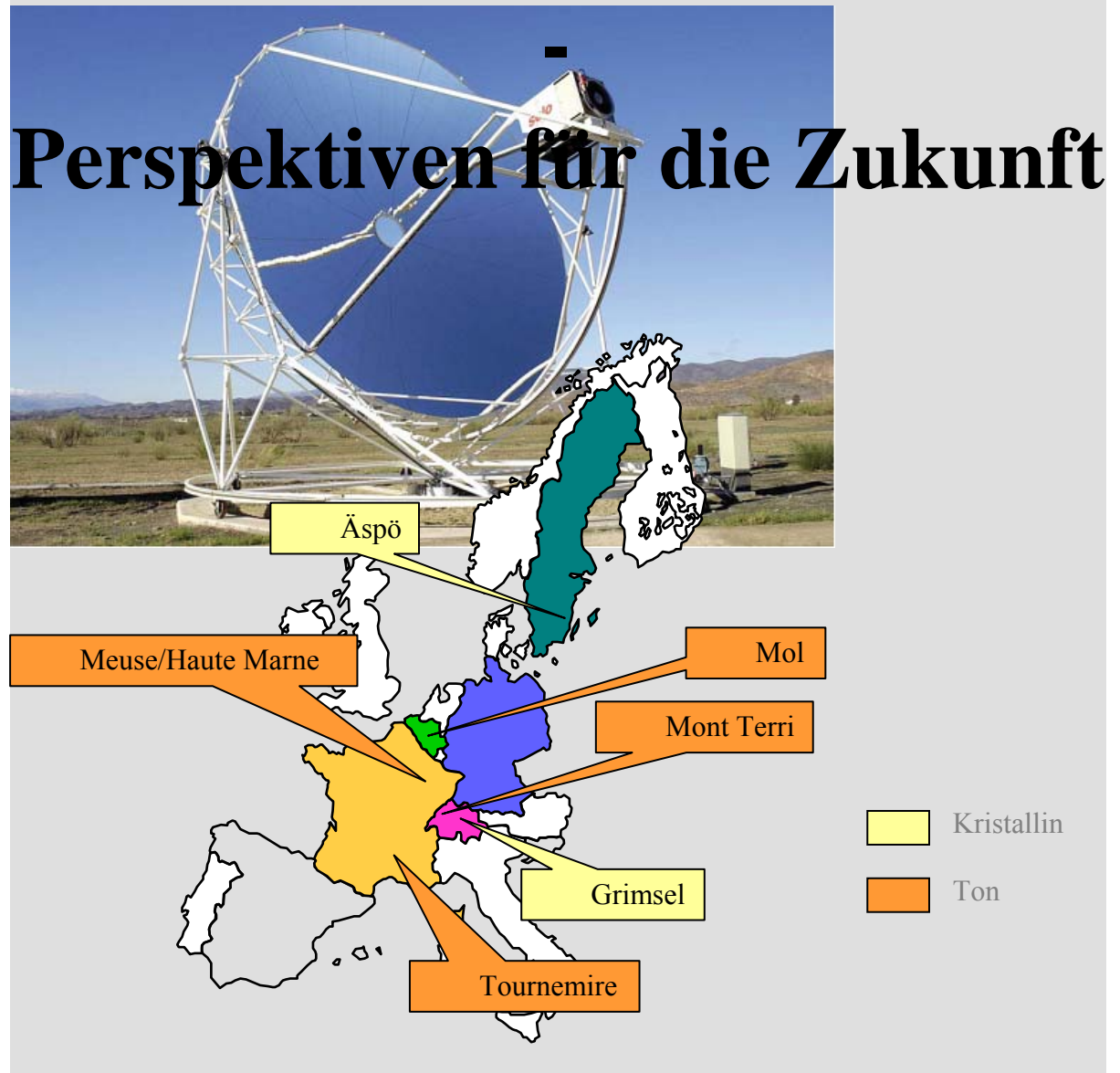


Energie



Vorträge der Hamburger Tagung (2009)

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Herausgeber:
Arbeitskreis Energie (AKE) in der DPG
Hardo Bruhns
Meliesallee 5
40597 Düsseldorf
E-Mail: ake (at) bruhns.info

Die Grafik des Titelblatts wurde mit
zwei Abbildungen aus den Beiträgen
von V. Bräuer (Abb. 7, S. 45) und
B. Hoffschmidt (Abb 5, S. 55) gestaltet.

Februar 2010

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

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Übersicht über die Fachsitzungen.....	6
Abstracts aller Vorträge der Hamburger Tagung	7
Effiziente und umweltfreundliche Nutzung von Kohlenstoff zur Elektrizitätserzeugung (vorgetragen von U. Stimming)	17
Microalgen-Photosynthese für Biomasse Produktion (vorgetragen von T. Lamparter).....	29
Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle (vorgetragen von V. Bräuer).....	37
Überblick über solarthermische Kraftwerke (vorgetragen von B. Hoffschmidt)	47
Energieeffiziente Gebäudehüllen: Neue Materialien und Komponenten (vorgetragen von U. Heinemann)	59
Die geologische CO ₂ -Speicherung in Deutschland – Möglichkeiten und Herausforderungen angesichts konkurrierender Nutzungsansprüche (vorgetragen von K. Reinhold)	63
Internationaler Entwicklungsstand bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse von Kernkraftwerken (vorgetragen von L. Weil)	65

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen zu den Plenar-, Haupt- und Fachvorträgen der AKE Tagung des Jahres 2009 in Hamburg zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vorträgen Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien aller Vorträge 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 Vortragenden, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Januar 2010

Hardo Bruhns

Einleitung

Wie in den vorangegangenen Jahren organisierte der Arbeitskreis Energie auch 2009 auf der Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, dieses Mal in Hamburg, ein Programm zu aktuellen Themen der Energieforschung. Beiträge behandelten Energiewandler, Kern-, Wind- Bio- und Solarenergie, Dämmmaterialien sowie Methanhydratgewinnung und CO₂-Sequestration.

- In einem Plenarvortrag zur „Energieversorgung in Europa, Herausforderungen, Optionen, Perspektiven“ hob A. Voß (IER, Univ. Stuttgart) hervor, dass Nachhaltigkeit mit Blick auf den gesamten Rohstoffbedarf von Energietechnologien auf Kostenvergleichsbasis verstanden werden muss. Damit sei neben den fossilen Energien auch die hochsubventionierte Photovoltaik deutlich negativer zu bewerten als andere erneuerbare Energien oder Kernkraft. A. Voß betonte, dass die umwelt- und klimapolitischen Zielsetzungen für Deutschland ohne Weiterverwendung der Kernkraft nicht realistisch seien.
- Über Fortschritte bei der umweltfreundlichen Direktverstromung von Kohlenstoff in Hochtemperatur-Brennstoffzellen wurden von U. Stimming (TU München) berichtet. Er hob insbesondere die Vorteile kohlenstoffhaltiger Brennstoffe gegenüber Wasserstoff hervor.
- Die Grundzüge und der aktuelle Forschungsstand zu einer effektiven Biomassegewinnung aus Mikroalgen wurden von T. Lamparter (Univ. Karlsruhe) aufgezeigt. Mit ihnen könnten um zwei Größenordnungen höhere Erträge pro Flächeneinheit bei geringerer Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion erwartet werden als z.B. bei landwirtschaftlichen Rapsanbau.
- J. Knebel (FZK) berichtete über die Renaissance der Kernenergie weltweit und in Europa. Er betonte die Verfügbarkeit sicherer, zuverlässiger und kostengünstiger Kraftwerkstechnologie und skizzierte den Weg zum geschlossenen Brennstoffkreislauf, den er trotz ausreichender Uranverfügbarkeit zur Ressourcenschonung und Abfallminimierung für zweckmäßig halte.
- Das brandaktuelle Thema der Endlagerung wurde von V. Bräuer (BGR, Hannover) behandelt. Er erläuterte die Geologie von Endlagerstätten und hob die sehr unterschiedlichen – in der öffentlichen Diskussion häufig ignorierten – Gegebenheiten für Asse und Gorleben hervor.
- Eine eingehende Darstellung probabilistischer Sicherheitsanalysen von Kernkraftwerken durch Ludwig Weil (BFS, Salzgitter) rundete diese Sitzung ab.
- Dass Windenergie weiter Forschung und Entwicklung benötigt, wurde von A.P. Schaffarczyk (FH Kiel) gezeigt, der die schwierigen Bedingungen und das Potential von off-shore Windanlagen diskutierte.

- M. Greiner (Siemens AG) skizzierte neue Verfahren zur realistischen Modellierung von Windstochastizität und der Optimierung von Windparks und zeigte deren hohe praktische Bedeutung.
- In der Photovoltaik werden neue aussichtsreiche Ansätze bei organischen und Farbstoff-Zellen verfolgt. C. Brabec (Konarka Deutschland GmbH) berichtete über Entwicklungserfolge, die günstigere Kosten und eine bislang ungekannte Vielfalt von Einsatzmöglichkeiten erwarten lassen.
- Perspektiven für solarthermische Kraftwerke im Sonnengürtel der Erde, die gegenwärtig mit den DESERTEC und ESTELA Initiativen diskutiert werden, und deren möglicherweise sehr interessante Rolle für Europa wurden von B. Hoffschmidt (Solar-Institut Jülich) dargestellt.
- Für das wichtige Thema energieeffizienter Gebäudehüllen stellte U. Heinemann (ZAE Bayern, Würzburg) Vakuumdämmungen als einen viel versprechenden Ansatz vor, der allerdings erhebliches Umdenken bei Planung und Ausführung von Bauten erfordere.
- K. Wallmann (IFM Geomar, Kiel) gab einen Ausblick auf die Möglichkeiten der Methanhydratgewinnung bei gleichzeitiger CO₂-Speicherung in den Kontinental-abhängen.
- K. Reinhold (BGR, Hannover) diskutierte die Verfügbarkeit geologischer Speicher für CO₂-Sequestrierung in Deutschland und schätzte ab, dass das CO₂ aus fossiler Stromproduktion auf heutigem Niveau für ca. 30 Jahre verbraucht werden könnte.

Das Programm fand insgesamt sehr reges Interesse: An den Sitzungen am Nachmittag des ersten Tages nahmen bis zu 300 Hörer teil. Am zweiten Tag stand leider nur ein kleinerer Hörsaal zur Verfügung, der bei weitem nicht den Publikumsandrang fassen konnte.

H. Bruhns

Übersicht über die Fachsitzungen

AKE 1.1–1.1 Mo 9:30–10:15	ESA-A	Plenarvortrag des AKE
AKE 2.1–2.3 Mo 14:00–15:15	ESA-A	Energiewandler und -speicher
AKE 3.1–3.1 Mo 15:15–16:00	ESA-A	Energie aus Biomasse
AKE 4.1–4.4 Mo 16:30–18:45	ESA-A	Kernenergie
AKE 5.1–5.2 Di 10:30–11:45	VMP 6 HS-E	Windenergie
AKE 6.1–6.2 Di 11:45–12:30	VMP 6 HS-E	Wärmedämmung
AKE 7.1–7.4 Di 14:00–16:00	VMP 6 HS-E	Solarenergie
AKE 8.1–8.2 Di 16:30–17:45	VMP 6 HS-E	Fossile Energie

Abstracts

aller Vorträge der Hamburger Tagung 2009 des Arbeitskreises Energie

Energieversorgung in Europa - Herausforderungen, Optionen, Perspektiven (Plenarvortrag)

— •Alfred Voß — Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a , D-70565 Stuttgart

Die Europäische Union ist heute mit rund 450 Millionen Verbrauchern weltweit der zweit-größte Energiemarkt. Nicht nur durch die Preissituation bei Erdöl und Erdgas, sondern auch im Hinblick auf den Klimaschutz und bezüglich der Versorgungssicherheit steht die Energieversorgung in Europa vor erheblichen Herausforderungen.

Der Europäische Rat hat im Frühjahr 2007 mit seinen Beschlüssen, die Treibhausgasemissionen der EU bis 2020 um 30% gegenüber 1990 zu vermindern, den Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch bis 2020 auf einen Anteil von 20% zu steigern und den Energieverbrauch der EU bis 2020 um 20% zu reduzieren, wesentliche strategische Elemente zur Bewältigung der energieseitigen Herausforderungen formuliert.

Sind damit die Weichen für eine nachhaltige Energieversorgung in Europa richtig gestellt und welcher der verfügbaren bzw. in Entwicklung befindlichen Energietechniken bzw. Energieoptionen kommt dabei eine besondere Rolle und Bedeutung zu? Der Vortrag versucht, hierauf Antworten zu geben.

Effiziente und umweltfreundliche Nutzung von Kohlenstoff zur Elektrizitätserzeugung (Hauptvortrag)

—•Ulrich Stimming^{1,2}, Rainer Bußar^{1,2}, Björn Franke² und Simon Nürnberger² —
¹ZAE Bayern, Abteilung 1, Walther-Meißner-Str. 6, D-85748 Garching — ²Technische Universität München, Physik Department E19, James-Franck-Str. 1, D-85747 Garching

Zur gesicherten und umweltfreundlichen Bereitstellung elektrischer Energie muss neben dem verstärkten Ausbau der regenerativen Energien auch eine Optimierung der Umwandlungskette fossiler Energieträger durchgeführt werden. Wichtig sind drastisch reduzierte Emissionen und Ressourcenschonung durch Effizienzsteigerung. Eine Direktverstromung von hochkohlenstoffhaltigen Brennstoffen aus Biomasse oder Kohle in Hochtemperatur-Brennstoffzellen stellt hierbei ein innovatives Konzept dar. Ausgehend von einem sehr hohen thermodynamischen Wirkungsgrad von 100% für die Kohlenstoffoxidation können potentiell hohe Gesamtwirkungsgrade bei der Verstromung erreicht werden.

Bisher wurde über einige Konzepte zur direkten Umsetzung von Kohlenstoff in Brennstoffzellen berichtet. [1-3] Am ZAE Bayern konnte kürzlich demonstriert werden, dass eine Umsetzung von reinem Kohlenstoff auch mit einer SOFC mit Stromdichten von bis zu 100 mA/cm² bei 0,4V und T=900_C möglich ist.

Literatur: [1] U. Stimming, R. Bußar, B. Franke, in VDI-Tagung, Braunschweig, 2008. [2] D. Cao, Y. Sun, G. Wang, Journal of Power Sources 2007, 167, 250. [3] S. L. Jain, B. Lakeman, K. D. Pointon, J. T. S. Irvine, Ionics 2007, 13, 413.

Towards an Efficient Conversion of Ethanol in Low Temperature Fuel Cells

— •Vineet Rao¹ and Ulrich Stimming^{1,2} — ¹Technische Universität München, Physik Department E19, James- Franck-Str. 1, D-85747 Garching — ²ZAE Bayern, Abteilung 1, Walther-Meißner-Str. 6, D-85748 Garching

Direct conversion of ethanol in low temperature fuel cells is a major goal in the development of fuel cells. Advantages of ethanol are its availability from biomass and the high energy density of such liquid fuel. Nevertheless, a major drawback is the incomplete oxidation of ethanol. Recent research focused mainly on novel catalyst materials for the ethanol oxidation reaction (EOR) based on e.g. Pt-Sn. Furthermore, some groups have carried out tests on solid OH- ion exchange membrane fuel cells [1, 2]. Better kinetics of fuel cell processes in such exchange membrane fuel cells could allow using also higher alcohols as fuel. Ethanol has slower kinetics of oxidation in acidic media and several by-products are formed because of incomplete oxidation [3]. In our studies we investigated EOR in alkaline membrane electrode assemblies (MEA). Here, ethanol undergoes significantly more complete electro oxidation to CO₂ than in case of acidic MEA with same Pt anode [4].

References: [1] J. R. Varcoe, R. C. T. Slade, E. L. H. Yee, Chem. Comm. 2006, 1428. [2] C. Coutanceau, L. Demarconnay, C. Lamy, J. M. Leger, J. Power Sources 2006, 156, 14. [3] V. Rao, C. Cremers, U. Stimming et al., J. Electrochem. Soc. 2007, 154, B1138. [4] V. Rao, Hariyanto, C. Cremers, U. Stimming, Fuel Cells 2007, 7, 417.

Kohlenstoffaerogelelektroden für elektrochemische Doppelschichtkondensatoren auf Basis von Resorzin-Formaldehyd Sedimenten

— •Volker Lormann^{1,2}, Gudrun Reichnauer² und Vladimir Dyakonov^{1,2} — ¹Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Physikalisches Institut, Experimentelle Physik VI, D-97074 Würzburg — ²Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), D-97074 Würzburg

Synthetische poröse Kohlenstoffaerogele auf Basis von Resorzin (R) und Formaldehyd (F) bieten sich als Elektrodenmaterial für Superkondensatoren an. Monolithische Kohlenstoffaerogele haben eine große spezifische Oberfläche (400 bis 1000 m²/g) und einen niedrigen elektrischen Widerstand. Die mikroskopische Struktur dieser Materialien kann in weiten Bereichen über das R/Katalysator (RC) Verhältnis und die Konzentration von R und F in der Ausgangslösung (Massenverhältnis M) der organischen Vorstufen eingestellt werden. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurden durch Pyrolyse von RF-Sedimenten (d.h. kugelförmigen organischen Partikeln) gewonnene Kohlenstoffaerogelpulver zu Binderelektroden verarbeitet. Der Einfluss unterschiedlicher RC- und M-Verhältnisse auf die resultierenden mittleren Partikel- und Porengrößen sowie die spezifische BET-Oberfläche wurde mittels Gassorptionmessungen analysiert. Zyklische Voltammetrie und Impedanzspektroskopie wurde zur elektrochemischen Charakterisierung der Elektroden verwendet. Die Beziehung zwischen der mikroskopischen

Struktur der eingesetzten Kohlenstoffe und den elektrochemischen Eigenschaften der Binderelektroden wird diskutiert.

Energy from Biomass Production - Photosynthesis of Microalgae?

(Hauptvortrag)

—• Tilman Lamparter—Universität Karlsruhe, Botanisches Institut, Geb. 10.40, Kaiserstr. 2, D-76131 Karlsruhe

The composition of our atmosphere in the past, present and future is largely determined by photosynthetic activity. Other biological processes such as respiration consume oxygen and produce, like the use of the limited fossil fuel resources, CO₂ whose increasing atmospheric concentration is a major concern. There is thus a demand on the development of alternative energy sources that replace fossil fuel.

The use of crop plants for the production of biofuel is one step towards this direction. Since most often the same areas are used as for the production of food, the increased production of biofuel imposes secondary problems, however. In this context, the use of microalgae for biomass production has been proposed. Not only algae in the botanical sense (lower plants, photosynthetic eukaryotes) but also cyanobacteria, which belong to the prokaryotes, are used as "microalgae". The conversion of light energy into biomass can reach much higher efficiencies than in crop plants, in which a great portion of photosynthesis products is used to build up non-photosynthetic tissues such as roots or stems. Microalgae can grow in open ponds or bioreactors and can live on water of varying salinity. It has been proposed to grow microalgae in sea water on desert areas. Ongoing research projects aim at optimizing growth conditions in bioreactors, the recycling of CO₂ from flue gases (e.g. from coal-fired power plants), the production of hydrogen, ethanol or lipids, and the production of valuable other substances such as carotenoids.

Renaissance der Kerntechnik: Was machen unsere Nachbarn? (Hauptvortrag)

—•Joachim U. Knebel—Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Programm Nukleare Sicherheitsforschung, Hermann-von-Helmholtz Platz 1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen

'Generation IV' ist eine internationale Forschungsinitiative zur Entwicklung der künftigen, vierten Generation von Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung mit vier wesentlichen Zielen: Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie Proliferationsbarrieren und physikalischer Selbstschutz. Zur Reduzierung des hochradioaktiven Abfalls wird außerdem in internationaler Kooperation die Strategie von Partitioning und Transmutation untersucht. Ziel ist es dabei, die langlebigen radiotoxischen Bestandteile des radioaktiven Abfalls gezielt abzutrennen (Partitioning) und diese dann in speziellen Transmutationsanlagen, so genannte unterkritische Beschleuniger getriebene Systeme, in kurzlebige und/oder stabile Elemente umzuwandeln. Dieser Vortrag gibt einen Überblick über die Hintergründe, Ziele und Inhalte dieser internationalen Forschungsinitiativen sowie deren Auswirkungen auf die Endlagerung. Speziell wird auf die Chancen und Möglichkeiten für den Wirtschaftsstandort Deutschland eingegangen, die diese internationalen Initiativen bieten.

Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Hauptvortrag)

—•Volkmar Bräuer — Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken anfallenden hoch radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Einer günstigen geologischen Gesamtsituation mit einem geeigneten Wirts- und Barrieregestein kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Seit 1979 wird in diesem Zusammenhang der Salzstock Gorleben untersucht, allerdings wurden die Arbeiten auf Grund eines Moratoriums für einen Zeitraum von mindestens drei bis maximal zehn Jahren unterbrochen. Zur Vervollständigung des Kenntnisstandes über potenzielle Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz-, Kristallin- und Tongesteinsvorkommen veröffentlicht. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung auch international untersucht. Dies dient auch dazu, die nationalen Untersuchungsergebnisse abzusichern. Die internationalen Projekte bilden zudem eine hervorragende Basis für Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen, die zukünftig einen Schwerpunkt der deutschen Arbeiten bilden werden.

Flüssigmetalle in der Energietechnik

—•Robert Stieglitz — Institut für Kern- und Energietechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

Flüssige Metalle stellen ein wesentliches Element der technischen Entwicklung des Menschen dar. Durch den Zwang zu höherer Effizienz finden in der Technik zunehmend Flüssigmetallkühlverfahren Verwendung; sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften jedoch erheblich von anderen Kühlmedien. Neben ihrer guten thermischen Leitfähigkeit weisen sie zumeist eine kleine Viskosität auf und haben eine hohe Oberflächenspannung. Diese Eigenschaften erfordern spezielle Messverfahren und spezifische physikalische Modelle zur adäquaten numerischen Beschreibung dieser Strömungen. Anhand verschiedener energietechnischer Anwendungen arbeitet der Vortrag die Problemstellungen bei der Behandlung turbulenter Flüssigmetallströmungen heraus. Es werden mehrere Strömungsmessverfahren illustriert und kritisch diskutiert. Im Weiteren wird auf die Behandlung des turbulenten Wärmetransports eingegangen, da sie technisch von Bedeutung ist. Durch Vergleiche experimenteller und numerischer Ergebnisse werden die Defizite sowohl der Messaufbauten wie auch der verfügbaren Rechenmodelle aufgezeigt und diskutiert. Zuletzt werden Entwicklungstrends in der Experimentiertechnik wie auch der Modellierung beleuchtet.

Internationaler Entwicklungsstand bei der Probabilistischen Sicherheitsanalyse von Kernkraftwerken (Fachvortrag)

—•Leopold Weil und Heinz Peter Berg — Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 10 01 49, D-38201 Salzgitter

Die Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) hat sich weltweit innerhalb von etwa drei Jahrzehnten von einer Studiendisziplin zum unverzichtbaren Instrument der

Sicherheitsbeurteilung entwickelt. In der PSA werden Betriebserfahrung und Systemtechnik zur quantitativen Analyse zusammengeführt, die probabilistische Bewertung von Ereignisabläufen tritt an die Stelle von Postulaten und Ausschlüssen. Die PSA ergänzt die deterministische Analyse und hat sich auch als ein wichtiger "Treiber" von Sicherheitsverbesserungen erwiesen. Überwiegend wird international die PSA der Stufe 2 praktiziert, nationale Vorgehensweisen zur Integration der Erkenntnisse aus der PSA in die Sicherheitsbeurteilung sind eher uneinheitlich. Einige Länder betonen die strikt komplementäre Rolle der PSA, andere verfolgen eine risikoorientierte Vorgehensweise, wenige Länder haben übergreifende Risikokriterien formuliert. Durch internationale Standardsetzung und Meinungsbildung wird Alleingängen und Einzellösungen entgegengewirkt, der Datenbestand wurde erweitert und in der Qualität verbessert. Die Methoden der PSA haben somit unbestreitbar einen gewissen Reifegrad erreicht. Dennoch müssen die Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Methoden und des Datenbestandes fortgesetzt werden. Auch dabei spielt die internationale Zusammenarbeit eine wichtige Rolle.

Offshore Windenergie in Deutschland: Chancen und Herausforderungen (Hauptvortrag)

—•A. P. Schaffarczyk — Fachhochschule Kiel - University of Applied Sciences, Grenzstr. 3, D-24149 Kiel

Nach den Plänen der Bundesregierung nimmt die Nutzung der Windenergie zur Elektrizitätserzeugung eine wichtige Stellung ein. Installationen von bis zu 28 GW Nennleistung sind seit 2006 als Ziel formuliert. Wir gehen in unserem Vortrag zunächst auf die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen - auch im internationalen Vergleich - ein. Danach möchten wir vor allem die Bedeutung der angewandten Physik bei der Weiterentwicklung dieses Zweiges der regenerativen Energieumwandlung herausstellen: Nichtlineare Modellierung von Wasserwellen zur Beschreibung der mechanischen Lasten auf die Struktur, sowie die besonderen Eigenschaften des turbulenten Windfeldes, um nur einige zu nennen. Wir fassen einige Ergebnisse der Messplattformen FINO 1 bis 3 zusammen und berichten über den Fortschritt bei der Errichtung des ersten Deutschen Offshore Windpark alpha ventus.

Windenergie und Physik: Von Turbulenz über Windparks zu komplexen Netzwerken (Fachvortrag)

—•Martin Greiner — Siemens AG, Corporate Technology and Research, Information & Communications, D-81730 München

Die Turbulenz, die nun einmal eine ausgeprägte inhärente Eigenschaft von Wind ist, erzeugt Ermüdungslasten für die Windturbinen. Daher ist es wichtig, diese möglichst realistisch beschreiben zu können. Es wird gezeigt, wie die von den Ingenieuren stochastisch simulierten turbulenten Windfelder mit den aus der Physik bekannten multifraktalen Prozessen entscheidend verbessert werden können. Im zweiten Themenblock geht es um die Optimierung von Windparks und wie aus egoistischen Windturbinen kooperative werden. Auch Turbulenz spielt hier wieder eine Rolle und stellt die zukünftige Regelung von Windparks vor große Herausforderungen. Im letzten Teil des Vortrages wird vorgestellt, wie ein zukünftiges Europäisches Stromtransportnetz aussehen kann, das nur mit Erneuerbarer Energieerzeugung versorgt wird.

Energieeffiziente Gebäudehüllen: Neue Materialien und Komponenten (Fachvortrag)

—•Ulrich Heinemann, Helmut Weinläder und Hans-Peter Ebert — ZAE Bayern, Am Hubland, D-97074 Würzburg

Energieeffizienzmaßnahmen speziell in Wohngebäuden setzen vor allem und zu allererst an einer Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle an. Neben dem verstärkten Einsatz konventioneller Dämmmaterialien können neue Materialien und Komponenten weitergehende Lösungen bieten, die insbesondere unter dem Gesichtspunkt des hierfür benötigten Raums effizienter sind, aber auch neue technische und gestalterische Möglichkeiten eröffnen. Der durch einen Temperaturgradienten hervorgerufene Wärmetransport setzt sich prinzipiell zusammen aus dem Wärmetransport durch Konvektion, Wärmeleitung und Infrarotstrahlungstransport. Konvektion, ein sehr effektiver Wärmetransportmechanismus, wird auch von konventionellen Dämmmaterialien bereits hervorragend unterdrückt. Bei der Wärmeleitung sind zu unterscheiden die Beiträge über ein wie auch immer geartetes Festkörpergerippe und die Beiträge durch das Gas. Da ruhende Luft im Vergleich zu Festkörpern eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist, sind Dämmstoffe im Allgemeinen hochporös. Der Gesamtwärmetransport wird jedoch wesentlich bestimmt und dominiert von der Wärmeleitung dieses ruhenden Gases. Verbesserungen der Dämmeigenschaften setzen insbesondere an einer Verringerung der Gaswärmeleitfähigkeit an. Verbesserungs- und Optimierungsansätze werden anhand neuer Systeme erläutert: Nanostrukturierte Dämmmaterialien (Faktor 2), Vakuumisulationspaneele (VIP) (Faktor 5 bis 10), Vakuumisolierverglas (VIG) (Faktor 2), Transparente Wärmedämmung (TWD) (zur Gewinnung solarer Wärme oder blendfreiem Lichts) und quasi als "technische Krönung" die Schaltbare Wärmedämmung (SWD).

Kryokondensation eines Gases innerhalb eines Dämmstoffes

—•Jan Hoffmann, Matthias Geisler, Stephan Vidi und Hans- Peter Ebert — ZAE Bayern e.V., am Hubland, D- 97074 Würzburg

In der Vergangenheit haben sich Fasern und Pulver als Wärmedämmstoffe im Bereich der Tieftemperaturanwendungen bewährt. Aktuell wird in einem Forschungsprojekt eine speziell gedämmte Rohrleitung zum simultanen Transport von tiefkalten Flüssigkeiten (z.B. LH₂), Elektrizität und Informationen entwickelt. Ein niedriger Gasdruck innerhalb der Dämmung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Gesamtwärmeleitfähigkeit des Materials. Dies kann durch technisches Evakuieren oder durch die Kondensation eines Gases innerhalb der Dämmung erreicht werden. Es wird angenommen, dass der Wärmetransport durch Strahlung für beide Fälle identisch ist. Im Fall der Kondensation wird erwartet, dass sich die Festkörperwärmeleitung erhöht. Der Grund hierfür ist der thermische Kurzschluss der Punktkontakte des verwendeten Dämmstoffes durch die Ablagerung des kondensierten Gases an der Oberfläche und an den interpartikulären Kontaktstellen des Materials. Erste Messungen mit einer modifizierten Zweiplattenapparatur (guarded hot plate) im Temperaturbereich von 100K bis 300K bestätigten diesen Effekt. Untersucht wurde die Kondensation einer definierten Menge CO₂ innerhalb einer Pulverschüttung aus sphärischen Glaskugeln. Der Vergleich mit einem Modell zur Beschreibung des Wärmetransports in Kugelschüttungen zeigt, dass sich das kondensierende Gas wahrscheinlich gleichmäßig homogen auf der Oberfläche der Glaskugeln ablagert.

