

ZURÜCK ZUM KERN

Um Atomkraft wieder zur Zukunftstechnik zu machen, entwickeln Forscher verbesserte Reaktoren – doch Kritikpunkte bleiben

Von Christopher Schrader

Als ihr die Macht erst wenige Tage greifbar erschien, traf Angela Merkel ihre erste Entscheidung. Gerhard Schröder hatte nach der Niederlage in Nordrhein-Westfalen Neuwahlen zum Bundestag angekündigt, da versprach die Kanzlerkandidatin der Union für den Fall ihres Wahlsiegs das Ende eines deutschen Sonderwegs: des Atomausstiegs. Die 17 verbliebenen Kernkraftwerke sollten so lang am Netz bleiben dürfen, wie sie sicher und wirtschaftlich Strom erzeugen.

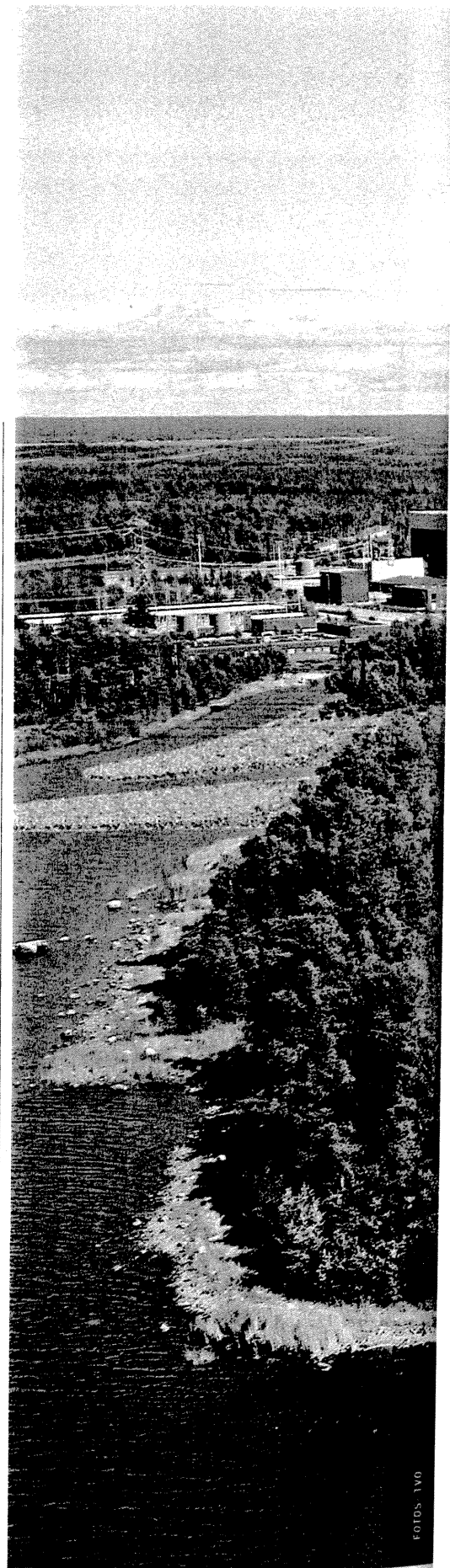
Merkel leitet damit in Deutschland eine Renaissance der Kernkraft ein, die in anderen Ländern bereits im Gange ist: Die beiden Nationen mit den meisten kommerziellen Reaktoren, Amerika und Frankreich, denken seit einer Weile darüber nach, Anlagen länger am Netz zu lassen und neue zu bauen. Asien setzt offensiv auf Atomstrom; alle fünf im Jahr 2005 eingeweihten Kernkraftwerke stehen dort. Und schon in vier Jahren soll auch in Europa ein neuer Reaktor ans Netz – Finnland plant den ersten Neubau in einem westlichen Industrieland seit 14 Jahren.

Diese Rückbesinnung auf die Nukleartechnik findet Beifall von unerwarteter Seite. Fritz Vahrenholt, ehemaliger SPD-Umweltse-

