit ihren Eigenschwingungsformen und den zugehörigen modalen Parametern wie generalisierte Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen. Für dieses Modell wurden insgesamt 154 Eigenformen von 2,15 Hz bis 50 Hz ermittelt und im Weiteren berücksichtigt.

Abb. 5 zeigt eine Eigenform, bei der im Wesentlichen die Dachdecke schwingt sowie eine weitere in einem Schnitt, die durch die Scheibenverformung der Decken geprägt ist.

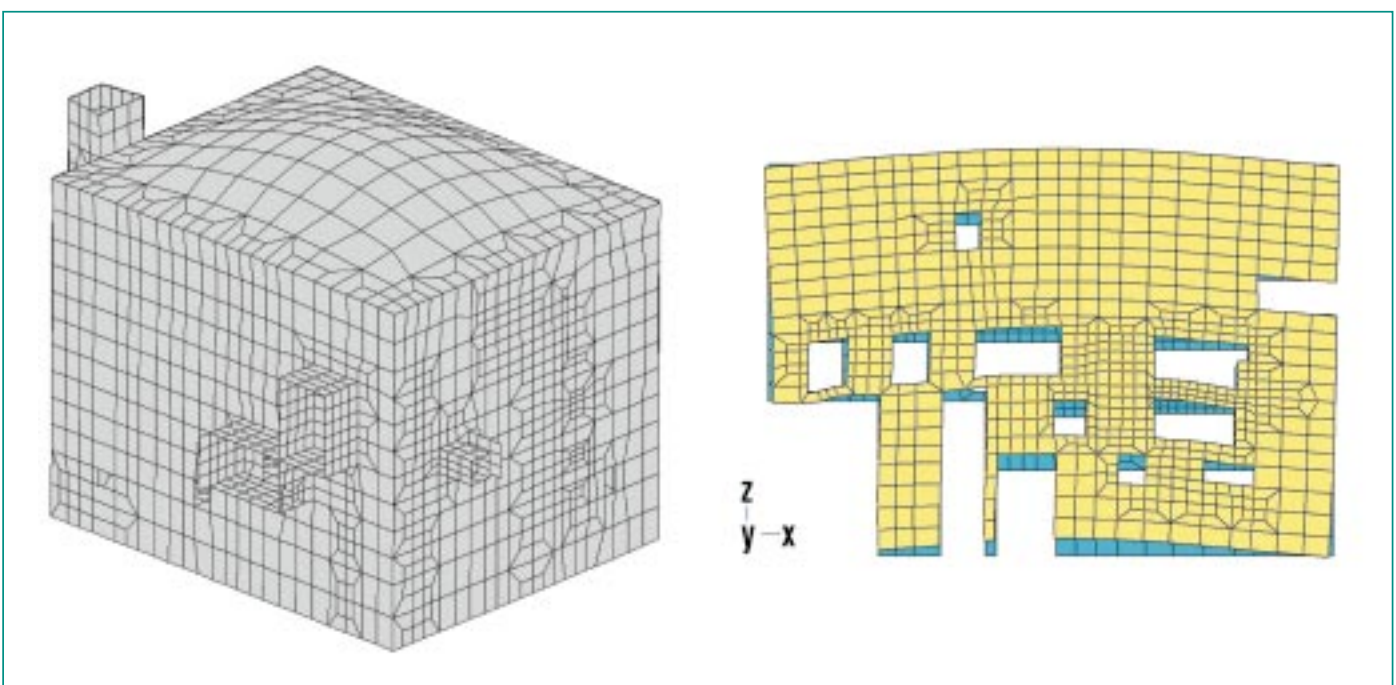


Abb. 5: Eigenformen 7 mit 9,24 Hz und 12 mit 17,22 Hz als Beispiele.

Bemessung der Stahlbeton-Konstruktion

Die Bemessung der inneren Wände und Decken sowie der Fundamentplatte erfolgt grundsätzlich anders als die der direkt durch FZA treffbaren Außenwände und der Dachdecke. Zur Bemessung der inneren Bauteile werden die lokalen Schnittkräfte unter Annahme linearen Strukturverhaltens ermittelt, d. h. „ungerissener“ Stahlbeton, sog. Zustand I.

