

Neue Reaktorkonzepte für die Kernspaltung, Entwicklungen von AREVA

W. Dams, R. Leverenz, R. Drescher, AREVA NP GmbH

1. Einleitung

Die Kernenergie ist kein Auslaufmodell, denn

- sie wird in 31 Ländern, in denen zweidrittel der Weltbevölkerung leben, genutzt,
- es sind 435 Kernkraftwerksblöcke in Betrieb und 28 sind in 12 Ländern in Bau,
- diese Anlagen decken weltweit 16% und in der EU 34% des Strombedarfs.

Die Dimension der Herausforderung, die auf die Energieversorgung zukommt, ist in Abb. 1 zu ersehen und damit ist offensichtlich, dass alle Arten der Technologien zur Energieumwandlung notwendig sind.

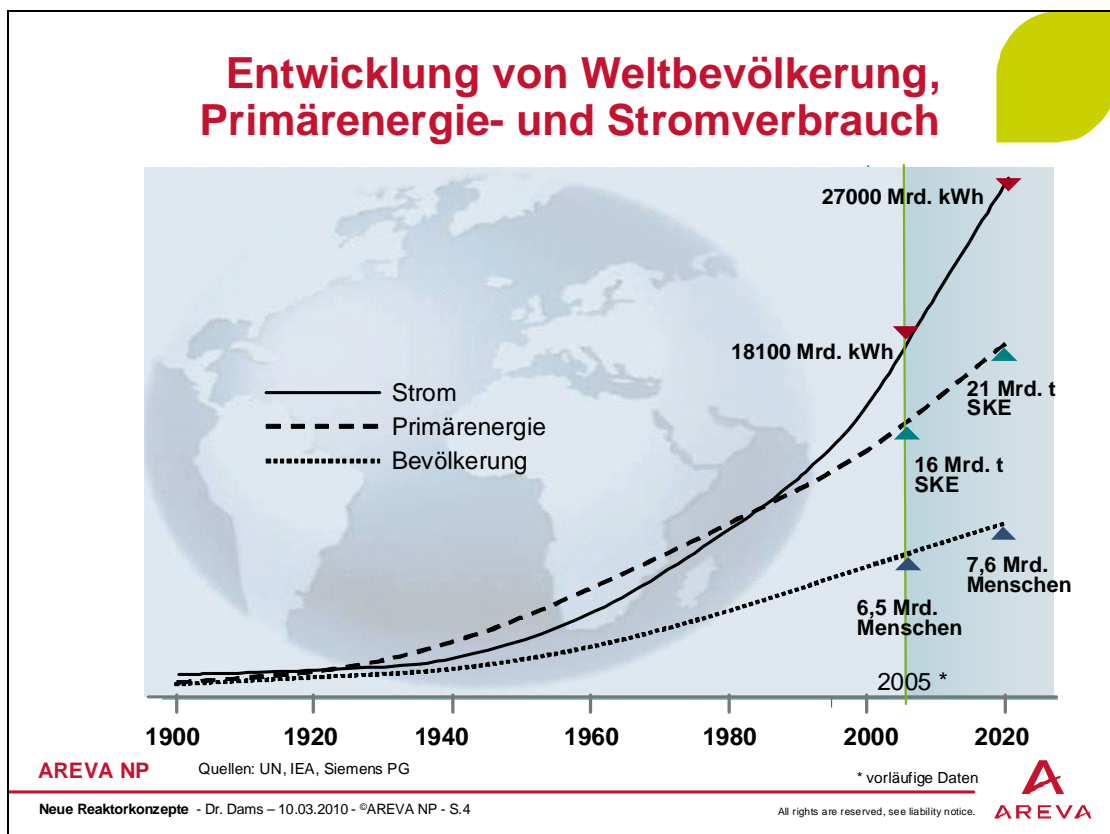


Abb. 1

2. Reaktorkonzepte der Generation III+

In der Roadmap (Abb. 2) für die Entwicklung neuer Reaktorkonzepte befinden wir uns zur Zeit bei Übergang von bestehenden Anlagen (Generation II) zur neuen verbesserten Anlagen der Generation III/ III+. Einer dieser Kernreaktoren ist der von AREVA gebaute EPR™.