Neue Entwicklungen in der organischen Photovoltaik (Hauptvortrag)

—•Christoph J. Brabec — Konarka Technologies Inc., Konarka Germany GmbH, Landgrabenstrasse 94, D-90443 Nürnberg, Germany

Lösungsprozessierte, organische "bulk heterojunction" Solarzellen haben in den letzten Jahren großen technischen Fortschritt gemacht und sind auf gutem Wege sich als eine der zukünftigen Solartechnologien zu etablieren. Dieser Vortrag fasst die wesentlichen Entwicklungen der letzten Jahre zusammen und gibt einen Überblick über den Status der Technologie als auch eine Vorausschau auf die zukünftigen relevanten Materialien und Technologien. Mit einer zertifizierten Effizienz von 6% sind die organischen Solarzellen natürlich noch weit hinter den inorganischen Technologien. Jedoch gibt es bereits eine klare technische Roadmap wie sich die Effizienz innerhalb der nächsten Jahre auf über 10% bringen lässt. Neue Materialklassen spielen dabei genauso eine große Rolle wie Tandemtechnologien oder verbesserte Lichteinkopplung. Ein Ausblick auf die Lebensdauer, Produktionstechnologien und die Kosten der organischen Solarzellen unterstützt die Erwartung, dass gedruckte Solarzellen das größte Kostenpotential unter den gegenwärtigen Solartechnologien haben.

Perspektiven für Solarthermische Kraftwerke im Sonnengürtel - Beitrag der deutsche Industrie und Forschung (Hauptvortrag)

—•Bernhard Hoffschmidt — Solar-Institut Jülich (SIJ) FH Aachen, Aachen University of Applied Sciences, Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich

Solarthermische Kraftwerke haben das Potenzial, einen signifikanten Beitrag zur zukünftigen CO₂ freien Stromversorgung der Welt leisten zu können. Bei solarthermischen Kraftwerken wird die direkte Sonnenstrahlung genutzt, weshalb ihre Anwendung im Wesentlichen auf den Sonnengürtel der Erde begrenzt ist. In der Diskussion ist deshalb eine Übertragung der Elektrizität mittels Hochspannungs- Gleichstromübertragung in nördliche Regionen. Durch die Kombination mit großen thermischen Speichern bzw. durch eine Hybridisierung mit biogenen und fossilen Brennstoffen können die Kraftwerke zur Netzhaltung oder als Backup für fluktuierende andere regenerative Systeme (PV, Wind) eingesetzt werden. Der Markt für diese Technologie wächst im Sonnengürtel der Erde zurzeit stark. Die deutsche Industrie ist an verschiedenen Demonstrations- und Pilotprojekten beteiligt. Im Verbund mit der Industrie arbeitet die deutsche Forschung an der Effizienzsteigerung durch die Erhöhung der Prozesstemperaturen und an einer Kostenreduktion der bestehenden Systeme durch eine Anpassung der Kraftwerkskomponenten an die hoch dynamischen solaren Randbedingungen.

Mini-Spiegel-Array für solarthermische Kraftwerke

—•Markus Sauerborn¹, Bernhard Hoffschmidt¹, Joachim Götsche¹, Stefan Schmitz¹, Christian Rebholz², Frank Ansorge² und David Iffland² — ¹Solar-Institut Jülich, FH Aachen, Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich — ²Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Argelsrieder Feld 6, D-82234 Oberpfaffenhofen-Weßling

Solarthermische Kraftwerke sind die kostengünstigste Variante, um aus Sonnenlicht großtechnisch Strom zu gewinnen. Bei Solarturmkraftwerken ergeben sich die Stromgestehungskosten im Wesentlichen aus den Investitionskosten. Bis zu 50% der Gesamtkosten entfallen auf das Heliostatenfeld. Die aktuellen Ansätze der großflächigen Heliostate sind vom Materialaufwand nicht wesentlich reduzierbar, da die Stabilisierung gegenüber den auftretenden Windlasten die Materialmenge quasi vorgibt. Diese Technik bietet nur geringes Potenzial für weitere, rigorose Kostensenkungen. Das hier vorgestellte kleine Heliostatsystem MIKROHELIX (ca. 2x1m) hat viele, kleine, parallel montierte Spiegel (je 10x10cm). Dieses Mini-Spiegel-Array ist in einer flachen Box mit transparenter Abdeckung eingekapselt. Das System bietet einen viel versprechenden Ansatz, der durch die flache Auslegung die Windlast und damit den erhöhten Materialaufwand geschickt umgeht. In einem vom BMU geförderten Projekt wurde ein erster MIKROHELIX konstruiert und zu Testzwecken realisiert. Eine Simulation zum Wirkungsgrad wurde erstellt und eine ökologische Bilanz ist vor der Fertigstellung. Der entwickelte Demonstrator wird zurzeit am Sonnensimulator des SIJ auf die technischen und optischen Eigenschaften untersucht. Die bisherige Bilanz des Projektes zeigt interessante Resultate.

Future Energy Research in the EU under EIT Conditions - Pilot Projects

—•Franziska Pühringer-Oppermann, Petra Bele, Rainer Bussar, and Ulrich Stimming — TUM, Dept. of Physics, E19, James-Franck Str. 1, D-85748 Garching

The European Institute of Innovation and Technology (EIT) has been established in April 2008. It is an independent organisation with the administrative head in Budapest, a governing board, an executive committee and a chairman. The EIT budget until 2012 is 308 MEUR. EIT will operate through the formation of Knowledge and Innovation Communities (KICs). The first three KICs are foreseen in the areas sustainable energy, ICT and climate mitigation. The European Commission has sponsored four pilot projects (conducted 2008-2009) to help develop a suitable governance structure for cooperations on European scale such as the future KICs. They are Bridge, ComplexEIT, SUCCESS and Gast, dealing with different topics like nanomedicine (Bridge), integration of hardware and software (ComplexEIT), sustainable energy (SUCCESS) and green and safe road transportation (Gast). The strategic objective of these pilot projects is to design, implement and test new models of cooperation in the knowledge triangle. We are involved in SUCCESS and after benchmarking of 66 collaborations in the field sustainable energy, the state of the art of selected representative topics was assessed and shortcomings in governance evaluated by SWOT analysis. In parallel further existing collaborations were used to extract and establish a management structure for such collaborations on the European scale.

Methanhydrate: Erdgasgewinnung und CO₂-Speicherung (Hauptvortrag)

—•Klaus Wallmann—Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFMGEOMAR, Gebäude Ostufer, Wischhofstr. 1-3, D-24148 Kiel

Große Mengen an Gashydraten wurden weltweit in Sedimenten nachgewiesen, die an den Kontinenträndern in Wassertiefen von ca. 400 m bis 4000 m abgelagert werden. Die Menge an Erdgas, die in diesen Hydraten gebunden ist, übertrifft die Erdgasreserven in konventionellen Lagerstätten um ein Vielfaches. Neue experimentelle Studien zeigen, dass die Methanhydrate spontan mit flüssigem CO₂ reagieren. Dabei wird Erdgas (Methan) freigesetzt und das CO₂ als eisartiges und stabiles Hydrat fixiert. Es ist also prinzipiell möglich, CO₂ aus Kraftwerken sicher als Hydrat im Meeresboden zu speichern und dabei gleichzeitig große Mengen an Erdgas zu gewinnen. Seit Sommer 2008 arbeiten insgesamt 30 Partnerinstitutionen aus Industrie und Wissenschaft in dem nationalen Verbundprojekt SUGAR (Submarine Gas Hydrate Reservoirs) daran, diese Technik im Labor und am Computer weiterzuentwickeln und in einer zweiten Projektphase im Feld zu testen.

Die geologische CO₂-Speicherung in Deutschland. Möglichkeiten und Herausforderungen angesichts konkurrierender Nutzungsansprüche (Fachvortrag)

—•Johannes Peter Gerling — Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Die Abtrennung von CO₂ aus Verbrennungsgasen großer Industrieanlagen und eine nachfolgende geologische CO₂-Speicherung ist eine der Handlungsoptionen um einen Einklang zwischen weiter wachsendem Energieverbrauch und Klimaschutz herzustellen. In Deutschland kommen für eine CO₂-Speicherung nur Erdgasfelder (ca. 2,75 Gt) und tiefe Sole-führende Gesteinsschichten (20±8 Gt) in Betracht. Regionalgeologisch findet man das überwiegende Potenzial im Norddeutschen Becken. Auf Basis des enormen Datenfundus aus der Kohlenwasserstoff- Exploration erstellen die staatlichen geologischen Dienste zurzeit für ganz Deutschland ein einheitliches Speicherinformationssystem. Dieses wird die Speichermöglichkeiten im Untergrund konkretisieren und eine Planungsgrundlage beim Abwägen konkurrierender Nutzungsansprüche bilden.

Effiziente und umweltfreundliche Nutzung von Kohlenstoff zur Elektrizitätserzeugung (vorgetragen von U. Stimming)

S. Nürnberger¹, R. Bußar^{1,2}, B. Franke¹ und U. Stimming^{1,2}

¹ ZAE Bayern, Abteilung 1: Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien, Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching

² Technische Universität München, Physik Department E19, Grenzflächen und Energieumwandlung, James-Franck-Straße 1, 85748 Garching

1. Einleitung

Eine wichtige Voraussetzung einer stabilen Ökonomie ist die langfristig gesicherte Bereitstellung elektrischer Energie. Die Bedeutung der elektrischen Energie als Nutzenergie wird zukünftig weltweit weiter steigen, wobei bis 2030 in etwa eine Verdopplung zu erwarten ist. Mittelfristig (~20-30 Jahre) zeichnet sich bisher kein technologischer Ansatz ab, der fossile Energieträger in der Stromerzeugung vollständig ersetzen könnte. Die Schonung der limitierten fossilen Energieträger und die Reduzierung der damit verbundenen Kohlenstoffdioxidemissionen (CO₂ pro Kilowattstunde) muss ein entscheidendes Ziel der Energietechnik sein. Hieraus ergibt sich ein klarer Auftrag zur Ressourcenschonung der nicht regenerativen Energieträger, etwa durch Vermeidung mehrstufiger Umwandlung fossiler Primärenergieträger in unterschiedliche Sekundärenergieträger. Brennstoffzellen haben das Potential einer hocheffizienten Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie. Brennstoffzellen basieren jedoch bisher nur auf Sekundärenergieträgern wie Wasserstoff oder Methanol. Innovativ erscheinen deshalb insbesondere Brennstoffzellen die eine direkte Verstromung eines Primärenergieträgers ermöglichen. Eine solche Direktverstromung von Kohlenstoff, gewonnen etwa aus Kohle oder Biomasse, in geeigneten Brennstoffzellen könnte einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und mittelfristiger Energiesicherheit liefern.

2. Beitrag einer direkten Elektrifizierung von Kohlenstoff in Brennstoffzellen

Unsere derzeitige energiepolitische Situation ist gekennzeichnet durch ein zweifaches Problem: (i) Nur begrenzt verfügbare fossile Energieträger (siehe Tabelle 1) mit gleichzeitig noch hohem Anteil derselben am jährlichen Primärenergieeinsatz. (ii) Notwendigkeit die CO₂-Emissionen deutlich zu begrenzen.

Eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Energieumwandlung ist auch mit kohlenstoffhaltigen Energieträgern möglich, wenn geeignete Energieträger in Brennstoffzellen mit hoher Effizienz in elektrische Energie umgewandelt werden. Brennstoffzellen erreichen potentiell hohe Wirkungsgrade, die u.a. durch Betriebstemperatur T und das Verhältnis der Verbrennungsenthalpie dH und -entropie dS des

Brennstoffes bestimmt werden. Die Reaktionsentropie und –enthalpie sind abhängig von der chemischen Identität des Brennstoffs und bestimmen den thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} der Brennstoffzelle. Letzterer ist stark temperaturabhängig für alle Reaktionen mit großer Reaktionsentropie dS , aufgrund der Temperaturabhängigkeit der freien Reaktionsenthalpie ($dG = dH - TdS$) bedingt durch den Beitrag der Reaktionsentropie dS .

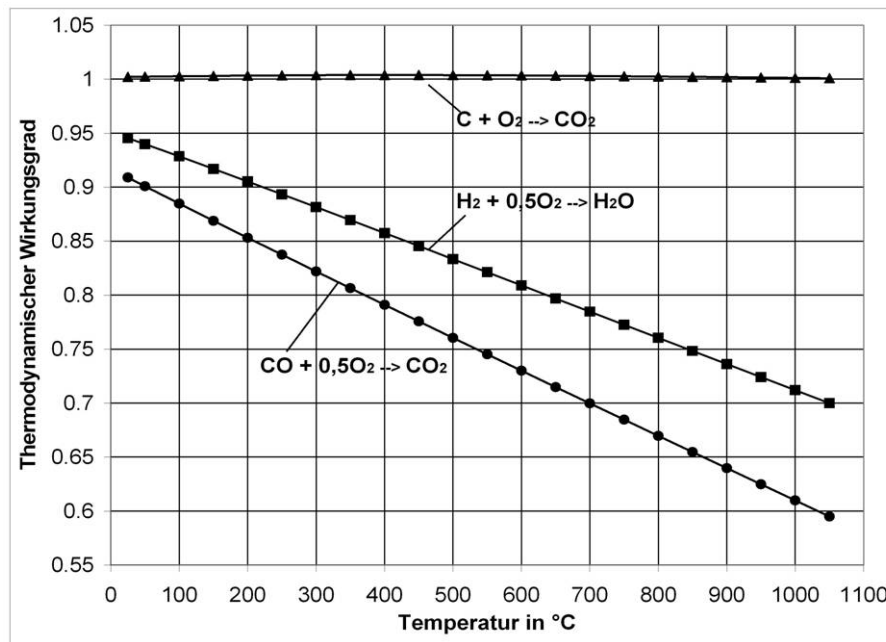


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des thermodynamischen Wirkungsgrades η_{th} verschiedener Brennstoffe (Kohlenstoff, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid)

Hohe thermodynamische Wirkungsgrade η_{th} führen zu potentiell hohen Gesamtwirkungsgraden η_{ges} , wenn u.a. die Kinetik der elektrochemischen Oxidation keine zu hohen Überspannungen an der Anode für hinreichende Leistungsdichten erfordert und so der Spannungswirkungsgrad η_v möglichst hoch ist. Insbesondere die elektrokatalytische Verbrennung von Kohlenstoff (Kurve mit Dreiecken in Abb. 1) in einer Direktkohlenstoff-Brennstoffzelle (engl. Direct Carbon Fuel Cell, DCFC) weist bei höheren Temperaturen hohe thermodynamische Wirkungsgrade η_{th} auf ($\eta_{th} \sim 1,0$, nahezu unabhängig von T , da die Standardreaktionsentropie $\Delta_R S^\circ = +2,9 \text{ J}/(\text{Kmol})$ sehr gering ist) und ist somit ein attraktiver Umwandlungsprozess. Ein Vorteil von Kohle ist, dass sie ohne vorgeschaltete Synthese als Primärenergieträger zur Verfügung steht und damit energieaufwendige Umwandlungsprozesse nicht erforderlich sind. Eine Aufreinigung der Kohle erscheint aber erforderlich, da u.a. Silikate, Alkalien und andere elektrochemisch inerte Beimengungen zu Problemen bei der Umsetzung führen. Die zu erwartenden Vorteile einer Verstromung von Kohlenstoff in einer DCFC sind:

- Hoher thermodynamischer Wirkungsgrad ($\sim 100\%$), der in der Praxis zu deutlich besseren Wirkungsgraden (80% demonstriert in Ref.^[1]) als bei Wärmekraftprozessen und anderen Brennstoffzellenkonzepten führen kann. Potentiell könnte bei der Elektrizitätserzeugung basierend auf Kohlenstoff die CO_2 -Erzeugung pro kWh auf die Hälfte im Vergleich zu Wärmekraft-Prozessen reduziert werden.

- Eine Direktverstromung von Kohlenstoff in einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle erfordert keine neuartige Brennstoffzellentechnologie, sondern kann in existierenden modifizierten Brennstoffzellensystemen erfolgen.
- Die hohe weltweite Verfügbarkeit an Kohle erlaubt eine längerfristige Nutzung dieses Primärenergieträgers.
- CO₂ wird in reiner Form erhalten und kann einfacher als bei Verbrennungskraftwerken mit noch erheblichen N₂-Anteilen im Abgas (ohne Oxyfuel-Prozess) direkt eingelagert werden.
- Biomasse kann nach Pyrolyse bzw. hydrothermalen Karbonisierung genutzt werden, wodurch sogar eine negative CO₂-Bilanz möglich ist; CO₂ wird aus der Atmosphäre entfernt, sofern das entstandene CO₂ anschließend sequestriert wird.

Energieträger	Reserven /EJ = 10 ¹⁸ J	Ressourcen /EJ	Gesamt /EJ
Erdöl	6.755	3.430	10.185
Erdgas	5.676	6.555	12.231
Kohle	20.408	114.757	135.165
Uran	799 ^a	2.180 ^b ; (3.091) ^c	2.979

Tabelle 1: Verfügbarkeit der wichtigsten Energieträger (Stand Dez. 2005). Quelle: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Rohstoffen (Kurzstudie), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005; (1 t Uran entspricht 410 bis 674 TJ, Tabellenwerte wurde aus dem unteren Wert berechnet) (a) RAR (hinreichend gesicherte Vorräte) gewinnbar bis 40 \$/kg U; (b) Summe aus RAR gewinnbar bis 130 \$/kg U und EAR (estimated additional resources); (c) Spekulative Ressourcen

Wichtig für die Beurteilung einer neuen Technologie ist neben den Rohstoffpreisen der verwendeten Energieträger auch deren nachhaltige Verfügbarkeit. Eine heute zu entwickelnde Technologie muss auf hinreichende Reserven und Ressourcen zurückgreifen können, um umsetzbar und längerfristig wirtschaftlich attraktiv zu sein. In Tabelle 1 findet sich eine Gegenüberstellung der wichtigsten Energieträger. Bei der zum Vergleich aufgeführten Gesamtverfügbarkeit von Uran wurden nur die hinreichend gesicherten und vermuteten Vorräte berücksichtigt. Die Gesamtverfügbarkeit, die Summe aus Reserven und Ressourcen von Kohle ist im Vergleich zu anderen fossilen Energieträgern, wie etwa Erdöl und Erdgas, deutlich größer. Insbesondere stehen in Europa deutlich größere Kohle- als Erdöl- oder Erdgasreserven zur Verfügung.

3. Bisher realisierte Konzepte von Kohlenstoff-Brennstoffzellen

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über bereits realisierte Konzepte und einige wichtige Ansätze zur Verstromung von Kohlenstoff gegeben. Die verschiedenen Ansätze lassen sich anhand der Art der verwendeten Elektrolyte unterscheiden: (i) geschmolzene Hydroxide mit Betriebstemperaturen von 400-700 °C, (ii) geschmolzene Karbonate (700-800 °C) und (iii) oxidkeramische Elektrolyte (800-1000 °C).

Die bisher am weitesten entwickelte Hochtemperaturbrennstoffzelle die Kohlenstoff als Brennstoff verwendet basiert auf Schmelzkarbonaten. Von John F. Cooper (Lawrence Livermore National Laboratory) wurde der Ansatz einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle bisher mit unterschiedlichen kohlenstoffreichen Brennstoffen erfolgreich getestet.^[3] Es wurden Leistungsdichten von bis zu 125 mW/cm² bei 0,8 V Zellspannung und 800 °C erreicht. Ein Betrieb über 30 h mit etwa 27 mW/cm² bei 1 V Zellspannung (800 °C) konnte demonstriert werden. Dieses Konzept scheint vorteilhaft für eine Systemgestaltung, da der Brennstoff von oben periodisch zugeführt wird und noch einer evtl. nötigen Konditionierung unterworfen werden kann. Zudem kann die an der Anode evtl. gebildete Schlacke aus Beimengungen des Brennstoffs separiert werden. U.a. Korrosions- und Materialprobleme sind jedoch noch zu überwinden, weshalb eine weitere systematische Erforschung notwendig erscheint.^[2-4]

Von Zecevic et al. bei Scientific Application and Research Associates (SARA) wurde ein DCFC-Konzept basierend auf einer Hydroxidschmelze entwickelt.^[5, 6] Es wurden kurzfristige Leistungsdichten (wenige Sekunden) von bis zu 140 mW/cm² erreicht und Leistungsdichten von etwa 40 mW/cm² und einer Zellspannung von 0,3 V bei $T = 630$ °C über längere Zeiten (540 h) gehalten.

Von der Clean Coal Energy (CCE) ist ein Konzept beschrieben, bei dem Kohlestaub in einem CO₂-Trägerstrom in einer oxidkeramischen Brennstoffzelle der Anode zugeführt wird.^[2] Dieser Ansatz kombiniert eine SOFC mit der ‚fluidized-bed‘-Technik welche von der Stanford University entwickelt wurde. In einer kürzlich erschienenen Arbeit berichten R. E. Mitchell et al. und T. M. Gür et al. (Direct Carbon Technologies, DCT) über eine Verstromung von Kohlenstoff in einer derartig modifizierten SOFC.^[7, 8] Bei 900 °C liegt das Boudouard-Gleichgewicht zwischen Kohlenstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid nahezu vollständig auf der Seite des Kohlenstoffmonoxids. Letzteres ist der eigentliche an der Anode umgesetzte Brennstoff und es wurden bisher maximale Leistungsdichten von etwa 140 mW/cm² bei 0,5 V Zellspannung detektiert.^[8] Des Weiteren existieren bereits realisierte Kombinationen zwischen Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen und oxidkeramischen Brennstoffzellen, berichtet z.B. von Balachov (SRI International)^[1] mit Leistungsdichten von 10-100 mW/cm² (bei 0,7 V und 700-950 °C) und von John Irvine und Mitarbeitern.^[9-11] Von Irvine et al. sind für die ‚Hybrid direct carbon fuel cell‘ (HDCFC) Leistungsdichten von etwa 10 mW/cm² (bei 0,5 V und 700 °C) berichtet.

4. Entwicklung einer SOFC-basierten Direktkohlenstoff-Brennstoffzelle

Zu den wichtigsten Herausforderungen bei der Verwendung einer oxidkeramischen Brennstoffzelle als Konzept zählt ein möglichst inniger Kontakt zwischen dem festen Brennstoff und der Anodenschicht, um technisch relevante Leistungsdichten erreichen zu können. Es sei kurz darauf hingewiesen, dass auch bei einem Kontakt zwischen zwei festen Phasen, dem Brennstoff und der Anodenoberfläche, eine zu typischen gasförmigen Brennstoffen vergleichbare Kontaktfläche bzw. Umsatzrate möglich sein sollte. Die Teilchendichte des Kohlenstoffs ist um etwa vier Größenordnungen höher als für gasförmigen Wasserstoff bei $p = 1$ atm. Hierdurch wird die für gasförmige Brennstoffe

typischerweise große, da poröse Anodenoberfläche von bis zu drei Größenordnungen über der geometrischen Oberfläche der Anodenschicht vollständig kompensiert. Weiterhin ist der Haftkoeffizient für Wasserstoff auf Nickel in typischen Nickelanoden bei höheren Temperaturen und typischen Drücken einer SOFC sicher kleiner eins. Wichtig ist in diesem Zusammenhang eine auf den verwendeten festen Brennstoff angepasste Anodenoberfläche.

Eine weitere Herausforderung für die DCFC ergibt sich aus dem Boudouard-Gleichgewicht zwischen CO_2 und Kohlenstoff, welches bei höheren Betriebstemperaturen zur störenden Bildung von Kohlenstoffmonoxid (CO) führt. Gemäß Abb.1 führt die Vergasung von Kohlenstoff zu Kohlenstoffmonoxid zu einer deutlichen Absenkung des thermodynamischen Wirkungsgrades der Brennstoffzelle. Eine Senkung der Betriebstemperatur auf ca. $500\text{ }^\circ\text{C}$, etwa durch optimierte oxidkeramische Elektrolyte sollte zu einem geringeren Anteil von CO führen. Bei $500\text{ }^\circ\text{C}$ und 1 bar beträgt der Partialdruck von CO weniger als 10%, wohingegen bei $800\text{ }^\circ\text{C}$ und 1 bar etwa 90% CO im Gleichgewicht vorliegen.

5. Experimentelles

Am ZAE finden z.Z. Untersuchungen zum Funktionsprinzip einer Direktkohlenstoff-Brennstoffzelle auf der Basis einer modifizierten oxidkeramischen Brennstoffzelle statt. Der SOFC-Teststand ist mit Sensoren und Komponenten ausgestattet um relevante Parameter wie Temperatur, Druck, Volumenströme und Gaszusammensetzung des Anodenauslasses zu ermitteln. Die Gaszusammensetzung wird mit einem Gaschromatograph MicroGC M200 der Firma Agilent Technologies ermittelt. Als Potentiostat wird ein Autolab PGSTAT 302 N mit FRM 2 Impedanzmodul für Impedanzspektroskopie sowie für potentiostatische und galvanostatische Messungen verwendet. Die elektronische Last ist vom Typ NTL 1500M-30, (FuG Elektronik GmbH) und dient zur Aufzeichnung von Strom-Spannungs-Kennlinien (*U-I*-Kennlinien) mit automatisierter Datenerfassung.

Der Aufbau der oxidkeramischen Zelle zur Umsetzung von Kohlenstoff als Brennstoff ist in Abbildung 2a schematisch dargestellt. Das Zellgehäuse besteht im Wesentlichen aus zwei konzentrisch übereinander angeordneten Aluminiumoxidrohren. In der Anodenkammer führen dünne Spülstäbe sehr nahe an die Zelle, über welche Stickstoff als Inertgas in den Anodenraum geleitet werden kann, um Sauerstoff und Produktgase herauszuspülen. Zur elektrischen Kontaktierung sind auf Anode und Kathode Stromabnehmernetze angebracht (siehe Abbildung 2a, links).

Mit einem Röhrenofen (Nabatherm) wird das ganze System auf die gewünschte Betriebstemperatur ($800\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C}$) gebracht.

Bei der Verwendung von Kohlenstoff als Brennstoff wurde dieser in Form von porösen Presslingen (3 cm Durchmesser mit etwa 1 cm Höhe) zwischen Anodenschicht und Ni-Netz in das System eingebracht (siehe Abbildung 2b). Der elektrisch leitende Kohlenstoff dient dabei als Stromabnehmer und Brennstoff. Die elektronische Leitfähigkeit ist bei dieser Art der Kontaktierung bedeutend. Graphit erreicht eine Leitfähigkeit von etwa $1,25 \times 10^5\text{ S/m}$. Als hochreine Modelbrennstoffe wurden in dieser Arbeit Vulcan XC72 GP3868 von CABOT als amorphes Material und kristallines ECOPHIT GFG 50M Pulver von SGL Carbon verwendet.

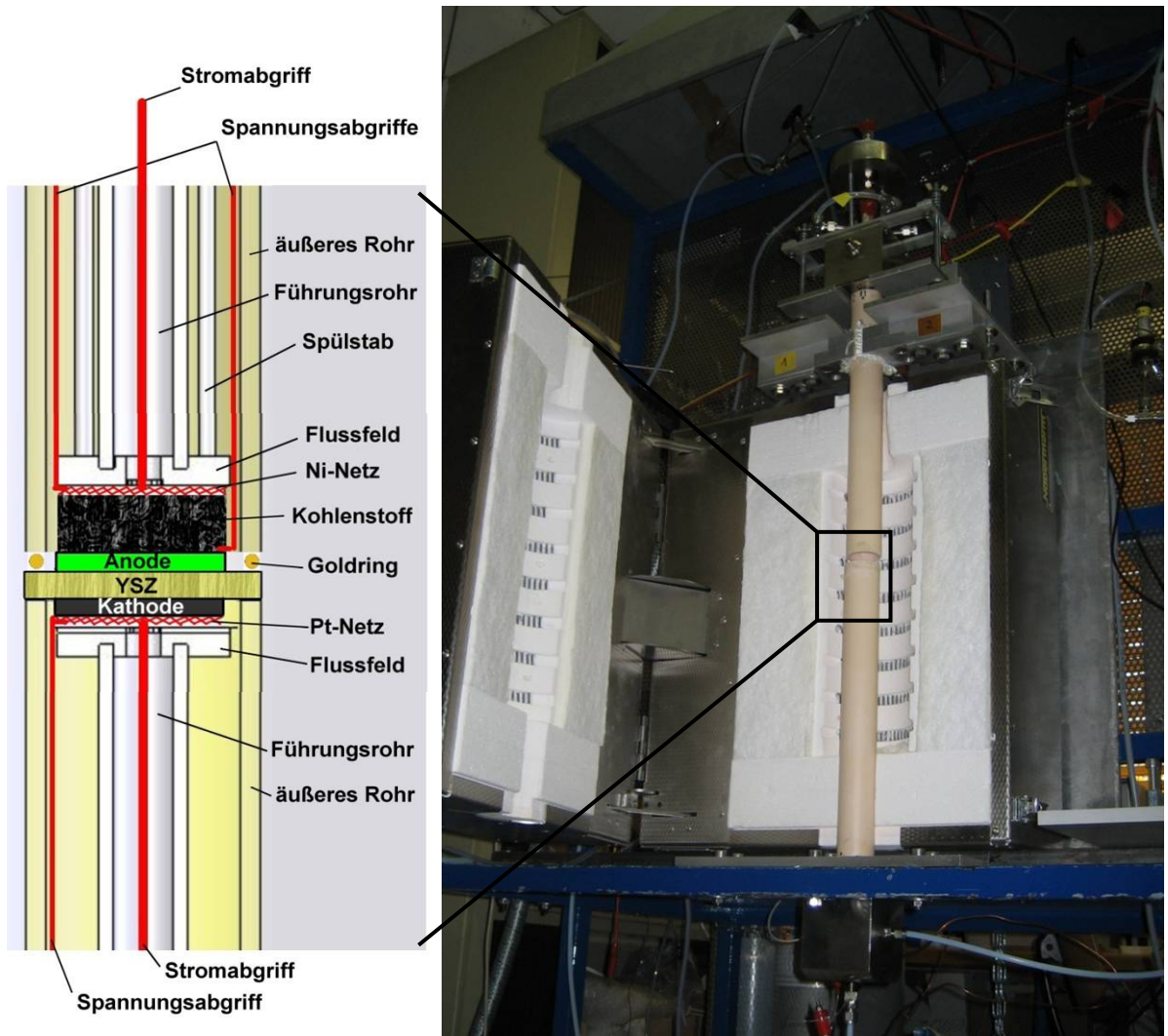


Abb. 2a: Bild des SOFC-Teststandes und schematische Darstellung der Kontaktierung der DCFC im Querschnitt



Abb. 2b: Detail der Anode der DCFC mit Kohlenstoffpressling auf einer Standardanode aus NiO/CGO und Detail der Kontaktierung mittels eines Nickelnetzes (rechts)

6. Experimentelle Ergebnisse zur Kohlenstoff-Elektrooxidation

Zunächst wurde der Aufbau mit Wasserstoff unter Standardbedingungen an einer kommerziellen SOFC getestet. Bei der SOFC handelt es sich um eine elektrolyt-geträgerte Vollzelle aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid (YSZ) mit einer NiO/CGO-Anode und LSM-Kathode ((La_{1-x} Sr_x)MnO_{3+δ}). Hierbei wurde die Funktionalität des neuen Aufbaus geprüft und Referenzwerte eines Standardbrennstoffes gewonnen.

Um die wichtigsten Parameter, die eine effektive Umsetzung von Kohlenstoff beeinflussen, besser zu verstehen, wurden folgende systematische Variationen durchgeführt: (i) Es wurden zwei verschiedene hochreine Kohlenstoffmaterialien untersucht: Als Material wurden GFG50 als ein kristallines Material mit einer BET-Oberfläche von ~20 m²/g (Korngröße 40-60 μm) und Vulcan XC 72 als amorphes Material mit einer BET-Oberfläche von etwa 250 m²/g (Korngröße 5-20 μm) ausgewählt. Ziel dieser Variation des Brennstoffs ist es den Einfluss der Kristallinität des Kohlenstoffs auf die Reaktivität bezüglich der anodischen Oxidation zu verstehen. (ii) Variation der Struktur und chemischen Zusammensetzung der Anodenschicht, um den Einfluss der Anodenzusammensetzung auf die Kinetik der Kohlenstoffoxidation besser zu verstehen.

Wie in Punkt 4 beschrieben, ist für den Kontakt von Kohlenstoffdioxid mit Kohlenstoff bei hohen Temperaturen die Bildung von signifikanten Anteilen von CO aus der Boudouard-Reaktion zu erwarten. Um den Einfluss des Kohlenstoffmonoxids auf die Leistungsdichten für die Modelbrennstoffe besser einschätzen zu können, wurde zunächst die Umsetzung von CO an einer kommerziellen SOFC und im Vergleich hierzu an einer anodenseitig unbeschichteten SOFC untersucht. Im letzteren Fall sollte keine Adsorption von CO auf dem reinen YSZ-Elektrolyten möglich sein. In Abbildung 3 sind im linken Graphen die an einer Standardanode mit einem Gasmisch bestehend aus 68% CO und 32% CO₂ erreichten Stromdichten für unterschiedliche Temperaturen dargestellt. Die beobachteten Stromdichten erreichen Werte von bis zu 250 mA/cm² bei einer Zellspannung von 0,8 V. In Experimenten ohne Anodenschicht, dargestellt in Abbildung 3 rechts, konnten nur deutlich geringere Stromdichten von etwa 1-2 mA/cm² bei identischen Bedingungen (0,8 V, T = 1000°C) erreicht werden. Folglich sind insbesondere unbeschichtete Zellen interessant, um die direkte Verstromung von Kohlenstoff ohne Störung durch CO aus der Boudouard-Reaktion untersuchen zu können.

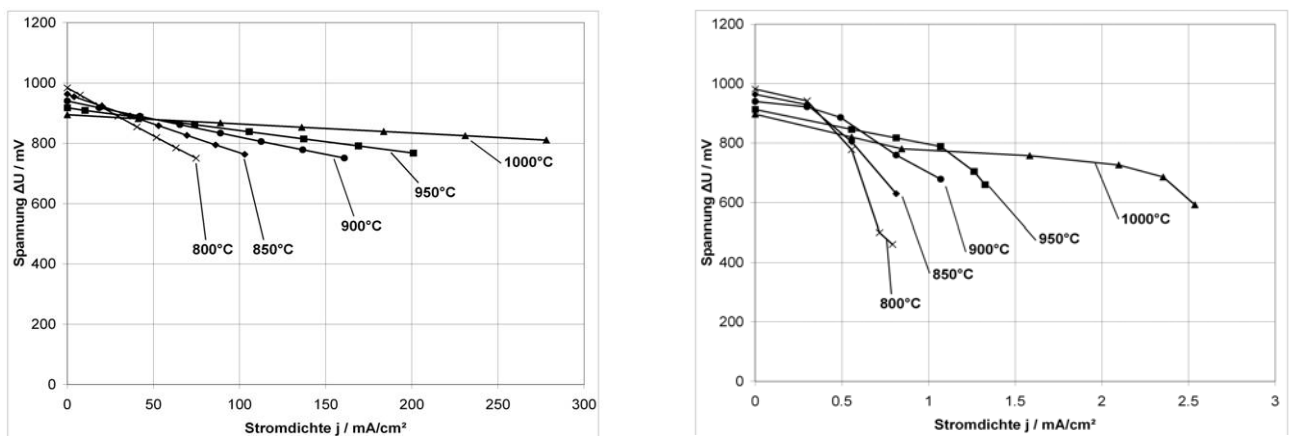


Abb. 3: Vergleich der *U-I*-Kennlinie für ein CO/CO₂-Gasmisch an einer Standardanode (*links*) und einer anodenseitig unbeschichteten SOFC (*rechts*) bei unterschiedlichen Temperaturen (800-1000 °C)

Um den Einfluss der Struktur und Kristallinität des Kohlenstoffs auf seine Reaktivität bezüglich der anodischen Oxidation zu untersuchen wurden zunächst die beiden Modellbrennstoffe GFG50 und Vulcan an einer anodisch unbeschichteten SOFC untersucht. Die U - I -Kennlinien von GFG50 und Vulcan an einer anodenseitig unbeschichteten Zelle ist in Abbildung 4 gezeigt. Erkennbar ist, dass für beide Kohlenstoffmaterialien, anders als für CO, auch ohne Anodenschicht signifikante Stromdichten erreicht werden. Der linke Graph in Abbildung 4 zeigt die Umsetzung des amorphen Materials (Vulcan) für verschiedene Temperaturen. Es werden mit etwa 100 mA/cm^2 für eine Zellspannung von $0,4 \text{ V}$ deutlich höhere Stromdichten für Vulcan als für GFG50 (rechts) unter identischen Bedingungen erreicht.

Eine Analyse der Strom-Spannungskennlinie durch Arrheniusanalytik erlaubt die Ermittlung der Aktivierungsenergie E_a der Oxidationsreaktion beider Brennstoffe. Für Vulcan wurde eine Aktivierungsenergie von 100 kJ/mol und für GFG50 eine fast dreifach höhere Aktivierungsenergie von 290 kJ/mol bestimmt. Für Wasserstoff als Referenzbrennstoff wurde eine Aktivierungsenergie von etwa 57 kJ/mol an einer kommerziellen SOFC ermittelt.

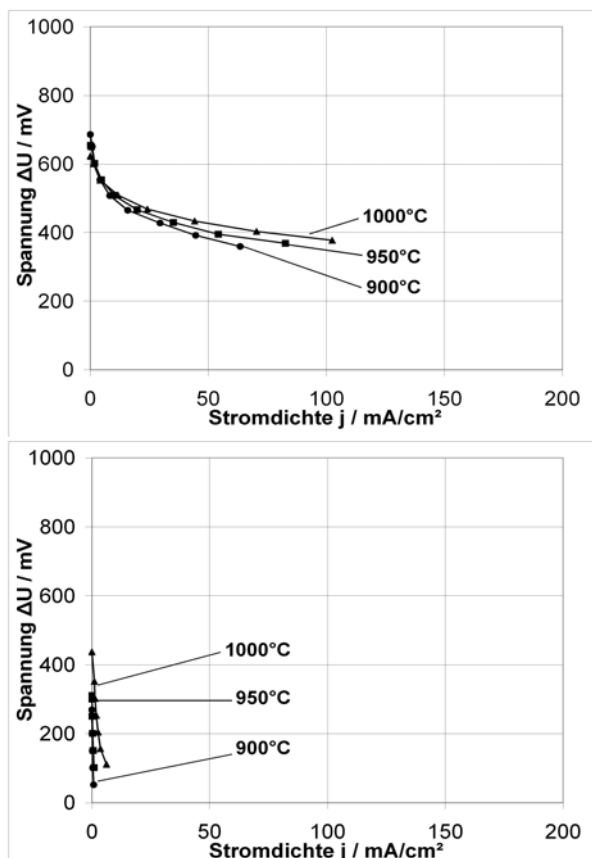


Abb. 4: Vergleich der Oxidation von Vulcan (*links*) und GFG50 (*rechts*) an einer anodenseitig unbeschichteten SOFC bei unterschiedlichen Temperaturen (900-1000°C)

An einer Standardanode wurde Vulcan im Vergleich zu einer anodenseitig unbeschichteten Zelle unter ansonsten identischen Bedingungen untersucht (siehe Abbildung 5). Es ist erkennbar, dass die Leerlaufspannung für Vulcan mit etwa $0,9 \text{ V}$ an der Standardanode im Vergleich zur anodenseitig unbeschichteten Zelle mit etwa $0,6 \text{ V}$ bei

1000 °C deutlich höher ist. Die U - I -Kennlinie zeigt anders als im Experiment ohne Standardanode eine erkennbare Abhängigkeit von der Spülrate mit Stickstoff. Die Stromdichte sinkt mit steigender Spülrate des Inertgases.

In Abbildung 5 ist zudem erkennbar, dass bei Betriebstemperaturen von 950 °C die Leerlaufspannung für Vulcan an der Standardanode auf den Wert der unbeschichteten Zelle absinkt. Insgesamt ist die Leistungsdichte für Vulcan an der Standardanode bei 1000 °C höher aber bereits bei 950 °C geringer als an der unbeschichteten Zelle.

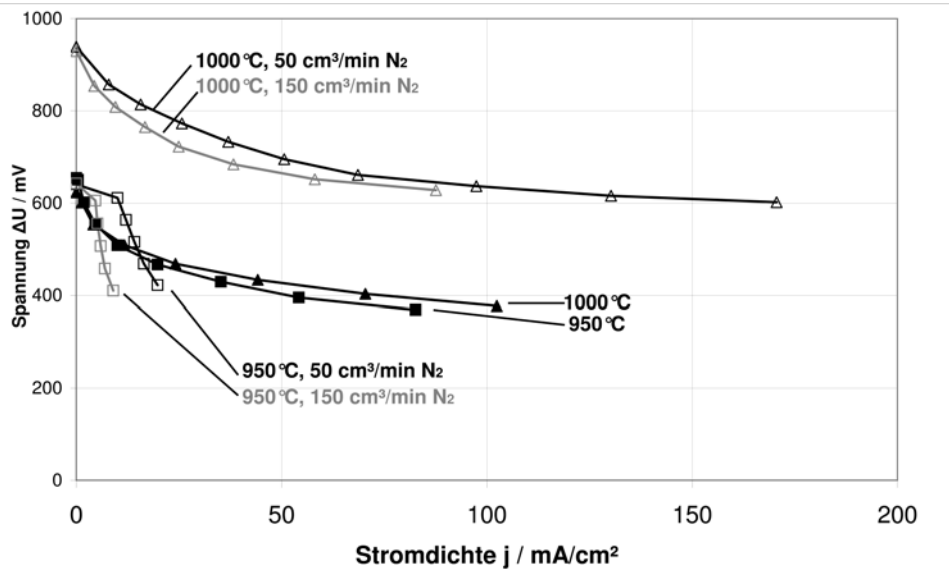


Abb. 5: Vergleich der Oxidation von Vulcan an einer anodenseitig unbeschichteten Zelle (Linien mit geschlossenen Symbolen) mit der an einer Standardanode (offene Symbole) bei Temperaturen von 950 und 1000 °C. Die Spülrate mit Stickstoff als Inertgas wurde für beide Temperaturen zwischen 50 cm³/min (graue Linie) und 150 cm³/min (schwarze Linie) variiert, um den Beitrag von Kohlenstoffmonoxid (CO) auf die Stromdichte abschätzen zu können.

Um den Einfluss von Ceroxid, über das als Katalysatormaterial für die Oxidation von Kohlenwasserstoffen berichtet wurde ^[12-14], für die Kohlenstoffoxidation untersuchen zu können, wurde eine anodenseitig unbeschichtete SOFC mit Cer-Gadolinium-Oxid (CGO) und Kupferoxid als Anodenmaterial modifiziert. Das Kupferoxid gewährleistet dabei die elektrische Querleitfähigkeit. Auf Nickel wurde wegen dessen Fähigkeit zur Karbidbildung zunächst verzichtet. In Abbildung 6 ist der Einfluss dieser modifizierten Anodenschicht auf die elektrochemische Umsetzung von GFG50 gezeigt. Der kristalline Brennstoff wurde hier gewählt, da die erreichten Stromdichten an anodenseitig unbeschichteten Zellen deutlich geringer waren als für Vulcan und somit hier ein höheres Optimierungspotential zu erwarten ist. Zum besseren Vergleich ist die U - I -Kennlinie der unbeschichteten Zelle mit GFG50 als Brennstoff (offene Symbole) ebenfalls dargestellt. Eine signifikant höhere Stromdichte ist an der Zelle mit CGO/CuO-Anodenschicht im Vergleich zur unbeschichteten Zelle erkennbar, wenngleich auch die Stromdichten von etwa 10-15 mA/cm² bei 0,2 V immer noch deutlich geringer sind als für Vulcan an anodenseitig unbeschichteten Zellen.

Durch Arrheniusanalyse wird die Aktivierungsenergie für die Oxidation von GFG50 an einer CGO/CuO-Anode auf etwa 120 kJ/mol im Vergleich zu 280 kJ/mol an einer unbeschichteten Zelle bestimmt.

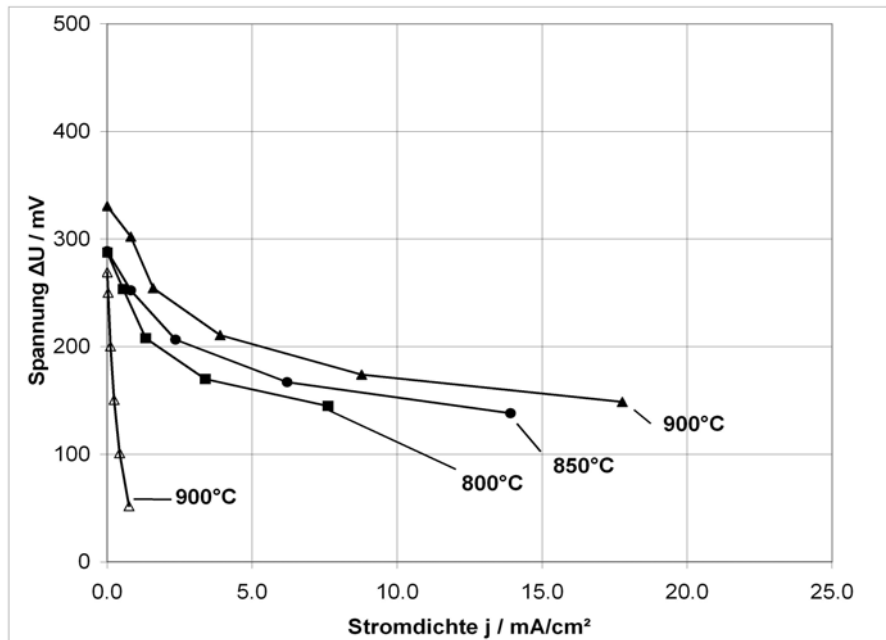


Abb. 6: Vergleich der Oxidation von GFG50 an einer anodenseitig unbeschichteten Zelle (offene Symbole) mit der an einer selbstentwickelten CGO/CuO-Anode bei verschiedenen Temperaturen (geschlossene Symbole).

7. Diskussion der Ergebnisse zur Kohlenstoff-Elektrooxidation

Es wurde beobachtet, dass die Modellbrennstoffe aus hochreinem Kohlenstoff auch ohne Anodenschicht elektrochemisch umsetzbar sind (Abbildung 4). In diesen Experimenten wurde Kohlenstoff als Pressling direkt auf den oxidkeramischen Elektrolyten aus YSZ angepresst. Der Kohlenstoff selbst dient dann als elektrischer Leiter und der Kontakt zum Elektrolyten reicht offenbar aus eine Dreiphasengrenze (Brennstoff/elektrischer-/ionischer Leiter) auszubilden. Durch Erhöhung der Spülrate werden gasförmige Komponenten, wie CO, prinzipiell verstärkt ausgespült und der Anteil der CO-Oxidation sollte daher sinken. Durch Variation der Stickstoffspülrate konnte aufgrund der dabei unveränderten U - I -Kennlinie verifiziert werden, dass an anodenseitig unbeschichteten Zellen primär eine direkte Oxidation des Kohlenstoffs erfolgt. Die Vergleichsmessungen mit CO an Standardzellen und an anodenseitig unbeschichteten Zellen bestätigen, dass ohne Anodenschicht kaum CO anodisch oxidiert wird. Der Strom in Abbildung 3 (rechts) ist im Vergleich zur Standardzelle insignifikant. In Abbildung 4 ist erkennbar, dass Vulcan als Brennstoff (links) deutlich besser umgesetzt werden kann als das kristalline Material GFG50 (rechts). Der Unterschied ist sicherlich nicht allein auf den Unterschied der BET-Oberfläche zurückführbar, da auch die Leerlaufspannungen für GFG50 mit 0,45 V deutlich geringer sind. Es wurde bereits darüber berichtet, dass amorphe Materialien eine höhere Reaktivität aufweisen.^[15] In diesem Zusammenhang erscheint es interessant welchen Einfluss eine chemische Modifizierung der Oberfläche des Brennstoffs haben könnte. Durch Vorbehandlung mit Schwefelsäure oder Kaliumpermanganat könnte bspw. die Oberfläche präoxidiert werden, um zu klären ob hierdurch die Verstromung verbessert werden kann.

Messungen an Standardanoden (Abbildung 5) zeigen deutlich höhere Leerlaufspannungen von etwa 0,9 V im Vergleich zu etwa 0,6-0,65 V für Messungen ohne Anodenschicht. Gleichzeitig wurde bei hohen Temperaturen von 1000 °C eine erhebliche höhere Stromdichte von 160 mA/cm² bei 0,6 V beobachtet, die deutlich von der Spülrate mit Stickstoff abhängt. Durch Absenkung der Temperatur auf 950 °C bricht die *U-I*-Kennlinie jedoch ein und die Leerlaufspannung sinkt auf den Wert vergleichbar der Messung ohne Anodenschicht. Die starke Abhängigkeit von der Spülrate und die Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung deuten darauf hin, dass die elektrochemische Oxidation im Wesentlichen von Kohlenstoffmonoxid aus der Boudouard-Reaktion getragen wird. Im anodenseitigen Abgasstrom wurde neben Kohlenstoffdioxid auch Kohlenstoffmonoxid mittels des Gaschromatographen nachgewiesen. Bei höheren Spülraten von 150 cm²/min wird CO verstärkt aus dem Anodenraum ausgetragen und durch Absenkung der Temperatur die Bildungsrate des CO gesenkt. Folglich deutet die stark abfallende *U-I*-Kennlinie bei 950 °C darauf hin, dass Kohlenstoff an einer Standardanode im Gegensatz zur anodenseitig unbeschichteten Zelle extrem schlecht umgesetzt werden kann. Wahrscheinlichste Ursache ist die Struktur der Standardanode, da die oberste Schicht nur aus Nickeloxid, bzw. nach Reduktion aus Nickel besteht, und keinen direkten Zugang zum Ionenleiter für den festen Brennstoff bietet. Eine Standardanode mit poröser Struktur erscheint ungeeignet für eine direkte Umsetzung des Kohlenstoffs und es erfolgt bei hohen Temperaturen primär eine Umsetzung der vergasteten Anteile des Brennstoffs.

Messungen an modifizierten Anodenschichten bei Temperaturen 800-900 °C deuten auf eine elektrokatalytische Aktivität von CGO bei der Oxidation von Kohlenstoff. Die Stromdichte konnte auf etwa 18 mA/cm² bei 0,15 V Zellspannung erhöht werden. Jedoch ist keine Verbesserung der Leerlaufspannung erkennbar. Für das kristalline Kohlenstoffmaterial GFG50 konnte die Aktivierungsenergie an CuO/CGO-Anoden um ca. 170 kJ/mol, d.h. etwa 40% im Vergleich zur anodenseitig unbeschichteten Zelle minimiert werden. Insgesamt erscheint die Integration von CGO in die Anode aussichtsreich, da dieses Material eine erkennbare Verbesserung der *U-I*-Kennlinie für das kristalline Material erwirkt hat. Vergleichsmessungen mit CO an CGO (nicht gezeigt) lassen darauf schließen, dass keine nennenswerte Verstromung von CO an dieser Anode erfolgt und folglich die höhere Stromdichte auf eine höhere direkte Umsetzung des Kohlenstoffs zurückführbar ist.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten zur Verstromung von Kohlenstoff in einer oxidkeramischen Hochtemperatur-Brennstoffzelle konnte gezeigt werden, dass: (i) Basierend auf dem Konzept einer SOFC eine direkte Verstromung von Kohlenstoff mit relevanten Stromdichten möglich ist. An einer anodenseitig unbeschichteten Zelle konnten für Vulcan XC72 100 mA/cm² bei ~0,4 V (~40 mW/cm²) erreicht werden. (ii) Amorpher Kohlenstoff in Vulcan XC72 wird deutlich leichter und mit höheren Stromdichten umgesetzt als kristallines Material wie GFG50. (iii) CGO hat einen elektrokatalytischen Effekt auf die Oxidation von Kohlenstoff und führte zu einer Erhöhung der Stromdichte bei gleicher Zellspannung und Betriebstemperatur für das schwer umsetzbare GFG50.

Ein wichtiger Aspekt der geplanten weiteren Entwicklung einer Direktkohlenstoff-Brennstoffzelle ist die Optimierung der Anode in Bezug auf chemische Zusammensetzung und Struktur. Kohlenstoff kommt nur mit der Oberfläche der Anodenschicht in Kontakt und kann als Feststoff nicht tiefer in die Anodenschichten einer porösen Anode eindringen. Deshalb sollen modifizierte, glatte Anodenschichten entwickelt werden. Eine wenige μm

dicke Schicht aus CGO, mit evtl. weiteren Komponenten wird im weiteren Verlauf untersucht werden.

Aufgrund des geringeren thermodynamischen Wirkungsgrades der Oxidation von Kohlenstoffmonoxid ($\eta_{th} = 0,67$ bei $T = 800$ °C) im Vergleich zur Direktoxidation von Kohlenstoff ($\eta_{th} \sim 1,0$ nahezu unabhängig von T) ist trotz der höheren Leistungsdichte mit Kohlenstoffmonoxid eine Absenkung des CO-Anteils sinnvoll. Für Kohlenstoff ist zudem eine höhere Brennstoffausnutzung möglich als mit gasförmigem Kohlenstoffmonoxid. Für weitere Untersuchungen der elektrochemischen Oxidation von Kohlenstoff soll eine niedrigere Betriebstemperatur ermöglicht werden, um den Einfluss der Boudouard-Reaktion zu minimieren. Als Elektrolytmaterial wird die Verwendung von CGO angestrebt, da dieses schon bei rund 600 °C eine hinreichende ionische Leitfähigkeit erreicht.

Danksagung

Wir möchten unseren Kolleginnen und Kollegen am ZAE Bayern in Erlangen für die gute Zusammenarbeit bei der Optimierung der Anodenschichten danken.

Literatur

- [1] I. Balachov, in Fuel Cell Seminar SRI International, Palm Springs, CA, USA, 2005.
- [2] B. Heydorn, S. Crouch-baker, The Fuel Cell Review 2006.
- [3] N. J. Cherepy, R. Krueger, K. J. Fiet, A. F. Jankowski, J. F. Cooper, Journal of the Electrochemical Society 2005, 152, A80.
- [4] J. R. Selman, Journal of Power Sources 2006, 160, 852.
- [5] S. Zecevic, E. M. Patton, P. Parhami, Carbon 2004, 42, 1983.
- [6] S. Zecevic, E. M. Patton, P. Parhami, Chemical Engineering Communications 2005, 192, 1655.
- [7] S. Li, A. Lee, R. E. Mitchell, T. M. Gür, Solid State Ionics 2008, online available.
- [8] A. C. Lee, S. Li, R. E. Mitchell, T. M. Gür, Electrochemical and Solid-State Letters 2008, 11, B20.
- [9] K. Pointon, B. Lakeman, J. Irvine, J. Bradley, S. Jain, Journal of Power Sources 2006, 162, 750.
- [10] S. L. Jain, J. B. Lakeman, K. D. Pointon, J. T. S. Irvine, Journal of Fuel Cell Science and Technology 2007, 4, 280.
- [11] Y. Nabae, K. D. Pointon, J. T. S. Irvine, Energy & Environmental Science 2008, 1, 148.
- [12] H. Tu, H. Apfel, U. Stimming, Fuel Cells 2006, 6, 303.
- [13] R. J. Gorte, H. Kim, J. M. Vohs, Journal of Power Sources 2002, 106, 10.
- [14] E. P. Murray, T. Tsai, S. A. Barnett, Nature 1999, 400, 649.
- [15] D. Cao, Y. Sun, G. Wang, Journal of Power Sources 2007, 167, 250.

Microalgen-Photosynthese für Biomasse Produktion

(vorgetragen von T. Lamparter)

Tilman Lamparter

Universität Karlsruhe, Botanisches Institut, Geb. 10.40, Kaiserstr. 2, D-76131 Karlsruhe

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich möchte zunächst den Organisatoren für die Einladung zu dieser Fachtagung danken und mich kurz vorstellen. Mein Name ist Tilman Lamparter, ich bin Biologe, genauer gesagt Pflanzenphysiologe, an der Universität Karlsruhe. Ich beschäftige mich in meiner Forschung hauptsächlich mit Photorezeptoren, die sich Phytochrome nennen, und die sowohl in Pflanzen als auch in Bakterien und in Pilzen vorkommen. Auf diesem Bild ist angedeutet, dass wir auch mit Physikern zusammen arbeiten. Trotzdem soll es aber auf dieser Tagung nicht um Phytochrom gehen, sondern um die Photosynthese, und zwar genauer gesagt um die Frage, wie man die Photosynthese von Microalgen für die Produktion von Kraftstoffen ausnutzen kann.

Ich möchte kurz erläutern, wie ich selbst auf das Thema Microalgen gekommen bin. Das hat unter anderem mit meinem Wechsel von Berlin nach Karlsruhe zu tun. Das Profil der Technischen Universität und des Forschungszentrums Karlsruhe (mittlerweile KIT) ist stark Anwendungs-orientiert.

Zu der Zeit (vor etwa eineinhalb Jahren) wurde in den Medien die Produktion von Biodiesel aus Nutzpflanzen wie zum Beispiel Raps oder Mais intensiv diskutiert. Soll diese Produktion weiter ausgebaut und gefördert werden oder nicht? Auf der einen Seite soll der Anteil regenerativer Energien erhöht werden, um sparsamer mit den Ressourcen umzugehen und um den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren. Auf der anderen Seite: wenn man Pflanzen wie Raps oder Mais einsetzt, um daraus Kraftstoffe herzustellen, ergibt sich eine Konkurrenz Situation mit der Lebensmittel-Produktion. Man kann die Fläche für die Produktion von Biodiesel nicht beliebig steigern, denn - vereinfacht gesagt - reicht dann die Fläche nicht aus, um Lebensmittel zu produzieren.

Ich habe damals überlegt, ob es nicht sinnvoll wäre, Pflanzen in Gegenden anzubauen, die nicht landwirtschaftlich nutzbar sind, wie zum Beispiel in der Wüste oder auf kargen Böden. Tatsächlich wird dies mit der Jatropha Pflanze bereits realisiert, die in Afrika und Indien angebaut wird, um daraus Biodiesel herzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich darauf aufmerksam gemacht worden, dass sich im Prinzip auch Microalgen sehr gut eignen, um die Energie des Sonnenlichts für die Erzeugung von Biokraftstoff oder von anderen Substanzen zu verwenden.

Ein Vorteil von Microalgen besteht darin, dass im Gegensatz zu Landpflanzen alle Zellen Photosynthese betreiben. Landpflanzen, und auch natürlich die Nutzpflanzen, die für die Erzeugung von Biodiesel verwendet werden, betreiben Photosynthese ausschließlich in den Blättern, die Wurzel macht natürlich keine Photosynthese und auch oberirdische Organe wie z.B. Blüten oder die Stämme von Bäumen betreiben keine Photosynthese. Das bedeutet, in diesen Pflanzen ist die Energie Umwandlung nicht optimal. Bei Microalgen handelt es sich dagegen um einzellige Systeme (die Zellen teilen sich unter günstigen

Bedingungen ungefähr einmal am Tag); als Tochterzellen entstehen wieder neue Zellen, die photosynthetisch aktiv sind und es gibt keine Zellen, die keine Photosynthese betreiben.

Im Prinzip wäre es möglich, einen großen Teil des Kraftstoffbedarfs der USA aus Microalgen zu decken. In dieser Übersicht ist zusammen gestellt, wie viel Biodiesel aus welcher Pflanze gewonnen werden kann und welche Fläche benötigt würde, um 50% des Kraftstoffbedarfs der USA zu decken. Mit Raps bräuchte man über 100 Prozent, das heißt es würde keine Fläche mehr für den Anbau von Nahrungsmitteln übrig bleiben (und es wäre immer noch nicht genug Kraftstoff). Mit Microalgen könnte man dagegen mit 1 bis 3 Prozent der Fläche der USA auskommen, um 50% Treibstoff zu produzieren.

Das sind nun theoretische Werte, in der Praxis werden Microalgen trotz dieser theoretischen Vorteile noch nicht in großem Stil eingesetzt. Ein Nachteil liegt in den relativ hohen Investitions- und Produktionskosten begründet. Für den Anbau von Raps braucht man einen Acker, einen Traktor und Saatgut, während man für Microalgen eine Bioreaktor Anlage benötigt. Es kommt dazu, dass Microalgen im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Pflanzen noch nicht intensiv erforscht sind. In meinem Bereich, der Botanik, untersuchen naturgemäß mehr Arbeitsgruppen die Biologie von Landpflanzen wie *Arabidopsis thaliana* oder Reis. Microalgen werden von deutlich weniger Gruppen untersucht.

Unser Ziel ist es, nach wie vor in der Natur nach Algen zu suchen, die für bestimmte Anforderungen geeignet sind. Zum Beispiel wäre es wünschenswert, eine Microalge zu finden, die unter starkem Licht gut wächst.

Wir haben von einer Helgoland Exkursion und einer anderen Exkursion in Giglio (Mittelmeer) Algenproben nach Karlsruhe gebracht. Die Algen wurden vereinzelt und werden zurzeit im Labor untersucht. Allerdings kann ich an dieser Stelle noch nicht auf eigene Ergebnisse eingehen, sondern möchte Ihnen vor allem einen Überblick geben, wo Microalgen zurzeit schon eingesetzt werden und welche Einsatzmöglichkeiten sich für die Zukunft ableiten lassen.

Zunächst möchte ich kurz auf die Biologie der Microalgen eingehen und zeigen, welche verschiedenen Gruppen es gibt.

Dann möchte ich Beispiele nennen, wie im Prinzip Microalgen für die Energie-Nutzung eingesetzt werden können, welche Richtungen beschritten werden.

Für den effektiven Einsatz von Microalgen ist die Frage, in welchem Bioreaktor diese Algen wachsen, von entscheidender Bedeutung. Auf die verschiedenen Bioreaktoren möchte ich im dritten Teil eingehen.

Zum Schluss möchte ich ein paar Beispiele für Firmen nennen, die in USA und in Deutschland mit Microalgen arbeiten.

Die Photosynthese-Aktivität auf der Erde ist unterschiedlich verteilt. An Land dominieren Samenpflanzen, also Organismen die uns allen geläufig sind. Im Gegensatz dazu wird die Photosynthese im Meer in erster Linie von Microalgen bestritten; die wichtigsten Gruppen sind dabei die Cyanobakterien, Diatomeen und Dinoflagellaten.

Dabei verteilt sich die Primärproduktion zu etwa gleichen Teilen zwischen Land und Meer, in beiden Bereichen werden jährlich etwa 50 Mrd. Tonnen Kohlenstoff fixiert. Insgesamt entspricht das einem Umsatz von etwa 10 % des atmosphärischen CO₂.

Warum bezogen auf die Fläche die Photosynthese in den Meeren nicht so effizient verläuft wie an Land liegt unter anderem daran, dass im Meer wichtige Nährstoffe wie Phosphat und Stickstoff limitierend sind. In den Küstenregionen mit besserer

Nährstoffversorgung werden deutlich höhere Photosyntheseraten erzielt wie im offenen Meer, wie sich anhand z.B. der Chlorophyll Fluoreszenz Bilder nachweisen lässt. Im Prinzip ließe sich die Photosynthese der Microalgen im Meer deutlich steigern, wenn genügend Nährstoffe zur Verfügung stünden.

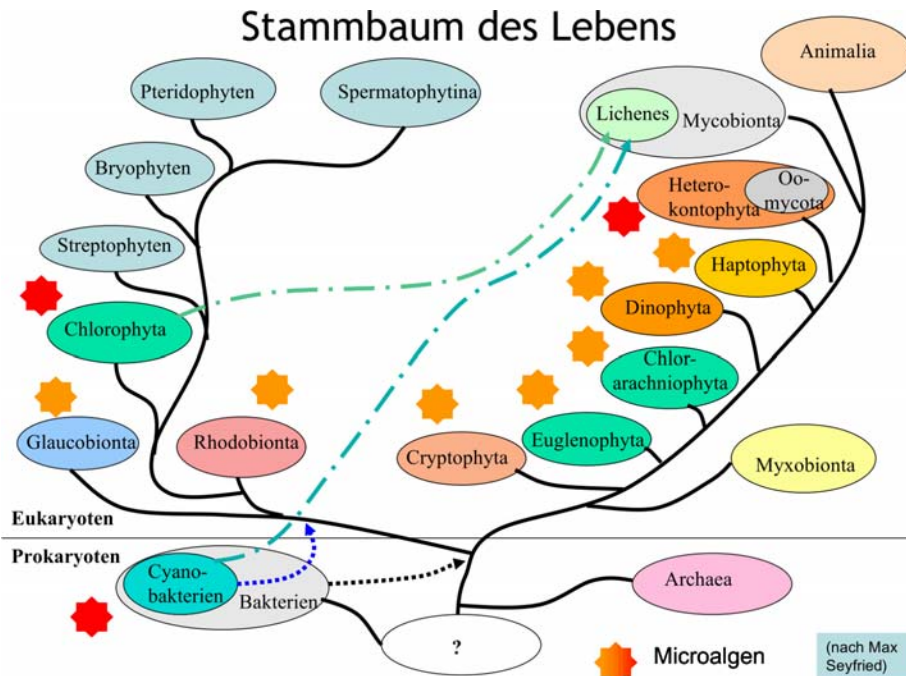


Abb. 1 Stammbaum des Lebens – Vorkommen von Microalgen (nach Max Seyfried)

Ich habe hier in diesem „Stammbaum des Lebens“ (Abb. 1) die Gruppen mit einem Stern gekennzeichnet, in denen Microalgen vorkommen. Sie können sehen, dass es sich bei den Microalgen keineswegs um eine homogene Gruppe von wenigen Arten handelt, auch wenn die Zahl der heute eingesetzten Arten noch relativ klein ist. Man kann davon ausgehen, dass es insgesamt mehrere 100000 Arten von Microalgen gibt, viele davon sind noch gar nicht entdeckt worden.

Ich möchte im Folgenden kurz auf die in meinen Augen drei wichtigsten Gruppen eingehen, nämlich die Cyanobakterien, die Diatomeen und die Grünalgen. Bei den Cyanobakterien handelt es sich streng genommen gar nicht um Algen, weil sie zu der Gruppe der Bakterien gehören, zu den Prokaryoten, und keinen Zellkern enthalten. Echte Algen enthalten einen Zellkern und sind deutlich komplexer aufgebaut.

Im Unterschied zu anderen Bakterien können Cyanobakterien oxygene Photosynthese betreiben. Cyanobakterien sind sehr alt, vermutlich vor etwa 3 Mrd. Jahren entstanden. Sie sind (in der Erdgeschichte) verantwortlich dafür, dass die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre immer weiter angestiegen und der CO₂ Gehalt abgesunken ist. Die relative Bedeutung der Cyanobakterien in diesem Kontext hat zwar nachgelassen, weil andere photosynthetisch aktive Organismen an Bedeutung zugenommen haben. Allerdings sind Cyanobakterien immer noch für etwa 40% der Primärproduktion der Meere verantwortlich.

Cyanobakterien sind auch bekannt dafür, dass sie Toxine bilden. Unter bestimmten Bedingungen kann es im Meer zu einer Massenvermehrung von Cyanobakterien kommen. In diesen Fällen werden von den Behörden Warnungen ausgesprochen und es ist nicht

ratsam, in den Gewässern zu baden. Bei den Toxinen handelt es sich einmal um Neurotoxine, einmal um Lebertoxin, die zum Teil auch biotechnisch hergestellt werden und für die Forschung verkauft werden.

Ein Beispiel, wie Cyanobakterien für die Produktion von Biomasse eingesetzt werden, ist hier zu sehen. *Spirulina* werden in großen Mengen in *open ponds* in USA, Japan und China produziert. Die Zellen werden als Nahrungsergänzungsmittel angeboten, man kann solche Tabletten kaufen, die sehr gesund sein sollen. Außerdem wird *Spirulina* in Kosmetikartikeln eingesetzt. Im Labor wird *Spirulina* als Rohmaterial für die Extraktion von Phycocyanobilin verwendet.

Da Cyanobakterien zu den Bakterien gehören, haben sie relativ kleine Genome, und es ist vergleichsweise einfach, diese Genome zu sequenzieren. Zur Zeit (Mitte 2008) sind über 35 Genome sequenziert, die Mehrzahl von marinen Cyanobakterien. Für einige Arten ist *genetic engineering* etabliert, ein Vorteil gegenüber den meisten eukaryotischen Microalgen.

Die nächste große Gruppe sind die Diatomeen. Auch diese Organismen tragen wesentlich zur Primärproduktion bei, ebenfalls etwa 40% der Meeres-Primärproduktion geht auf Diatomeen zurück. Es handelt sich um eine sehr artenreiche Gruppe; es wird vermutet, dass es über 100000 Diatomeen gibt, von denen die meisten noch nicht bekannt sind. Die charakteristische

Eigenschaft der Diatomeen ist ihre Zellwand, die aus Siliziumoxid besteht. Die Poren in der Zellwand bilden regelmäßige Muster aus, so dass man sehr schöne Mikroskop-Bilder von Diatomeen erhalten kann. Es handelt sich um eine relativ junge Gruppe, die vor etwa 200 Mio Jahren entstanden ist. Diatomeen sind eng mit Braunalgen verwandt, im Gegensatz zu diesen kommen Diatomeen jedoch nur als einzellige oder fädige bzw. Kolonie-bildende Formen vor.

Von zwei Diatomeen Arten ist inzwischen das Genom sequenziert worden, *Thalassiosira pseudonana* und *Phaeodactylum tricorutum*. *Phaeodactylum tricorutum* wird in der Biotechnologie auch als Produzent einer mehrfach ungesättigten Fettsäure, Eicopentaensäure, eingesetzt.

Die Grünalgen sind eng mit den Samenpflanzen verwandt. Sie besitzen Chlorophyll a und b (typische Cyanobakterien nur Chlorophyll a, Diatomeen Chlorophyll a und c) und ihre Zellwand enthält Cellulose. Es gibt zahlreiche einzellige Formen, aber auch thallos wachsende Grünalgen, die nicht als Microalgen bezeichnet werden. Die einzellige Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ist ein wichtiger Modellorganismus für die Forschung. Unter gewissen Bedingungen bildet *Chlamydomonas* – mit Hilfe einer Sauerstoff-empfindlichen Hydrogenase – molekularen Wasserstoff. Die Möglichkeit, *Chlamydomonas* für die Produktion von Wasserstoff einzusetzen, wird von vielen Gruppen untersucht.

Dunaliella salina ist eine weitere Mikroalge, die biotechnologisch genutzt wird. Diese Zellen sind tolerant gegenüber hohen Salzkonzentrationen und produzieren unter solchen Bedingungen relativ viel β Carotin, welches extrahiert und als Nahrungsmittel-Zusatz verkauft wird. Die Grünalge *Haematotoccus pluvialis* wird für die Produktion von Carotinoiden eingesetzt. Das Pigment Astaxanthin bewirkt bei Fischen eine Ausprägung der Pigmentierung und daher wird diese Alge als Zusatz für Fischfutter eingesetzt. Die schnell wachsende Grünalge *Chlorella* wird in *open ponds* angezogen, auch daraus werden Lebensmittel-Zusätze hergestellt. *Botryococcus braunii*, eine mehrzellige Grünalge, wurde wegen ihres hohen Lipid-Gehalts für die Produktion von Biokraftstoffen vorgeschlagen. In USA kann man Starterkulturen für die eigene Algen-Zucht über das Internet beziehen.

Trotz der potentiellen Vorteile von Microalgen für die Biomasse-Produktion und der Möglichkeit, Photosynthese effizient für die Energie-Nutzung einzusetzen, hat sich ihr Einsatz noch nicht im kommerziellen Stil etabliert. Allerdings wird im Bereich der Forschung an verschiedenen Punkten gearbeitet, und es ist zu vermuten, dass die Bedeutung von Microalgen für kommerzielle Anwendung weiter zunehmen wird. Im Zusammenhang mit der Nutzung der Photosynthese-Energie werden vor allem vier Anwendungs-Bereiche vorgeschlagen: der Einsatz von Microalgen zur Produktion von Wasserstoff, Ethanol, und Lipiden sowie für das *recycling* von CO₂ aus Erdgas- bzw. Kohlekraftwerken. Die vier Bereiche sollen im Folgenden kurz angesprochen werden:

Für die Produktion von Wasserstoff durch Mikroorganismen ist ein Enzym, die Hydrogenase, zuständig, die aus Protonen und Elektronen Wasserstoff bildet bzw. aus Wasserstoff Protonen und Elektronen produzieren kann. Hydrogenasen kommen in verschiedenen Mikroorganismen vor, und man kann je nach zentralem Metall-Ion zwei Gruppen unterscheiden, Nickel-Eisen-Hydrogenasen und Eisen-Hydrogenasen. Die meisten Hydrogenasen reagieren sehr empfindlich auf Sauerstoff, d.h. sie werden durch Sauerstoff irreversibel gehemmt. Auch wenn Sauerstoff-unabhängige Hydrogenasen in nicht-photosynthetischen Bakterien gefunden wurden, können diese doch nicht so ohne weiteres funktional in photosynthetischen Organismen exprimiert werden, weil für die Einlagerung der Cofaktoren zahlreiche weitere Enzyme benötigt werden, die zusätzlich exprimiert werden müssten. Die Grünalge *Chlamydomonas* (aber auch andere Grünalgen sowie zahlreiche Cyanobakterien) enthält ebenfalls eine Sauerstoff-sensitive Hydrogenase, die unter Sauerstoff-armen Bedingungen Wasserstoff bildet. Da in der (oxygenen) Photosynthese Sauerstoff aus der Wasserspaltung frei wird, kann die Hydrogenase nicht unter normalen Bedingungen arbeiten. Bei *Chlamydomonas* hat man herausgefunden, dass Schwefel-Mangel die Wasserstoff-Bildung induziert¹.

Unter Schwefelmangel können keine neuen Proteine synthetisiert werden. Am ehesten sind davon die zentralen Proteine des Photosystem 2 betroffen, die einer hohen *turnover*-Rate unterliegen. Daher fällt unter Schwefel-Mangel zunächst das Photosystem 2 aus, Wasserspaltung kann nicht stattfinden, es wird kein Sauerstoff mehr gebildet und der vorhandene Sauerstoff wird veratmet. Unter solchen Bedingungen ist jedoch immer noch die licht-getriebene Elektronentransportkette des Photosystem 1 aktiv. Die Elektronen können nun nicht mehr für die Reduktion von NADP zu NADPH verwendet werden, sie werden stattdessen über die Hydrogenase für die Produktion von Wasserstoff „verbraucht“. Letztendlich entstammen diese Elektronen aus der Stärke, ein Speicher-Molekül, welches unter „normalen“ Bedingungen akkumuliert. Unter Schwefelmangel ist es so unter Verbrauch von Stärke möglich, den Elektronenfluss aufrecht zu erhalten und die damit verbundene Protonen-Translokation kann noch zur Synthese von ATP eingesetzt werden. Diese Erkenntnisse können für die Licht-getriebene Produktion von Wasserstoff ausgenutzt werden. Man muss dazu die Zellen für eine gewisse Dauer in Schwefel-haltigem Medium wachsen lassen, damit genügend Photosynthese-Produkte akkumulieren können. Verschiedene Möglichkeiten sind denkbar, die bisher niedrige Produktion von Wasserstoff weiter zu verbessern. Es gibt bereits *Chlamydomonas* Mutanten, die mehr Wasserstoff bilden. Einige Gruppen versuchen, Hydrogenasen durch Mutagenese zu modifizieren und somit z.B. Sauerstoff unempfindlicher zu machen.

Es ist ebenfalls denkbar, Microalgen für die Synthese von Ethanol einzusetzen. Zwei Enzyme, Pyruvat Decarboxylase und Alkohol Dehydrogenase, katalysieren die

¹ Die Zusammenhänge sind auf Folie 30 des Vortrags dargestellt. Siehe Archiv des AKE http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2009-AKE_Hamburg/Vortraege/DPG2009_AKE3.1_Lamparter_Biomasse-Microalgen_korr.pdf

Umwandlung von Pyruvat in Alkohol, ein Vorgang, der bei der alkoholischen Gärung zur Herstellung von Bier und Wein genutzt wird. Wenn diese Enzyme in Cyanobakterien exprimiert werden, produzieren diese Ethanol. Die produzierten Mengen sind ebenfalls noch gering, durch *genetic engineering* hofft man, diese Produktion weiter steigern zu können.

Viele Microalgen produzieren natürlicherweise große Mengen von Lipiden als Speicher. Die Lipide können wie das Öl der Rapspflanzen zur Herstellung von Biodiesel eingesetzt werden, unter Verwendung der gleichen Produktionsanlagen. Über einen Transesterifizierungs-Prozess werden die Fettsäuren der Triacylglycerine (die meisten Speicher-Lipide gehören zu dieser Gruppe) in Methyl ester umgewandelt.

Oil content of some microalgae

Microalga	Oil content (% dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i>	25–75
<i>Chlorella</i> sp.	28–32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16–37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25–33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20–35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31–68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35–54
<i>Nitzschia</i> sp.	45–47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20–30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50–77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15–23

Tabelle 1: Ölgehalt einiger Microalgen (nach Y. Chisti (2007))

In dieser Tabelle 1 sind Beispiele für Microalgen zusammengestellt, die hohe Lipid Mengen produzieren². Man findet vor allem Vertreter der Grünalgen und Diatomeen, während Cyanobakterien eher Glycogen als Speicher verwenden.

Prinzipiell ist es denkbar, mit Hilfe von Microalgen CO₂ aus Kraftwerks-Abgasen zu fixieren. Auf diese Art würde das CO₂ nicht in die Atmosphäre abgegeben und gleichzeitig würde CO₂ die Microalgen „düngen“. In einigen Pilot-Projekten wird diese Art von CO₂ recycling getestet. Um diese Möglichkeit für Kohlekraftwerke im großen Stil nutzen zu können, würden große Flächen benötigt. Für alle Kohlekraftwerke zusammen käme man bei einfachen Schätzungen auf 7% der Fläche der BRD. Die Gesamt CO₂ – Bilanz wäre allerdings selbst in diesem Fall nicht Null: wenn die Microalgen für die Biokraftstoff Produktion eingesetzt werden, wird bei der Verbrennung natürlich wieder CO₂ freigesetzt. Trotzdem kann durch eine solche Filtrierung die CO₂-Abgabe deutlich reduziert werden.

Für die Massenproduktion von Microalgen müssen diese in Bioreaktoren kultiviert werden. Am Design dieser Bioreaktoren entscheidet sich die Frage, ob die Umwandlung von Sonnenenergie in chemisch fixierte Energie effizient genug verläuft. Für die sinnvolle

² Siehe auch Folie 35 des Vortrags

Produktion von Biokraftstoffen muss mehr Energie heraus kommen als hineingesteckt wird. Dieser triviale Aspekt wird jedoch oft nicht erfüllt.

Im Rahmen des „*Aquatic Species Program*“ wurde auf offene Systeme gesetzt. In sog. *raceway ponds* werden die Microalgen in flachen Becken kultiviert, für die unumgängliche Durchmischung wird das Nährmediums durch ein Paddelrad umgewälzt. Auf dem Foto ist eine *Spirulina*-Farm zu sehen, die in Kalifornien betrieben wird.

Raceway ponds haben den Vorteil, dass die Anlagen relativ einfach und kostengünstig gebaut werden können. Allerdings sind die Erträge pro Flächeneinheit vergleichsweise gering, und es können wegen der Kontamination durch Bakterien, Pilze oder andere Algen nur extremophile Organismen kultiviert werden. *Spirulina* zum Beispiel wächst unter alkalischen Bedingungen, unter denen sich andere Organismen nicht durchsetzen können.

In geschlossenen Systemen können Microalgen auch unter sterilen Bedingungen kultiviert werden. Bei der Entwicklung und Optimierung von geschlossenen Bioreaktoren stehen technische Parameter im Vordergrund. Ein optimaler Bioreaktor sorgt für die richtige Licht-Einstrahlung, wobei die Verteilung der Zellen im Licht eine wichtige Rolle spielt, und bewirkt eine optimale Durchmischung unter möglichst geringem Energie Aufwand.

Je nach Bauweise unterscheidet man zwischen Röhren-Reaktoren, Flachbett-Reaktoren und Folien Reaktoren. Die Algen-Suspension wird durch ein System von lichtdurchlässigen Röhren gepumpt. In Folien Reaktoren werden die Microalgen in Plastik-Schläuchen kultiviert. Diese Systeme zeichnen sich durch niedrige Herstellungs-Kosten aus. In Flachbett-Reaktoren werden die Kulturen durch die „flächigere“ Verteilung der Suspension im Vergleich zu den anderen Systemen gleichmäßiger bestrahlt. In einem patentierten und optimierten Verfahren werden spezielle Flachbett-Reaktoren von der Firma Subitec bereits in größeren Stückzahlen hergestellt.

	Energie- verbrauch W/m ³	Algenproduktion g Trockensubstanz pro Tag pro m ³	(g TS)/kJ	kJ/(g TS)
<i>Raceway pond</i>	10	100	0.12	8.64
Röhren-Reaktor	2000	1000	0.01	172.8
Flachbett- Reaktor	50	1000	0.23	4.32

Tabelle 2: Effektivität von Bioreaktoren

In dieser Tabelle 2 sind Literatur-Werte zur Effektivität der verschiedenen Systeme zusammengestellt³. Obwohl die Zahlen vermutlich unter optimierten Bedingungen erzielt wurden, kann man dennoch erkennen, dass in geschlossenen Reaktoren deutlich höhere Ausbeuten erzielt werden als in *raceway ponds*. Für die Umwälzung der Suspension muss in Röhren-Reaktoren relativ viel Energie aufgebracht werden – mehr als im günstigsten Fall über die Algen wieder entnommen werden kann. Die Flachbett-Reaktoren schneiden bei diesem Vergleich am besten ab; mit diesen Reaktoren wird die höchste Produktion pro investiertem kJ erzielt.

³ Siehe auch Folie 44 des Vortrags

Nun noch einige Beispiele für Firmen, die Microalgen untersuchen oder anwenden – einige Beispiele für die Produktion von Nahrungszusatzstoffen wurden bereits gezeigt. Die Information ist zum großen Teil dem Internet entnommen (siehe auch URL Adressen). Zunächst zwei Beispiele für amerikanische Firmen, Greenfuel und Solix, die CO₂ aus Kraftwerken für die Düngung von Microalgen benutzen. Eine Berliner Firma, Cyano Biofuels, untersucht die Möglichkeit, Cyanobakterien für die Produktion von Ethanol einzusetzen. Die Firma Subitec wurde bereits erwähnt. Bei dieser Firma werden unter anderem Flachbett Bioreaktoren in größeren Stückzahlen hergestellt. Subitec ist ein *spin off* des Fraunhofer Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik in Stuttgart. Die Firma Novagreen setzt Microalgen unter anderem für die Produktion von Antikörpern ein.

Zum Abschluss noch eine kurze Abwägung der Vor- und Nachteile von Microalgen-Kulturen gegenüber der Verwendung von Nutzpflanzen. Im Prinzip sind mit Microalgen höhere Produktivitäten möglich, d.h. das Sonnenlicht kann effizienter ausgenutzt werden. Es ist die Verwendung von Meerwasser denkbar, da es viele Microalgen gibt, die aus Meerwasser isoliert wurden. Microalgen können auf Flächen kultiviert werden, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden, bis hin zu Wüsten-Flächen. Man kann in der Zukunft Microalgen einsetzen, um Wasserstoff und Ethanol zu produzieren.

Die Nachteile liegen unter anderem in den hohen Investitions-Kosten begründet. Man muss große Bioreaktoren entwickeln und bauen, und Nährstoffe müssen kontinuierlich zugeführt werden. Die Kultivierung und Aufarbeitung der Microalgen muss weiter optimiert werden. Die Optimierung betrifft nicht nur die technische Seite der Bioreaktor-Anlagen, sondern auch die biologische Seite: *screening* nach geeigneten Organismen, genetische Modifikationen zur weiteren Optimierung, z.B. im Hinblick auf die Ethanol oder Wasserstoff Produktion. Neben der Produktion von Kraftstoffen, die zur Zeit noch nicht realisiert werden kann, ist der Einsatz von Microalgen für die Produktion „wertvoller“ Stoffe in verschiedenen Bereichen denkbar und kann schneller Erfolge erzielen.

Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle (vorgetragen von V. Bräuer)

Volkmar Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2,
30655 Hannover

Abstract

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken anfallenden hoch radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Einer günstigen geologischen Gesamtsituation mit einem geeigneten Wirts- und Barrieregestein kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Seit 1979 wird in diesem Zusammenhang der Salzstock Gorleben untersucht, allerdings wurden die Arbeiten auf Grund eines Moratoriums für einen Zeitraum von mindestens drei bis maximal zehn Jahren unterbrochen.

Zur Vervollständigung des Kenntnisstandes über potenzielle Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz-, Kristallin- und Tongesteinsvorkommen veröffentlicht. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung auch international untersucht. Dies dient auch dazu, die nationalen Untersuchungsergebnisse abzusichern. Die internationalen Projekte bilden zudem eine hervorragende Basis für Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen, die zukünftig einen Schwerpunkt der deutschen Arbeiten bilden werden.

Einleitung

Die Frage der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist seit vielen Jahren ein international intensiv diskutiertes Thema. Laut einer Umfrage halten in Deutschland etwa 80 % der Bevölkerung die Lösung der „Endlagerfrage“ für eine dringliche Aufgabe. Dies wird auch durch Umfrageergebnisse aus dem Jahr 2005 in der Europäischen Gemeinschaft bestätigt (EUROBAROMETER 2005).

Während in einigen Ländern schon Endlager für mittel- und schwach-radioaktive Abfälle existieren, gibt es weltweit noch kein entsprechendes Endlager für den hoch aktiven und Wärme entwickelnden Abfall. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden international auch unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung untersucht. In vielen Ländern spielen dabei die jeweiligen nationalen geologischen Gegebenheiten eine wesentliche Rolle.

Wirtsgesteinsstudien in Deutschland

Zur Frage der möglichen Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hatte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz- und Kristallinvorkommen veröffentlicht, deren Ergebnisse auch heute noch aktuell sind und Gültigkeit haben (KOCKEL & KRULL 1995, BRÄUER et al. 1994).

Als Ergebnis wurden dabei Salzstöcke und Regionen mit Kristallinvorkommen in Deutschland ausgewiesen, die als weiter untersuchungswürdig eingestuft wurden. Die Untersuchungen stützten sich auf Literatur-, Archiv- und Bohrungsdaten. Feldmessungen wurden nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der Studien wurden am 28. August 1995 im Rahmen einer Pressekonferenz von der damaligen Bundesumweltministerin Dr. Merkel der Öffentlichkeit vorgestellt.

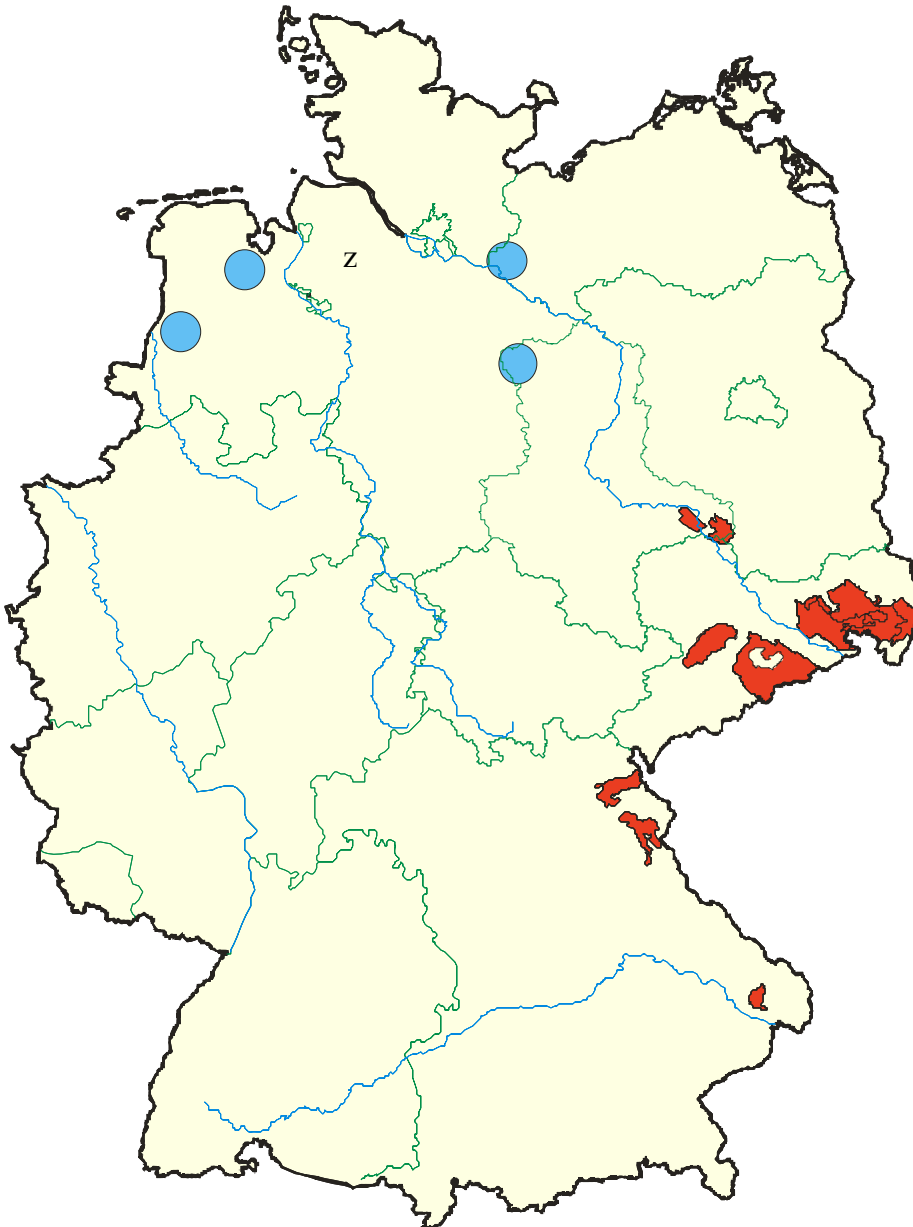


Abb. 1: Untersuchungswürdige Regionen in salinaren (blau) und kristallinen (rot) Formationen Deutschlands (BGR 1995)

Die BGR erhielt im Jahre 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) den Auftrag, in Ergänzung zu den Untersuchungen zu Steinsalz und Kristallingesteinen, eine Studie über die Verbreitung von Tongesteinen als potenzielle

Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland zu erstellen (HOTH et al. 2007).

Bei den für Tongesteine durchgeführten Untersuchungen dienten international anerkannte, von der BGR für die Wirtsgesteine Salz und Kristallin formulierte Ausschluss- und Abwägungskriterien als Grundlage. Sie wurden ergänzt durch die im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte aufgestellten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (AkEnd 2002). Zusätzlich wurden von der BGR weitere, aus geowissenschaftlicher Sicht als maßgeblich erachtete, Abwägungskriterien bei der Auswahl der Regionen herangezogen.

Das Konzept der Endlagerung in geologischen Formationen setzt generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken voraus. Besonders in tieferen Bereichen kann die Standsicherheit der Strecken in Tongesteinen nur mit Ausbaumaßnahmen erreicht werden. Bei unverfestigten Tonen sind diese Maßnahmen besonders aufwändig und kostspielig. Daher wurden nur verfestigte Tongesteine in die Betrachtung der BGR einbezogen. Endlagerrelevante Forschungsergebnisse von mineralogischen, geochemischen und geotechnischen Untersuchungen an Tongesteinen in internationalen Felslabors wurden ergänzend berücksichtigt.

Grundlage der im Rahmen der BGR-Tonstudie durchgeführten Beurteilung von Tongesteinsformationen im tieferen Untergrund Deutschlands waren etwa 25.000 Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft und ausgewertet wurden. Die Informationen zu den Bohrungen liegen in der BGR, dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie anderen staatlichen Geologischen Landesdiensten vor.



Abb. 2: „Tonstudie“ der BGR

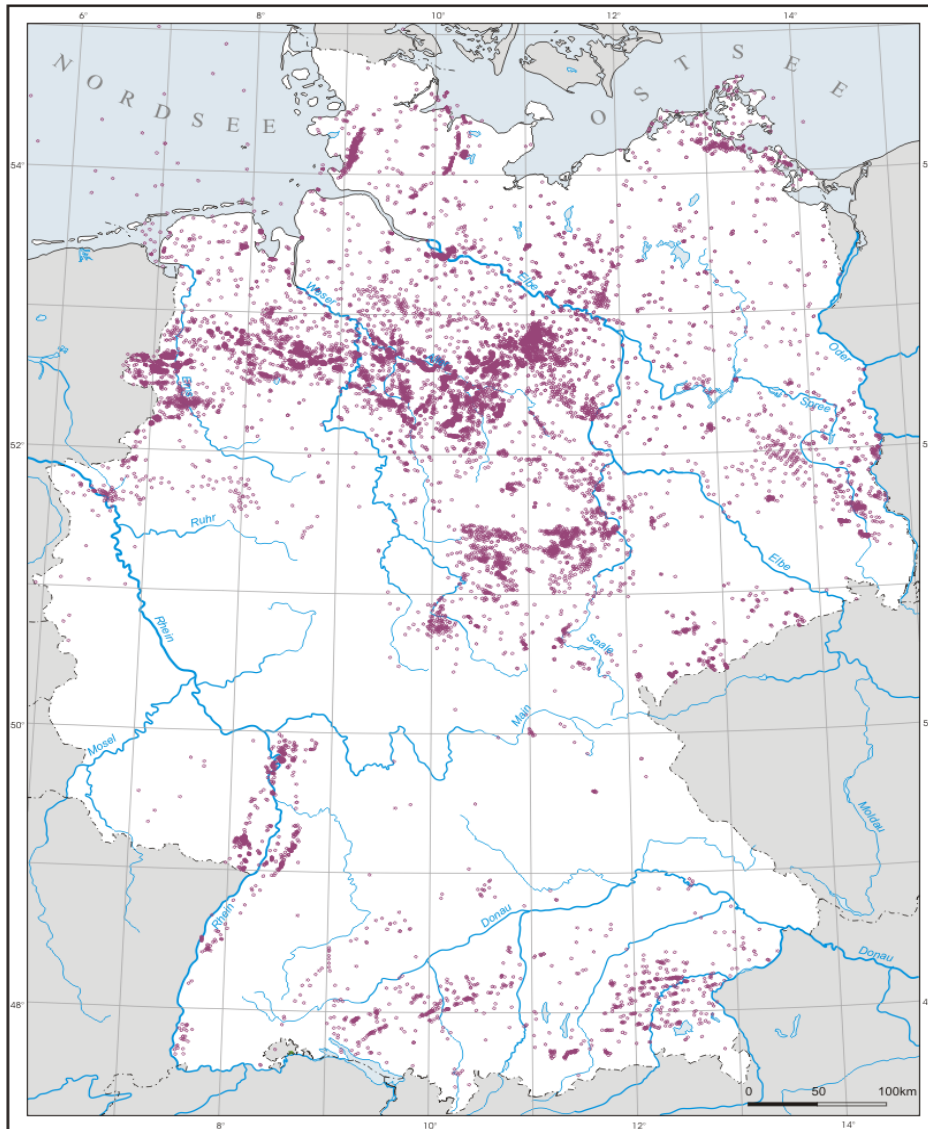


Abb. 3: Karte der Bohrungen (ca. 25 000) im Tiefenbereich >300 m (aus der „Tonstudie“ der BGR)

Lücken durch nicht zur Verfügung stehende digitale Datensätze wurden durch die Erfassung von Daten in anderen Formaten geschlossen. Dies betrifft einerseits nicht vorhandene Detailinformationen zu den Tongesteinsformationen und andererseits aber auch die Auswertung von tieferen Bohrungen mit anderem Erkundungsziel (z.B. Geothermie, Erzerkundung). Zusätzlich zu den Bohrungsdaten wurden die Ergebnisse wichtiger seismischer Profilmessungen mit einbezogen, sie bildeten zum Beispiel eine wichtige Grundlage für die Erfassung und Charakterisierung von Störungen und deren Tiefenreichweite. Auch die Korrelation von geophysikalischen Messergebnissen ermöglichte eine weitgehende Erfassung von endlagerrelevanten Parametern.

Die BGR-Tonstudie lieferte als Ergebnis keine Darstellung von Endlagerstandorten. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass mächtige und homogene Tongesteine, welche die Mindestanforderungen an Endlagerwirtsgesteine erfüllen, in der Unterkreide sowie in Gesteinen des Unter- und Mitteljura Norddeutschlands auftreten. In Süddeutschland

konnten stärker regional begrenzt Gesteine des Mitteljuras als untersuchungswürdig ausgewiesen werden. Die Tonformationen des Tertiärs wurden dagegen wegen ihrer ungünstigen mechanischen Eigenschaften in der BGR-Studie nicht weiter betrachtet.

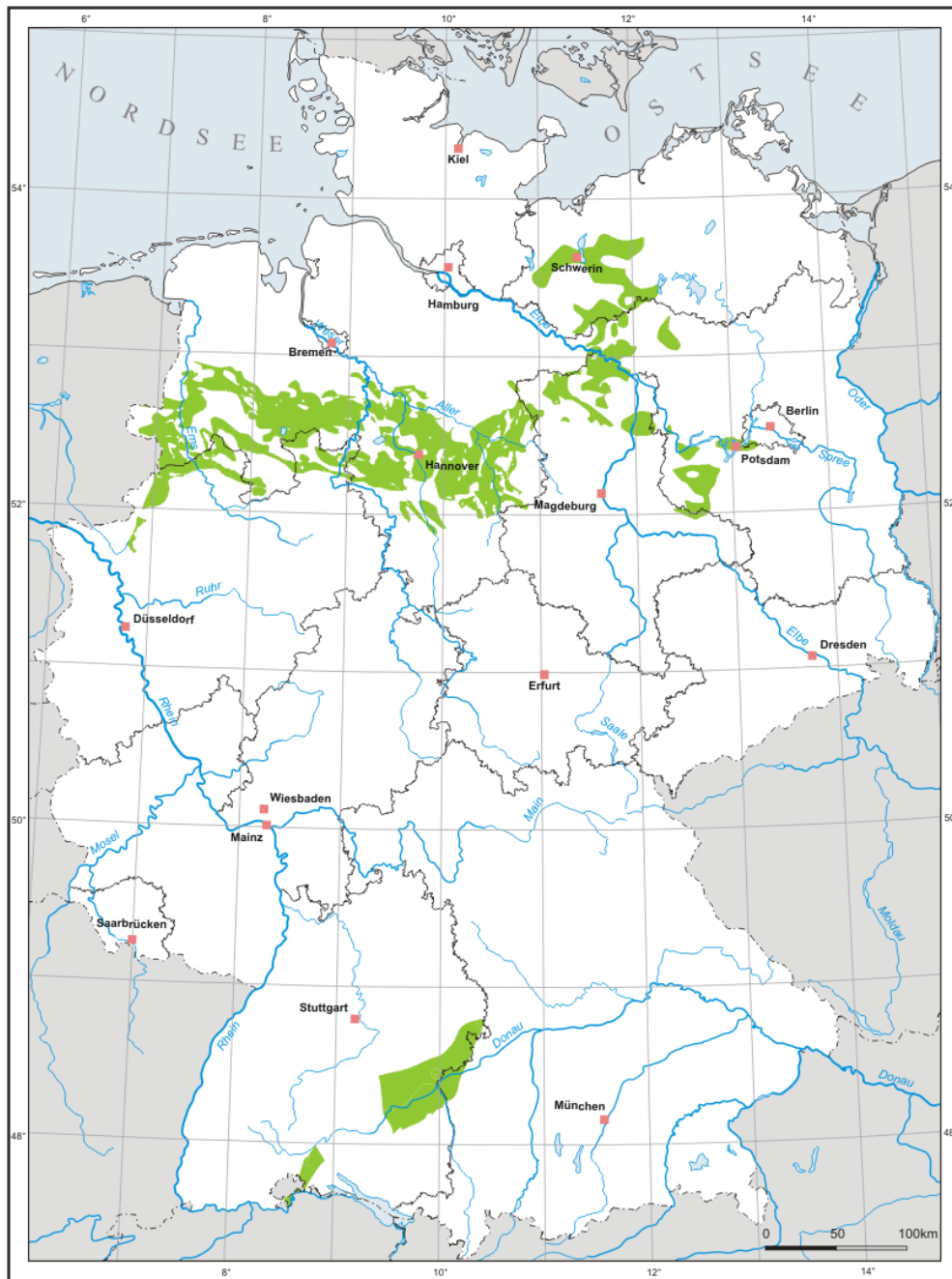


Abb. 4: Untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Deutschland (BGR 2007)

Geografisch und raumordnerisch gesehen liegen die ausgewiesenen Teilgebiete vor allem in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg und untergeordnet auch in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass eine weitere Eingrenzung der ausgewiesenen Teilgebiete im Sinne einer Standortauswahl nur mit einem sehr aufwändigen Erkundungsprogramm möglich ist.

Eigenschaften von Steinsalz

International werden im Rahmen der einzelnen Endlagerkonzepte im Wesentlichen Tongesteine, Steinsalz und Kristallingesteine als mögliche Endlagerwirtsgesteine untersucht. Schon Ende der 50-iger Jahre gab es in Deutschland Überlegungen über die Endlagerung in Salzgesteinen. Aufgrund jahrzehntelanger Forschung und über hundertjähriger Erfahrung im Salzbergbau wurde inzwischen ein umfangreiches Wissen zu den endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz und Salzformationen erarbeitet.

<i>Eigenschaft</i>	<i>Steinsalz</i>	<i>Ton/Tonstein</i>	<i>Kristallingestein (z. B. Granit)</i>
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

Abb. 5: Eigenschaften möglicher Wirtsgesteine in Deutschland

Unter natürlichen Lagerungsbedingungen ist Steinsalz praktisch undurchlässig gegenüber Gasen und Flüssigkeiten. Steinsalz besitzt zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie viskoplastische Eigenschaften, die zum Verschluss von Hohlräumen im Gebirge führen. Aufgrund dieser günstigen Eigenschaften ist Steinsalz insbesondere als Wirtsgestein für Wärme entwickelnde hochaktive Abfälle (HAW) sehr gut geeignet.

Eigenschaften von Kristallingesteinen

Neben den Salzformationen wurden im Rahmen der BGR-Studien Kristallinvorkommen in ihrer räumlichen Ausdehnung und ihren spezifischen Eigenschaften in Deutschland untersucht. Kristallingesteine (Granite und metamorphe Gesteine) zeichnen sich besonders durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit aus. Auch ihr sehr geringes Lösungsverhalten ist für die Endlagerung günstig. Während die Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im ungeklüfteten Zustand meist sehr gering ist, weisen diese Gesteine im geklüfteten Zustand deutlich höhere bis sehr hohe Durchlässigkeiten auf. In diesem Fall ist der dichte Einschluss der Abfälle nur durch Hinzuziehung geeigneter, technischer Barrieren (Behälter, Bentonit-Versatz) zu gewährleisten.

Eigenschaften von Tongesteinen

Tongesteine weisen eine Bandbreite, vom plastischen Ton mit Übergangsformen bis zum stark verfestigten und z. T. geklüfteten Tonstein, auf. Dabei können erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität auftreten. Die bisher bekannten, für die Endlagerung günstigen Eigenschaften der Tongesteine sind insbesondere die sehr geringe Durchlässigkeit und die hohe Sorptionsfähigkeit. Tongesteinsformationen haben als abdeckende, dichte Schichten z. B. für Kohlenwasserstoff-Vorkommen ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere nachgewiesen.

Konsequenzen für die Endlagerkonzepte

Als Konsequenz der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften sind die Endlagerkonzepte im Steinsalz, in Tongesteinen und in Kristallingesteinen ebenfalls unterschiedlich. Das Endlagerkonzept für Steinsalz basiert aufgrund der Undurchlässigkeit und der Kriecheigenschaften des Steinsalzes auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle. Im Hinblick auf die Qualität der Bewertung zugrunde liegenden Daten gilt generell, dass die standortspezifischen Kenntnisse über die Steinsalzvorkommen in Deutschland im Vergleich zum Kenntnisstand über Tongestein- und Kristallinvorkommen wesentlich größer sind. Eine umfassende Wissensbasis der Eigenschaften der Salzgesteine sowie erprobte Erkundungsmethoden und -verfahren sind vorhanden.

Im Vergleich zu Steinsalz sind die Kenntnisse über Tongesteinsformationen u. a. auch wegen der geringen Bergbauerfahrung geringer. Beim Endlagerkonzept mit Tongesteinen als Wirtsgestein darf die durch die Abfallwärme hervorgerufene maximale Gebirgstemperatur wegen der möglichen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der Tonminerale insbesondere infolge von Mineralumbildungen eine Temperatur von 100 °C nicht überschreiten (zum Vergleich Steinsalz: 200 °C). Dies bedingt eine längere Zwischenlagerzeit, ein für Deutschland neu zu entwickelndes Endlagerkonzept mit einem wesentlich erhöhten Platzbedarf sowie ein neues Behälterkonzept. In Tongesteinen sind zudem Sicherungsmaßnahmen (Spritzbeton, Ankerung und evtl. Ausbau) für die untertägigen Hohlräume notwendig, wobei dann die Gasbildung und das veränderte chemische Milieu zu berücksichtigen sind.

Kristallingesteine besitzen eine sehr hohe Festigkeit. Untertägige Hohlräume sind daher für den Betrieb von Zugangs- und Einlagerungsstrecken in der für die Endlagerung relevanten Tiefe im Allgemeinen ohne Ausbau standsicher. Obwohl kristalline Gesteine

selbst keine hohen Temperaturempfindlichkeiten aufweisen, gelten die Einschränkungen in Bezug auf die maximal mögliche Temperaturbelastung wie bei den Tongesteinen, da die Einlagerungsstrecken mit Bentonit als zusätzliche Barriere versetzt werden müssen. Dies bedingt im Vergleich zur Einlagerung in Steinsalz einen erheblich höheren Platzbedarf und Aufwand.

Endlagerkonzept	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 – 1200 m
Lagerungstechnik	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Temperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C
Versatzmaterial	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 – 40 Jahre	min. 30 – 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzepte	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

Abb. 6: Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Internationale Forschungsarbeiten zur Endlagerung

International sind deutsche Forschungseinrichtungen in die Untersuchungen in zahlreichen Untertage-Laboratorien eingebunden, z. B. in Frankreich (Meuse/Haute Marne), in der Schweiz (Mt. Terri, Grimsel) und in Schweden (Äspö). Ziel dabei ist es, Erkenntnisse über die unterschiedlichen Wirtsgesteine zu erlangen und Methoden für die Untersuchungen im eigenen Land zu entwickeln. Der dabei notwendige große Aufwand dient auch dazu, die eigenen Untersuchungsergebnisse international abzusichern. Die internationalen Projekte bilden eine hervorragende Basis um die Schwerpunkte der deutschen Endlagerforschung, die zukünftig im Wesentlichen in Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen liegen und die die weitere Charakterisierung von Tongesteinen als Alternative zu Steinsalz als Wirtsgestein zum Thema haben, zu bearbeiten.

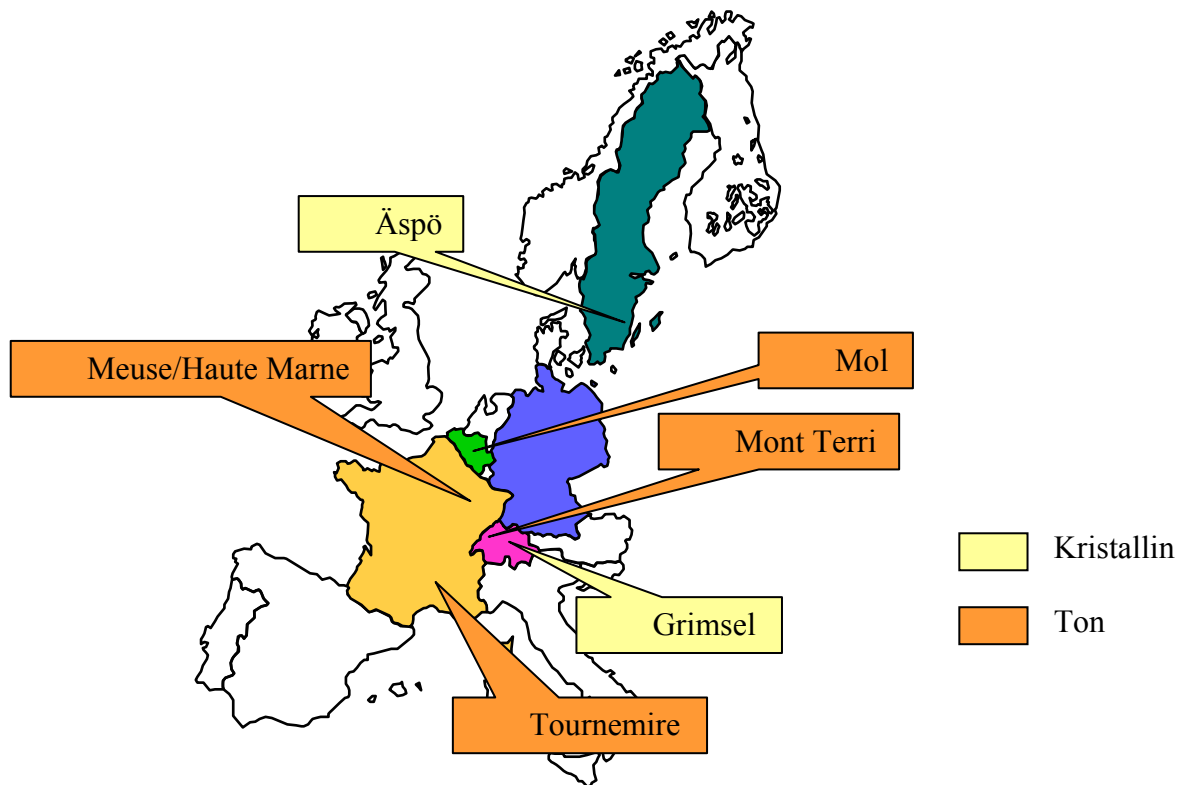


Abb. 7: Die Untertage-Laboratorien mit Beteiligung der BGR

Ausblick

Obwohl die Untersuchungen und Forschungsarbeiten auf dem Weg zu einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle schon sehr weit gediehen sind, ist die Frage der Standortbestimmung nur in den wenigsten Ländern weit fortgeschritten. In Deutschland ist dies im Wesentlichen damit begründet, dass die für die Bestimmung eines Standortes notwendigen politischen Entscheidungen nicht getroffen wurden und auch weiter ständig verschoben werden. Dieser politisch bedingte Stillstand bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wird in der Öffentlichkeit dergestalt interpretiert, dass für politische Entscheidungen offensichtlich noch keine ausreichenden wissenschaftlich-technischen Lösungen vorliegen. Um diesem Trugschluss entgegen zu treten, sollte es daher Aufgabe der Politik sein, die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse aufzugreifen und auch dem dringenden Wunsch der Öffentlichkeit nachzukommen, die Lösung der Endlagerfrage zügig anzugehen.

Literatur

AKEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).- 260 S., Köln.

Bräuer, V.; Reh, M.; Schulz, P.; Schuster, P.; Sprado, K.-H. (1994): Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen - 142 S., BGR, Hannover.

Eurobarometer (2005): "Radioaktive Abfälle", Eurobarometer Spezial 227/ Wave 63.2 - TNS Opinion & Social.

Hoth, P.; Wirth, H.; Reinhold, K.; Bräuer, V.; Krull, P.; Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen - 118 S., BGR, Hannover, Berlin.

Kockel, F.; Krull, P. (1995): Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen - 66 S., BGR, Hannover, Berlin.

Überblick über solarthermische Kraftwerke (vorgetragen von B. Hoffschmidt)

Bernhard Hoffschmidt, Spiros Alexopoulos

Solar-Institut Jülich (SIJ) FH Aachen, Aachen University of Applied Sciences,
Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich

Potenzial

"Vom physikalisch-technischen Gesichtspunkt aus gibt es keine Zweifel daran, dass solarthermische Kraftwerke eine der besten Optionen für die Bereitstellung der weltweit benötigten großen Mengen CO₂-freien Stroms darstellen. Will man diese besonders geeignete Technik nicht versäumen, müssen jetzt dringend die notwendigen Schritte getan werden." Zu diesem Schluss kommt die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) in einer 2005 veröffentlichten Studie in Anbetracht schwindender fossiler Brennstoffreserven und wachsender Probleme im weltweiten Klimawandel.

Und das ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass auf ein Quadrat von etwa 800 km x 800 km Fläche in der nordafrikanischen Sahara ein Solarstrahlungsanteil entfällt, der dem gesamten weltweiten Primär-Energiebedarf entspricht – unter Berücksichtigung eines Umwandlungswirkungsgrads von 10 %.

Betrachtet man die Edel-Endenergie "Elektrizität" in ihrem globalen Bedarf, so lässt sich sagen, dass nur etwa 1 % der Fläche der Sahara ausreichen würde, um mit solarthermischen Kraftwerken den gesamten derzeitigen Elektrizitätsbedarf der Erde zu decken (siehe Abbildung 1).

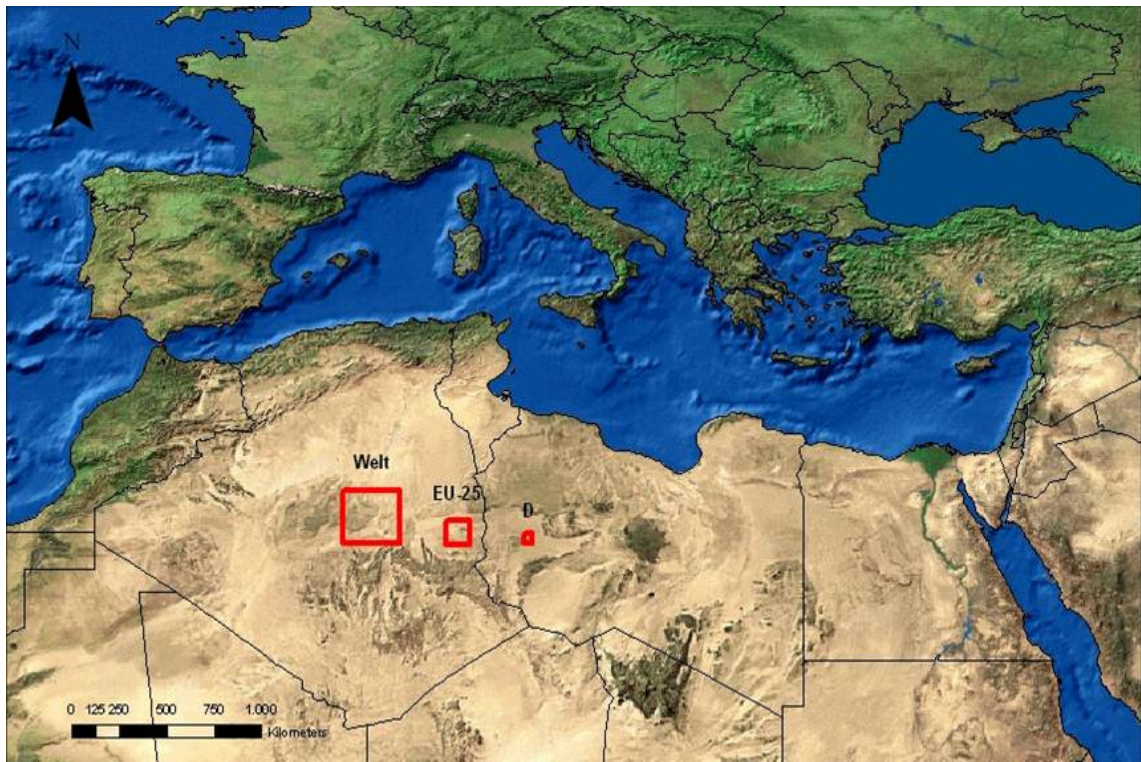


Abbildung 1: Potenzial der solarthermischen Kraftwerke

Und ein weiterer Vergleich: Ein solarthermisches Kraftwerk in der Größe des Nasser-Stausees (Assuan, ca. 5250 km² Fläche) entspricht gemäß einer fundierten Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. energetisch in etwa der Mineralölproduktion der Länder des Mittleren Ostens.

Solarthermische Kraftwerke stellen eine bedeutende Technologieoption für einen nachhaltigen Energiemix der Zukunft dar. Sie konzentrieren die Strahlung der Sonne, erzeugen Wärme und wandeln diese mit konventioneller Kraftwerkstechnik in Strom um. Die Wärme kann auch gespeichert werden, so dass der Betrieb während des Durchzugs von Wolken möglich ist und bis in die Abendstunden hinein verlängert werden kann.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit haben solarthermische Kraftwerke zumindest im Sonnengürtel der Erde eine gute Perspektive, mittelfristig erheblich zur nachhaltigen Energieversorgung beizutragen, da sie auf der einen Seite über ein riesiges Flächenpotential verfügen, das mit keiner alternativen Nutzung konkurriert, auf der anderen aufgrund ihres Kostensenkungspotentials in einem überschaubaren Zeitraum wirtschaftlich konkurrenzfähig zu fossilen Alternativen sein könnten.

Konzentrierende Solarsysteme können theoretisch deutlich höhere Temperaturen erreichen, ohne dass ihr thermischer Wirkungsgrad dabei deutlich sinkt. Nach dem Carnot-Gesetz bedeutet dies einen besseren Umwandlungswirkungsgrad des nachgeschalteten Kreisprozesses, so dass mit weniger Kollektorfläche dieselbe Menge an Elektrizität erzeugt werden kann. Da die Kosten der Kollektoren einen signifikanten Anteil an den Investitionskosten der Gesamtanlage darstellen, könnte mit dieser Strategie eine deutliche Kostensenkung erzielt werden.

Zu den solarthermischen Kraftwerken gehören neben der Parabolrinne und dem Solarturm, der Fresnel-Kollektor und die Dish-Sterling Maschine.

Parabolrinnenkollektoren könnten Temperaturen bis zu 550°C erzielen und damit ein kommerzielles Dampfkraftwerk optimal antreiben. Das heutzutage in kommerziellen Systemen verwendete Wärmeträgermedium Thermoöl ist allerdings in der Anwendungstemperatur auf 400°C beschränkt.

Turnsysteme können Temperaturen über 1000°C erzielen, da sie durch die zweiachsige Nachführung eine deutlich höhere Konzentration erzielen können. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, hocheffiziente Gas- und Dampfturbinen Kraftwerke solar zu betreiben, die erheblich höhere Wirkungsgrade und geringere spezifische Kosten als Dampfsysteme aufweisen.

Der Fresnel-Kollektor und die Dish-Sterling Maschine sind weitere viel versprechende solarthermische Technologien, die in Europa und USA erprobt werden.

Parabolrinne

Parabolrinnen-Kollektoren sind einachsige der Sonne nachgeführte konzentrierende Solarkollektoren. Ihre Einsatzgebiete sind größere Solarsysteme, bei denen die Betriebstemperaturen im Bereich von über 80°C bis mindestens 400°C liegen. Ihr Reflektor folgt der Form eines parabolischen Zylinders, der ideale Fokus ist eine gerade Linie, die Fokallinie. In der Position der Fokallinie befindet sich das sogenannte Absorberrohr, das die konzentrierte Strahlung absorbiert und so bei Temperaturen bis zu typischer Weise 400°C

an das hindurch strömende Wärmeträger-Fluid überträgt. An der Oberfläche des Absorberrohres herrschen Flussdichten der Sonnenstrahlung bis zur etwa 100-fachen Einstrahlung. Das Wärmeträger-Fluid ist Wasser/ Dampf, Thermo-Öl oder auch Salzschnmelze.

Um hohe Wirkungsgrade bei den Betriebstemperaturen zu erreichen, wird zusätzlich zu einer selektiven Beschichtung zur Isolation ein Vakuum zwischen innerem Absorberrohr und dem konzentrischen äußeren Glasrohr erzeugt. Der Reflektor muss mit ausreichender geometrischer Präzision und Widerstandsfähigkeit gegen alle aufkommenden Windlasten die einfallende Solarstrahlung effizient reflektieren. Eisenarmes Glas, einachsrig gekrümmt und mit rückseitiger Verspiegelung ist aufgrund der dauerhaft guten Reflektivität für das solare Spektrum und wegen bester Beständigkeit gegen Kratzer hervorragend geeignet.

Parabolrinnen-Kraftwerke sind die einzige langjährig kommerziell erprobte Technologie, Sonnenenergie in Großkraftwerken zu nutzen. Parabolrinnen-Kraftwerke werden in Kalifornien seit 1985 erfolgreich kommerziell betrieben. Zwischen 1984 und 1991 wurden insgesamt neun Rinnenkraftwerke mit einer installierten Gesamtleistung von 354 MW_e errichtet. Sie haben bereits über zwölf Milliarden Kilowattstunden Solarstrom produziert und damit umgerechnet etwa 12 Millionen Menschen ein Jahr lang mit Strom versorgt. Die Parabolrinnenkraftwerke in Kalifornien werden mit Thermoöl als Wärmeträgermedium betrieben, und auch die derzeit in Planung befindlichen kommerziellen Projekte basieren auf dem synthetischen Öl.

Wie bei konventionell befeuerten Kraftwerken, auch Atomkraftwerken, wird der Strom in Parabolrinnen-Kraftwerken mit einer Dampfturbine und angeschlossenem Generator erzeugt. Der benötigte Dampf wird allerdings nicht durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt, sondern mit Hilfe der Sonnenenergie. Die Solarstrahlung wird mit großen Reihen von Parabolspiegeln aufgefangen und gebündelt. Die gewonnene Hitze reicht aus, um den benötigten Dampf zu erzeugen. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel eines Parabolrinnenkollektors.



Abbildung 2: Beispiel einer Parabolrinne, Quelle: DLR

Direkt-verdampfende Kollektoren sind eine interessante Alternative zum Thermoöl. Vorteile liegen in der Möglichkeit höherer Frischdampftemperaturen. Damit verbunden sind höhere Prozesswirkungsgrade, Kostenvorteile sowie ökologische Vorteile.

Im Rahmen des EU geförderten Projekts DISS wurde auf der Plataforma Solar in Almeria ein 500 m langer Kollektorstrang und eine entsprechende Wasserdampfkonditionieranlage in Betrieb genommen. Die Testanlage ist so flexibel ausgelegt, dass alle drei ausgewählten Betriebskonzepte, nämlich Rezirkulation, Zwangsdurchlauf und Einspritzkonzept für die Dampferzeugung erprobt werden konnten. Es konnte gezeigt werden, dass die Direktverdampfung in Parabolrinnenkollektoren technisch beherrschbar ist.

Ein weltweit größter Standort für Parabolrinnen befindet sich in der Hochebene von Guadix - im südspanischen Andalusien. Dort stellen die 50-MW-Parabolrinnen-Kraftwerke AndaSol-1 und AndaSol-2 mit ihren Solarfeldern von je 562.440 m² mit Abstand die größten Solarkraftwerksprojekte in Spanien dar. Andasol 1 versorgt bis zu 200.000 Menschen mit klimafreundlichem Strom und spart im Vergleich zu einem modernen Steinkohlekraftwerk jährlich 149.000 Tonnen Kohlendioxid ein. Als Kollektor kommt der EuroTrough zum Einsatz, der mit Förderung der EU entwickelt wurde und der beim Forschungszentrum PSA (Plataforma Solar de Almería) erfolgreich getestet worden ist.

Der Parabolrinnen-Kollektor EuroTrough wurde für verschiedene Anwendungen im Temperaturbereich 200-400°C von einem europäischen Konsortium aus Industrie und Forschung entwickelt. Er basiert auf den jahrelangen Erfahrungen aus Kalifornien. Das erreichte Ziel der von der europäischen Kommission finanziell unterstützten Arbeiten war die Gewichts- und Kostenreduzierung bei gleichzeitiger Wirkungsgrad-Steigerung. Die Tragstruktur des Kollektors wurde unter Beibehaltung der bewährten Kollektorgeometrie als sogenannte Torque-Box ausgeführt. Die Fachwerkstruktur aus verzinktem Stahlrohr zeichnet sich durch geringes Gewicht, hohe Steifigkeit auch unter Windlast und Vorteile bei Fertigung, Transport und Montage aus. Die Konstruktion erlaubt die kostengünstige Aufstellung auf Geländen mit bis zu 3 % Neigung.

Die Apertur des Kollektors hat eine Breite von 5,8 m bei 100 oder 150 Metern Länge je Kollektor-Einheit. Die Spiegelfacetten von je ca. 2,5 m² sind zylinder-parabolisch mit der Brennweite 1,71 m aus eisenarmem Floatglas der Stärke 4 mm in einem Glasbiege-Ofen gefertigt. Das Absorberrohr ist zur Minimierung der thermischen Verluste mit einem Glashüllrohr und Vakuum versehen. Als Wärmeträger-Fluid kann Thermo-Öl oder Wasser/Dampf zum Einsatz kommen.

Neben Andasol 1 und den Schwesterprojekten Andasol 2 und 3 in Spanien befinden sich weitere Projekte mit einer Gesamtleistung von mehr als 2.000 Megawatt weltweit in Planung. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Regionen Spanien, USA, China und Nordafrika.

Solarturm

Die Entwicklung bei den Solarturmkraftwerken zielt darauf ab, die im Vergleich zu Parabolrinnen höhere Konzentration der Solarstrahlung dazu zu nutzen, den angeschlossenen Kraftwerksprozess bei höherer Temperatur und damit mit besserem Wirkungsgrad zu betreiben. Die höhere Temperatur stellt außerdem einen Vorteil bei der Speicherung der thermischen Energie dar, da weniger Speichervolumen pro kWh notwendig wird. Kurzfristig zielen die Entwicklungen darauf ab, die Wärme aus den

Solartürmen in Dampfkraftwerke einzukoppeln. Im Vergleich zu Parabolrinnen, die aufgrund der begrenzten Temperaturstabilität des Thermoöls mit Dampftemperaturen von max. 370°C arbeiten, lassen sich in Turmkraftwerken die üblichen Dampfstände konventioneller Kraftwerke (540-565°C) erzielen.

Unterschiedliche Wärmeträger können dabei eingesetzt werden. Während die amerikanische Industrie eine Salzschnelze als Wärmeträger und Speichermedium vorsieht, bevorzugt die europäische Industrie Luft oder Wasser/Dampf als Wärmeträger und nutzt Festbett-Schüttungen zum Speichern der thermischen Energie.

In solarthermischen Turmkraftwerken wird die Solarstrahlung mit Hilfe von Spiegeln gebündelt und auf einen Receiver gelenkt, der sich auf der Spitze eines Turmes befindet. Mit den dort entstehenden sehr hohen Temperaturen wird über einen Kraftwerksprozess Strom erzeugt.

In Jülich in Deutschland wurde das weltweit erste solarthermische Turmkraftwerk, das Luft als Wärmeträgermedium einsetzt, gebaut. Die Erstellung der ersten Versuchs- und Demonstrationsanlage in Jülich mit einer Leistung von 1,5 Megawatt erfolgte in Public Private Partnership von KAM als Generalunternehmer, den Stadtwerken Jülich als Betreiber und den Forschungseinrichtungen DLR sowie dem Solar-Institut Jülich für die wissenschaftliche Begleitung. Abbildung 3 zeigt ein Bild aus der Bauphase des Solarturmkraftwerks Jülich.



Abbildung 3: Bild aus dem Bau der Solarturmkraftwerks Jülich, Quelle: Stadtwerke Jülich

Die Anlagengröße wurde so gewählt, dass die Erfahrungen hinsichtlich Betrieb und Design der Anlage auf große Systeme mit einer Leistung von bis zu 100 MW_e für Anwendungen im Sonnengürtel der Erde übertragbar sind. Mit einer Spiegelfläche von

insgesamt etwa 18.000 m² wird Luft zur Erzeugung von Wasserdampf auf 680°C erhitzt, um mit dem Wasserdampf Strom zu erzeugen und in das öffentliche Netz einzuspeisen.

Das solarthermische Kraftwerk in Jülich dient als Referenz für zukünftige kommerzielle Projekte in den Solarmärkten Südeuropas und Nordafrikas. Das Solarturmprojekt wurde von den Ländern Nordrhein-Westfalen und Bayern sowie vom Bund gefördert.

Herzstück des Solarturmkraftwerks ist der Receiver. Dieser besteht aus einer Vielzahl von einzelnen quadratischen Absorbern aus einer speziellen porösen Keramik, die sich durch die einfallenden Sonnenstrahlen erhitzen. Umgebungsluft von außen und erkaltete Luft aus dem Luftkreislauf wird angesaugt und bis auf 700°C aufgeheizt. Die heiße Luft wird dann zur Erzeugung von Wasserdampf und zum Antrieb einer Turbine genutzt. Im letzten Schritt wandelt ein Generator die Rotationsenergie der Turbine in elektrischen Strom um, der auf der Mittelspannungsebene in das öffentliche Netz eingespeist wird.

Die erhitzte Luft kann auch einem thermischen Speicher, bestehend aus einem keramischen Festbett innerhalb eines isolierten Stahltanks, zugeführt werden. Wenn die Sonne nicht scheint, kann Wärme aus dem Speicher abgeleitet und wiederum Wasserdampf und damit Strom erzeugt werden. Zeitpunkt und Umfang der Stromeinspeisung sind auf diese Weise exakt berechenbar.

Bei dem Solarturmprinzip entfallen aufwändige Bodenarbeiten. Dieser Solarkraftwerkstyp lässt sich problemlos auch in hügeligem Gelände errichten, was die Suche und Auswahl geeigneter Standorte erheblich vereinfacht und die Einsatzmöglichkeiten steigert. In gebirgigen Regionen sind sogar Varianten ohne Turmkonstruktion denkbar, wenn das Receiversystem auf einer dem Spiegelfeld gegenüber liegenden Bergflanke eines Tales installiert wird.

Die in der jüngsten Vergangenheit entwickelten keramischen Bauteile des offenen volumetrischen Receivers ermöglichen deutlich höhere Prozesstemperaturen und damit prinzipiell höhere Solarabsorber- und Kreisprozesswirkungsgrade als sie bei Parabolrinnensystemen erreicht werden können. Daraus resultiert in dem Ziel der elektrischen Energieerzeugung auch grundsätzlich ein höherer exergetischer Gütegrad des Gesamtprozesses. Durch den Einsatz einfacher kostengünstiger Wärmespeicher können die Nutzzeiten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erweitert werden. Der primäre Wärmeträger Luft besitzt zwar eine geringere Wärmekapazität als Wasser oder Salzschmelze, ist aber unbegrenzt verfügbar, kostenlos, ungiftig und kann in dem Heißgaskreis praktisch drucklos und damit technisch absolut sicher und zuverlässig geführt werden. Darüber hinaus bleibt der Gesamtprozess leicht regelbar. Es sind keine aufwändigen Maßnahmen zur Haltung bestimmter Bereitschaftstemperaturen durch Begleitheizungen nötig. Die An- und Abfahrzeiten können kurz gehalten werden. Es fallen keine Schadstoffe an, die umständlich entsorgt werden müssten.

Und letztlich ist dieses technische Grundkonzept leicht "hybridisierbar", d.h. eine entsprechend erweiterte Kraftwerksanlage kann in Kombination mit einer Gasturbine auch gänzlich bedarfsorientiert betrieben werden. Wird hierzu Biogas verfeuert, bleibt die CO₂-Neutralität weitgehend erhalten.

Im Rahmen der Errichtung des Kraftwerks wurde auf etwa halber Höhe des Turms eine Möglichkeit geschaffen, parallel zum Kraftwerksbetrieb und nahezu ohne diesen zu beeinflussen, Experimente im Leistungsbereich 100-1000 kW durchzuführen. Demnächst werden Versuche im großen Maßstab parallel zum regulären Betrieb des solarthermischen Versuchskraftwerks auf der Forschungsplattform stattfinden können. Dies beschränkt sich nicht nur auf rein solarthermische Versuche, sondern umfasst aufgrund der Möglichkeiten,

die die Forschungsplattform bietet, auch solar-thermochemische Versuche, wie die Wasserspaltung zur Wasserstoffproduktion. Des Weiteren können im Rahmen der Begleitforschung und Optimierung des Kraftwerksbetriebs Prototypen, z.B. im Bereich der Heliostaten oder auch in der Receivertechnologie, erstmalig im größeren Maßstab erprobt und evaluiert werden. Auf der Forschungsplattform können somit Komponenten getestet werden, bevor sie in diesem Kraftwerk sowie in geplanten Nachfolgeprojekten eingesetzt werden. So bietet sich eine einmalige Kooperation von Anlagenbauer, Anlagenbetreiber und Forschung zur zielgerichteten Fortentwicklung der entscheidenden Komponenten und des Gesamtsystems solarthermischer Turmkraftwerke.

Ein weiteres thermisches Solarkraftwerk PS10, das Wasserdampf als Wärmeträgermedium verwendet, ging in Spanien mit 11 MW ans Netz und versorgt 10.000 Einwohner Sevillas mit Strom. Der Bau wurde im Jahr 2006 abgeschlossen mit einem über 100 m hohem Solarturm und ausrichtbaren Spiegelflächen (Heliostaten) in der Gesamtgröße von 100 Fußballfeldern. Der Solarturm PS10 war der erste kommerziell genutzte Solarturm in Europa. Die Energie wird durch eine Turbine erzeugt, die über Wasserdampf angetrieben wird. 624 riesige Heliostate, die dem Verlauf der Sonne folgen, fangen Solarenergie ein und lenken die Strahlen konzentriert auf einen Punkt am oberen Ende des Solarturms. Jeder Spiegel ist halb so groß wie ein Tennisplatz und das erhitzte Wasser hat eine Temperatur von bis zu 285°C.

Nahe Sevilla ist im Jahr 2009 ein weiteres Solarturmkraftwerk in Spanien errichtet worden. Mit einer Nennleistung von 20 Megawatt (MW) verfügt PS20 über die doppelte Kapazität des Vorgängermodells PS10 und soll genügend sauberen Strom für 10.000 Haushalte erzeugen. So können ungefähr 10.900 Tonnen CO₂-Emissionen vermieden werden, die bei der Stromerzeugung in herkömmlichen Kraftwerken anfallen würden.

In der Nähe von Sevilla in Andalusien wird ein mit einer Leistung von 19 MW_e kommerzielles Solarturmkraftwerk errichtet. „Solar Tres“ wird geschmolzene Salze zur Übertragung der Wärme im Inneren des Receivers statt des sonst in solarthermischen Parabolrinnenkraftwerken verwendeten Thermo-Öls benutzen. Am zentralen Receiver entstehen durch die Konzentration des Sonnenlichts Temperaturen von über 850°C, die das Salz auf etwa 565°C erhitzen.

In den USA wird das bislang größte Solarturmprojekt des Landes realisiert. Die Anlage entsteht im Ivanpah Solar Complex von BrightSource in der südkalifornischen Mojave-Wüste und soll ab Ende 2011 rund 35.000 amerikanische Haushalte mit Solarstrom versorgen.

Fresnel

Fresnel-Kollektoren bestehen aus der Sonne einachsigen nachgeführten Spiegelfacetten.

Die Spiegel sind parallel angeordnet und konzentrieren das Sonnenlicht auf ein mehrere Meter darüber liegendes Absorberrohr. Ein Sekundär-Reflektor oberhalb des Absorberrohrs lenkt zusätzlich Strahlung in die Brennlinie.

Im Absorberrohr zirkuliert als Wärmeträger Wasser, das verdampft und überhitzt werden kann. Die so gewonnene thermische Energie wird dann in einer Dampfturbine in Elektrizität umgewandelt.

Ein Kollektor zum Beispiel mit 24 Meter Breite und 1.000 Meter Länge könnte im Absorberrohr Dampf mit mehr als 500°C für eine Stromleistung von ca. 5 MW produzieren. Jede der 48 Spiegellamellen besteht aus einer Reihe von 500 Spiegeln mit 0,5 Meter Breite und 2 Meter Länge. Mehrere Kollektoren können zu Kollektorfeldern verschaltet werden, um Kraftwerksleistungen von mehreren hundert MW zu erreichen. Abbildung 4 zeigt einen Fresnel Kollektor.



Abbildung 4: Beispiel eines Fresnel Kollektors, Quelle: DLR

Bei den dafür erforderlichen Bauteilen handelt es sich zu einem hohen Anteil um kostengünstige Standardkomponenten, die fast weltweit verfügbar sind, eine hohe lokale Wertschöpfung ermöglichen und damit auch Wettbewerbsvorteile gegenüber Konkurrenztechnologien erwarten lassen.

Darüber hinaus ist die Fresnel-Technik unempfindlich gegen Windlasten und erlaubt eine hohe Landausnutzung. Ebenso wie Parabolrinnen fokussieren auch Fresnel-Kollektoren die direkte Solarstrahlung auf eine Brennlinie, um ein Absorberrohr zu erwärmen. Während die Parabolrinne derzeit noch weitgehend auf der Basis eines Thermoöls als Arbeitsmedium arbeitet, wird beim Fresnel-Kollektor Wasser direkt im Rohr verdampft.

Im Gegensatz zu Parabolrinnen-Kollektoren haben die Spiegel eine geringere Krümmung und sind dadurch preisgünstiger in der Herstellung. Der Strahlungsempfänger hat oberhalb des Absorberrohrs außerdem einen gewölbten Sekundärspiegel. Dieser lenkt

die Sonnenstrahlen, die den Absorber nicht direkt treffen, in einem zweiten Reflexionsschritt auf das Rohr.

Optimierungspotenziale im Bereich der Receiver- und der Sekundäroptik sowie unterschiedliche kommerzielle Konzepte wurden theoretisch untersucht. Technische und wirtschaftliche Voraussagen müssen jedoch über Demonstrationsprojekte verifiziert werden, denn der Verweis auf reale Referenzprojekte ist entscheidend für den kommerziellen Erfolg.

Zum Erreichen des technischen Nachweises unter realen Betriebsbedingungen wird derzeit auf der Plataforma Solar de Almería in Südspanien ein 100 m langer Kollektorstrang getestet. Diese Versuchs- und Demonstrationsanlage erbringt eine thermische Leistung von ca. 1 Megawatt. Eine Besonderheit dieser Demoanlage liegt in der hohen Temperatur des Arbeitsmediums. Während des Testbetriebs wurden erstmals Temperaturen von 450°C überschritten, um höhere Wirkungsgrade zu erzielen. Diese Temperaturen liegen dabei deutlich über der Grenze, die bei Parabolrinnenanlagen mit dem Wärmeträger Öl und anderen Kollektoren möglich sind.

Dish-Stirling

Dish-Stirling-Systeme sind Anlagen zur dezentralen solarthermischen Stromerzeugung, die direkte Sonnenstrahlung nutzen (siehe **Abbildung 5**). Ihre elektrische Leistung liegt typischerweise zwischen 5 und 50 kW. Durch diesen Leistungsbereich und die Möglichkeit, mehrere Systeme zu einer „Farm“ zusammenzuschalten, sind die Dish-Stirling-Systeme für einen weiten Einsatzbereich geeignet. Leistungen von 5 kW bis in den MW Bereich können damit abgedeckt werden und bieten einen Ersatz für die heute weit verbreiteten Diesel-Aggregate.



Abbildung 5: Beispiel eines Dish-Stirling-Systems

Eine rotationssymmetrisch parabolisch gekrümmte Konzentratorschale mit kurzer Brennweite bündelt Solarstrahlung auf den nahe seines Brennpunktes angeordneten Receiver mit der Stirlingeinheit. Da gerichtete (direkte) Solarstrahlung konzentriert wird, müssen Konzentrator und Stirlingeinheit kontinuierlich zweiachsig der Sonne nachgeführt werden. Der Receiver ist das Bindeglied zwischen Konzentrator und Stirlingmotor und damit ein hochbeanspruchtes Bauteil. Er absorbiert die Strahlung und führt sie als Hochtemperaturwärme dem Stirlingmotor zu, der sie über den Stirling-Kreisprozess in mechanische Energie wandelt. Ein direkt an die Kurbelwelle des Stirlingmotors gekoppelter Generator formt diese dann in elektrische Energie um.

Anfang und Mitte der 80er Jahre wurden in den USA in mehreren Projekten die ersten modernen Dish-Stirling-Anlagen mit 25 kW elektrischer Leistung gebaut. Heute wird weiter in den USA an der Markteinführung der Dish-Stirling-Technologie gearbeitet.

Auch in Europa wird an der Entwicklung von Dish-Stirling Systemen gearbeitet. Die Abbildung zeigt das Ergebnis einer von der EU geförderten EuroDish Anlage, die in drei Referenzländern aufgestellt und erprobt wurde. Sie leistet 10 kW und etwa 120 kWh an einem guten Sonnentag im Sonnengürtel der Erde.

Da der Konzentrator im Betrieb stets exakt auf die Sonne ausgerichtet sein muss, wird er in zwei Achsen beweglich montiert. Er hat einen 8,5 m Durchmesser und wird als dünnwandige Sandwichschale aus faserverstärktem Epoxidharz ausgeführt.

Die Jahresenergieausbeute wird beim EuroDish gesteigert, indem der Konzentrator rund 25 % über der Nennleistung des Stirlingmotors ausgelegt wurde. Deshalb muss zwar bei Einstrahlungen über 850 Watt pro Quadratmeter überschüssige Wärme abgeführt werden, aber der Motor arbeitet auch bei geringerer Einstrahlung mit hohem Wirkungsgrad.

Bislang existiert eine Reihe von Prototypen, die ihre Leistungsfähigkeit über etliche tausend Stunden Betrieb bereits nachgewiesen haben.

Die Kosten könnten am Ende der Lernkurve bei 10 bis 20 c/kWh liegen, also für netzferne Versorgungsaufgaben gut geeignet sein.

Zukünftige Marktentwicklung und Zukunftsperspektiven

Für den wirtschaftlichen Einsatz von solarthermischen Kraftwerken sind die sonnenreichen Gebiete im Sonnengürtel der Erde ideal.

Nach diversen Studien werden bis 2010 mindestens 2.000 MW an solarthermischen Kraftwerken auf der ganzen Erde installiert und bis 2020 mindestens 20.000 MW.

Alleine in Spanien sind 2009 an solarthermischen Kraftwerken 200 MW fertig gestellt oder im Bau. Nach Angaben von IDAE sind für die Jahre 2010 und 2011 jeweils ca. 850 MW an installierter Leistung geplant. Auch in den USA gibt es eine große Anzahl von solarthermischen Kraftwerken, die in Planung sind. Diese Daten zeigen einen stark wachsenden Markt mit Wachstumsraten über 50 % weltweit für den Zeitraum bis 2020.

Nach einer Studie von Greenpeace & EREC werden bis 2030 138.000 MW und bis 2040 267.000 MW an installierter Leistung vorhergesagt.

Die beteiligte Industrie schätzt, dass bei einem stetigen Ausbau auf etwa 15 bis 20 GW weltweit bis 2020 bei gleichzeitiger Fortsetzung von Forschung und Entwicklung die volle Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Mittellaststrom aus fossilen Energieträgern und bis 2030

gegenüber Grundlaststrom an guten Standorten erreicht wird. Insbesondere die Möglichkeit, kostengünstig Energiespeicher zu integrieren oder durch Zufeuerung von fossilen und biogenen Brennstoffen Strom bedarfsgerecht zu produzieren, erlaubt, langfristig sehr große Anteile der Stromerzeugung durch solarthermische Kraftwerke zu decken. Absatzgebiete für solarthermische Kraftwerktechnologien bestehen in den Sonnenregionen der Erde, wobei Nord-Afrika ein langfristiges Zielgebiet für Europa ist.

Neben den rasch wachsenden Energiemärkten im Sonnengürtel der Erde existieren schon heute die technischen Voraussetzungen, um den dort erzeugten Strom auch in Mitteleuropa zu nutzen, wenn entsprechende Netzwerkkapazitäten für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ausgebaut werden.

Nach der ESTELA Studie ist es möglich 20 GW von solarthermischen Kraftwerken in nordafrikanischen Staaten zu bauen, da die Technologie kommerziell verfügbar ist. Überdies wird solch ein Plan die industrielle Entwicklung der Nordafrikaregion fördern, weil viele Komponenten dort erzeugt werden können.

Abbildung 6 zeigt eine Vorhersage für den Ausbau solarthermischer Kraftwerke im Mittelmeerraum bis zum Jahr 2020.