Die maßgebende Einwirkung für die Sohlplatte ist die Temperatur. Sie führt im Extremfall zu einer Bewehrung von bis zu $105 \text{ cm}^2/\text{m}$. An solchen Stellen sind Zusatzbetrachtungen mit lokal reduzierten Steifigkeiten zur Erfassung des sog. Zustands II, „gerissener“ Stahlbeton, erforderlich.

Die maßgebenden Einwirkungen für die übrigen Bauteile sind die dy-

namischen Lastfälle BEB und FZA. Hier müssen die lokalen Schnittkräfte zu jedem Zeitschritt über den gesamten Zeitverlauf ermittelt werden. Dazu werden Maximum und Minimum jeder lokalen Schnittgröße mit den zugehörigen anderen Schnittgrößen aus Betriebslasten je Zeitpunkt überlagert. Dies führt bei jedem Element und für jede betrachtete Lastfallkombination (bei FZA je Stoßpunkt) zu 12 Bemessungslastfällen. Die sich aus der Bemessung der Einzel-Lastfallkombinationen“ für das jeweilige Element ergebende Bewehrung wird über alle Lastfallkombinationen eingehüllt. Abb. 6 zeigt beispielhaft für eine Wand in der Mitte des Gebäudes in farbgrafischer Darstellung die sich so ergebenden Bewehrungsmengen.

Für die Bemessung der äußeren Wände und der Dachdecke ist der Direktstoß des Flugzeugs maßge-

bend. Dies erfordert eine Bemessung unter Berücksichtigung des nichtlinearen dynamischen Verhaltens der Struktur. Charakteristisch sind das elasto-plastische Verhalten des Durchstanzkegels auf der Schubbewehrung und das elasto-plastische Biegeverhalten der Wand/Decke als Ganzes. Hierfür existieren nichtlineare Näherungsmodelle mit 2 Freiheitsgraden, die Berechnung kann aber auch mit nichtlinearen 2D- oder 3D-FE-Modellen erfolgen. Der Berechnungsgang erfolgt so, dass zunächst die erforderliche Bewehrung geschätzt wird, die dynamische Berechnung zeigt dann, ob Versagen – gekennzeichnet durch Überschreiten von Verzerrungs- oder Deformationsgrenzen – eintritt. Aus Platzgründen wird hierauf jedoch nicht näher eingegangen.

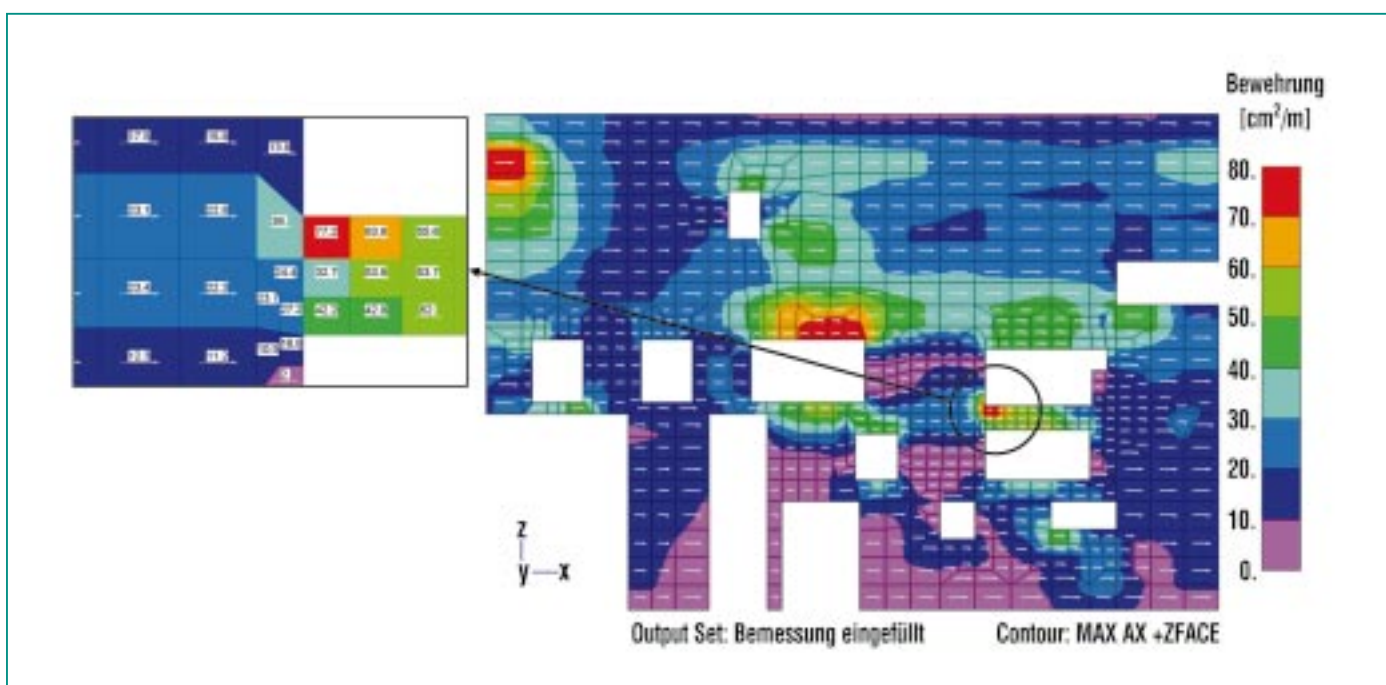


Abb. 6: Einhüllende Bewehrung für eine Innenwand der VEK.

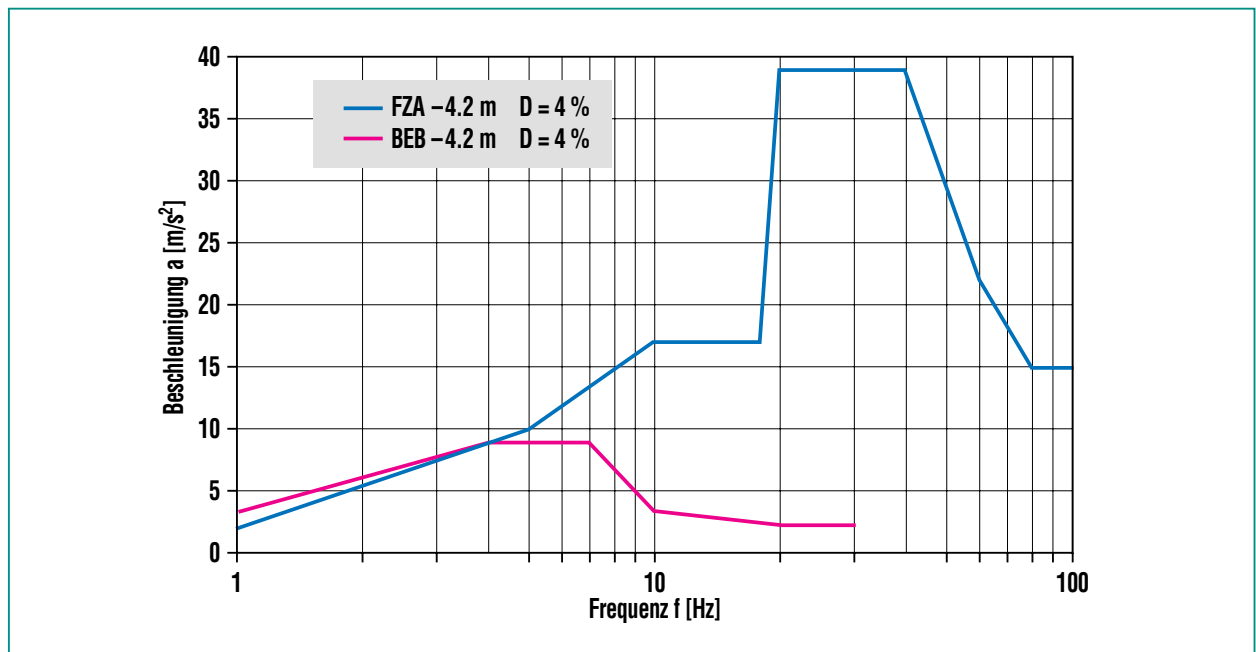


Abb. 7: Einhüllende und geglättete Gebäude-Antwortspektren der VEK für FZA und BEB.

Gebäude-Antwortspektren

Zur Auslegung der Komponenten in den einzelnen Zellen für EVA werden die Gebäude-Antwortspektren benötigt. Sie stellen das Pendant zum Beschleunigungs-Antwortspektrum des Bodens (Abb. 3) an verschiedenen Aufpunkten des Gebäudes dar, gefiltert (bewertet) durch das Übertragungsverhalten des Gebäudes. Fast alle Komponenten mit den zugehörigen Tragstrukturen sowie Rohrleitungen sind für BEB auszulegen, in den Prozesszellen zusätzlich viele Komponenten auch für FZA. EDW ist hier wie üblich durch BEB abgedeckt.

Abb. 7 zeigt beispielhaft die horizontalen Bemessungsspektren der Zelle V1 für BEB und FZA. Sie sind als Einhüllende über die Ergebnisse aller Stoßpunkte sowie über die Ergebnisse in der Bandbreite der

Bodensteifigkeit gebildet und ingenieurmäßig geglättet. Man erkennt, dass FZA bis auf den niedrigen Frequenzbereich BEB abdeckt. Die linearen Antwortspektren infolge FZA sind im Frequenzbereich von 40 Hz bis 60 Hz um eine Größenordnung höher als die infolge BEB. Hier liegt der Haupt-Anregungsbereich der mit Abb. 4 definierten Stoßbelastung.

Zusätzlich wurden auch abgeminderte Antwortspektren infolge FZA ermittelt, die das nichtlineare Verhalten der Komponenten in sich und an den Verbindungsstellen im Gebäude ingenieurmäßig berücksichtigen. Bei deren Ausnutzung müssen aber Zusatznachweise erbracht werden:

- Nachweis, dass sich die Komponente ohne lokales Versagen ausreichend verformen kann (Kapazitätsbemessung)

- Nachweis der Zusatzbeanspruchungen in anschließenden Systemen aus den vergrößerten Verschiebungen.

Die Anwendung der abgeminderten Spektren ließ sich im Genehmigungsverfahren jedoch nicht durchsetzen. Es mussten daher teilweise materialintensivere Lösungen gewählt werden.

Auslegung der Komponenten

Im Rahmen dieses Nachrichten-Artikels wird nur die Prozesszelle V1 betrachtet. Abb. 8 zeigt eine CAD-Darstellung des verfahrenstechnischen Inventars mit einer Vielzahl von größeren und kleineren Komponenten auf einer Stahltragkonstruktion und einem dichten Netz von Kleinleitungen.

Üblicherweise versucht man, die einzelnen Anlagenteile – Stahltragkonstruktion, Komponenten,

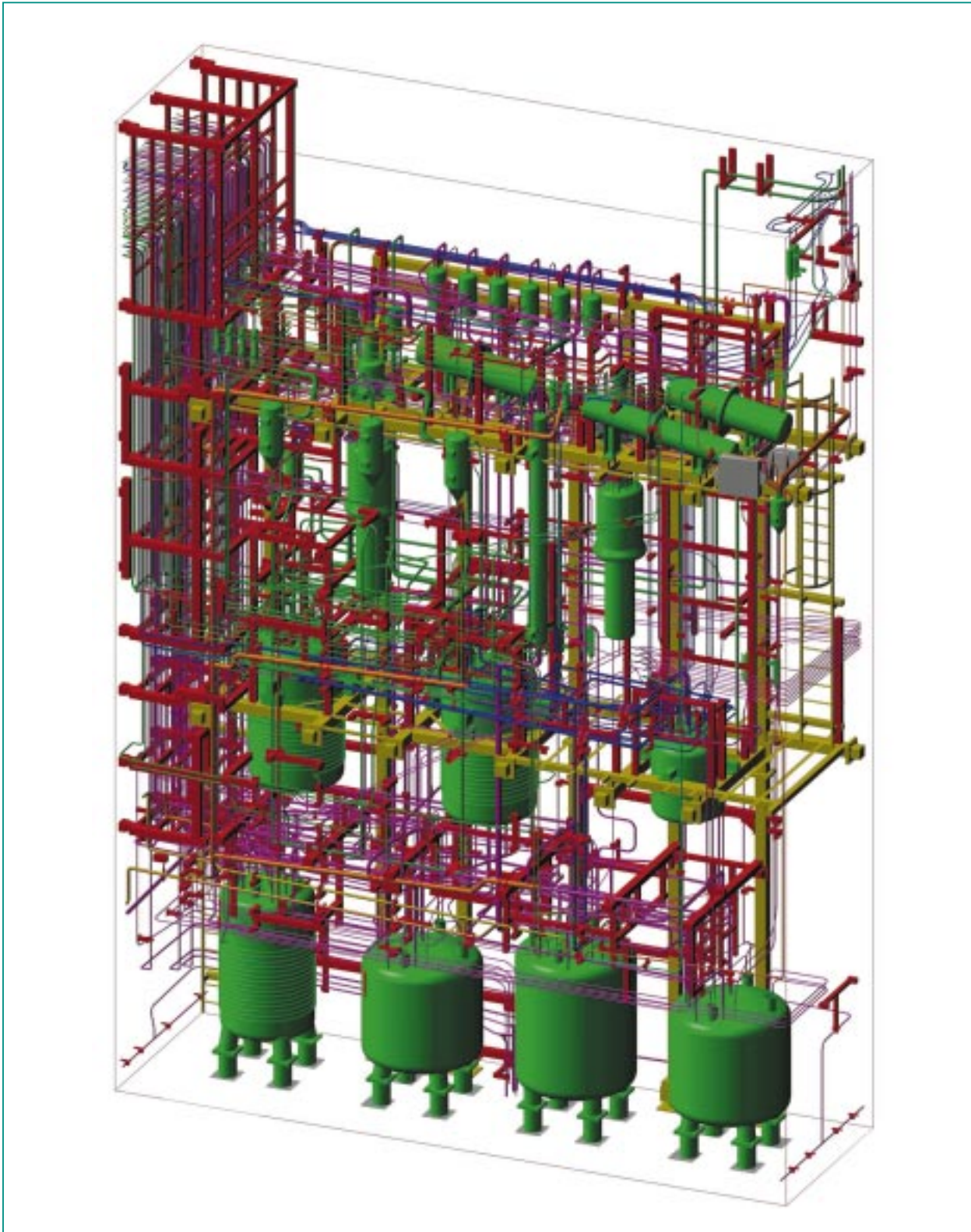


Abb. 8: Anlagentechnik Zelle V1, Übersicht.

Rohrleitungen – entkoppelt zu betrachten. Dies ist hier nicht möglich, da

- die Komponenten über die Stahltragstruktur gekoppelt sind,
- die Stahltragstruktur selbst im relevanten Frequenzbereich schwingt,
- einzelne Komponenten durch größere Rohrleitungen miteinander verbunden sind.

Auch hier bedurfte es also eines „Integralmodells“ im übertragenen Sinne. Es handelt sich dabei um ein 3D-FE-Modell aus Balken-Elementen für Stahltragstrukturen, Komponenten und relevante Rohrleitungen. Flüssigkeitsschwappen in den Behältern wurde dabei auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Auf eine Darstellung des Modellbildes und der ermittelten räumlichen Eigenformen wird wegen deren Komplexität verzichtet. Insgesamt wurden 200 Eigenfrequenzen von 3,91 Hz bis

80 Hz ermittelt und bei den dynamischen Berechnungen berücksichtigt.

Als Ergebnisse zeigt Abb. 9 beispielhaft die v. Mises-Vergleichsspannungen in der Stahltragstruktur aus der Überlagerung von Eigenlast (EL) und FZA sowie Abb. 10 die zugehörigen Spannungen am Sattelhorn des Kühlers, ermittelt an einem nachgeschalteten 3D-Schalenmodell unter Belastung mit den entsprechenden Ergebnis-Schnittkräften des Integral-

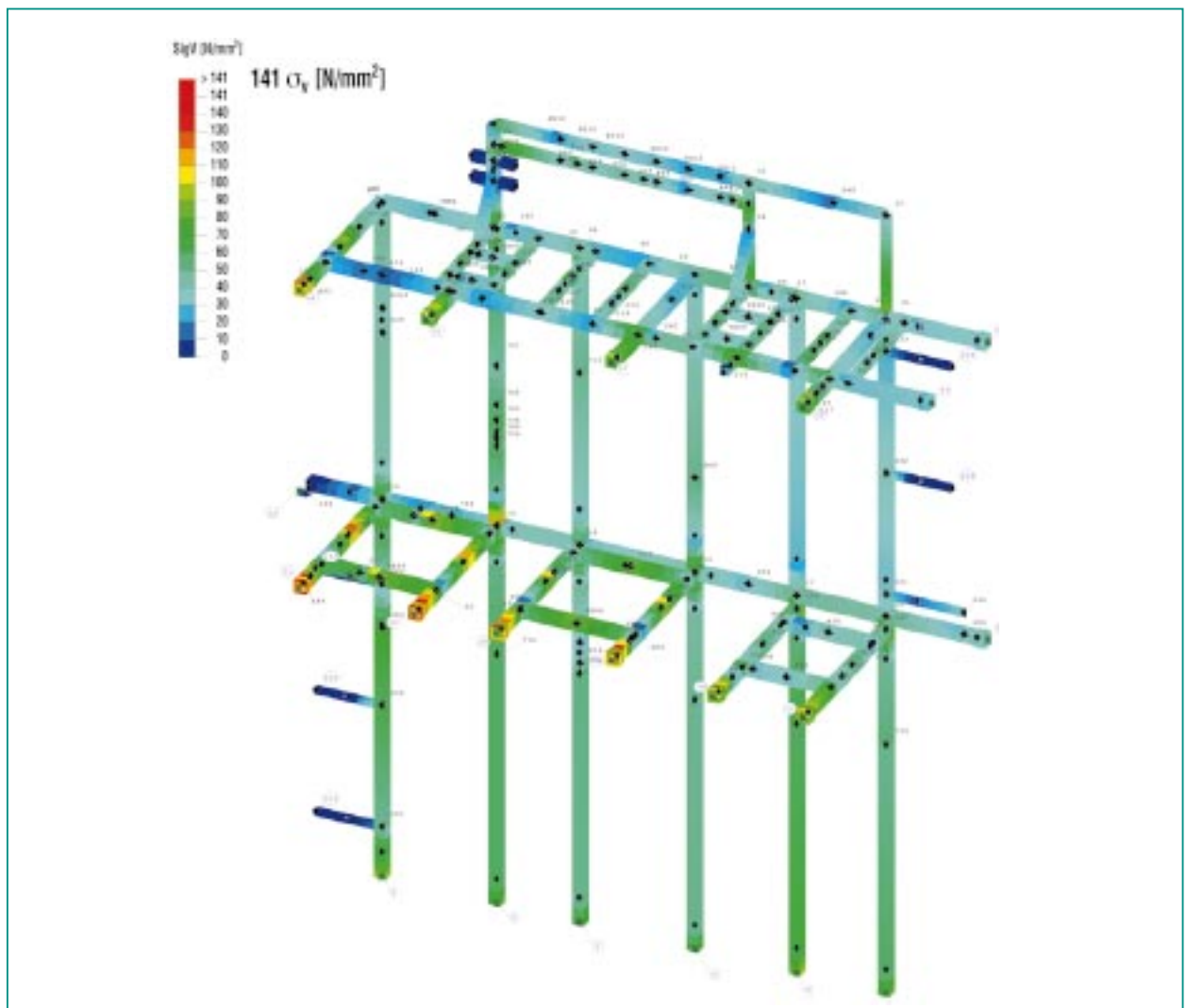


Abb. 9: Vergleichsspannungen in der Stahlstruktur, Lastfall EL + FZA.

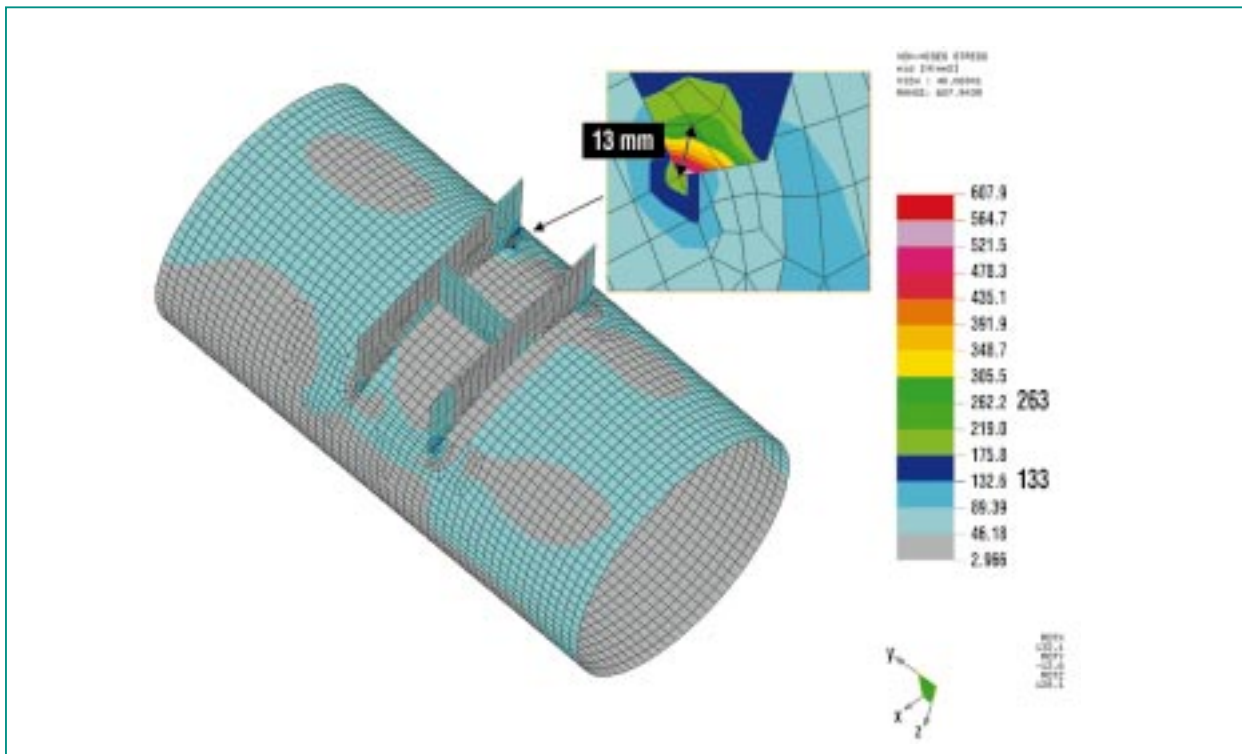


Abb. 10: Vergleichsspannungen am Sattelhorn des Kühlers, Lastfall EL + FZA.

modells. Außerhalb des Bereichs der (nur für Ermüdungsfragen relevanten) Spitzenspannungen zeigen sich zulässige Ergebnisse.

Die ermittelten Lagerkräfte des Integralmodells dienen zum Nachweis der bauseitigen Ankerplatten-Anschlüsse.

Zusammenfassung

Für das VEK-Gebäude wurde ein 3D-Integralmodell entwickelt, das es erlaubt, die globalen Antworten – Verschiebungen, Beschleunigungen, Schnittkräfte, Antwort-

spektren, globale Bewehrung – für sämtliche Einwirkungen in einem Modell zu ermitteln.

Besonders für die Einwirkungskombination mit FZA führte eine voll-dynamische Bemessung, die die Bewehrung zu jedem Zeitschritt bestimmt, zu bestmöglicher Realitätsnähe und Wirtschaftlichkeit.

Die Vorteile des Integralmodells wurden auf die Auslegung der verfahrenstechnischen Anlagen in den Zellen übertragen, indem Stahlstruktur, Behälter und Rohrleitungen gemeinsam in einem Gesamtmodell behandelt wurden.

Das Vorgehen bei der VEK zeigt den neuesten Stand der Technik zur strukturellen Auslegung kerntechnischer Anlagen gegen interne und externe außergewöhnliche Einwirkungen.