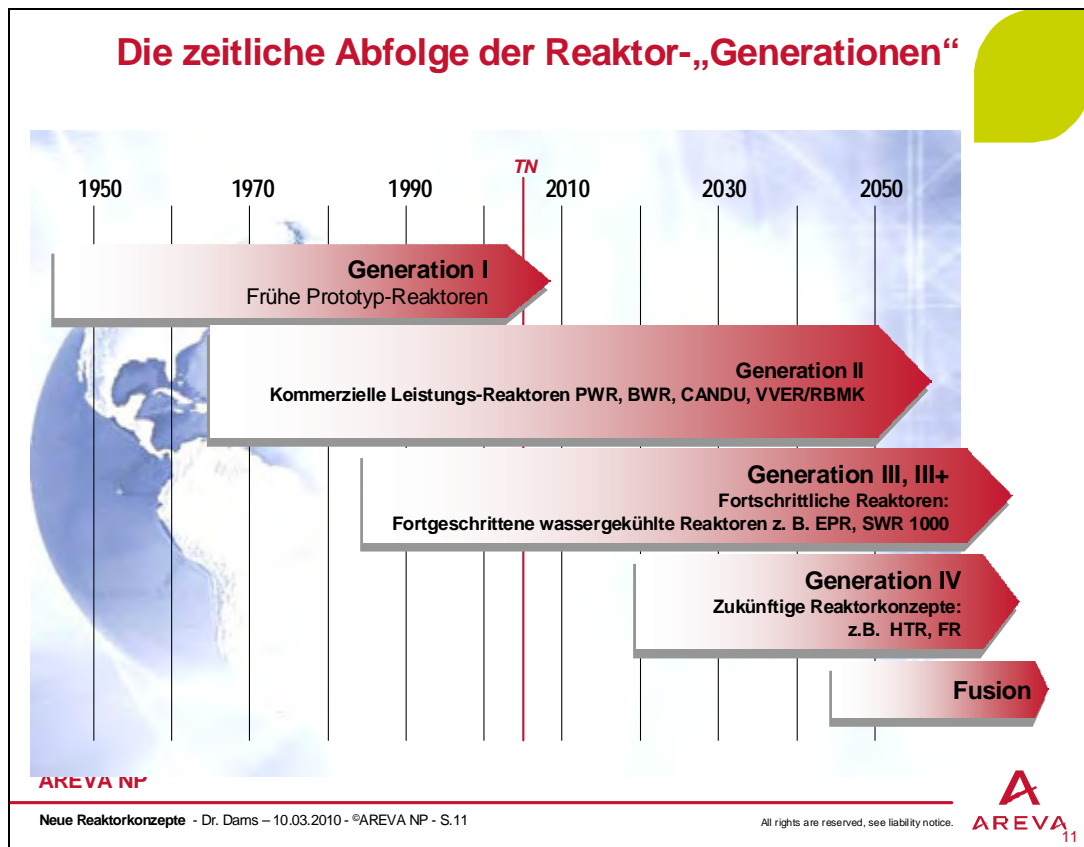


Abb. 2

2.1. Der EPR™

Der EPR™ baut auf der erprobten Technik der modernsten, von AREVA errichteten Reaktoren auf. Das sind die Konvoi-Baulinie in Deutschland und die N4-Linie in Frankreich. Eine evolutionäre Auslegung wurde gewählt, um die Erfahrung aus dem Bau und Betrieb von Reaktoren in vollem Umfang nutzen zu können. Richtschnur waren zum einen die Vorgaben der europäischen und der US-amerikanischen Energieversorger für künftige Kernkraftwerke, zum anderen die gemeinsamen Empfehlungen der deutschen und französischen Genehmigungsbehörden.

Wesentliche Entwicklungsziele waren eine noch weiter erhöhte Sicherheit sowie eine nochmals gesteigerte Wirtschaftlichkeit, um die Konkurrenzfähigkeit der Kernenergie gegenüber anderen Energiequellen, fossilen wie regenerativen, auszubauen.

Das Sicherheitsniveau der Kernkraftwerke ist in der Vergangenheit kontinuierlich erhöht worden. Der EPR als Reaktor der Generation III+ stellt einen weiteren Fortschritt in der Sicherheitstechnik dar. Ich möchte hier die zentralen Weiterentwicklungen aufzählen:

- Erstens: Verbesserte Störfall-Vorbeugung.

Die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des Reaktorkerns ist noch weiter verringert worden. Dafür sorgen unter anderem ein vergrößertes Wasservolumen im primären Kühlsystem, verringerte Leistungsdichte im Reaktorkern, eine erhöhte Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme durch vierfache Redundanz und konsequente räumliche Trennung sowie optimierte Mensch-Maschine-Schnittstellen

- Zweitens: Verbesserte Störfall-Beherrschung

Selbst im extrem unwahrscheinlichen Fall eines Kernschmelzens würden die Folgen eines Unfalls auf die Anlage selbst beschränkt bleiben. Dies würde durch das Einschließen der Radioaktivität im robusten doppelwandigen Containment geschehen. Ein geschmolzener Kern (“Corium”) würde unter dem Reaktordruckbehälter aufgefangen. Auf einer speziell beschichteten Fläche könnte sich das Corium ausbreiten und schließlich stabilisiert und gekühlt werden. Der Druck würde kontrolliert abgebaut werden. Auch der Entstehung von Wasserstoff wird durch geeignete technische Maßnahmen entgegenwirkt.

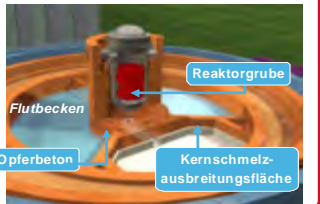
- Und Drittens:

Verbesserter Schutz gegen äußere Risiken, wie Flugzeugabsturz – auch großer Passagiermaschinen – und innere Risiken, wie Brand oder Überflutung

Grundsätzlich besteht dabei für alle Sicherheitssysteme und alle zugehörigen Hilfssysteme eine vollständige, vierfache Redundanz. Die Risiken im Zusammenhang mit “Common Mode”-Fehlern, die auch redundante, aber technisch identische Systeme betreffen könnten, wurden reduziert, indem systematisch das Prinzip funktionaler Diversität angewendet wurde. Das bedeutet zum Beispiel: Würde ein redundantes System vollständig ausfallen, so gibt es immer ein anderes System mit einem anderen Design, das die Funktion übernehmen kann und es dadurch ermöglicht, den EPR sicher abzufahren und zu kühlen. Die verschiedenen Stränge der sicherheitsrelevanten Systeme befinden sich in vier verschiedenen Gebäuden mit strikter räumlicher Trennung.

Beherrschbarkeit von Störfallfolgen durch die Kombination passiv und aktiv wirkender Sicherheitssysteme

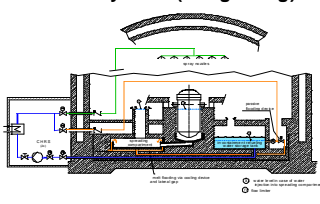
Passives System (Kurzfristig)



1. Temporäres Zurückhalten der Schmelze in der Reaktorgrube (Metallsperre und Gravitation)
2. Austritt der Kernschmelze in die vorgesehene Ausbreitungsfläche (Schmelzen der Metallsperre und Gravitation)
3. Fluten & Kühlen der Kernschmelzausbreitungsfläche durch Öffnen des Flutbeckens

&

Aktives System (Langfristig)



1. Wärmeableitung aus dem Sicherheitsbehälter:
 - durch den Umwälzkreislauf des Kühlwassers
 - durch das Flutsystem des Sicherheitsbehälters

keine wesentlichen Maßnahmen in der Umgebung der Anlage erforderlich

AREVA NP All rights are reserved, see liability notice. AREVA

Neue Reaktorkonzepte - Dr. Dams - 10.03.2010 - ©AREVA NP - S.17

Abb. 3

Nicht nur die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kernschäden wurde vermindert, durch ein neues Containment-Design werden zudem die radiologischen Folgen von schweren Störfällen begrenzt. Dieses neue Design stellt sicher, dass das Containment seine strukturelle Integrität unter Unfallbedingungen sowie unter äußeren zivilisationsbedingten Risiken behält (Abb. 3). Auch die Ereignisse des 11. September 2001 wurden dabei berücksichtigt. Durch den Zwischenraum im Doppelwandcontainment werden eventuelle radioaktive Leckagen gesammelt und können vor Abgabe in die Umwelt einer Filteranlage zugeführt werden. Der Zwischenraum steht unter ständigem Unterdruck, so dass auch bei Ausfall der Filteranlage die Leckagenkontrolle fortbesteht. Im hypothetischen Ereignis eines Unfalles mit Kernschmelze wäre es nicht mehr erforderlich, die in der unmittelbaren Nachbarschaft zur Anlage lebende Bevölkerung zu evakuieren (Abb. 4).

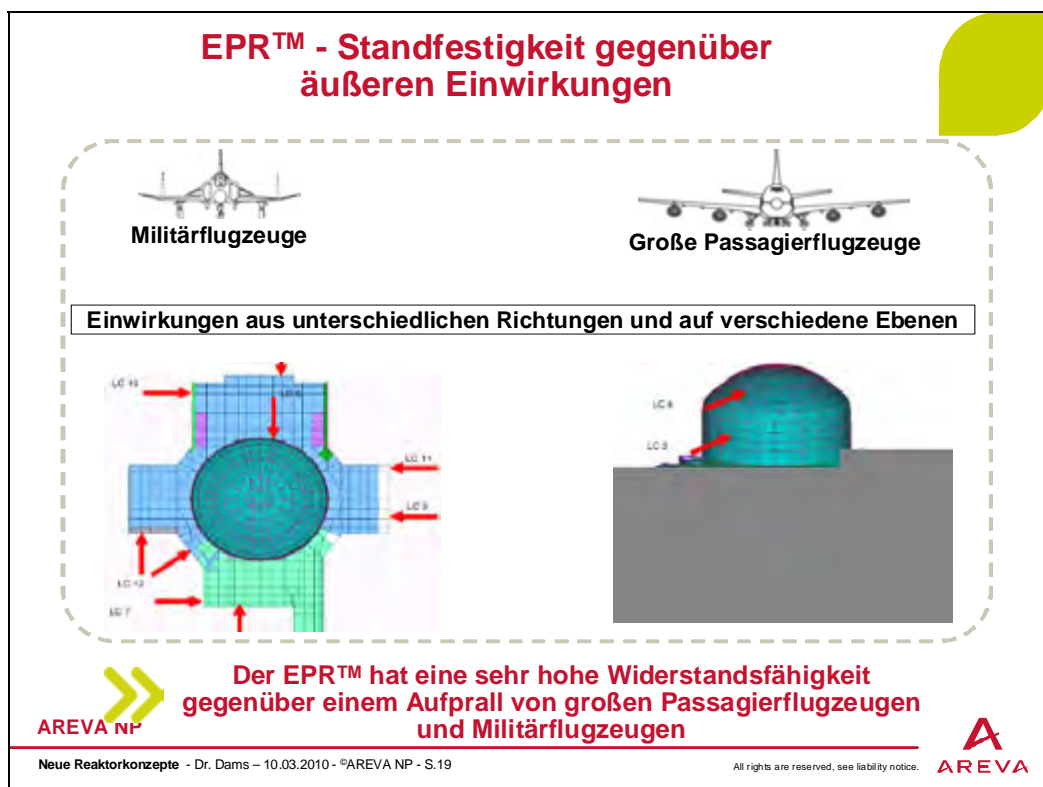


Abb. 4

2.2. Der Kerena™

Ein zweites Konzept, welches Areva zur Zeit zur Marktreife entwickelt, ist der Kerena™. Dieser Siedewasserreaktor baut auf der langen Erfahrung bei der Herstellung und dem Betrieb solcher Anlagen in Deutschland auf (Abb. 5).

Die technischen Daten des Kerena™ sind:

- Thermische Reaktorleistung: 3,370 MW_{th}
- Nennleistung: 1,250 MW_{el}
- Wirkungsgrad: 37 %
- Brennelement Typ: ATRIUM™ 12A
- Brennelement Anzahl: 664
- Steuerstäbe: 157

- Höhe aktiver Kern: 3.0 m
- Durchschnittliche Brennstoffleistungsdichte: 51 kW/I
- RDB Höhe: 23.81 m
- RDB innerer Durchmesser: 7.12 m
- RDB Betriebsdruck: 75 bar
- Interne Umwälzpumpen: 8
- Geplante Lebensdauer: 60 Jahre