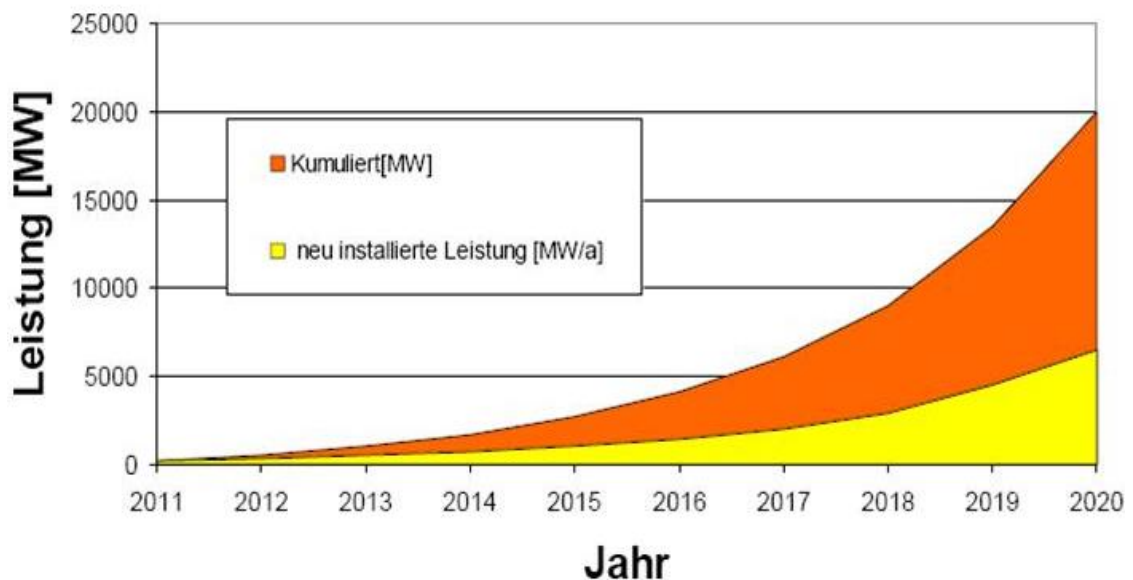


Abbildung 6: Ausbau solarthermischer Kraftwerke im Mittelmeerraum gemäß ESTELA

Ein großer Teil der in Nord-Afrika produzierten Elektrizität kann nach Europa transportiert werden. Eine solche Technologie wird bereits in vielen Off-Shore Projekten in Europa benutzt und es wird erwartet, eine weitere Verbesserung hinsichtlich der Preise und der Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Bibliographie

- R. Pitz-Paal, B. Hoffschmidt: Ziele bei der Entwicklung von solarthermischen Kraftwerken
Solarthermische Kraftwerke –Technologie und Perspektiven, FVS Themen 2002
- R. Pitz-Paal: Solarturmkraftwerkssysteme, FVS Themen 2002
- G. Eisenbeiß, M. Geyer: Solarenergie aus dem Sonnengürtel, SolarPACES, 2002
Solarthermische Kraftwerke, BINE Projektinfo, 2/1993
- S. Fischer: Sonnige Aussichten für solar thermische Kraftwerke, Energy 2.0, Mai 2009
- Jenseits von Spanien Das Solarthermische Versuchs- und Demonstrationskraftwerk Jülich,
38, DLR Nachrichten, 120
- F. Göhring, K. Hennecke, B. Hoffschmidt, M. Schmitz, P. Schwarzbözl: 500kW-
Forschungsplattform im Solarturm Jülich für Experimente mit hochkonzentrierter
Solarstrahlung
- D. Laing, W. Schiel, P. Heller: Dish-Stirling-Systeme, FVS Themen 2002
- R. Pitz-Paal, H. Müller-Steinhagen, W. Platzer: Strom aus solarthermischen Kraftwerken
- R. Pitz-Paal, W. Platzer: Solarthermische Kraftwerke – Europäische Potenziale
kostengünstig erschließen, FVS Themen 2006

Energieeffiziente Gebäudehüllen: Neue Materialien und Komponenten (vorgetragen von U. Heinemann)

Dr. Ulrich Heinemann, Dr. Helmut Weinläder, Dr. Hans-Peter Ebert

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., ZAE Bayern

Abstract

Energieeffizienzmaßnahmen speziell in Wohngebäuden setzen vor allem und zu aller erst an einer Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle an. Neben dem verstärkten Einsatz konventioneller Dämmmaterialien können neue Materialien und Komponenten weitergehende Lösungen bieten, die insbesondere unter dem Gesichtspunkt des hierfür benötigten Raums effizienter sind, aber auch neue technische und gestalterische Möglichkeiten eröffnen.

Konventionelle Dämmstoffe.

Der aktuelle Dämmstoffmarkt im Bauwesen wird im Wesentlichen von zwei Produktgruppen dominiert: Minerale Dämmstoffe (55%) und organische Schäume (41%); letztere untergliedert in EPS-Hartschaumdämmstoffe (30%), Polystyrol-Extruderdämmstoffe XPS (6%) und PUR-Hartschaumdämmstoffe (5%) (Stand 2005, Quelle: GDI). Andere Dämmstoffe wie Perlite, Schaumglas oder solche aus nachwachsenden Rohstoffen fallen mit insgesamt etwa 4% kaum ins Gewicht. Die Wärmeleitfähigkeit dieser konventionellen Dämmstoffe liegt typischer Weise im Bereich 0.035 bis 0.040 W/(m·K), bei PUR-Schäumen bei etwa 0.030 W/(m·K). Je kleiner dieser Wert ist, umso besser ist die Wärmedämmeigenschaft.

Wärmetransportmechanismen, Beiträge der einzelnen Mechanismen, Verbesserungs- und Optimierungsansätze.

Ganz allgemein ist Wärmetransport die Gesamtheit des durch einen Temperaturgradienten hervorgerufenen Energietransports. Er setzt sich prinzipiell zusammen aus Wärmetransport durch Konvektion, Wärmeleitung und Infrarotstrahlungstransport. Konvektion zu unterdrücken ist die primäre Aufgabe eines jeden Wärmedämmmaterials. Da ruhende Luft im Vergleich zu Festkörpern eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist, sind Dämmstoffe im Allgemeinen hochporös. Je geringer die Dichte, umso weniger trägt Wärmeleitung über das Festkörpergerippe zum Gesamttransport bei. Da mit geringerer Dichte der Wärmetransport über Strahlung zunimmt, sind für eine Gesamtoptimierung der Verringerung des Materialeinsatzes Grenzen gesetzt. Bei den im Bauwesen eingesetzten konventionellen Dämmstoffen wird der Gesamtwärmetransport dementsprechend durch die Wärmeleitung des Gases in den Hohlräumen dominiert (Anteil größer als 60%). Verbesserungen der Dämmeigenschaften setzen insbesondere an einer Verringerung dieser Gaswärmeleitfähigkeit an. Die bessere Dämmeigenschaft von PUR-Schäumen ist so auf andere Gase in den geschlossenen Zellen zurückzuführen. Der für die Praxis anzusetzende Dämmwert berücksichtigt jedoch die durch den Austausch der Zellgase und der umgebenden Luft hervor gerufene Verschlechterung. Durch diffusionshindernde Deckschichten kann diese Degradation erheblich verringert werden. Verbesserungen bei den EPS-Schäumen setzen an dem Infrarotstrahlungstransport an. Aufgrund spezieller

Infrarot-Trübungsmittel konnte so die Dämmwirkung verbessert oder bei gleicher Wärmeleitfähigkeit der Materialeinsatz auf die Hälfte reduziert werden.

- **Nanostrukturierte Materialien.**

Bei Porengrößen unter ca. 1 μm wird der Wärmetransport der Gasmoleküle weniger durch die Anwesenheit anderer Gasmoleküle behindert, sondern in zunehmendem Maße je kleiner die Poren durch die Vielzahl von Zellwänden oder anderer Strukturelemente. Bei ausreichend niedriger Gesamtdichte eines Dämmmaterials lässt sich so der magische Schwellwert der Wärmeleitfähigkeit von ruhender Luft von 0.025 W/(m·K) unterschreiten. Die Wärmeleitfähigkeit von Pulverpresslingen aus pyrogener Kieselsäure oder aus in nass-chemischen Verfahren hergestellten Silikat-Aerogelen ist mit etwa 0.018 W/(m·K) nur **etwa halb so groß** wie die herkömmlicher, mit Luft gefüllter Dämmstoffe. Im Vergleich zu diesen SiO₂-basierten Materialien bieten auf Nanometerskala strukturierte organische Schäume weitere Verbesserungspotentiale.

- **Vakuumisolationspaneele (VIP).**

Vakuumisolationspaneele sind Dämmelemente, welche prinzipiell aus einer Vakuumschicht und einem Füllmaterial bestehen. Während bei den bekannten Vakuum-basierten hocheffizienten Wärmedämmungen wie Thermoskannen zylindrische Gehäuse in der Lage sind, den äußeren atmosphärischen Belastungsdruck von 1 bar zu tragen – dieser entspricht einer Gewichtslast von 10 t/m² –, müssen bei flachen Vakuumisolationspaneelen druckstabile Füllmaterialien oder Strukturen die entsprechenden Druckkräfte aufnehmen. Besonders in der Kombination von nanostrukturierten Füllmaterialien auf der Basis von pyrogener Kieselsäure (SiO₂) mit den geringsten Anforderungen an die Qualität des Vakuums und den dichtesten heute verfügbaren Kunststoffhochbarrierelaminaten ergeben sich VIP-Produkte mit Funktionsdauern von mehreren Jahrzehnten, wie sie im Bauwesen gefordert sind. Gegenüber nicht-evakuierten Dämmungen bieten diese bei gleicher Dämmstärke eine um einen **Faktor 5 bis 10** bessere Dämmwirkung. Somit werden schlanke, raumsparende und hocheffiziente Dämmbauten für unterschiedliche Einsatzbereiche im Neubau, insbesondere aber auch für Maßnahmen im Bestand möglich.

- **Vakuumisolierglas (VIG).**

Die thermischen Schwachstellen auch bei gut wärmegeämmten Gebäuden liegen im Bereich der Fenster. Der Wärmedurchgang selbst von exzellenten Fenstern mit einem U_w-Wert von 0.8 W/(m²K) ist um einen Faktor 5 schlechter als der von den angrenzenden gut gedämmten Wänden mit einem U-Wert von z.B. 0.15 W/(m²K). Ähnlich wie bei den opaken Dämmelementen VIP bietet auch hier die Evakuierung (des Scheibenzwischenraums) ein enormes Verbesserungspotential bzgl. der Dämmwirkung (**Faktor 2**). Die technischen Herausforderungen bestanden in der Entwicklung von Stützen, die in der Lage sind, die externe Last aufzunehmen, sowie in einem ausreichend dichten und doch thermisch stabilen Randverbund. Beide sollten nicht nennenswert zum Gesamtwärmetransport beitragen. Bei einer Gesamtstärke von nur 9 mm, einem Gewicht entsprechend dem der Zweifachverglasung werden Dämmwerte erreicht, die besser sind als die einer Dreifachverglasung.

- **Transparente Wärmedämmung (TWD).**

Transparente Wärmedämmungen zeichnen sich unter den Dämmmaterialien und Dämmsystemen durch eine hohe Lichtdurchlässigkeit (Transluzenz) aus. Je nach Anwendung steht der Gewinn blendfreien Lichtes oder die thermische Nutzung solarer Einstrahlung im Vordergrund. Die Wärmeleitfähigkeit von TWDs in der Form von Kapillarplatten mit einer Vielzahl senkrecht zur Oberfläche orientierter dünnwandiger Röhren oder in Form von hintereinander liegenden Dreifachstegplatten ist im Vergleich zu konventionellen, nicht transparenten Dämmmaterialien mit einem Faktor 2 bis 2.5 größer. Durch den Einsatz nanostrukturierter Silikat-Aerogele in granularer Form lässt sich die Wärmeleitfähigkeit auf etwa 0.025 W/(m·K) deutlich reduzieren. In der praktischen Anwendung von TWDs ist jedoch der sommerliche Überhitzungsschutz zu beachten.

- **Schaltbare Wärmedämmung (SWD).**

Einen Ansatz für solch einen Überhitzungsschutz bietet die Schaltbare Wärmedämmung. Sie basiert auf einem Vakuumisulationspaneel in der Ausführungsform mit Edelstahlhülle und relativ grobem Füllmaterial (Glasfasern). Zusätzlich ist in das VIP eine beheizbare Kapsel mit einem mit Wasserstoff beladenen Metallhydridgetter integriert. Durch Aufheizen des Getters wird eine geringe Menge des gut wärmeleitenden Wasserstoffgases freigesetzt und damit die Wärmeleitfähigkeit des Elementes um einen Faktor 100 erhöht. Aus einem hochwärmedämmenden wird ein gut wärmeleitendes Element. Der Prozess ist reversibel; lässt man die Getterkapsel abkühlen, so wird der Wasserstoff wieder vom Getter aufgenommen. Bei fehlender solarer Einstrahlung oder bei unerwünschtem Wärmeeintrag im Sommer bleibt das Paneel passiv und im hoch wärmedämmenden Zustand. Lediglich in der Heizperiode bei gleichzeitigem Wärmebedarf und solarem Angebot wird das Paneel wärmeleitend geschaltet und die Wärme in das Gebäude hereingelassen. Die hierfür benötigte elektrische Leistung beträgt lediglich 5 W/m².

Weitere Informationen zum Thema erhalten Sie bei:

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., ZAE Bayern
Am Hubland
97074 Würzburg
Telefon: 0931 / 70564-0
E-Mail: ulrich.heinemann@zae.uni-wuerzburg.de
Internet: www.zae-bayern.de, www.vip-bau.de

Die geologische CO₂-Speicherung in Deutschland – Möglichkeiten und Herausforderungen angesichts konkurrierender Nutzungsansprüche (vorgetragen von K. Reinhold)

Klaus Reinhold¹, Johannes Peter Gerling²

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin, Wilhelmstraße 25-30, D-13593 Berlin, k.reinhold@bgr.de

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geozentrum Hannover, Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Der weltweite Energiebedarf – insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern – wird laut Prognosen von beispielsweise der IEA bis zum Jahr 2030 noch einmal um etwa 50 % wachsen. Auch wenn man bereits in vielen Regionen der Welt eine hohe Wachstumsrate beim Einsatz der erneuerbaren Energien verzeichnen kann, sind die absoluten Anteile an der weltweiten Energieversorgung weiterhin gering. Im Umkehrschluss ist zu folgern, dass die Energieversorgung auch zukünftig zu großen Anteilen auf den fossilen Energieträgern Erdöl, Erdgas und Kohle fußen wird. Wegen ihren dominierenden Anteilen an Reserven und Ressourcen, ihrer geostrategisch gleichmäßigen Verteilung und dem bisher deutlich geringeren Preis gegenüber Erdöl und Erdgas wird die Kohle vermutlich wieder zunehmend in den Vordergrund rücken. Aus Sicht des Klimaschutzes ist diese Entwicklung nicht besonders erfreulich, da Kohle – und hier insbesondere die Braunkohle – den vergleichsweise höchsten CO₂-Ausstoß pro erzeugter Energieeinheit hat.

Für den Standort Deutschland kann man davon ausgehen, dass der Primärenergieverbrauch in den kommenden Dekaden nicht weiter anwachsen wird. Jedoch ist angesichts der Tatsachen, dass bei uns Kohle mit einem Anteil von nahezu 50 % der führende Energieträger in der Stromerzeugung ist und wir den Ausstieg aus der Kernenergie vollziehen, ist in Deutschland von einem wieder steigenden Kohlestromanteil auszugehen – trotz weiterhin hohen Wachstumsraten der erneuerbaren Energien.

Neben Effizienzverbesserungen, Verbrauchsreduktionen und dem wachsenden Anteil der erneuerbaren Energien ist die Abtrennung von CO₂ aus den Verbrennungsgasen großer Industrieanlagen und eine nachfolgende dauerhafte geologische CO₂-Speicherung eine der Handlungsoptionen um einen Einklang zwischen Klimaschutz und weltweit wachsendem Energieverbrauch herzustellen. Für eine dauerhafte CO₂-Speicherung in geologischen Schichten des tiefen Untergrundes sind zum einem fundierte Kenntnisse zur Geologie erforderlich, zum anderen müssen wirtschaftliche, technologische und rechtliche Aspekte berücksichtigt werden.

Das Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“ bewertet die bekannten geologischen Fakten hinsichtlich einer möglichen dauerhaften CO₂-Speicherung. Die geologischen Voraussetzungen dafür sind:

- die Existenz eines Speicherhorizontes mit ausreichender Aufnahmefähigkeit (Speicherkapazität) in einer Fangstruktur,
- ein darüber befindliches Barrieregestein mit sicherer langzeitwirksamer Abdichtung und Festigkeit gegenüber erhöhten Lagerstätten- bzw. Schichtdrücken,
- die Verträglichkeit des zu speichernden Mediums (CO₂, ggf. mit Fremdstoffen) mit den Lagerstättenmedien und dem Speichergestein.

Informationen über die Verbreitung und Ausbildung nutzbarer Speicher- und Barrieregesteine und ihrer geologisch-petrophysikalischen Eigenschaften stellen die staatlichen geologischen Dienste (SGD) der Länder und die BGR zusammen. Insbesondere die Datenbestände und Erfahrungen der Erdöl- und Erdgasexploration sowie Ergebnisse anderer lagerstättenkundlicher Untersuchungen sind grundlegende Informationen. Das gemeinsame Projekt aller SGD Deutschlands und der BGR bündelt die Kompetenzen für die weitergehende Klärung der Untergrundverhältnisse gebündelt. Unter Berücksichtigung bestehender Nutzungen des Untergrundes werden Informationen über potenziell geeignete, natürliche Speicherräume für eine dauerhaft sichere Speicherung von CO₂ ausgewertet. Die zwei wichtigsten geologischen CO₂-Speicheroptionen in Deutschland sind entleerte Erdgaslagerstätten und tiefe saline Aquifere. Regionalgeologisch findet man das überwiegende Potenzial im Norddeutschen Becken. Mit einer Sedimentmächtigkeit von mehr als 10.000 m im Beckenzentrum und einer Ausbreitung über den gesamten Norddeutschen Raum besitzt es schon jetzt große Bedeutung für die geotechnische und energetische Nutzung des tieferen Untergrundes. Darüber hinaus gibt es CO₂-Speicherpotenzial im Molassebecken nördlich der Alpen, im Oberrheingraben, im Saar-Nahe Becken, in der Thüringer Senke, in der Münsterländer Oberkreidemulde und in der Hessischen Senke.

In Deutschland wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Geotechnologien zur Nutzung des tieferen Untergrundes realisiert. Die für die CO₂-Speicherung infrage kommenden tiefen Sandsteinaquifere werden lokal beispielsweise als Untertage-Gasspeicher, als tiefegeothermische Reservoirs oder für die Verpressung von Salzen genutzt. Heutige energiewirtschaftliche und klimapolitische Herausforderungen sowie die technologischen Entwicklungen führen dazu, dass das Interesse an der Nutzung des tiefen Untergrundes zunimmt. Die Bewertung eventueller zukünftiger Nutzungskonflikte erfordert dabei die Erarbeitung geowissenschaftlicher Methoden und Grundlagen. Diese müssen geeignet sein, die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Nutzungsarten räumlich und zeitlich zu bestimmen. Die grundlegenden Stoffgesetze und numerische Modellierungsverfahren sind vorhanden. Das Verständnis der Interaktionen thermomechanischer, hydraulischer und geochemischer Prozesse bedarf weiterer Untersuchungen. Auch reicht der bisherige geologische Kenntnisstand nicht aus, um regionale Prognosen über zukünftige Nutzungskonflikte im Kontext mit der dauerhaften CO₂-Speicherung zu quantifizieren. Benötigt werden Kriterien zur wirtschaftlichen und nachhaltigen Nutzungen des Untergrundes. Diese müssen geowissenschaftlichen Standards entsprechen und durch den Gesetzgeber geregelt werden. Die Ergebnisse des Projektes „Speicher-Kataster Deutschland“ sollen der qualifizierten Information von Politik, Öffentlichkeit und Wirtschaft dienen. Sie sind damit Grundlagen für die weitere geotechnische und energetische Nutzung des tieferen Untergrundes von Deutschland.

Internationaler Entwicklungsstand bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse von Kernkraftwerken (vorgetragen von L. Weil)

H. P. Berg, L. Weil

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Postfach 10 01 49, 38201 Salzgitter

Kontakt: hberg@bfs.de

Zusammenfassung

Probabilistische Sicherheitsanalysen werden weltweit als ergänzendes Instrument zu deterministischen Analysen für die Bewertung des Sicherheitsniveaus industrieller Anlagen, insbesondere von Kernkraftwerken, eingesetzt.

Dies hat dazu geführt, dass auf der Ebene internationaler Organisationen wie der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) oder der OECD/NEA die Anwendung probabilistischer Sicherheitsanalysen in Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren behandelt und fortentwickelt wird. Das betrifft z.B. die derzeit entwickelten Leitfäden (Safety Guides) zur PSA der Stufe 1 bzw. zur PSA der Stufe 2 bei der IAEA in Wien oder technische Papiere und Statusberichte der CSNI-Arbeitsgruppe der OECD/NEA zu verschiedenen Anwendungsfeldern der PSA.

Darüber hinaus wird ein Überblick gegeben, in welchen Ländern die PSA routinemäßig eingesetzt wird und auf welchen Regelungen sich diese Länder abstützen (z.B. IAEA Safety Series-Dokumente oder nationale Regelwerke).

Dabei sind die nationalen Vorgehensweisen zur Integration der Erkenntnisse aus der PSA in die Sicherheitsbeurteilung eher uneinheitlich. Einige Länder betonen die strikt komplementäre Rolle der PSA, andere verfolgen eine mehr risikoorientierte Vorgehensweise, wenige Länder wie z.B. die Niederlande, Großbritannien oder Australien haben übergreifende Risikokriterien formuliert, die zum Teil nur für die Kerntechnik definiert wurden oder – wie in den Niederlanden – die für alle technischen Fragestellungen und Projekte gelten, wobei in diesen Fällen eine Umsetzung in kerntechnische Anforderungen notwendig ist. An diesen Bewertungskriterien werden die Ergebnisse der PSA gespiegelt.

1. Einleitung

In der Folge der Festschreibung der gesetzlichen Pflicht für den Betreiber eines Kernkraftwerks zur Durchführung einer Sicherheitsüberprüfung im Atomgesetz in § 19a im Jahre 2002 wurden die grundlegenden Aufgaben, Ziele und Anforderungen an eine probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) unter Orientierung am gegenwärtigen internationalen Stand und Empfehlungen fortgeschrieben und im behördlichen Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) – bekannt gegeben am 30. August 2005 durch das BMU [1] - niedergelegt. Die Erstellung der übergeordneten behördlichen

Anforderungen für PSA im Rahmen einer SÜ erfolgte von einer Arbeitsgruppe des Fachausschusses für Reaktorsicherheit des Länderausschusses für Atomkernenergie (FARS).

Der behördliche Leitfaden PSA verweist hinsichtlich der Konkretisierung der Einzelheiten zur Durchführung von PSA auf die Fachbände „Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für KKW“ und „Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für KKW“.

Im Hinblick auf die neuen Erfordernisse bei der Durchführung einer Sicherheitsüberprüfung wurden die in der aufsichtlichen Praxis bewährten PSA-Fachbände [2, 3] unter erheblicher Ausweitung des Analyseumfangs vom Facharbeitskreis PSA überarbeitet und aktualisiert sowie vom BfS im Oktober 2005 herausgegeben [4, 5]. Der Facharbeitskreis PSA ist ein vom BMU einberufenes und vom BfS geleitetes Gremium technischer Experten, die bei Behörden, Sachverständigenorganisationen, Herstellern, Betreibern und Beratern auf dem Gebiet der PSA tätig sind.

Die PSA-Fachbände dienen als Empfehlung für PSA-Methoden und Datenquantifizierung und sollen die Verfahrenssicherheit für die Durchführung einer PSA zur Sicherheitsbeurteilung bestehender Kernkraftwerke verbessern sowie ihre Begutachtung erleichtern. Damit unterscheiden sich die Fachbände von den meisten internationalen Leitfäden oder Standards, die oft nur einen Rahmen für die durchzuführenden Analysen setzen; ein wesentlicher Grund dafür, beim Vergleich von PSAs nicht nur auf das quantitative Ergebnis zu schauen, sondern auf die Reichweite der Analyse (z. B. im Hinblick auf Einwirkungen von Außen), die verwendeten Modelle und die zugrunde gelegte Datenbasis.

Es besteht Übereinstimmung im Facharbeitskreis PSA darüber, dass eine weitere Fortschreibung zur Durchführung von Methoden der PSA für Kernkraftwerke erforderlich ist. Im Unterschied zur Fertigstellung der PSA-Fachbände im Jahr 1997 liegen für die Durchführung von probabilistischen Analysen für EVA und für Stufe 2-Analysen noch keine Aufsichtserfahrungen vor. Daher soll die erste neuerliche Aktualisierung der PSA-Fachbände nach dem ersten SÜ-Projekt, bei dem diese Unterlagen volle Anwendung finden, erfolgen, damit die Erfahrungen aus diesem „Pilotprojekt“ den zukünftigen Projekten zugute kommen. Das bedeutet konkret, dass eine Aktualisierung zurzeit für 2010 geplant ist, um den weiteren methodischen Fortschritt berücksichtigen und einen noch weiter gehenden Konsens in Einzelfragen erreichen zu können.

Dabei sind die PSA-Fachbände im Wesentlichen auf ein Anwendungsgebiet der PSA ausgerichtet, nämlich die Durchführung von probabilistischen Analysen im Rahmen von umfassenden Sicherheitsüberprüfungen. Darin besteht ebenfalls ein Unterschied zu internationalen Regelungen und der Praxis in anderen Ländern, die die PSA in viel größerem Umfang für die tägliche Arbeit in den kerntechnischen Anlagen selbst, aber auch auf behördlicher Seite in Genehmigungs- und Aufsichtsfragen nutzen. Dies erfolgt in Deutschland nur punktuell und wird auch in den Bundesländern unterschiedlich gehandhabt. Beispiele für die Anwendung der PSA jenseits umfassender Sicherheitsüberprüfungen werden im Folgenden vorgestellt.

2. Regulatorische Dokumente zur PSA

Probabilistische Sicherheitsanalysen werden weltweit als ergänzendes Instrument zu deterministischen Analysen für die Bewertung des Sicherheitsniveaus industrieller Anlagen, insbesondere von Kernkraftwerken, eingesetzt. Dies hat dazu geführt, dass internationale

Organisationen (siehe Tabelle 1) Leitfäden zur Anwendung probabilistischer Sicherheitsanalysen in Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren fortentwickeln bzw. Statusberichte erstellen.

Internationale Organisationen
IAEA Nuclear Safety Standards Committee (NUSSC) Commission of Safety Standards (CSS)
OECD/NEA Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) Committee on Nuclear Regulatory Activities (CNRA)
WENRA (Western European Nuclear Regulators' Association)

Tabelle 1: Arbeitsgruppen internationaler Organisationen

2.1. Internationale Atomenergiebehörde (IAEA)

Die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) hat sich in einer Reihe von Dokumenten mit der Bedeutung und Durchführung von probabilistischen Sicherheitsanalysen auseinander gesetzt. Die erste Serie von Leitfäden zur PSA der Stufen 1 und 2 ist bereits mehr als zehn Jahre alt [6, 7], damals noch losgelöst von Bezügen zu übergeordneten regulatorischen Dokumenten, die Anforderungen beschreiben, die von allen Mitgliedsländern erfüllt werden müssen.

Ein Beispiel für ein solches Dokument ist IAEA Safety Assessment for Facilities and Activities Draft Safety Requirement, DRAFT 9, 28.01.2008, in dem geschrieben steht:

“In most cases, the safety assessment includes a safety analysis, which consists of a set of different analyses for quantitatively evaluating and assessing challenges to safety under various operational states, anticipated operational occurrences and accident conditions, using deterministic and also probabilistic methods. The safety analysis shall be an integral part of the safety assessment.“

Der zugehörige Leitfaden [8] formuliert: “The achievement of a high level of safety should be demonstrated primarily in a deterministic way. However, the safety analysis should incorporate both deterministic and probabilistic approaches. These approaches have been shown to complement each other and both should be used in the decision making process on the safety and ability of the plant to be licensed. The probabilistic approach provides insights into plant performance, defence in depth and risk that are not available in the deterministic approach.“

Aufgrund der Struktur der IAEA-Dokumente der IAEA Safety Standards Series war es nur folgerichtig, als nächsten Schritt IAEA Safety Guides zur PSA der Stufen 1 und 2, aufbauend auf [6, 7] weiter zu entwickeln:

Safety Guide Level 1 (Entwurf August 2008) ist bereits in der offiziellen Länderkommentierung gewesen; der Entwurf wird im nächsten Schritt bei CSS eingespeist (s. Tabelle 1). Die Struktur des Leitfadens ist in Tabelle 2 beschrieben.

Safety Guide Level 2 (Entwurf August 2008) war ebenfalls bereits in der offiziellen Länderkommentierung.

Eine Veröffentlichung beider Dokumente wird Ende 2009 erwartet.

Current Structure of IAEA Safety Guide on Level 1
Introduction
General considerations relating performance and use of PSA
PSA project management and organisation
Familiarisation with the plant and information collection
Level 1 PSA for internal initiating events for full power conditions
General methodology for internal and external hazards level 1 PSA
Specifics of internal hazards level 1 PSA
Specifics of external hazards level 1 PSA
Level 1 PSA for low power and shutdown modes
Use and applications of PSA

Tabelle 2: Struktur des Entwurfs des IAEA-Leitfadens zur PSA Stufe 1

2.2. Committee on the Safety of Nuclear Installations der OECD/NEA

Auch die OECD/NEA hat eine Reihe von Dokumenten zur PSA veröffentlicht, die technische Papiere bzw. Statusberichte umfassen (siehe Tabelle 3).

Arbeitsergebnisse	Berichte in Vorbereitung
PSA-based Event Analysis, Technical Opinion Paper No. 6, December 2004	The Role of PSA in Nuclear Power Plant Safety Decision Making, Technical Opinion Paper – No. x voraussichtlich veröffentlicht 2009.
Living PSA and its Use in the Nuclear Safety Decision-making Process, Technical Opinion Paper No. 7, February 2005	
Level-2 PSA for Nuclear Power Plants, Technical Opinion Papers - No. 9, April 2007	
The Use and Development of Probabilistic Safety Assessment, NEA / CSNI / R (2007) 12, November 2007	

Tabelle 3: Veröffentlichungen des CSNI/OECD/NEA

2.3. Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA)

Die Western European Nuclear Regulators' Association ist die Vereinigung der Leiter der atomrechtlichen Behörden in Staaten der europäischen Union mit Kernkraftwerken, die sogenannte Issues (insgesamt 18) mit rd. 300 Referenzniveaus für verschiedene Themenbereiche vereinbart hat [9]. Diese Referenzniveaus sollen in das nationale Regelwerk und die nationale Sicherheitspraxis bis 2010 umgesetzt werden. Das Issue O behandelt die PSA (siehe Tabelle 4).

Issue O: Probabilistic Safety Analysis
Reference levels
Scope and content of PSA
Quality of PSA
Use of PSA
Demands and conditions on the use of PSA

Tabelle 4: Struktur des Issue O zur PSA

Dort heißt es:

1.4 For each plant design, a specific PSA shall be developed for level 1 and level 2 including all modes of operation and all relevant initiating events including internal fire and flooding. Severe weather conditions and seismic events shall be addressed.

3.2 PSA shall be used (it is intended that such analysis will be done on a continuous basis, not just every ten years during the Periodic Safety Review) to identify the need for modifications to the plant and its procedures, including for severe accident management measures, in order to reduce the risk from the plant.

2.4. Europäische Kommission

Die Europäische Kommission selbst hat aufgrund der eingeschränkten Zuständigkeit auf dem Gebiet der kerntechnischen Sicherheit die Aktivitäten der Erstellung aktueller Dokumente reduziert. Zwei Beispiele für PSA-relevante Aktivitäten der Europäischen Kommission aus jüngerer Zeit sind:

Report on the Regulatory Experience of Risk-informed In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components and Common Views, EUR 21320 EN, August 2004,

Bestandteil des 6. Forschungsrahmenprogramms der EK ist das „Severe Accident Research Network of Excellence“ (SARNET): u.a. Projekt zur Harmonisierung der PSA der Stufe 2 (Proceedings of FISA 2006, EU Research and Training in Reactor Systems, EUR 21231).

2.5. Nationale Leitfäden/Richtlinien zur PSA

Eine Reihe von Ländern (insbesondere in Mittel- und Osteuropa, aber auch in Asien wie in China und Korea) setzt die Regelungen der IAEA direkt in nationale Regelungen um, andere haben eigene Leitfäden bzw. Richtlinien entwickelt.

Neben den Dokumenten aus den USA [10, 11] wurden in den letzten Jahren Leitfäden in Kanada [12] und Finnland [13] bzw. Leitlinien für die Inspektion wie in Großbritannien [14] veröffentlicht, die in knapper Form die Anforderungen an eine PSA darstellen. In der Schweiz wurden Richtlinien für die schweizerischen Kernkraftwerke zu „Anforderungen an die Qualität und den Umfang einer PSA“ [15] und zu „Anwendungen der PSA für Kernkraftwerke“ [16] erarbeitet, die WENRA Reference Levels und die IAEA Safety Standards erfüllen. Diese Dokumente sollen auch bei der Weiterentwicklung der PSA in Deutschland, insbesondere für Anwendungen außerhalb umfassender Sicherheitsüberprüfungen, einbezogen werden.

3. Anwendungsfelder der PSA in Betrieb und Aufsicht

Im Folgenden werden die wesentlichen Anwendungsfelder der PSA in Betrieb und Aufsicht behandelt, wie sie sowohl in den IAEA – als auch in den OECD-Dokumenten behandelt werden. Weitere Details sind in [17] aufgeführt.

3.1. Periodische Sicherheitsüberprüfungen

Die Einführung periodischer Sicherheitsanalysen wurde von allen internationalen Organisationen mit Dokumenten begleitet (siehe Tabelle 5).

PERIODIC SAFETY REVIEW (PSR)

- ERSTELLTE DOKUMENTE BEI OECD, EU UND IAEA -

OECD: The Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants, Practices in OECD Countries, Paris, 1992

EC: Periodic Safety Reviews of Nuclear Power Plants in EC-Member States, Finland, Sweden and Switzerland: A Review of Current Practices, Luxembourg, 1995

IAEA: Safety Guide on Periodic Safety Review of Operational Nuclear Power Plants, Wien 1994; überarbeitete Fassung wurde 2003 publiziert; eine weitere Überarbeitung wird zur Zeit vorgenommen

WENRA: Harmonization of Rector Safety in WENRA Countries, Report by RHWG, January 2006, Aktualisierung Safety Levels Januar 2008

Tabelle 5: PSÜ-Dokumente

Alle Dokumente fordern bei der Sicherheitsbeurteilung von in Betrieb befindlichen Anlagen neben deterministischen Analysen auch probabilistische Sicherheitsanalysen.

Dabei ist der Umfang und die Reichweite der durchgeführten PSA in einzelnen Ländern sehr unterschiedlich (siehe Tabelle 6).

Belgien:	deterministisch; einige PSA-Aspekte (PSA Stufe 1 und 2)
Bulgarien:	deterministisch und probabilistisch
Finnland:	deterministisch und probabilistisch
Frankreich:	deterministisch für Konformität; probabilistisch für neue Anforderungen (PSA Stufe 1)
Großbritannien:	deterministisch und probabilistisch (PSA Stufe 2)
Japan:	formal deterministisch; PSA für komplementäre Beurteilung (PSA Stufe 2 ohne Quellterm)
Korea:	deterministisch und probabilistisch als ergänzende Beurteilung
Mexiko:	deterministisch; PSA Stufe 1 geplant
Niederlande:	deterministisch und probabilistisch
Schweden:	1. PSÜ Schwerpunkt probabilistische Analysen (PSA Stufe 1) 2. PSÜ Schwerpunkt Organisation
Schweiz:	deterministisch und probabilistisch (PSA Stufe 1 und 2)
Slowakische Rep.:	deterministisch; einige PSA-Aspekte (PSA Stufe 1 und 2)
Slowenien:	deterministisch und probabilistisch (PSA Stufe 1 und 2)
Spanien:	deterministisch und probabilistisch
Tschechische Rep.:	deterministisch; PSA nicht explizit gefordert, aber durchgeführt
Ungarn:	deterministisch und probabilistisch (PSA Stufe 1)

Tabelle 6: PSÜ-Analyseanforderungen

3.2. Ereignisauswertungen

Die Auswertung von Betriebserfahrungen mit Hilfe der PSA bedeutet insbesondere die Auswertung von Ereignissen. Eine solche Auswertung erfolgt bereits in einer Reihe von Ländern.

Die PSA-basierte Auswertung von Ereignissen wird für Ereignisse mit hoher potentieller sicherheitstechnischer Bedeutung durchgeführt. Dies erfordert geeignete Screening-Kriterien.

Solche Precursor-Analysen werden auch in Deutschland durchgeführt.

3.3. Bewertung technischer Spezifikationen

Unter Bewertung technischer Spezifikationen aus Sicht der PSA werden die Optimierung von Intervallen wiederkehrender Prüfungen /Tests, die Bewertung von Reparaturen während des Leistungsbetriebes sowie die Optimierung betrieblicher Randbedingungen verstanden.

Dazu kann aber auch die Beurteilung von bau- und systemtechnischen Änderungen gehören. Dabei muss die Frage beantwortet werden, ob – und, wenn ja, in welchem Umfang – Risikoerhöhungen zulässig sind.

3.4. Gestuftes Qualitätsmanagement

Das Ziel des Qualitätsmanagementprogramms, das auf Anlagenteile, Systeme und Komponenten in einem Kernkraftwerk angewandt wird, soll sicherstellen, dass sie ihre Sicherheitsfunktionen im Normalbetrieb und bei Störfällen zuverlässig erfüllen. Üblicherweise wurde ein deterministischer Ansatz gewählt, die sicherheitsrelevanten Anlagenteile, Systeme und Komponenten zu identifizieren.

Eine Vielzahl heutiger PSA hat gezeigt, dass einige Anlagenteile, Systeme und Komponenten als sicherheitsrelevant klassifiziert wurden, aber eine geringe Risikosignifikanz haben, andererseits einige Anlagenteile, Systeme und Komponenten als sicherheitstechnisch unbedeutend klassifiziert wurden, laut Ergebnisse der PSA aber eine hohe Risikosignifikanz haben.

Die Anwendung eines gestuften Qualitätsmanagements (QM) ermöglicht es, die traditionellen QM-Anforderungen mit der Risikosignifikanz in Einklang zu bringen.

Die Sicherheitsklassifikation (abgeleitet aus deterministischen Analysen und ingenieurtechnischen Erfahrungen) und die Risikosignifikanz (abgeleitet aus der PSA) werden gemeinsam verwendet, um zu entscheiden, ob Änderungen am QM-System vorgenommen werden sollen.

3.5. Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes

In vielen Ländern wird die PSA der Stufe 2 dazu verwendet, Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes zu identifizieren, die Konsequenzen schwerer Störfälle vermindern können. Dies hat zu bautechnischen Änderungen in Anlagen geführt (z.B. katalytische Wasserstoffrekombinatoren) oder zur Einführung von Leitfäden für Betreiber mit Handlungsanweisungen im Falle eines schweren Störfalls. Außerdem wird die PSA der Stufe 2 dazu verwendet, die Effektivität und Effizienz der Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes zu ermitteln und zu bewerten.

Die Ergebnisse der PSA der Stufe 2 wurden auch verwendet, um Referenzszenarien für die Katastrophenschutzplanung abzuleiten..

3.6. Risikomonitore

Der Stand der Entwicklung und des Einsatzes von Risikomonitoren ist in [18] beschrieben.

Der Risikomonitor ist ein Analyseinstrument in Realzeit, das Risikoinformationen auf der Basis der aktuellen Anlagenkonfiguration bereitstellt wie z.B. Anlagenzustand, Komponenten, die nicht in Betrieb sind, die Wahl im Betrieb oder in Standby befindlicher

Stränge für betriebliche Systeme. Diese Information kann z.B. für die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen verwendet werden, um solche Maßnahmen derart zu planen, dass Risikospitzen vermieden werden und das kumulative Risiko gering ist. Dadurch werden gleichzeitige Unverfügbarkeiten verschiedener Systeme erkannt.

Der Risikomonitor wird online vom Personal auf der Warte genutzt, offline für die Planung zukünftiger Instandhaltungsmaßnahmen und die Bewertung ungeplanter Ereignisse wie Komponentenfehler.

3.7. Training des Personals

PSA-Ergebnisse werden in vielen Anlagen auch in das Trainingsprogramm des Anlagenpersonals eingespeist. Ziel ist dabei, das Training auf sicherheitsrelevante Anlagenteile, Systeme und Komponenten, Störfallszenarien in Instandhaltungsmaßnahmen zu fokussieren. Die PSA wird insbesondere dazu verwendet, risikosignifikante Szenarien zu identifizieren und sie im Simulatortraining zu verwenden.

4. Quantitative probabilistische Sicherheitskriterien

4.1. Einleitung

In der PSA werden für die Sicherheit relevante Ereignisabläufe und das Ineinandergreifen der Sicherheitssysteme für eine Gesamtanlage modelliert. Wichtige Ergebnisgrößen beziehen sich demgemäß nicht allein auf die Zuverlässigkeit einzelner technischer Systeme oder Komponenten, sondern auf das Verhalten der Gesamtanlage.

Die wichtigsten dieser integralen Ergebnisgrößen sind:

- Gesamthäufigkeit von Kernschadenzuständen (Core Damage Frequency, CDF),
- Häufigkeit von unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen, Häufigkeit der so genannten "großen Freisetzung" (Large Release Frequency, LRF), wobei letztere in unterschiedlicher Weise als das Überschreiten einer vorgegebenen effektiven Aktivitätsfreisetzung definiert wird, die außerhalb der Anlage kurzfristig Maßnahmen erforderlich macht (typische Definition: 0,1% des Kerninventars an Spaltprodukten),
- Häufigkeit von unfallbedingten Schäden bzw. Expositionen.

Diese Ergebnisgrößen der PSA stehen zur Sicherheitsbeurteilung zur Verfügung. Sie lassen sich in Verbindung mit den Kenngrößen der deterministischen Analyse nutzen, wobei sehr unterschiedliche Strategien Anwendung finden. Die folgenden Grundmuster lassen sich unterscheiden:

1. Die Ergebnisse der PSA können ohne jede Änderung der bestehenden Bestimmungen und des technischen Regelwerks als zusätzliche Information genutzt werden, die bei den zu treffenden behördlichen Entscheidungen jeweils angemessen berücksichtigt wird.
2. Es werden zusätzlich zu bestehenden Bestimmungen und technischen Regeln Forderungen eingeführt, die sich auf die quantitativen Ergebnisse der PSA beziehen

(Beispiel: Die Häufigkeit von Kernschäden darf einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten).

3. Teile der bestehenden Bestimmungen und technischen Regeln werden durch Forderungen ersetzt, die sich auf PSA-Ergebnisse beziehen.

Bei der Umsetzung der Grundmuster sind zahlreiche Varianten möglich, insbesondere hinsichtlich des Grades der Verbindlichkeit von PSA-Bestimmungen, der Anforderungen an die Nachweise und ihres Anwendungsbereichs. Im zeitlichen Ablauf sind Übergänge zwischen den Grundmustern denkbar.

4.2. Beispiele für nationale Strategien

4.2.1. Die Niederlande

In den Niederlanden wurden risikobezogene Kriterien entwickelt, auf deren Grundlage die Sicherheit und die Umweltauswirkungen von Industrieanlagen mit großem Gefährdungspotential, zu denen auch Kernkraftwerke gehören, beurteilt werden [19]. Eines dieser Kriterien bezieht sich auf das individuelle Risiko, das andere begrenzt das kollektive Risiko („societal risk“).

Das maximal zulässige Individualrisiko, als Folge des Betriebes der Anlage vorzeitig zu Tode zu kommen, beträgt 10^{-6} / a. Die Berechnung des Individualrisikos erfolgt nach einer eher restriktiven Vorschrift, der zufolge postuliert wird, dass ein zum Unfallzeitpunkt ein Jahr altes Kind weitere siebzig Lebensjahre am Unfallort verbringt [20].

- **Individualrisiko $< 10^{-6}$ /a**
- **Begrenzung des kollektiven Risikos**

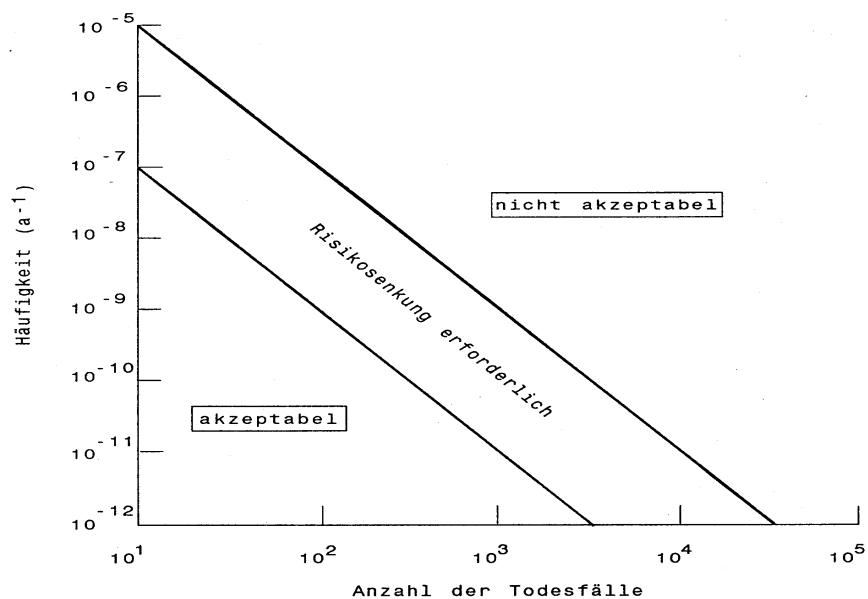


Abb. 1: Begrenzung des kollektiven Risikos für Industrieanlagen in den Niederlanden [16]

Im Sinne von Abb. 1 erfolgt eine Begrenzung des „societal risk“ derart, dass die Wahrscheinlichkeit für zehn Unfallopfer 10^{-5} in einem Jahr, für hundert Unfallopfer 10^{-7} in einem Jahr usw. nicht überschreitet. Das Kollektivrisiko bezieht sich in dieser Form nur auf deterministische Strahlenschäden, d.h. auf frühe Strahlenwirkungen mit Todesfolge. Bei den Berechnungen bleiben schadensmindernde Maßnahmen unberücksichtigt.

Für die Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken wurden aus der o.g. Risikobegrenzung Kriterien für die Beurteilung von PSA-Ergebnissen hergeleitet. Konkret ist eine Begrenzung der Kernschadenshäufigkeit auf 10^{-4} pro Jahr nachzuweisen, die Häufigkeit großer Freisetzungen darf $10^{-6}/a$ nicht überschreiten (nach [21, 22]).

Die niederländische Vorgehensweise behandelt das Risiko durch die Kerntechnik in der gleichen Art und Weise wie im Fall nichtnuklearer Einrichtungen wie z. B. bei Chemieanlagen oder Flugplätzen. Hierdurch wird eine objektive Beurteilung technischer Risiken erreicht.

In [23] wird eine mögliche Erweiterung des Konzepts der individuellen und kollektiven Risikobegrenzung in den Niederlanden diskutiert. Anwendungen auf Flughäfen, den Straßenverkehr und den Transport gefährlicher Güter weisen häufig in völligem Gegensatz zu ihrer hohen öffentlichen Akzeptanz im Vergleich zur Kerntechnik überraschend hohe Risikokennzahlen aus [24].

4.2.2. Großbritannien

Im Nachgang zur Anhörung zu Sizewell-B hat das U.K. Health and Safety Executive, die britische Genehmigungsbehörde, die Schrift „Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations“ [25] als ‘Draft for Comment’ herausgegeben. Im Jahre 1992 wurden die in dieser Unterlage gemachten Vorschläge als „Safety Assessment Principles for Nuclear Power Plants“ [26] zu Anforderungen erhoben. Inzwischen liegen aktualisierte Dokumente vor [27, 28].

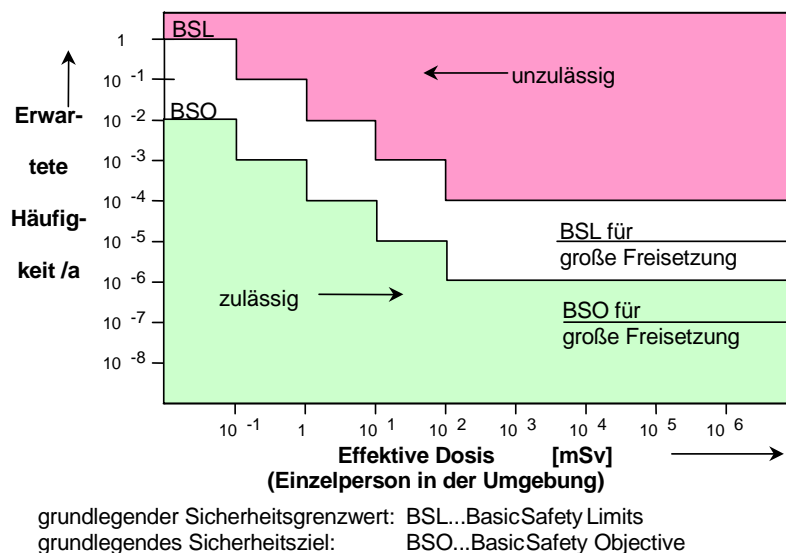


Abb. 2: Zuordnung von erwarteter Häufigkeit von Anlagenzuständen und radiologischen Auswirkungen (nach [23, 24]). Zugrundegelegt wird eine Person, die ca. 1 km in Hauptwindrichtung von der Anlage lebt. Der Bereich zwischen BSO und BSL gilt als tolerierbar, wenn Optimierung nach ALARP nachgewiesen ist.

Hervorzuheben ist, dass in den Safety Assessment Principles des Nuclear Installation Inspectorate (NII) mehrere quantitative probabilistische Sicherheitsziele vorgegeben sind; hier wird auf das Kriterium P 42 eingegangen, das den Charakter von Dosis-Häufigkeitskurven hat, wobei neben der eigentlichen Grenzkurve ein Bereich vorgesehen ist, in welchem eine Risikooptimierung vorzunehmen ist (Abb. 2). Für jeden Dosisbereich gibt es eine maximal zulässige Häufigkeit, den grundlegenden Sicherheitsgrenzwert (Basic Safety Limit, BSL). Anzustreben ist das deutlich unterhalb dieses Wertes liegende sogenannte grundlegende Sicherheitsziel (Basic Safety Objective, BSO). Es sei darauf hingewiesen, dass diese Kriterien nicht nur für Kernkraftwerke, sondern auch für andere kerntechnische Anlagen gelten.

Bemerkenswert ist eine Zusatzbedingung zu P 42, die das anzustrebende Ziel einer Ausgewogenheit des Sicherheitskonzepts quantitativ festlegt: danach ist (im Rahmen einer PSA) zu zeigen, dass keine Ereignisklasse allein mehr als 10 % zum Gesamtrisiko der Anlage beiträgt [16].

5. Ausblick

Die PSA hat sich weltweit innerhalb von etwa drei Jahrzehnten von einer Studiendisziplin zum unverzichtbaren Instrument der Sicherheitsbeurteilung entwickelt. Die PSA ergänzt die deterministische Analyse und hat sich als ein wichtiger Treiber von Sicherheitsverbesserungen erwiesen.

Überwiegend werden international die PSA der Stufe 1 und der Stufe 2 praktiziert, wie auch in den WENRA-Referenzniveaus vorgesehen. PSA wird in Deutschland im Rahmen der SÜ gefordert, eine Anwendung in Aufsichtsverfahren steht erst am Anfang. Ein Beispiel für umfangreiche Anwendung der PSA ist in Tabelle 7 beschrieben [29].

Nationale Vorgehensweisen zur Integration der Erkenntnisse aus der PSA in die Sicherheitsbeurteilung sind eher uneinheitlich. Einige Länder betonen die strikt komplementäre Rolle der PSA, andere verfolgen eine risikoorientierte Vorgehensweise, wenige Länder haben übergreifende Risikokriterien formuliert [30].

Durchgeführte risikoinformierte Pilotprojekte und Anwendungen in Kernkraftwerken der Schweiz:
Beurteilung von Nachrüstungen/Anlagenänderungen (alle)
Jahresrisikoprofil und Beurteilung von Ereignissen und Befunden (alle)
Risiko-informierte WKP an Hauptkühlmittelleitungen (Beznau, Leibstadt)
Risiko-informierte Instandhaltung (Beznau)
Änderungen des Betriebszyklus (Beznau, Leibstadt)
Reparaturzeiten in Technischen Spezifikationen (Beznau Notstromdiesel, Gösgen)
Containment-Leckratentest (Gösgen geplant)

Tabelle 7: Beispiel für die breite Anwendung der PSA in Aufsichtsverfahren

Durch internationale Standardsetzung und Meinungsbildung wird Alleingängen und Einzellösungen entgegengewirkt. Die Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Methoden und des Datenbestandes müssen fortgesetzt werden. Auch dabei spielt die internationale Zusammenarbeit eine wichtige Rolle.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung des Leitfadens zur Durchführung der „Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes– Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse –“ vom 30. August 2005, Bundesanzeiger Nr. 207a vom 03. November 2005, ISSN 0720-6100
- [2] Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Dezember 1996, BfS-KT-16/97.
- [3] Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und Fehlerbäumen, April 1997, BfS-KT-17/97.
- [4] Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, ISSN 0937-4469, ISBN 3-86509-414-7
- [5] Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: August 2005, BfS-SCHR-38/05, ISSN 0937-4469, ISBN 3-86509-415-5
- [6] International Atomic Energy Agency: "Procedures Guide for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1) ", Safety Series No. 50-P-4, Vienna, 1992
- [7] International Atomic Energy Agency: "Procedures Guide for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2)", Safety Series No. 50-P-8, Vienna, 1995
- [8] International Atomic Energy Agency: "Safety Assessments and Verification for Nuclear Power Plants", Safety Guide No. NS-G-1.2, Vienna, January 2002
- [9] Western European Nuclear Regulators` Assessment: WENRA Reactor Safety Levels, Issue O: Probabilistic Safety Analysis, January 2007
- [10] Nuclear Energy Institute: A Risk-informed, Performance- based Regulatory Framework for Power Reactors, NEI 02-02, Washington, May 2002
- [11] American Society of Mechanical Engineers: Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants Application, ASME RA-Sc-2007, New York 2007
- [12] Canadian Nuclear Safety Commission: Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Nuclear Power Plants, Regulatory Standard S-294, April 2005

- [13] STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority): Probabilistic Safety Analysis in Safety Management of Nuclear Power Plants, Guide YVL 2.8, May 2003
- [14] Nuclear Safety Directorate: Technical Assessment Guide on Probabilistic Safety Analysis, T/AST/030, February 2005
- [15] Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK): "Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang, Richtlinie ENSI-A-05/d, Januar 2009
- [16] Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK): "Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Anwendungen", Richtlinie HSK-A-06/d, Mai 2008
- [17] H. P. Berg: "Overview on the different Applications of Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants", Kerntechnik 74 (2009), im Druck
- [18] NEA/CSNI/R (2004) 20: "Risk Monitors – The State of the Art in their Development and Use at Nuclear Power Plants", produced on behalf of IAEA and OECD NEA WGRISK, Paris, 2004
- [19] Directorate General for Environmental Protection at the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment.: "Premises for Risk Management - Risk Limits in the Content of Environmental Policy", Annex to the Dutch National Environmental Policy Plan „Kiezen of Verliezen“ (to Choose or to Lose) (Second Chamber of the States General, 1988-89 session, 21137, nos. 1-2)
- [20] B. Eendebak,: "The Use of Probabilistic Safety Assessments for Operating Nuclear Power Plants", Fourth Annual Two-Day Conference on PSA in the Nuclear Industry, London, November 29th – 30th, 1995,
- [21] M. F. Versteeg: "Dutch Procedures Guide for Conducting Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants (Level 1)" Beitrag zum IAEA Specialists' Meeting on "Use of PSA in the Regulatory Process", Wien 26.-29. April 1993
- [22] M. F. Versteeg: "Regulatory Guidance and Preconditions for PSAs in the Netherlands" Proc. Internat. Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA'96, Vol. 3, pgs. 1601 – 1607 Park City, Utah (USA), September 29th- October 3rd, 1996
- [23] J. K. Vrijling, W. van Hengel, S. E. van Maanen "The Application of the Concept of Societal Risk to Various Activities in the Netherlands" Proceedings of the International Conference „Probabilistic Safety Assessment and Management '96 ESREL '96 - PSAM-III“, June 24-28, Crete, Greece Vol. 2, pgs. 960-966, Springer Verlag
Editors: C. Cacciabue, I. Papazoglou
- [24] J. K. Vrijling: "Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands" in Reliability Engineering & System Safety 74 (2001) pgs. 337 – 344
- [25] Health & Safety Executive: "The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations" HMSO, London, 1988, ISBN 0-11-882043-5
- [26] Health & Safety Executive: "Safety Assessment Principles for Nuclear Plants" HMSO, London, 1992, ISBN 0-11-886368-1
- [27] Health and Safety Executive: Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities, 2006 Edition, Redgrave Court
- [28] Health and Safety Executive: Numerical Targets and Legal Limits in Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities, An Explanatory Note, Redgrave Court, December 2006

[29] M. Richner: Umfang und Anwendungen probabilistischer Sicherheitsanalysen, SKG Young Generation Frühjahrstreffen, April 2006

[30] H. P. Berg: Experience with Quantitative Safety Targets on International Level“, Kerntechnik 74 (2009), im Druck

[31] L. Weil ”Charakterisierung der Risiken in der Kernenergienutzung“. Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung der venia legendi genehmigte Habilitationsschrift Aachen, 22. Juli 2003

[32] POS-Bericht

The POS Model for Common Cause Failure Quantification H. P. Berg, R. Görtz, J. Mahlke, J. Reckers, P. Scheib, L. Weil Wirtschaftsverlag NW, ISBN 978-3-86509-870-2

Layout und Redaktion: Hardo Bruhns
Alle Rechte liegen bei den Autoren der jeweiligen Beiträge.

Der Druck erfolgte mit freundlicher Unterstützung des

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe