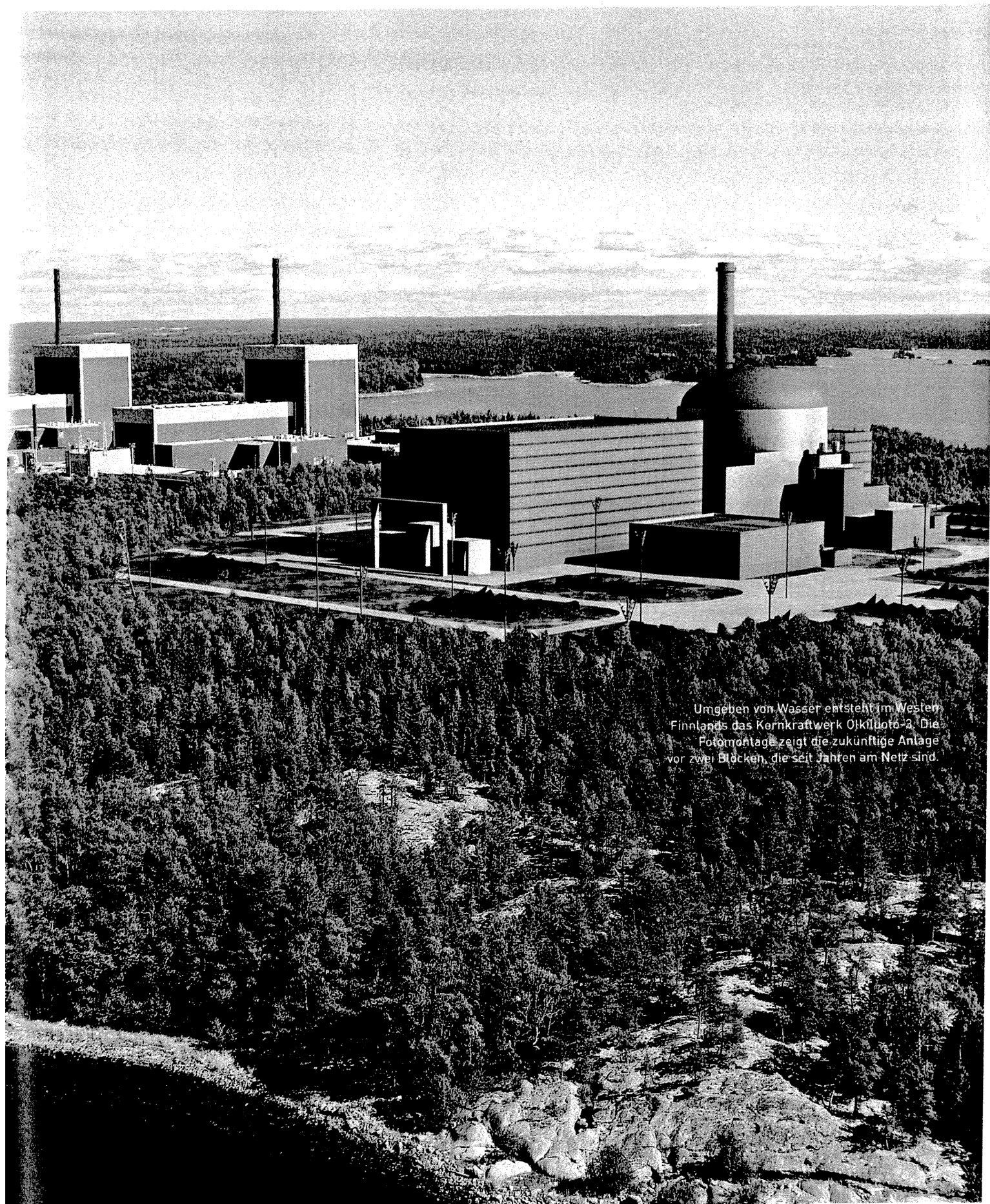
nator in Hamburg, warb vor kurzem im Gespräch mit der *Süddeutschen Zeitung* für eine Laufzeitverlängerung der deutschen Atomkraftwerke: Die Windkraft brauche die Zeit, wettbewerbsfähig zu werden – Vahrenholt ist Chef des Windmühlenbauers Repower. Auch Veteranen der Umweltbewegung wie James Lovelock, der die Erde einst zum lebendigen Organismus Gaia verklärt hat, Greenpeace-Mitbegründer Patrick Moore und Stewart Brand vom amerikanischen Whole Earth Catalog werben für einen Ausbau der Kernkraft. Für sie alle ist der Klimawandel das entscheidende Argument: Die Erwärmung der Erde lasse sich nur mit Atomenergie begrenzen, die kein Kohlendioxid freisetze.

Dieses Argument dürfte an Zugkraft gewinnen, wenn die Beweise für den Klimawandel klarer und seine Folgen deutlicher werden. Womöglich kippt dann auch die Stimmung der Deutschen. Zwar ist heute eine breite Mehrheit dafür, die 17 Kernkraftwerke, wie vor fünf Jahren beschlossen, bis 2020 abzuschalten. Aber die Zustimmung zum „Atomkonsens“ bröckelt: Waren im Jahr 2000 nur 24 Prozent der Befragten dafür, „nicht“ oder „eher nicht“ aus der Nukleartechnik auszusteigen, sagten im April 2005 schon 32 Prozent, Deutschland solle die Nutzung der Atomenergie „langsamer als beschlossen“ oder „gar nicht“ beenden.

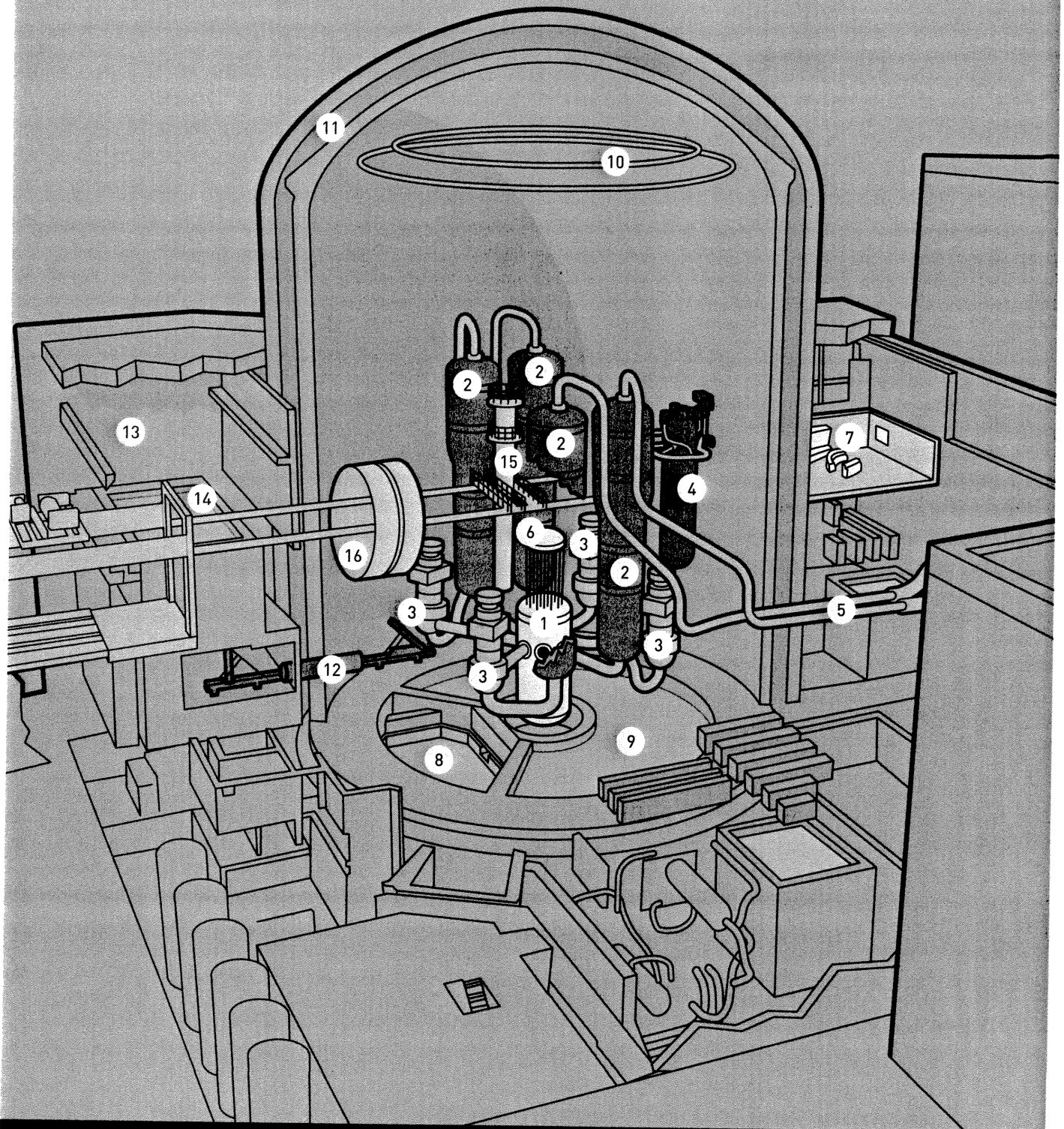
Wer aber Atomenergie als Mittel gegen den Klimawandel anpreist, muss drei unge löste Probleme der Technik angehen: Erstens erzeugen Kernreaktoren strahlenden Abfall, der für Hunderttausende von Jahren sicher eingeschlossen werden muss; ein solches Endlager gibt es in keinem Staat der Erde. Zweitens setzen Atommeiler womöglich Staaten, die den internationalen Terrorismus unterstützen in die Lage, Atomwaffen oder so genannte schmutzige Bomben herzustellen.



FOTOS: IVO



Umgeben von Wasser entsteht im Westen Finnlands das Kernkraftwerk Ojasilta-2. Die Fotomontage zeigt die zukünftige Anlage vor zwei Blöcken, die seit Jahren am Netz sind.



WIE EIN KERNREAKTOR MODERNSTER BAUART FUNKTIONIERT

In den Brennelementen im Reaktorkern (1) werden Uran-235-Atome gespalten. Das dadurch erhitzte Kühlwasser wird in die Dampferzeuger gepumpt (2) und fließt über die Kühlmittelpumpen (3) zurück. Der Druckhalter (4) hält das Wasser im Kreislauf auf konstant 155 bar. Im Dampferzeuger gibt es

seine Wärme an den Sekundärkreislauf ab, Dampf entsteht. Er gelangt über Leitungen (5) zur Turbine, die den Generator treibt. Mit Steuerstäben (6) wird der Reaktor aus dem Kontrollraum (7) reguliert. Bei einer Störung stoppen sie zwar die atomare Kettenreaktion, aber der Reaktor erzeugt noch

intensive Hitze. Sollte dann die Kühlung versagen, kann der Kern schmelzen. Ein Becken (8) soll die glühende Masse auffangen, ein Wasserreservoir (9) und die Sprinkleranlage (10) dienen der Kühlung. Die doppelte Kuppel (11) soll innen Explosionen und außen Flugzeugabstürzen standhalten.

Beim Beladen werden Brennelemente liegend (12) durch die Reaktorkuppel ins Brennstoffgebäude (13) transportiert. Abgebrannte Elemente kommen senkrecht ins Abklingbecken (14). Frische Elemente setzt eine Hebevorrichtung (15) in den Reaktor. Die Luke (16) dient zum Transport größerer Ersatzteile.

VOR- UND NACHTEILE DES EPR

Das Design des Europäischen Druckwasserreaktors EPR, der in Finnland gebaut wird, nimmt einige Bedenken von Gegnern der Nukleartechnik auf. Der Reaktor soll auch bei schwersten Störfällen die Radioaktivität im Gebäude halten. Kritiker erkennen dennoch Schwachstellen.

- Vorteile aus Sicht der Herstellerfirma
- Schwachstellen aus Sicht der Kritiker

Die Kuppel (11) besteht aus zweifach 1,3 Meter dickem Beton. Die verstärkte äußere Hülle schützt vor Flugzeugabstürzen, die innere hält das strahlende Inventar des Reaktors bei Explosionen zurück. Kleine Lecks kann der Hersteller nicht ausschließen, pro Tag dürfen 0,2 Prozent des inneren Volumens ins Freie gelangen, der Rauminhalt von drei mittelgroßen Zimmern. Genaue Berechnungen über Flugzeugabstürze fehlen in den finnischen Genehmigungsunterlagen. Durchführungen von Leitungen (5,12,16) schwächen solche Betonkonstruktionen.

Den Reaktor umgeben vier Kühlkreisläufe (2, 3). Jeder würde ausreichen, den Reaktor zu kühlen. Zu jedem gehören weitere Anlagen in einem Gebäude außerhalb der Kuppel. Diese sind am Hotkreis um den Reaktor angeordnet. Zwei davon sind durch verstärkte Betondecken geschützt. Jedes System, das zu seiner Sicherheit Energie und Steuerung benötigt, ist störanfällig. Zwei der vier Kreisläufe sind durch Flugzeuge oder Bomben gefährdet; bei Wartungsarbeiten darf das Personal niemals die beiden geschützten gleichzeitig abschalten.

Reaktordruckbehälter (1), Dampferzeuger (2) und Druckhalter (4) sind vergrößert. Das verschafft der Bedienungsmannschaft bei Störfällen mehr Zeit zum Reagieren.

In das auf sechs Meter verstärkte Fundament ist ein Auffangbecken (9) eingelassen. Sollte der Reaktorkern schmelzen, fließt die Masse hinein und kann dort gekühlt werden. Das hat der Hersteller nur mit etwa 100 Kilogramm Metall getestet, im Ernstfall aber ginge es um über 100 Tonnen. Wird der Druck im Kühlkreislauf nicht rechtzeitig reduziert, zerreißt es den glühenden Reaktor womöglich, die Schmelze fließt dann nicht mehr geordnet in das Becken.

2.000 Kubikmeter Wasser (9) stehen zum Auffüllen des Primärkreislaufs im Fall eines Lecks zur Verfügung. Außerdem soll es zum Kühlen des geschmolzenen Keros im Auffangbecken dienen. Falls Wasser im Auffangbecken ist, wenn der geschmolzene Kern hineinfließt, gibt es eine Dampfexplosion. Das Becken muss also unbedingt trocken bleiben. Da der Kern aber erst schmilzt, wenn Kühlwasser ausgeflossen ist und die Bedienungsmannschaft Dampf aus dem System hat entweichen lassen, ist nichts unter der Reaktorkuppel mehr trocken.

Das Gebäude für Brennelemente (13) wird von der verstärkten Betonhülle geschützt. Beim liegenden Transport der Brennelemente durch einen Kanal (12) ist es schon zu Kommunikationsproblemen zwischen den Mannschaften auf beiden Seiten gekommen, weil diese sich nicht sehen können. Dadurch kann die Kettenreaktion unerwartet anspringen.

len, die strahlenden Abfall mit konventionellem Sprengstoff über eine Stadt verteilen. Und drittens können in Nuklearanlagen Unfälle mit drastischen Folgen geschehen, die ganze Landstriche unbewohnbar machen – ausgelöst durch technisches Versagen oder durch Terroristen, die eine Linienmaschine in eine Reaktorkuppel lenken.

Mit neuen Designs versuchen Forscher zurzeit, diese Bedenken zu zerstreuen. Das Kraftwerk, das in Finnland gebaut wird, ist nach Angaben seiner Entwickler bereits deutlich sicherer als bestehende Anlagen. Und Reaktoren, die von 2030 an marktreif sein sollen, reduzieren den Plänen zufolge die Menge des erzeugten Atommülls drastisch. Diese Generation-IV-Reaktoren erkundet ein internationaler Forschungsverbund; deutsche Experten fehlen dabei, weil die rot-grüne Bundesregierung mit dem Ausstiegsbeschluss auch die Reaktorforschung zurückgefahren hat – noch eine Entscheidung, die ein Kabinett Merkel womöglich schnell revidiert.

Und so könnten sich das Erschrecken über den Klimawandel und die nuklearefreundlichere Stimmung einer neuen Regierung in der Zeit nach 2015 gegenseitig verstärken. So weit, dass auch eine Entscheidung denkbar wird, die heute niemand in Deutschland durchsetzen könnte: den Neubau eines Kernkraftwerks an Isar, Ems, Elbe, Rhein oder Main.

Die Pläne für ein solches Kraftwerk kann man in Erlangen bereits einsehen. Dort residiert auf dem Forschungsgelände Süd die Firma Framatome-ANP, eine Tochter von Siemens und dem französischen Nuklearkonzern Areva. Framatome hat die ersten beiden Aufträge für Reaktoren erhalten, die seit Jahrzehnten in Europa vergeben worden sind. Die Firma baut in Finnland das besagte Kraftwerk Olkiluoto-3, das 2009 ans Netz gehen soll. Auch ein Block im französischen Flamanville ist beschlossen, neben der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague – Fertigstellung 2012. Framatome nennt das Kraftwerk EPR, für European Pressurized Water Reactor (Europäischer Druckwasserreaktor).

„Der EPR hat ein evolutionäres Design, er folgt also keinem ganz neuen Prinzip“, sagt Jürgen Czech, technischer Direktor bei Framatome. Tatsächlich hat die Firma die aktuellen Typen deutscher und französischer Produktion weiterentwickelt. Das Design des EPR nimmt viele Bedenken auf, die Atomkritiker an der Sicherheit der bisherigen An-

Viel Beton und ein Auffangbecken sollen Gegnern der Atomkraft die Argumente nehmen

lagen geäußert haben. Dabei geht es vor allem um Warnungen vor abstürzenden Flugzeugen und einer Kernschmelze, dem bisher nicht per Auslegung zu beherrschenden „größten anzunehmenden Unfall“. Der EPR hat ein Auffangbecken für den geschmolzenen Kern (siehe Grafik Seite 78). Wolfgang Kröger, der an der ETH Zürich das Labor für Sicherheitsanalytik leitet, lobt es ausdrücklich: „Der Reaktor ist dafür ausgelegt, diesen schwersten Störfall zu überstehen, ohne dass größere Radioaktivitätsmengen nach außen dringen.“ Und gegen Flugzeuge soll eine doppelte Reaktorkuppel schützen.

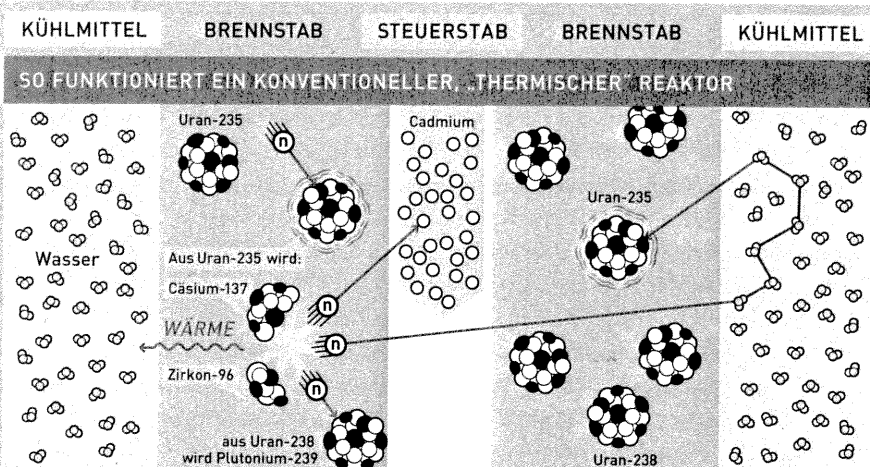
Wie tauglich diese Maßnahmen sind, ist schwer zu beurteilen: In Deutschland, wo der EPR mitentwickelt worden ist, gibt es bei unabhängigen oder kritischen Nuklearexperten erstaunlich wenig Sachverstand über den Reaktor. „Wir dürfen ja nicht einmal erforschen, ob die Neuerungen am EPR auf die existierenden Kernkraftwerke übertragen werden und dort den Sicherheitsstandard heben könnten“, sagt Joachim Knebel vom Forschungszentrum Karlsruhe. So bleibt die Kritik am Design eher allgemein. „Es ist weiterhin ein System, das man aktiv kühlen muss“, sagt Wolfgang Liebert vom Ianus, einer Forschungsstelle für Sicherheitsfragen an der Technischen Universität Darmstadt. „Alles, was Energie braucht und angesteuert werden muss, ist störanfällig“, ergänzt Wolfgang Kröger aus Zürich.

Die größten Bedenken gelten bei jedem Druckwasserreaktor möglichen Störfällen am Kühlsystem. Dort wälzen große Pumpen unter hohem Druck stehendes, heißes Wasser um, das die im Reaktorkern entstehende Wärme abführt. Die gefährlichsten Störfälle betreffen Lecks in diesem Kreislauf. Strömt das Wasser aus den Rohren, lässt sich zwar die Kettenreaktion im Reaktor schnell und zuverlässig abschalten, aber die radioaktive Fracht im Kern erzeugt noch so viel Hitze, dass dieser gekühlt werden muss, damit die Brennelemente nicht schmelzen.

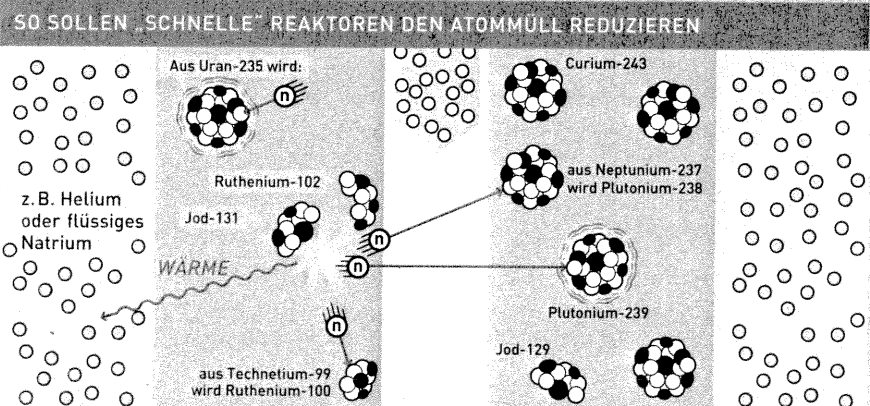
DIE TRICKS DER KERNPHYSIK

Um den Atommüll zu reduzieren, planen Nuklearforscher, von 2030 an eine neue Generation von Kernkraftwerken zu bauen. Die „schnellen“ Reaktoren sollen den Abfall sozusagen zerstrahlen.

Ein frisches Brennelement strahlt relativ wenig, steht es aber in einem konventionellen, „thermischen“ Reaktor, reichert sich in seinem Inneren eine strahlende Fracht an. Das passiert, weil bei der Kernspaltung Neutronen frei werden und Trümmer von Atomkernen zurückbleiben. Diese Spaltprodukte sind meist radioaktiv, besondere Sorgen machen Strahlenschützern Cäsium-137 (Halbwertszeit 30 Jahre), Technetium-99 (211 000 Jahre) und Jod-129 (16 Millionen Jahre). Gesundheitsgefährdend ist auch Jod-131, das zwar in acht Tagen zur Hälfte zerfällt, aber nach einem Reaktorunfall in der Schilddrüse eingelagert werden kann. Durch die Spaltung entstehen auch stabile, nicht strahlende Metalle wie Ruthenium-102 oder Zirkon-96. Die umherfliegenden Neutronen verwandeln Uran-238 in Plutonium-239 (Halbwertszeit 24 000 Jahre). Fangen solche Kerne weitere Neutronen ein, entstehen Neptunium, Americium oder Curium: diese Schwermetalle, die in der Natur nicht vorkommen, heißen Aktinide, sie sind alle radioaktiv.



Absorbiert ein Uran-235-Atom ein Neutron, zerfällt es in zwei ungleiche Hälften. Gleichzeitig werden zwei oder drei weitere Neutronen frei, die mit hohem Tempo durch den Reaktor jagen. Eines davon muss durch Kollisionen mit Wasseratomen abgebremst werden, weil es nur dann besonders leicht wieder ein Uran-235 spalten kann. Dieses langsame Tempo heißt „thermisch“. Überzählige Neutronen müssen absorbiert werden, sonst gerät die Kettenreaktion außer Kontrolle; dazu dienen die Steuerstäbe mit ihrem Inhalt aus Cadmium. Manche Neutronen werden von dem schwerer zu spaltenden Uran-238 absorbiert, das sich zu Plutonium-239 verwandelt.



Kraftwerke der Zukunft sollen als „schnelle“ Reaktoren funktionieren und den entstandenen Atommüll teilweise zerstrahlen. Auch hier darf nach einer Kernspaltung nur eines der drei entstehenden Neutronen wieder eine Spaltung auslösen, etwa in einem Plutonium-Atom. Die überzähligen aber können, weil sie nicht abgebremst werden, zum Beispiel Technetium-99 in das stabile, nicht radioaktive Ruthenium-100 verwandeln. Aus Jod-129 kann auf gleiche Weise das stabile Xenon-130 entstehen. Auch Atome der Elemente Neptunium, Americium oder Curium lassen sich im Prinzip beseitigen: Neptunium-237 verwandelt sich durch das Einfangen von mehreren Neutronen zu spaltbarem Plutonium und kann dann auch noch zur Stromerzeugung beitragen.

Die größte Schwachstelle der Technik bleibt der Mensch – er ist überfordert oder leichtsinnig

Wenn das bevorsteht, muss die Bedienungsmannschaft unbedingt den Druck im System kontrolliert senken. „Im Reaktor gibt es sonst eine Explosion“, sagt Wolfgang Liebert. Beim EPR werden dann Ventile am so genannten Druckhalter geöffnet, der den Druck im System sonst konstant auf 155 bar hält. Nur: Dieses System ist nur einmal vorhanden und hängt an einem der vier Kühlkreisläufe. Sollte dieser zerstört werden, sind die Ventile womöglich nicht mehr zu benutzen. Dazu sagt Jürgen Czech: „Ein Bruch der Verbindungsleitung würde zu einer Selbstentlastung des Kühlkreislaufs führen. Die Ventile wären dann nicht mehr nötig.“

Weitere Bedenken betreffen die Funktion des Auffangbeckens für die Kernschmelze. Es sollte weitgehend trocken sein, wenn die glühende Masse hineinfließt, weil sonst eine heftige Dampfexplosion droht. In einem solchen Krisenfall ist aber wohl nichts mehr unter der Reaktorkuppel trocken, das Kühlmittel ausgeflossen, der Dampf abgelassen. Laut Czech bliebe das Auffangbecken dennoch trocken genug. Das Reaktorgebäude ist so ausgeführt, dass das ausgeströmte Wasser in den tiefen Gebäudeteilen gesammelt wird“, sagt er. „Das Becken liegt nicht auf den Wasserwegen. Lediglich geringe Mengen von kondensiertem Wasser können dort auftreten.“ Ob diese Mengen wirklich gering wären, bezweifeln Kritiker allerdings.

Ein Problem aber bleibt auch beim EPR ungelöst: der Atommüll. Zwar kommt der Reaktor mit etwa einem Sechstel weniger Uran aus als herkömmliche Anlagen. Aber auch seine abgebrannten Brennelemente müssen ins Endlager. Erst die Kraftwerke der nachfolgenden Generation sollen den Endlagerbedarf drastisch reduzieren.

Dazu hat der Forschungsverbund Gif (Generation IV International Forum) sechs Typen ausgewählt, die die Experten bis 2030 entwickeln wollen. Alle Designs brechen radikal mit dem bisherigen Stand der Technik. Der Brennstoff wird teilweise ganz anders als

heute im Reaktorkern verpackt; das soll es erschweren, beim Umgang mit dem Brennstoff Material für Waffen abzuzweigen. Im Inneren der Reaktoren zirkulieren neben dem heute üblichen Wasser Heliumgas, geschmolzenes Salz, flüssiges Metall oder Natrium. Diese Kühlmittel sollen Temperaturen von 500 bis 1000 Grad Celsius aushalten; heute sind Werte um 300 Grad üblich.

Auf dem Papier haben die sechs Reaktortypen große Vorteile. Die hohen Temperaturen in ihrem Inneren zum Beispiel machen nicht nur die Stromgewinnung effizienter, sie erlauben es auch, Wasserstoff zu erzeugen, der vielen als Treibstoff für Autos der Zukunft gilt. „Es gibt da aber noch große technologische Lücken“, warnt Wolfgang Kröger, der für die Schweiz bei Gif mitgearbeitet hat. „Das braucht noch viel Entwicklungsarbeit.“

Um die Atommüllfrage zu lösen, haben sich die Planer auf die Physik besonnen. Die Reaktoren sollen durch kernphysikalische Reaktionen ihren eigenen Abfall verbrennen. Das würde die Anforderungen an ein Endlager drastisch senken. „Die Planer wollen nicht nur die Menge reduzieren, sondern vor allem die Zeit, für die ein gesicherter Einschluss nötig ist“, sagt Wolfgang Kröger. Das Ziel ist es, von den geologischen Zeiträumen von Hunderttausenden oder gar Millionen von Jahren zu historischen Zeiträumen von einigen tausend Jahren zu kommen. So lange, lautet die Annahme, dürfte eine Zivilisation das Wissen bewahren können, welche Stoffe wo mit welchen Methoden eingelagert worden sind.

Um das zu erreichen, sind vier der sechs Reaktortypen als so genannte schnelle Systeme ausgelegt. In ihrem Inneren werden die bei der Kernspaltung entstehenden Neutronen nicht wie in konventionellen Reaktoren abgebremst. Denn wenn sie ihr Tempo behalten, können sie einige der dort entstandenen radioaktiven Stoffe unschädlich machen (siehe Grafik Seite 80), wenn man diese konzentriert und an die richtige Stelle im Reaktor stellt.

„Damit das effektiv funktioniert, müsste man erst einmal ein System der Wiederaufarbeitung schaffen, das viel komplizierter ist als alles, was wir heute kennen“, sagt Wolfgang Liebert von der Darmstädter Forschungsstelle Ianus. Bisher werden bei der nuklearen Mülltrennung nur Plutonium und Uran aussortiert. In Zukunft müssten zudem noch so genannte Aktinide und langlebige Spaltprodukte isoliert werden. „Von der Güte der Abscheidung hängt es ab, wie die Qualitätsanforderungen an ein Endlager sinken“, sagt Wolfgang Köhler. Um die nötige Zeit um einen Faktor von 1000 zu senken, müssten die Fabriken 99,9 Prozent der radioaktiven Stoffe aus dem Atommüll lösen können. Selbst wenn das gelänge, wäre es für Wolfgang Liebert ein Albtraum: „Man hat eine hochradioaktive Suppe. Und die soll man dann auch noch transportieren? Und vor Diebstahl durch Terroristen schützen?“

Denn eine Schwachstelle der Technik kann keine technische Maßnahme entschärfen: den Menschen. Nahezu alle Nuklearunglücke der Vergangenheit, einschließlich der Explosion von Tschernobyl und der Kernschmelze in Harrisburg, sind durch eine Kombination von technischen Fehlern und menschlichen Fehlentscheidungen ausgelöst worden. Bedienungsmannschaften waren schlampig, überfordert, leichtsinnig oder haben Sicherheitsmängel verschwiegen. Insofern muss eine mögliche Regierung Merkel entscheiden, bevor sie Deutschland auf den Atompfad zurückführt: Vertraut sie eigentlich den Menschen genug, die ihr bei der Bundestagswahl das Vertrauen schenken sollen? ■