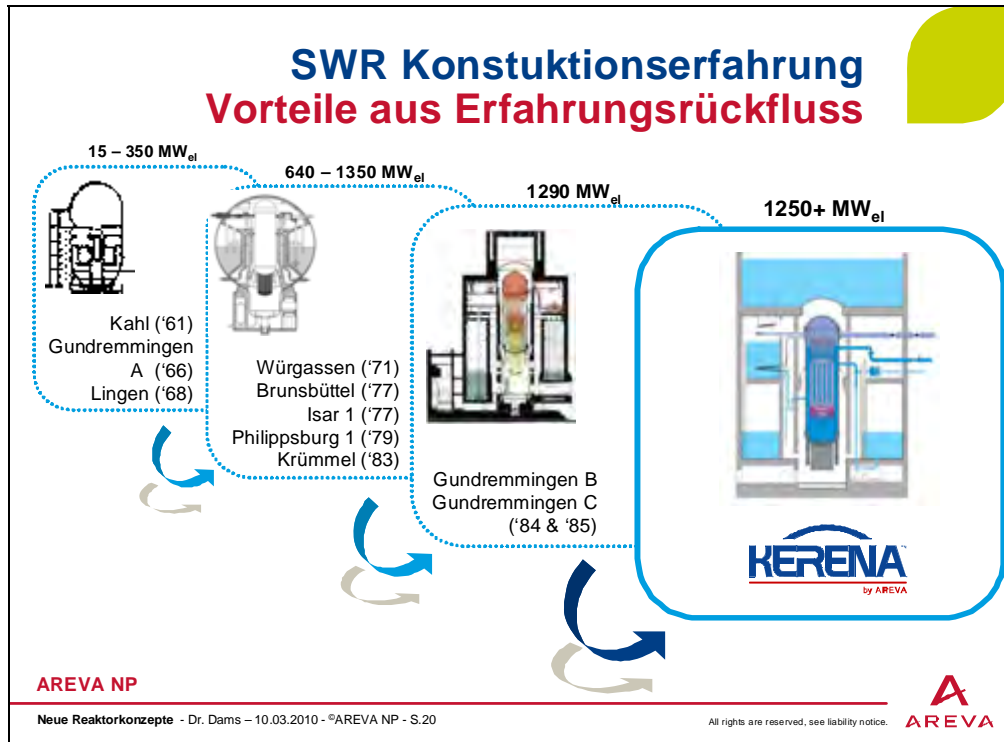


Abb. 5

Die zentralen Entwicklungsziele dieser Generation III+-Anlage sind:

- **Sicherheit**

- Sehr geringe Häufigkeit von Kernschmelzunfällen
- Beherrschung von Störfällen und auslegungs- überschreitenden Ereignissen ohne der Inanspruchnahme des externen Notfallschutzes
- Einführung passiver Sicherheitssysteme (Prinzip von Redundanz & Diversität)
- Große Zeiträume für erforderliche Personalhandlungen (>3 Tage)

- **Betrieb und Wirtschaftlichkeit**

- Einsatz von Betriebserfahrung zur Vereinfachung der Projektplanung
- Hohe Anlagenverfügbarkeit
- Wartungsfreundliches Design und geringer Wartungsaufwand
- Flexible Brennstoffzyklen (12 - 24 Monate)
- Hoher Abbrand (bis zu 65 GWd/t)

- Verringerung von Produktionsabfall
- Lebensdauer von 60 Jahren (geplant)
- Kurze Konstruktionsdauer von 48 Monaten
- Erzeugungskosten wettbewerbsfähig gegenüber größeren Kernkraftwerken & fossil befeuerten Anlagen

Diese Ziele wurden durch diverse Sicherheitssysteme und Auslegung der Anlage erreicht. Im Wesentlichen besteht das Sicherheitskonzept des Reaktors aus:

- **Redundanz & Diversität**
 - Sichergestellt durch zwei aktive und einen passiven Sicherheitsstrang
- **Passives Sicherheitssystem**
 - Funktion werden selbständig oder durch passive Systeme aktiviert
 - Unabhängige Basis zur Beherrschung von Störfällen und auslegungsüberschreitenden Ereignissen
- **Passive Reaktor Kühlung**
 - Hinreichendes Kühlwasser zur Gewährleistung der Wärmeabfuhr für bis zu 72h nach Eintritt eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses ohne Personalhandlung
- **Schwere Störungen**
 - In diesem unwahrscheinlichen Fall werden Konsequenzen kontrolliert und es sind keine wesentlichen Maßnahmen in der Umgebung der Anlage erforderlich.

Passive & Aktive Sicherheitssysteme gewährleisten die Sicherheit des KERENA™ Reaktors. Beispielhaft sind einige der passiven Sicherheitssysteme erläutert.

2.2.1. Der Notkondensator (Abb. 6)

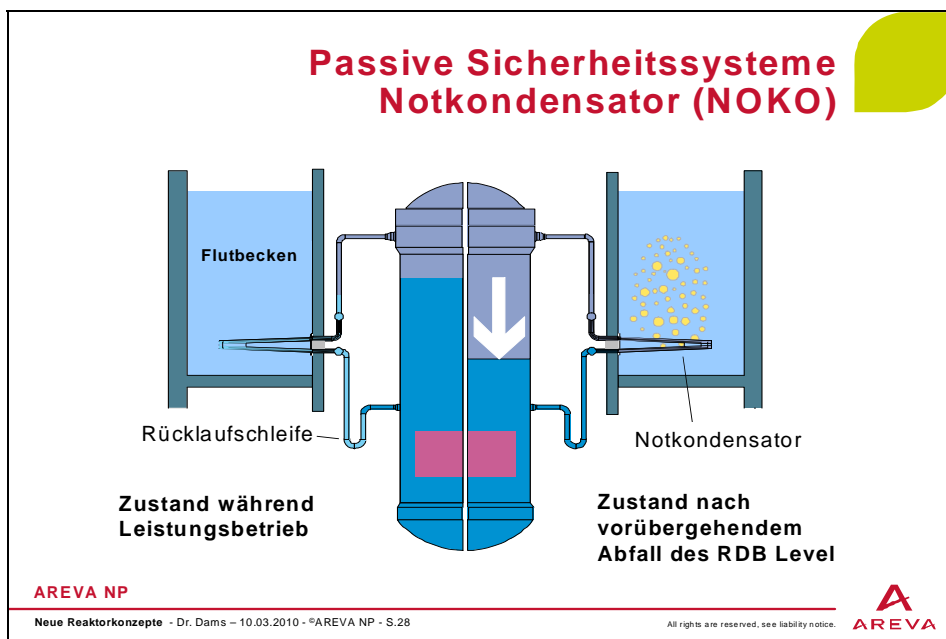


Abb. 6

2.2.2. Das Gebäudekondensatorsystem (Abb. 7)

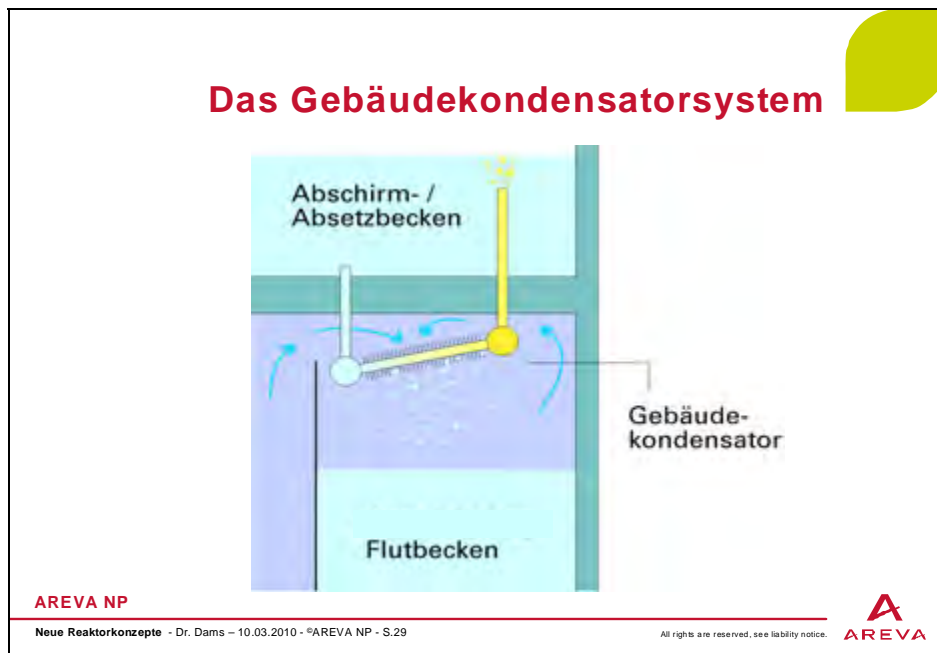


Abb. 7

- Aufgabe: Wärmeabfuhr aus Containment bei Störfällen mit gleichzeitigem Ausfall der aktiven Nachwärmeabfuhr
- vier Teilsysteme, jedes einem Flutbecken zugeordnet
- Vorlaufleitung, Verteiler, Wärmetauscherrohre, Sammler und Abströmleitung
- oberhalb des Wasserspiegels der Flutbecken angeordnet, über Vorlauf- und Abströmleitung mit Abschirm-/Absetzbecken verbunden
- GEKO sind mit Wasser aus Abschirm-/Absetzbecken gefüllt
- keine Absperrarmaturen

2.2.3. Das passive Flutsystem (Abb. 8)

- Aufgabe: Bespeisung des RDB bei Kühlmittelverluststörfällen mit gleichzeitigem Ausfall des nuklearen Nachkühlsystems
- vier Teilsysteme, jedes einem Flutbecken und dem entsprechenden NOKO-Teilsystem zugeordnet
- jedes Teilsystem besteht aus einer Leitung, die das Flutbecken mit dem NOKO verbindet, in der Leitung federentlastete Rückschlagarmatur
- Druck auf Einströmseite = Containmentdruck + Druck der Wassersäule, Druck auf Ausströmseite = Reaktordruck
- Armatur öffnet, wenn Kraft auf den Ventilkegel Null ist
- Leistungsbetrieb: auf der Ausströmseite steht der hohe Reaktordruck an, d.h. Rückschlagklappe wird zugeedrückt
- im Anforderungsfall sinkt der Druck im RDB durch KMV und ADE
- Rückschlagklappe öffnet, wenn Kraft auf Ventilkegel Null

- durch die Verwendung einer federentlasteten Armatur ist der Druck zum Öffnungszeitpunkt im RDB noch etwas größer
- Dampf strömt aus RDB ins FB - zusätzliches S/E-Ventil
- bei Druckausgleich fließt Wasser aus FB in den RDB

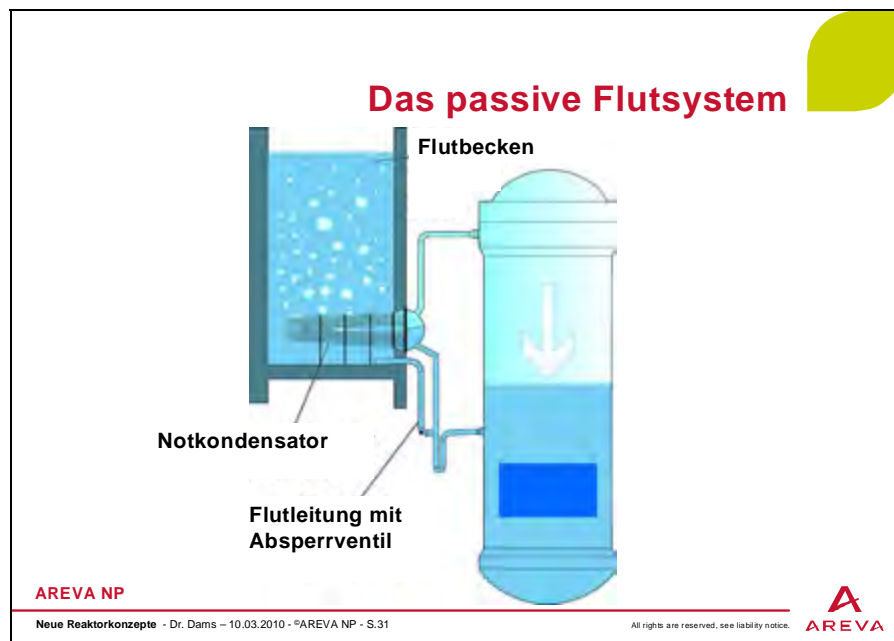


Abb. 8

2.2.4. INKA – Teststand

Diese passiven Sicherheitssysteme werden aktuell in einer aufwendigen Großversuchsanlage (INKA - Teststand), (Abb. 9) getestet.

Die ersten Testergebnisse zeigen, dass die Auslegung der passiven Sicherheitssysteme mit den Versuchsergebnissen im Einklang steht und deshalb für die Sicherheit des KERENA™ folgendes Fazit gegeben ist:

Fazit Sicherheit

- Sicherheitskonzept mit großen Wasservorräten
 - im Reaktordruckbehälter (RDB)
 - innerhalb des Sicherheitsbehälters (Flutbecken & Kondensationskammer)
 - außerhalb des Sicherheitsbehälters (Abschirm- / Absetzbecken)
- Verschiedene Aktivierungssysteme
 - Sicherheit I&C- System
 - passives Impulsgebersystem
- Diverse aktive & passive Sicherheitssysteme zur Beherrschung von auslegungsüberschreitenden Ereignissen
- Beherrschung von auslegungsüberschreitenden Ereignissen nur mit passiven Sicherheitssystemen ohne Kernaufheizung
- Sehr geringe Wahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalls

- Auslegungüberschreitende Ereignisse werden passiv kontrolliert, Konsequenzen sind auf die Anlage selbst beschränkt
- Anlage ist gegen Naturereignisse und Gefährdungen von Innen und Außen geschützt
- Verringerung des Kapitalaufwandes durch
 - geringere Anzahl von aktiven Systemen und Komponenten
 - Einsatz von passiven Systemen

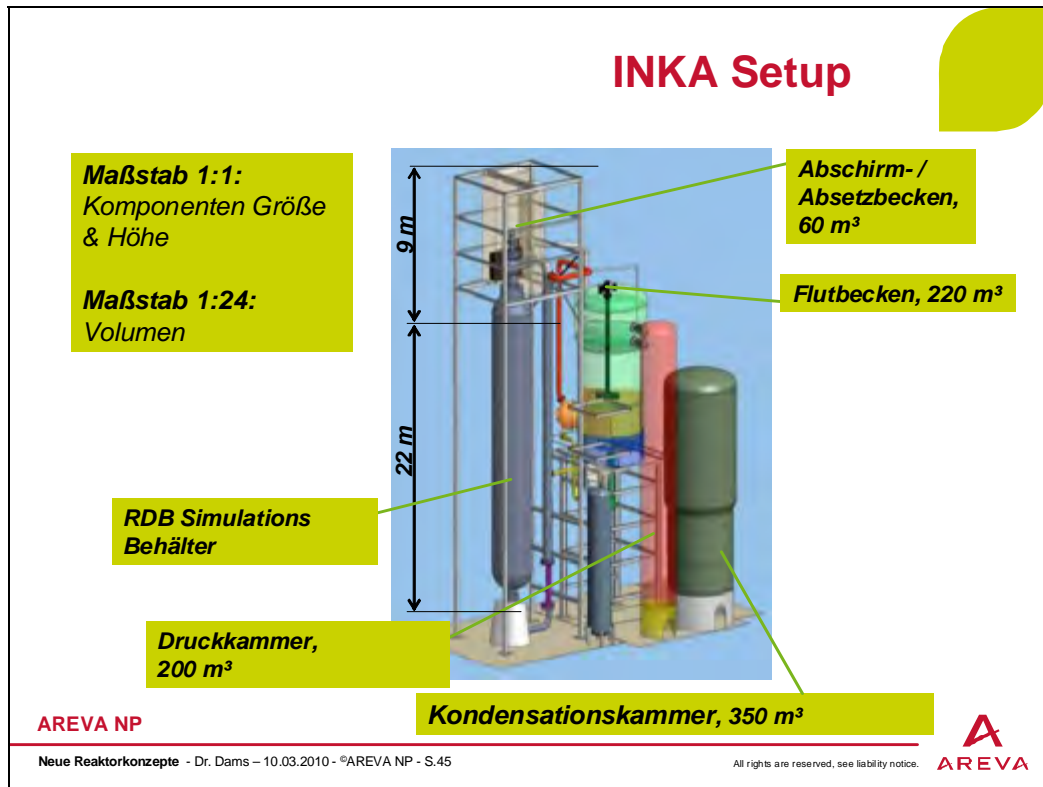


Abb. 9

3. Neue Reaktorkonzepte der Generation IV

Für die zukünftigen Reaktorkonzepte (Generation IV), (Abb. 2), die ab 2020 zur Verfügung stehen sollen, favorisiert Areva Konzepte, die eine bessere Ausnutzung der Uranressourcen zum Entwicklungsziel hat.

Die begrenzten Ressourcen an Kernbrennstoff können jedoch nicht als Argument gegen die Nutzung der Atomkraft herhalten. Die zur Zeit bekannten Lagerstätten enthalten etwa 19,9 Millionen Tonnen Uran, das in der Natur als Uranoxid (U₃O₈) vorkommt. Über die größten Vorräte verfügen Australien mit 4,2 Millionen Tonnen, die USA mit 2,4 und China mit 1,8 Millionen Tonnen. Da der Preis für U₃O₈ seit Ende 2000 von knapp 20 US-Dollar auf über 100 Dollar pro Kilogramm gestiegen ist, könnten aus den globalen Vorräten mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nahezu 4,6 Millionen Tonnen Uran gewonnen werden. Bei einem Gesamtbedarf aller Kernkraftwerke in Höhe von 68 400 Tonnen im Jahr 2004 würde damit zumindest für die nächsten 67 Jahre genügend Brennstoff zur Verfügung stehen. Die wirtschaftliche Reichweite beträgt ca. 120 Jahre.

3.1. Neue Brennstoffkonzepte

In den bestehenden Leichtwasserkonzepten besteht der Brennstoff aus angereichertem Uran bis 5% U-235. Darüber hinaus wird in verschiedenen Ländern auch Brennstoff aus Uran und Plutonium (MOx) verwendet. Bei der Spaltung von Uran wird zusätzlich durch einen Neutroneneinfang aus Uran-238 Plutonium 239 erzeugt. (Abb. 10)

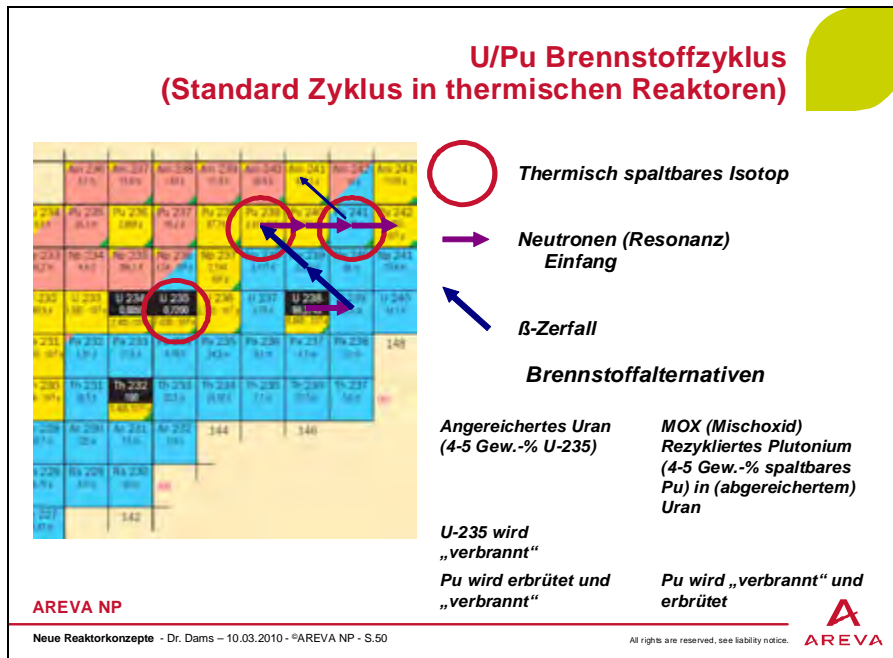


Abb. 10

Diese Kernreaktion unter Nutzung der schnellen Neutronen kann durch neue Kernauelegung bestehender Leichtwasserreaktoren optimiert werden. Dabei wird dann nicht verwendetes U-238 in einem Reaktorkern zur Energieerzeugung mit verwendet.

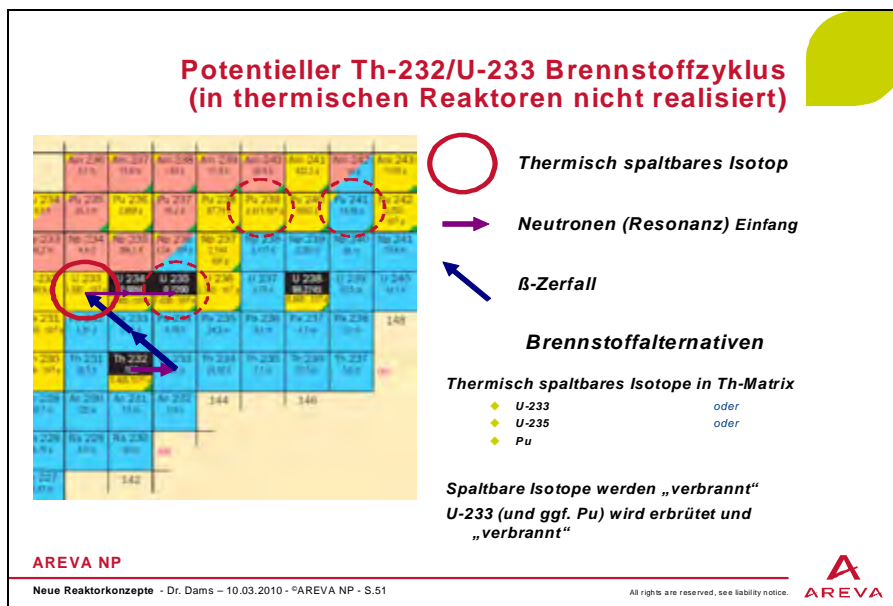


Abb. 11

Diese verbesserten Kernausslegungen erlauben deshalb eine längere Nutzung der Uran – Brennelemente und Verbesserung der Ökonomie der Anlagen. In aktuellen Entwicklungsprogrammen wird dieses untersucht.

In der Vergangenheit wurde zudem die Verwendung des in der Natur vorkommenden Thoriums untersucht. (Abb. 11). Auch hier gibt es internationale Entwicklungsprogramme, die zum Ziel haben, Thorium in bestehenden Leichtwasserreaktoren einsetzen zu können.

3.2. Die beiden favorisierten Generation IV- Konzepte

Ziele für F&E

Im Rahmen des Projekts Gen IV wurden 6 aussichtsreiche Reaktorkonzepte ausgewählt

VHTR	GFR	SFR	SCWR	LFR	MSR
------	-----	-----	------	-----	-----

AREVA NP

SFR

Neue Reaktorkonzepte - Dr. Dams – 10.03.2010 - ©AREVA NP - S.54 All rights are reserved, see liability notice.

Abb. 12

Für unseren Konzern sind zwei Reaktorbaulinien von Interesse. als erstes ist ein Schneller Reaktor zu nennen. Die Besonderheiten dieses Reaktors sind, dass er aus den viel häufiger vorkommenden U-238 Brennstoff erbrüten kann. diese Anlage würde deshalb die Ressourcen der Erde viel effektiver nutzen. Zudem ist dieser Anlagentyp ideal geeignet der Brennstoffkreislauf aller Leichtwasserreaktoren zu schließen. Diese neuen Anlagen, die alternativ mit flüssigen Metallen oder Gas gekühlt werden (und somit die schnellen Neutronen nicht abbremsen), sind auch in der Lage “minor actinides” d.h. langlebigen nuklearen Abfall in kurzlebige Nuklide umzuwandeln (Transmutation).

Eine weitere Reaktorlinie, ein VHTR (Very High Temperature Reactor), der eine Gasaustrittstemperatur von 900°C haben soll, ist eine Reaktorlinie mit einem Anwendungsgebiet, das über die reine Stromerzeugung hinausgeht. In dieser “Hochtemperatúrauslegung” ist dieser Typ in der Lage, Energie für Wasserstoffherzeugung aus

Wasser oder für Prozesswärme für chemische Anlagen oder Raffinerien zu liefern. Da solche Reaktoren aber einen sehr langen Entwicklungshorizont haben und zudem einen ganz neuen Brennstoffkreislauf erfordern sind, sind solche Entwicklungen nicht nur sehr langwierig und nur in einer internationalen Kooperation möglich. Selbst für unseren großen Konzern ist diese Entwicklung mit eigenen Mitteln nicht möglich. Wir verfolgen aber all die langfristigen Forschungen und investieren auch eigene Mittel, um mit unseren jungen Mitarbeitern solche Wissensgebiete zu erschließen, die Kreativität und Innovationskraft zu stärken. Das zeigt auch die Einbindung unserer Experten in Fusionsprojekte wie ITER, die noch sehr weit entfernt von der industriellen Nutzung sind.

4. Zusammenfassung

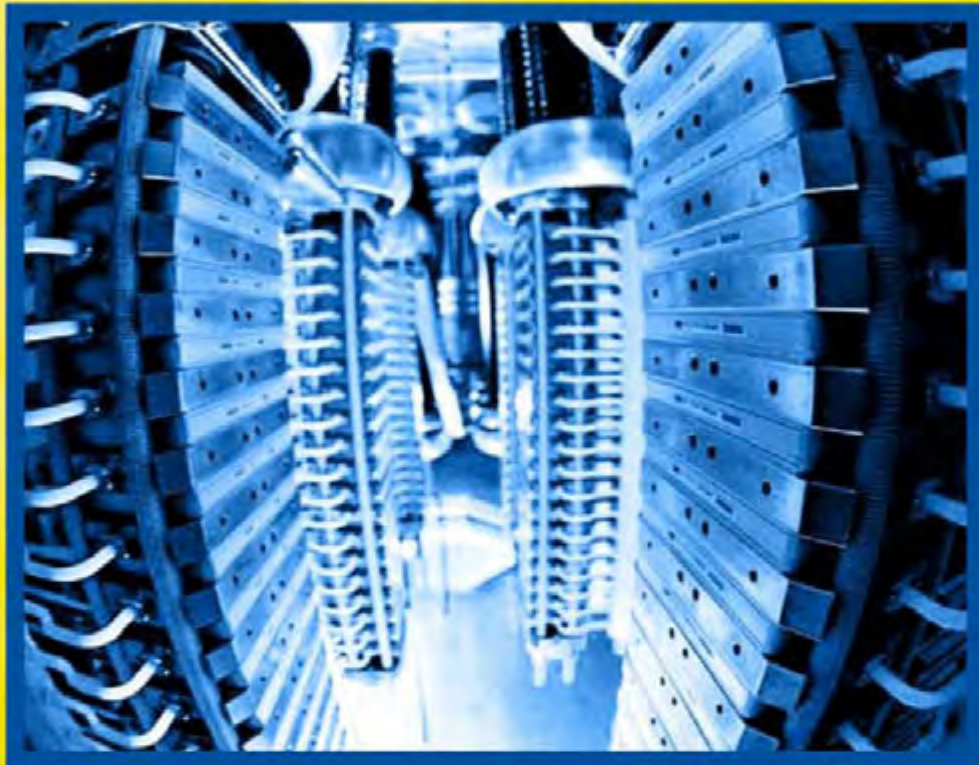
- Der wachsende Energiebedarf macht den Einsatz aller Energiequellen erforderlich, der Verzicht auf bestimmte Optionen ist ein energiepolitischer Irrweg.
- Steigende Preise für fossile Brennstoffe machen bestehende und neue Kernkraftwerke in der Grundlast ökonomisch attraktiver.
- Der Beitrag der Kerntechnik für den Klimaschutz findet mehr und mehr Beachtung bei den Politikern.
- Während gegenwärtig der Ausbau der Kernenergie sich in Fernost abspielt, zeichnet sich der Aufschwung der Kernenergie in Europa und Nordamerika ab.
- Fortschrittliche Reaktoren der 3. Generation bieten weitere Verbesserungen hinsichtlich Kosten, Umweltschutz und Sicherheit.
- Fortschritte beim Ausbau der Endlager für radioaktive Abfälle sind der Schlüssel zu einer öffentlichen Akzeptanz der Kerntechnik.

Dr. Wolfgang Dams
AREVA NP GmbH
Kaiserleistraße 29
63067 Offenbach
Wolfgang.Dams@areva.com

Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2010 Bonn

home:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm



Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2011

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Bonn, 15. und 16. März 2010

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Übersicht über die Fachsitzungen.....	7
Abstracts	8
Energieeffizienz in der Informationstechnologie (vorgetragen von W. Gnettner).....	18
ITER, the Decisive Step towards Fusion Energy (vorgetragen von G. Janeschitz)	29
The Physics Base for ITER and DEMO (vorgetragen von H. Zohm).....	44
Neue Reaktorenkonzepte für die Kernspaltung, Entwicklungen von AREVA (vorgetragen von W. Dams).....	55
Brennstoffzellen für mobile Anwendungen – Wo stehen wir auf diesem Weg? (vorgetragen von D. Stolten)	67
Elektrische Energiespeicher (vorgetragen von M. Rzepka)	77
Strom aus solarthermischen Kraftwerken im Sonnengürtel (vorgetragen von R. Pitz-Paal)	90
Stromtransport: Erfordernisse und Lösungen für ein europäisches Verbundnetz unter Nutzung solaren Stroms aus Nordafrika (vorgetragen von T. Benz)	97
Intelligente Stromnetze - Perspektiven und Potenziale (vorgetragen von F. Schulte)	108
Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine (vorgetragen von E. Huenges).....	114
Energie aus Biomasse – Perspektiven für Europa (vorgetragen von D. Thrän).....	126
Thermodynamisch optimiertes Heizen und Kraft-Wärme-Kopplung (vorgetragen von G. Luther).....	137

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2010 in Bonn zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien aller Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort zu dem Archiv des AKE weiterklicken) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Dezember 2010

Hardo Bruhns

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2010 -Bonn:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm