

9 Fragen zu Kernkraftwerken

Prof. Dr. Horst-Joachim Lüdecke¹, Dr. Götz Ruprecht² und
Dr. Armin Huke²

¹Europäisches Institut für Klima und Energie, gemeinnütziger e.V.

²Institut für Festkörper-Kernphysik, gemeinnützige GmbH

13. Oktober 2016

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
1. Frage: Was ist an Kernkraftwerken eigentlich so besonders?	3
2. Frage: Wie funktionieren Kernkraftwerke, können sie explodieren wie eine Atombombe?	5
3. Frage: Was sind die Nachteile von Kernkraftwerken?	7
4. Frage: Was sind die Vorteile von Kernkraftwerken?	8
5. Frage: Geht das Uran nicht bald zur Neige?	9
6. Frage: Was waren die Ursachen der Havarien von Tschernobyl und Fukushima?	10
7. Frage: Ist Radioaktivität schädlich?	11
8. Frage: Was ist mit nuklearem Abfall und den Rückbaukosten?	15
9. Frage: Hat die Zukunft neuer Kernkraftwerke schon begonnen?	16
Fazit	19

Einleitung

Die zivile Nutzung der Kernenergie verbinden viele Mitbürger mit extremer Gefahr. Diese insbesondere deutsche Angst wird in vielen Ländern mit Befremden aufgenommen. Sie steht in Gegensatz zu gut dokumentierten und im Internet leicht erreichbaren Fakten über die Sicherheit deutscher Kernkraftwerke und der seiner europäischen Nachbarn. Die Furcht vor der Kernenergie ist irrational und Folge einer in Deutschland über Jahrzehnte geübten Desinformation über die Kernenergie, der niemand entschieden die Fakten entgegensetzte, die KKW-Betreiber eingeschlossen.

Eine vernünftige, sachgerechte Energiepolitik war schließlich nicht mehr möglich. Die Entscheidung einer Ethikkommission, der zwar drei Kirchenvertreter, aber kein Energiefachmann angehörte [1], wurde von der Politik vorgeschoben, um den endgültigen Ausstieg aus der deutschen Kernenergienutzung zum Gesetz zu machen. Diese Entwicklung hat unserer Wirtschaft erheblichen Schaden zugefügt und wird ihn weiter erhöhen. Dass man selbst in einer freien, modernen und gebildeten Gesellschaft die Bürger Jahrzehnte lang derart desinformieren kann, wird spätere Generationen von Psychologen und Soziologen noch stark beschäftigen. Für eine Nation, die in Naturwissenschaften und Technik zur Weltspitze zählt, darf man es jedenfalls als intellektuellen Tiefpunkt sehen.

Inzwischen haben in Deutschland Kernkraftwerke trotz ihrer weltweit zunehmenden Verbreitung [2] den Ruf mittelalterlicher Hexen und Teufel. Wie bei der Inquisition steht das Ergebnis von Anfang an fest. „Argumente“ werden nachträglich angepasst, halten aber nicht einmal den einfachsten Überprüfungen stand. Eine umfangreiche Sammlung derartiger Beispiele inklusive Faktencheck findet man bei den „Hundert guten Antworten“ [3]. Der Fachmann erkennt ein weit verbreitetes Kenntnisdefizit über Kernkraftwerke und erlebt oft sogar Aggression von Gesprächspartnern, wenn er es unternimmt, dieses Defizit an Hand belegter Fakten zu verringern. Die vorliegenden „9 Fragen zu Kernkraftwerken“ machen genau dies. Sie richten sich an Zeitgenossen, welche eine politisch oft gewünschte und von den sogenannten Leitmedien umgesetzte Meinungsbildung als solche erkannt haben, die sich nicht nur auf die Kernenergie beschränkt. Sie sollen einen ersten Zugang zu den Fakten verschaffen, die später durch eigene Recherchen ergänzt werden können.

Wo finden sich nun die Fakten? Zuvörderst beim „*Wissenschaftlichen Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung*“ UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). UNSCEAR beschäftigt überwiegend internationale Experten aus dem staatlichen Forschungsbereich, die als neutral und vertrauenswürdig gelten können [4]. In der deutschen Öffentlichkeit ist diese wohl wichtigste Organisation so gut wie unbekannt, die Medien ignorieren sie. Auch sind Englischkenntnisse für die Lektüre der UNSCEAR-Broschüren nötig, es gibt sie nicht in deutsch, was alleine schon bezeichnend ist. Vertrauenswürdig ist auch die Internationale Atomenergie-Organisation IAEA [5], zu deren Aufgaben die Förderung der friedlichen Nutzung der Kernenergie gehört. Ihre Hauptaufgabe ist die

Überwachung kerntechnischer Anlagen. Die IAE0 informiert aber auch über den Zustand und den Ausbau von Kernreaktoren, bringt Sicherheitsberichte heraus und veranstaltet wissenschaftlich-technische Konferenzen. Obwohl 2005 mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet, begegnet man nicht selten dem Vorwurf, die IAE0 sei ein „Lobbyverein“. Belege für diese Behauptungen gibt es nicht. Der Lobbyvorwurf ist regelmäßig der letzte Notanker, wenn Argumente gänzlich fehlen.

Nur extrem selten sind Realitäts-Lichtblicke erstaunlicherweise auch in deutschen Publikationen zu finden, sogar in der grünen ZEIT [6]. Die Verbreitung der Unwahrheit über die Kernenergie aufzuhalten haben diese wenigen Ausnahmen nicht vermocht. Somit kann der deutsche Bürger heute nichts Substantielles mehr über Kernkraftwerke und ihre weltweiten Weiter- und Neuentwicklungen den deutschen Medien entnehmen, von Ausnahmen in multi-nationalen Sendern wie ARTE einmal abgesehen. Statt (noch) zahlreich vorhandener Fachleute aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen sieht man in deutschen Berichten oder Talkshows überwiegend Vertreter nicht-fachlicher Einrichtungen und Aktivistenorganisationen wie Greenpeace, die dem gutgläubigen Zuschauer dann als Experten vorgestellt werden. Allein das Zusammengehen der deutschen TV- und Radiostationen mit derartigen Organisationen bietet schärfer beobachtenden Zeitgenossen bereits wertvolle Hinweise auf die Objektivität der einschlägigen Berichterstattung.

1. Frage: Was ist an Kernkraftwerken eigentlich so besonders?

Kernkraftwerke erzeugen, wie alle anderen Kraftwerke auch, elektrischen Strom als wichtigste Energieform jeder modernen Industrienation. Sie verfügen aber über eine ungleich höhere Energiedichte ihres Brennstoffs Uran oder Thorium verglichen mit allen anderen Kraftwerkmethoden wie Kohle, Gas, Erdöl, Wind, Sonne und Wasser (Bei Sonne und Wind ist ein Vergleich nur mit der Leistungsdichte möglich). Kernkraftwerke besitzen damit ein maßgebendes Alleinstellungsmerkmal. Beispiele für Energiedichten in Kilowattstunden pro Kilogramm: Braunkohle 2,5, Steinkohle 8, Benzin 12, Uran hingegen 24.000.000 [7]. Heutige Reaktoren nutzen davon allerdings nur 5%, aber auch das ist noch ein Millionenfaches der Energiedichte fossiler Quellen.

Die Eigenschaft höchster Energiedichte (bzw. auch Leistungsdichte) des Brennstoffs macht den entscheidenden Unterschied zwischen Kernkraftwerken und allen anderen Kraftwerkmethoden aus. Die Effizienz der Stromerzeugung wächst nämlich mit diesen beiden Größen, Kosten und Flächenverbrauch dagegen sinken mit ihnen umgekehrt. Aus diesem Grunde ist die Nutzung der Kernenergie **prinzipiell** die **kostengünstigste** und **raumschonendste** aller Kraftwerkmethoden, ihr Strom ist am preiswertesten. Das sieht man insbesondere am Flächenverbrauch. Kernkraftwerke passen sogar in U-Boote. Windräder dagegen fressen im wahrsten Sinne ganze Landschaften, so ist aus Wind hierzulande noch

nicht einmal die elektrische Leistung von jahresgemittelten 1 Watt pro Quadratmeter herauszuholen [8]. Wollte man den gesamten Strom Deutschlands aus Wind erzeugen, wäre dazu mehr als die Fläche Bayerns erforderlich [9] – sicher wohl eine Zumutung für Mensch und Natur. Dabei macht Strom sogar nur $\sim 20\%$ der Primärenergie unseres Landes aus.

Das „**kostengünstig**“ der Kernenergie trifft aber für die heutigen Kernkraftwerke nicht in dem Maße zu, wie es die oben genannten Zahlen vermuten lassen. Hier lassen noch zu viele Gründe den prinzipiellen Kostenvorteil der Kernkraft wieder extrem zusammenschmelzen. Einige Stromkosten in Zahlen [Cents/kWh], wobei die Kernenergie auch in seriösen deutschen Quellen [10] nicht mehr vorkommt (Anmerkung: da Wind- und Sonnenstrom wegen ihrer Fluktuation teure Gas-Backup-Kraftwerke gleicher Leistung benötigen, sind die hier angegebenen Werte für Wind und Sonne mit Faktoren zwischen 3 und 6 zu multiplizieren): Uran 1,5, Kohle 2,4, Wind 7, Photovoltaik 14 [11].

Die dunklen Punkte der **heutigen** Kernenergie sind dagegen zum einen die Angst vor einer Havarie mit Freisetzung radioaktiver Strahlung, wenn unsachgemäß ausgelegte Kernkraftwerke oder grob unzureichender Sicherheitstechnik ein erhöhtes Gefährdungspotential erzeugen. Zum zweiten ist es der radioaktive Abfall, der besondere Vorkehrungen seiner Unterbringung und Beseitigung erfordert. Radioaktive Strahlung ist mit unseren Sinnen nicht wahrnehmbar. Jede die eigene Erfahrung übersteigende Gefahr wird als besonders bedrohlich empfunden, ob diese Empfindung nun real ist oder nicht. Damit ist neben Angst auch der zweite Hauptgrund für die allgemeine Fehleinschätzung von Kernkraftwerken angesprochen. Solche Fehleinschätzungen sind nicht neu, unsere Vorfahren fürchteten die Geschwindigkeiten der neuen Eisenbahn, so warnten damals Ärzte vor Fahrten mit über 50 km/h als einem lebensgefährlichen Wagnis.

Nach nunmehr über 60 Jahren ziviler Kernenergienutzung, fünf schweren Havarien (Harrisburg, Tschernobyl und Fukushima I, Block 1-3) sowie zahlreichen folgenlosen Betriebsstörungen in Kernkraftwerken liegen ausreichende Belege über Schadenspotential und Schadensstatistik der zivilen Kernenergienutzung vor. Man verwendet dabei das Kriterium „*Wie viele Tote pro erzeugter Elektrizität verursacht ein bestimmter Typ von Kraftwerken auf Dauer?*“ Unter diesem Kriterium sind **Kernkraftwerke** mit weitem Abstand die **sicherste** Form aller Stromerzeugungsmethoden überhaupt [12]. Die direkten Todesfälle infolge Kernkraftwerks-Havarien übersteigt bis heute nicht die Zahl 50, und dies ändert sich auch unter Einbeziehung eventueller Spätschäden infolge zu hoher radioaktiver Strahlenbelastung nach den bisher vorgefallenen Havarien nicht [4].

Im Gegensatz zu Kernkraftwerken summieren sich dagegen die Opferzahlen aus Katastrophen in Kohlebergwerken und infolge von Staudammbrüchen zu mehreren Hunderttausenden [13]. Aber nicht nur Kohle- und Wasserkraft fordern mehr Opfer als die Kernenergie. Selbst die anscheinend harmlosen Windräder und die Photovoltaik-Paneele auf hohen Dächern haben die Kernenergie infolge der aus großer Höhe zu Tode gestürzten Monteure inzwischen in der Schadensstatistik überholt [12]. Die von UNSCEAR durch zahlreiche begutachtete Publikationen belegten und gesicherten Fakten über die Zahl

von Opfern infolge Havarien in Kernkraftwerken stehen im Widerspruch zu Behauptungen (z.B. von Greenpeace), die in bewusster Falschaussage von weltweit bis zu Hunderttausend Toten infolge Spätschäden des Tschernobyl-Unglücks sprechen [14]. Niemand kann seriöse Belege durch begutachtete Publikationen für diese absurden Behauptungen vorlegen. Es mangelt auch an Plausibilität. Würde diese Zahl nämlich zutreffen, so müssten auch *jedes Jahr* fast eine Million Menschen allein an den Folgen ganz natürlicher Radioaktivität sterben. Besonders in Gebieten mit ungewöhnlich hoher natürlicher Radioaktivität müsste man eine sehr viel geringere Lebenserwartung beobachten – dies ist aber nicht der Fall [15]. Um es zuzuspitzen: Übertragen auf das hypothetische Krebsrisiko von Alkohol hätte das Münchener Oktoberfest jährlich 2.000 Tote zu beklagen [16], was natürlich auch nicht beobachtet wurde. Mit allen Kenntnissen und Erhebungen über die Gefährlichkeit von Radioaktivität vereinbar und klar belegt ist nur die oben erwähnte Zahl von grob 50 Opfern.

Weitere Alleinstellungsmerkmale der Kernenergie sind das völliges Fehlen von Emissionen, aber umgekehrt auch ihr „Pech“, von interessierten ideologischen Gruppen zum Brennpunkt aller Bestrebungen gewählt worden zu sein, moderne Technik grundsätzlich als etwas Unnatürliches und für den Menschen Schädliches anzusehen. Über keine technische Methode ist in Deutschland so viel Unwahrheit verbreitet und vor allem auch geglaubt worden wie über die Gefährlichkeit der zivil genutzten Kernenergie. Dass gleichermaßen hierzulande noch **kein einziger** Mensch durch Strahlung aus Kernkraftwerken oder durch radioaktive Abfälle zu Schaden kam, ist ein fast unglaublicher Widerspruch. Die jährlich über drei Tausend deutschen Verkehrstoten infolge der technischen Methode des Kraftfahrzeugs werden unreflektiert hingenommen. Ein sofortiges Abschaffen des Autoverkehrs würde jedes Jahr Tausende Leben retten, die Stilllegung aller deutschen Kernkraftwerke dagegen kein einziges.

2. Frage: Wie funktionieren Kernkraftwerke, können sie explodieren wie eine Atombombe?

Nein, das können sie nicht. Um dies zu verstehen, sind Vorbemerkungen erforderlich. Die Kernenergie ist ungleich stärker als die Energien unserer täglichen Erfahrung wie Wärme aus Kohle, Gas, Erdöl, Solarstrahlung oder mechanischer Windenergie. Der Grund liegt am Atomaufbau. Jedes Atom hat eine negativ geladene Hülle von Elektronen (den Trägern des elektrischen Stroms). Die Energien, die von Änderungen dieser Hülle ausgehen, sind die unserer täglichen Erfahrung. Der sehr schwer zugängliche Atomkern dagegen besteht aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen, beide zusammen bezeichnet man als Nukleonen. Energien bei Kernumwandlungen können bis ca. 100 Millionen Mal stärker sein als die der Elektronenhülle. Dies macht die **energetische Überlegenheit** von Kernkraftwerken aus, die solche Kernumwandlungen nutzen.

Die Anzahl der Protonen bestimmt das Element. So besitzt der Wasserstoff als leichtestes Element nur ein Proton, der Kohlenstoff schon 6 Protonen und so fort. Die Neutronen verändern dagegen nur das Gewicht des betreffenden Elements. Die leicht verständliche Nomenklatur besteht im Kürzel des Elementnamens, an welches die Zahl seiner Nukleonen angehängt wird. C-12 bedeutet beispielsweise den natürlichen Kohlenstoff mit 12 Nukleonen (6 Protonen und 6 Neutronen). Gleiche Elemente mit unterschiedlicher Neutronenzahl (unterschiedlichen Gewichten) bezeichnet man als Isotope des Elements. Elemente mit ihrer natürlichen Neutronenzahl sind in der Regel stabil, die anderen Isotope zerfallen dagegen mehr oder weniger schnell, sie sind *radioaktiv*, wie zum Beispiel C-14 gegenüber dem stabilen C-12.

Die Kernspaltung schwerer Elemente (Uran, Plutonium, Thorium) setzt Bindungsenergie des Atomkerns frei, die genutzt wird. Der Weg dahin führt bei allen heutigen Kernkraftwerken über die berühmte Kettenreaktion. Die Spaltung eines Atomkerns wird durch ein ankommendes Neutron ausgelöst. Der Atomkern zerfällt in 2 Fragmente, die *Spaltprodukte* (welche den nuklearen Abfall darstellen), setzt dabei seine Energie sowie wieder neue Neutronen frei, die ihrerseits neue Kerne spalten können. Das funktioniert beispielsweise bei Uran-235 sehr gut, bei Uran-238 nur sehr schlecht. Natürliches Uran, wie man es in den Minen fördert, ist immer ein Gemisch verschiedener Isotope, im Falle von Uran genau umgekehrt zur Spaltbarkeit: U-238 kommt 130 Mal so häufig vor wie U-235. Wäre dies nicht so, könnten in der Natur nukleare Kettenreaktionen ganz von selbst auftreten. Tatsächlich gab es solche **natürlichen** Kettenreaktionen – oder wenn man so will, natürlichen Kernreaktoren – auf unserer Erde vor 1,5 Milliarden Jahren, weil der Anteil an U-235 damals höher war [17]. Es hat über diese lange Zeit durch natürlichen Zerfall abgenommen. Heute muss man das Isotop U-235 künstlich konzentrieren, d.h. *anreichern*, um damit einen Kernreaktor betreiben zu können. Dieser Prozess verursacht einen Großteil der Kosten des Stroms aus Kernenergie.

Bei ausreichender Konzentration von U-235 reichen die dabei frei werdenden Neutronen aus, weitere Kerne zu spalten und damit eine Kettenreaktion aufrecht zu erhalten. Die Neutronen werden mit hoher Geschwindigkeit emittiert. Langsame Neutronen spalten aber erheblich besser neue Kerne als schnelle. Man kann daher einen Kernreaktor bauen, wenn man die Neutronen abbremst oder *moderiert*. Dies wird in heutigen Reaktoren erreicht, indem man den Raum zwischen den Uranstäben mit einem *Moderator* füllt (meist gewöhnliches Wasser). Die Neutronen entstehen im Uran, flitzen durch den Brennstab, treffen auf das Wasser, werden dort langsamer, und spalten dann in einem der benachbarten Brennstäbe einen weiteren Urankern. Man bezeichnet diesen, heute fast ausschließlich eingesetzten Kernkraftwerkstyp als „**thermisch**“ im Hinblick auf seine langsamen (thermischen) Neutronen.

Hiermit ist jetzt zuverlässig auch die oft geäußerte Befürchtung entkräftet „*Kernkraftwerke könnten explodieren wie eine Atombombe*“. Das ist **falsch**. Geht etwas total schief und die Kettenreaktion erzeugt zu viel Wärme, dehnt sich das Wasser aus oder verdampft gar. Dadurch wird weniger moderiert, es finden weniger Spaltungen statt, und

die Wärmeproduktion lässt wieder nach. Nur die für den regulären Betrieb vorgesehene Anordnung kann wirklich Spaltungsenergie freisetzen, und deren Toleranzbereich ist äußerst schmal. Bei der Atombombe dreht sich die ganze Technik darum, diesen geometrischen Toleranzbereich per Design zu vergrößern, bei Kernkraftwerken ist es genau umgekehrt. Man bezeichnet solch einen Mechanismus als *inhärent sicher*, weil er im Prinzip des Systems selber steckt und es keiner besonderen Vorkehrungen bedarf, um ihn in Gang zu setzen. Wenn aber alles so einfach und so sicher ist, wie kamen dann die schweren Havarien von Tschernobyl und Fukushima zustande? Beim Tschernobyl-Reaktor war immer bekannt, dass dieser Toleranzbereich viel zu groß ist, so dass dieser Typ in westlichen Ländern nie eine Zulassung bekommen hätte, aber selbst dieser Unfall führte nicht zu einem Atompilz. Bei Fukushima konnte man hingegen anschaulich sehen, dass diese inhärente Sicherheit funktioniert, entsprechend gab es keine „Verstrahlungen“. Es fehlten aber andere Vorkehrungen. Dazu mehr in Frage 6.

Heutige Kernkraftwerke sind fast alle wassermodert, wobei das Wasser gleichzeitig die Wärme aus der Kernspaltung aufnimmt. Danach geht es ganz konventionell ähnlich wie in Kohle- und Gaskraftwerken weiter: Der erzeugte heiße Wasserdampf dehnt sich aus, treibt Turbinen an, die dann über Generatoren Strom erzeugen. Der Unterschied besteht daher nur in der Art, die Wärme zu erzeugen. Die Spaltprodukte, die energetisch nicht mehr nutzbar sind, haben ein unnatürliches Verhältnis von Protonen zu Neutronen und sind infolgedessen so lange radioaktiv, bis sie von selbst ein stabiles Verhältnis erreicht haben. Dies kann je nach Art des Spaltproduktes rasch erfolgen, oder sich über Jahrhunderte hinziehen. Radioaktivität hat den Vorteil, dass ihr Verschwinden genau berechenbar ist. Dies trifft für chemische Abfälle nicht zu, sie halten sich teilweise ewig. Dieser Vorteil wird in der Anti-Atom-Agitation oft ins Gegenteil verdreht, indem „Hunderttausende Jahre Lagerzeit“ der nuklearen Abfälle betont werden, ohne zu erwähnen, dass es für fast alle anderen Arten giftiger Abfälle überhaupt kein Zeitlimit gibt.

3. Frage: Was sind die Nachteile von Kernkraftwerken?

Zur Antwort muss man unterscheiden zwischen den heutigen thermischen Kernkraftwerken und denen mit schnellen Neutronen, den „schnellen Reaktoren“, kurz Schnellspaltreaktoren, oder auch „Brutreaktoren“. Letztere laufen und liefen bereits [18]. Die Übermacht heutiger thermischer Reaktoren, überwiegend vom Typ „Druckwasserreaktor“, verhinderte allerdings bisher, dass sie in Serie gingen. Aber auch Kostengründe spielen eine Rolle: Der prominenteste Vertreter der Schnellspaltreaktoren verwendet ausgerechnet das schwer zu handhabende Natrium als Kühlmittel. Das hat historische Gründe, trägt aber leider dazu bei, dass die Entwicklung anderer Schnellspaltkonzepte wie die des bleigekühlten Reaktors oder des Flüssigsalzreaktors gehemmt werden (siehe auch Frage 9). Hinzu kommt, dass Kernkraftwerke sehr lange Laufzeiten haben, über 50 Jahre. Diese eigentlich positive Eigenschaft macht es oft schwer, andere Konzepte „mal eben“ auszuprobieren.

Die aufgewendeten hohen Investitionen können nicht einfach vernichtet werden, indem man die bestehenden Druckwasserreaktoren vorzeitig „in den Ruhestand“ schickt und durch schnelle Reaktoren ersetzt. Nur wir Deutschen machen dies – ohne Ersatz. Aber auch bei Neubauten entscheidet man sich weltweit immer wieder für Altbewährtes – in der Nuklearindustrie scheut man Innovationen, greift immer wieder auf die Druckwasserreaktoren zurück, selbst wenn deren Neubau wie beim Europäischen Druckwasserreaktor EPR in einem Fiasko endet [19].

Die heutigen thermischen Reaktoren weisen einen maßgebenden Nachteil auf, den es bei den „schnellen“ Typen nicht mehr gibt: Sie nutzen weniger als 1% des geförderten Natururans, erzeugen daher zu 99% mehr oder weniger Abfall und schöpfen infolgedessen den prinzipiellen Kostenvorteil der Kernenergie nur zu einem Bruchteil aus. Zusammen mit den inzwischen stark die Kosten treibenden Sicherheitsanforderungen rücken heutige Kernkraftwerke inzwischen sogar wieder nahe an die billige Kohle heran. Obwohl das Abfallproblem selbst bei den heutigen thermischen Typen keine technischen oder sicherheitsrelevanten Probleme bereitet (die hier diskutierten Probleme sind ausschließlich politischer Art), muss es als Nachteil gesehen werden. Dieser Nachteil entfällt bei schnellen Reaktoren zum Großteil, weil sie kombiniert mit geeigneter Aufbereitung 100% des Natururans nutzen können und somit keinen nennenswerten, über geologische Zeiträume endzulagernden Abfall mehr produzieren.

Der angeblich größte Nachteil von Kernkraftwerken hat schließlich nichts mehr mit der Realität, sondern nur noch mit einer Fiktion zu tun. Es ist ihr schon angesprochener „schlechter“ Ruf, ruhende „Atombomben“ zu sein. Zu dieser physikalisch schlicht falschen Aussage hilft nur sachliche Aufklärung. Infolge der steten Verbreitung der Kernenergie und besserer Information weltweit wird diese Rufschädigung auf Dauer auch in Deutschland irgendwann vermutlich einmal verschwinden.

4. Frage: Was sind die Vorteile von Kernkraftwerken?

Wir gehen zunächst von den heutigen Kernkraftwerkstypen aus. Als erster Vorteil ist die weite Skalierbarkeit zu nennen. Kernkraftwerke können beliebig groß wie klein gebaut werden, die Reaktoren in U-Booten und Eisbrechern zeigen es. Der größte, praktisch unschlagbare Vorteil ist freilich die bereits erwähnte extrem hohe Energiedichte und der damit verbundene winzige ökologische Fußabdruck. Im Vergleich zu Kohle- und Gaskraftwerken wirkt sich das vor allem auf die Förderung des Brennstoffs aus: Für die gleiche Menge an erzeugtem Strom muss bei Kohlekraftwerken deutlich mehr als 10 mal so viel Abraum, d.h. Natur, bewegt werden wie bei Kernkraftwerken. Zukünftige Kernkraftwerkstypen, die bereits als Versuchsanlagen erfolgreich im Einsatz sind, können das Natururan bis zu 100 Mal so effizient nutzen, beispielsweise der Flüssigsalzreaktor MSR unter Frage 9. Der ohnehin schon geringe Eingriff in die Natur wird dann nochmals

dramatisch reduziert.

Im Vergleich mit Wind- und Solarenergie bewirkt die hohe Energiedichte automatisch einen extrem geringen Landschaftsverbrauch, der auch vorgelagerte Produktionsketten umfasst. Der Raumvorteil von Kernkraftwerken gegenüber Windrädern wurde schon in Frage 1 angesprochen, als weiteres Anschauungsbeispiel entspricht die Leistung eines einzigen „normalen“ Kernkraftwerks dem von 300 km Windrädern hintereinander.

Als zweiten Vorteil weisen Kernkraftwerke keine Emissionen auf. Das trifft inzwischen praktisch auch auf Braunkohlekraftwerke mit moderner Filtertechnik zu, die völlig unsachgemäß oft als „Dreckschleudern“ bezeichnet werden. Von Befürwortern von Kernkraftwerken wird betont, dass diese auch kein CO₂ ausstoßen. Das ist zwar korrekt, aber kein gutes Argument, denn CO₂ ist ein für Pflanzen und damit auch für die Ernährung von Tieren und Menschen lebensnotwendiges Spurengas. Seine schädliche Klimawirkung ist dagegen bis heute nur vermutet und nicht belegbar [20], [21].

Als dritten Vorteil können Kernkraftwerke den ständig vorhandenen Grundbedarf an Strom decken, sie sorgen für *Grundlaststrom*. Das hebt sie von Windrädern und Photovoltaikzellen ab, die nur weitestgehend am Bedarf vorbei unbrauchbaren Fluktuationsstrom erzeugen können. Zum Ausgleich braucht man dann teure Gaskraftwerke oder unbezahlbare Speicher.

Ein vierter Vorteil ist schließlich die Standortunabhängigkeit. Kernkraftwerke fügen sich ideal in die Raum- und Kapazitätsplanung jedes Landes ein. Die Kosten für elektrische Übertragungsleitungen werden minimal. Ein Windkraftwerk baut man an der Küste oder zumindest in windstarken Gegenden, einen Solarpark im sonnigen Süden, ein Wasserkraftwerk an einem Fluss mit möglichst großem Gefälle. Man ist nicht nur abhängig von der zufälligen Topologie und Landschaft, sondern greift auch massiv in diese ein. Ein Kernkraftwerk ist dagegen ortsunabhängig und unauffällig. Wegen der preiswerteren Kühlung bevorzugt man zwar die Nähe zu Flüssen, dies ist aber keine Notwendigkeit.

5. Frage: Geht das Uran nicht bald zur Neige?

Alle Brennstoffe sind grundsätzlich begrenzt, wobei Schätzungen recht weit auseinander gehen. Immerhin gibt man der Kohle noch mehrere hundert Jahre, dem Erdöl aber schon weniger als 100 Jahre. Wie steht es um das Uran? Beim aktuellen Verbrauch heutiger Kernkraftwerke wird die Reichweite von Uran auf etwa 100 Jahre geschätzt. Liegt hier eine ähnliche Mangelsituation wie beim Erdöl vor? Nein, ganz im Gegenteil, denn die Verhältnisse liegen hier prinzipiell anders. Zunächst aber ist die Schätzung für die heutigen Reaktoren richtig – bei allen Unsicherheiten. Die heutigen Typen werden aber mit Sicherheit früher oder später von den zum Teil schon eingesetzten schnellen Reaktoren

abgelöst.

Da schnelle Reaktoren bei geeigneter Aufbereitung das geförderte Uran praktisch zu 100% nutzen können, kommen wir statt 100 Jahre dann auf 10.000 Jahre Uranreichweite. Uran gibt es aber in unvorstellbaren Mengen auch im Meer. Seine Förderkosten aus dem Meer nähern sich denen aus dem Bergbau immer mehr an und sind zwar für die heutigen Reaktoren noch unwirtschaftlich, nicht aber mehr für schnelle Reaktoren mit ihrem viel geringeren Brennstoffbedarf. Die Förderung von Uran aus Meerwasser wird praktisch niemals versiegen, denn das Metall wird laufend von Flüssen und Bächen ausgewaschen und ins Meer gespült. Selbst bei vollständiger Energieversorgung (nicht nur Strom) aus Kernenergie einer hoch zivilisierten Menschheit von 10 Milliarden Köpfen stünde dann Uran für viele Millionen Jahre zur Verfügung. Vom Thorium, das nur im Boden vorkommt, ist dabei nicht einmal die Rede, dieses würde sogar für mehrere Hundert Millionen Jahre ausreichen. Eine detailliertere Analyse findet sich hier [22].

Der Begriff „Erneuerbare Energien“ definiert sich darüber, dass diese „im Rahmen des menschlichen Zeithorizonts praktisch unerschöpflich zur Verfügung stehen“ [23]. Aus den erläuterten Reichweiten wird nun deutlich, dass Kernenergie ohne Einschränkungen zu den „Erneuerbaren“ zu rechnen ist – ein Faktum, das die Befürworter und Profiteure der „Erneuerbaren“ mit ihrem ideologischen Tunnelblick nicht akzeptieren wollen.

6. Frage: Was waren die Ursachen der Havarien von Tschernobyl und Fukushima?

Die wesentlichen Ursachen waren in Fukushima eine sträflich unzureichende Bauausführung und in Tschernobyl der inhärent gefährliche Reaktortyp (der in Frage 2 erwähnte zu große Toleranzbereich der Energieproduktion), in beiden Fällen also Verantwortungslosigkeit der Planer und Betreiber. Die Reaktoren beider Unglücksfälle hätten in Mitteleuropa keine Bau- oder gar Betriebserlaubnis erhalten. Der Tschernobyl-Reaktor wurde für militärische Zwecke genutzt und wurde mit leicht brennbarem Graphit (an Stelle von Wasser) moderiert. Das kann in dieser speziellen Anordnung zu sogenannten „Leistungsexkursionen“ führen: Bei höherer Temperatur wird nicht weniger, sondern noch mehr Wärme produziert – solange, bis ein Schaden entsteht. Dieses bekannte instabile Regelungsverhalten des Reaktors lässt eine Abweichung nicht automatisch in den Sollzustand zurückkehren, sondern bei zu großer Abweichung völlig unbeherrschbar werden. Bilanz des Tschernobyl-Unglücks: 30 Tote innerhalb weniger Wochen. Die Spätfolgen sind unklar, weil sie nur statistisch aus Todesraten ableitbar sind, die die natürlichen Todesraten kaum überschreiten, näheres in UNSCEAR [24].

Die Reaktoren von Fukushima entsprachen dagegen vom Bautyp her dem heutigen Stand, Leistungsexkursionen waren wegen der Wassermoderierung durch passive inhärente Si-

cherheit ausgeschlossen. Sie sind jedoch nicht gefeit gegen Überhitzung, wenn man nicht aktiv kühlt. Entgegen der immer wieder behaupteten „Unbeherrschbarkeit“ ist dieser Fall aber in der Kraftwerksauslegung ausdrücklich vorgesehen. Selbst bei einem kompletten Zusammenschmelzen des Reaktorkerns, der *Kernschmelze*, umschließt die Betonummantelung die gesamte Masse. In Fukushima griffen genau diese passiven Vorkehrungen, die Schmelze konnte nicht austreten. Allerdings fehlten wichtige Sicherheitselemente des heutigen Standards, hier Wasserstoff-Rekombinatoren zur Verhinderung von Knallgasexplosionen, sowie Wallmann-Filter gegen das Austreten radioaktiver Schwebstoffe in die Luft. Obwohl diese Radioaktivität weit unterhalb jeder Nachweisgrenze für gesundheitliche Schäden in der Bevölkerung lag, wurde vorsorglich evakuiert (s. auch Frage 7).

Wie konnte es aber überhaupt zur Überhitzung kommen? Obwohl die Ursache eine gewaltige Naturkatastrophe war, muss man die Folgen dem Betreiber mit seiner unverantwortlich leichtsinnigen Auslegung der Kraftwerksanordnung anlasten. Unzureichend hohe Schutzmauern gegen Tsunamis, die in dieser Stärke dort durchaus zu erwarten waren, und ein fehlender Schutz der Notstromaggregate, die nicht am höchsten, sondern ausgerechnet am tiefsten Punkt angebracht waren, sorgten für den Totalausfall der Stromversorgung, der Pumpen und somit der Kühlung. Im Gegensatz zu Tschernobyl war das Bedienungspersonal aber gut ausgebildet und geschult. Bilanz des Fukushima Unglücks: kein Todesopfer, aber riesiger materieller Schaden [25].

Es zeugt nicht gerade von Objektivität, die beiden Havarien der Kernenergie schlechthin anzulasten. Wenn ein vollbesetzter Bus mit defekten Bremsen über Alpenpässe fährt, muss mit Opfern gerechnet werden. Alle heute neu errichteten Kernkraftwerke weltweit, aber auch die meisten noch existierenden älteren Typen können grundsätzlich keine Schäden anrichten, wie sie der völlig anderen Voraussetzungen wegen in Fukushima oder gar Tschernobyl vorkamen. Jede Technik ist grundsätzlich mit Sicherheitsrisiken verbunden, und von Kernkraftwerken das Risiko „Null“ zu verlangen, „*hieß die Grenzen menschlichen Erkenntnisvermögens verkennen und würde weithin jede staatliche Nutzung von Technik verbannen*“, wie das Bundesverfassungsgericht 1978 bereits Kernkraftgegnern vorhielt [26]. Die bisherige Existenz von Kernkraftwerken beweist zumindest, dass diese trotz der Desaster von Fukushima und Tschernobyl die sichersten und naturschonendsten Methoden zur Erzeugung elektrischen Stroms sind.

7. Frage: Ist Radioaktivität schädlich?

Es kommt darauf an. Radioaktivität kann auch sehr nützlich sein. Patienten, die in radioaktiven Heilquellen gesunden und Krebspatienten, bei denen eine Bestrahlung zum Absterben des Tumors führte, werden es bezeugen. Radioaktivität ist die Fähigkeit eines Atomkerns, Strahlung zu emittieren, wobei er – oft mit Zwischenschritten – in einen nicht-radioaktiven stabilen Kern übergeht. Die *Strahlung* selber besteht aus Partikeln

unterschiedlicher Art, die selbst nicht radioaktiv sind und bei zu hoher Intensität in organischem Gewebe Schäden an Zellen bewirken können. Ein weit verbreiteter Irrtum ist, dass ein bestrahlter Gegenstand oder Organismus selbst radioaktiv wird, *Radioaktivität ist nicht ansteckend*. Ein weiterer gelegentlich zu vernehmender Irrtum ist, dass zwischen natürlicher radioaktiver Strahlung unserer Umgebung (Steine, Heilquellen usw.) und der Strahlung von radioaktivem Abfall aus Kernkraftwerken ein Unterschied bestünde. Dies ist nicht der Fall, es handelt sich in allen Fällen um gleiche Partikel und Energien.

Der Begriff „radioaktiv“ erzeugt bei vielen Menschen zuerst einmal Angst. Dies ist verständlich, denn nicht nur durch die Druckwelle der beiden Atombombenexplosionen über Hiroshima und Nagasaki wurden unzählige Menschen getötet, auch der Strahlungsblitz sowie die später freigesetzte Radioaktivität forderten zahlreiche Opfer. Angst ist aber bekanntlich kein guter Ratgeber, Fakten sind besser. Alle Lebewesen dieser Erde waren und sind der radioaktiven Strahlung von Gesteinen, Sand oder von Wasser (z.B. Heilquellen) ausgesetzt. Die ganz natürliche radioaktive Strahlung ist in vielen Erdregionen sogar weit stärker als die in den „radioaktiv verseuchten“ Gebieten bei Tschernobyl und Fukushima [27]. Im modernen Verkehrsflugzeug bombardiert uns die radioaktive Strahlung des Kosmos, weil ein Teil der abschirmenden Erdatmosphäre bei den heutigen Flughöhen bereits unter dem Flugzeug liegt. Überraschenderweise haben aber Piloten, Stewardessen oder Personal an radioaktiven Heilquellen keine kürzere Lebenserwartung als der Bevölkerungsdurchschnitt. Woran liegt das?

Hier begegnen wir einem der Wissenschaft bestens bekannten Effekt, der von den Medien aber leider wie ein gefährliches Geheimnis gehütet wird: *Die Einwohner in Gegenden mit ungewöhnlich starker natürlicher Umgebungsstrahlung haben keine höhere Krebsraten oder gar eine geringere Lebenserwartung als Vergleichsgruppen ohne „Strahlungsbelastung“, sogar das Gegenteil legen statistische Untersuchungen nahe [15]*. Das klingt paradox, schließlich müsste doch die gänzliche Abwesenheit von Radioaktivität der Idealzustand gesunden Lebens sein – oder nicht?

Die überraschende Antwort ist *nein*. Zunächst: Ohne Radioaktivität hätte es eine andere Evolution gegeben und auch uns Menschen gäbe es dann vermutlich nicht. Mehr noch, radioaktive Strahlung in nicht zu hoher Dosis scheint die Reparaturmechanismen der Zellen anzuregen, eine Analogie zu der positiven Wirkung wie sie auch moderate Sonnenstrahlung und nicht allzu gefährliche Bakterien und Viren, kurz alle „Angriffe“ auf unser Immunsystem ausüben. Nur im permanenten Wechselspiel von äußerem Angriff und Verteidigung wird unser Immunsystem gekräftigt und ist gesundes Leben möglich. Natürlich dürfen die Angriffe unsere Immunverteidigung nicht überwinden. Einen ähnlichen Zusammenhang erkannte schon Paracelsus mit seinem berühmten Satz „*Die Dosis macht das Gift*“. Nur wirklich gefährliche Viren, zu starke radioaktive Strahlung, ja sogar anscheinend harmloses Salz in zu großer Menge verzehrt (wenige 100 g auf einmal) sind für uns tödlich oder zumindest stark schädlich. Es ist aber zu betonen, dass man über die Details der beobachteten positiven Wirkungen moderater radioaktiver Strahlung noch extrem wenig weiß.

Bei kaum einem Thema ist daher die Diskrepanz zwischen öffentlicher Wahrnehmung und wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen größer als bei der biologischen Wirkung von Radioaktivität. Gerade hier wäre es Aufgabe der öffentlich-rechtlichen Medien gewesen, aufzuklären. Leider wurde von den Medien in großem Stil das Gegenteil unternommen. Die Berichterstattung über Fukushima mit seinen rund 19.000 Tsunamitoten, aber keinem einzigen Strahlenopfer durch die Kernkraftwerkshavarie war trauriger Höhepunkt einer offensichtlich sorgsam konzertierten Kampagne gegen alles, was mit „Atom“ oder „Kern“ beginnt [28].

Für den Organismus relevant ist übrigens nicht die Intensität der radioaktiven Strahlung selber, sondern die Energie, die dabei von ihm absorbiert wird, also die *Dosis* (genauer *Äquivalenzdosis*). Die zugehörige Einheit ist das Sievert, abgekürzt Sv, oder mSv (Millisievert). Die *Dosisrate* ist dann z.B. Millisievert pro Jahr (mSv/Jahr). Was ist nun gefährlich, 1 Sv? Oder 1 μSv /Stunde? Kommt es auf die Dosis oder auf die Dosisrate an? Die richtige Antwort ist „auf beides“. Hierzu stelle man sich das erste Sonnenbad im Frühling vor. Die Haut ist noch blass und reagiert empfindlich auf die ersten Sonnenstrahlen. 30 Minuten führen deshalb sehr wahrscheinlich zu einem Sonnenbrand und sind deshalb „gefährlich“. Sonnt man sich dagegen nur 5 Minuten, und am nächste Tag wieder, und macht das 6 Tage lang, so hat man insgesamt die gleiche, nun aber ungefährliche „Sonnendosis“ erhalten. Der Unterschied liegt hier in der Dosisrate: Statt in 30 Minuten hat man die gleiche Dosis auf 6 Tage verteilt und damit die Dosisrate um einen großen Faktor verringert. Nach der ersten Bräune ist die Haut unempfindlicher gegen weitere Sonneneinstrahlung (Bräunung = Training der Hautzellen). Die „Äquivalenzdosis“ ist also weniger äquivalent als sie sich anhört, und die Zusammenhänge sind tatsächlich nicht ganz trivial.

Was weiß man denn über die gesundheitliche Wirkung radioaktiver Strahlung wirklich? Eigentlich nur dies: 1 Sv in wenigen Minuten bis etwa eine Stunde kann gefährlich, mehrere Sievert können sogar lebensgefährlich sein. Unterhalb von einem Sievert ist dagegen so gut wie nichts bekannt. Trotzdem hat die internationale Strahlenschutzkommission bereits in den 50er Jahren eine Grenze bei 0,1 Sv (also 100 mSv) gezogen, um sicher zu gehen. Ohne Angabe eines Zeitraums, in welchem diese Dosis aufgenommen wird, nützt dieser Grenzwert jedoch wenig. Denn da die mittlere natürliche Dosisrate in Deutschland bei 2 mSv/Jahr liegt, hat in 50 Jahren der Durchschnitts-Deutsche automatisch diesen Grenzwert überschritten, manche früher, andere später. Es ist also einleuchtend, dass sich der 100-mSv-Grenzwert nur auf eine einmalige kurze Belastung bezieht, die sich dann möglichst nicht wiederholen sollte.

Unzählige, zum Teil sehr ausgedehnte Regionen der Erde weisen eine natürliche Umgebungsstrahlung auf, die **weit über** dem offiziellen Limit der internationalen Strahlenschutzkommission liegt. Solche Gebiete finden sich auch in Europa, vorwiegend in Spanien, Frankreich und Finnland mit Jahreswerten zum Teil weit über 10 mSv/Jahr, also dem fünffachen von Deutschland. Extrembeispiele, allerdings außerhalb Europas, sind Jahreswerte von bis zu 450 mSv/Jahr im Iran (Ramsar) oder bis zu 200 mSv/Jahr an den

Monazitstränden der brasilianischen Stadt Guarapari, die intensiv von Badegästen zur Erholung genutzt werden [27]. Ein 90-jähriger Bewohner von Ramsar, von denen es dort nicht weniger als anderswo gibt, hat demnach die 100 mSv-Grenze der internationalen Strahlenschutzkommission um 400 Mal überschritten!

Zum Vergleich betrug die Dosisrate der in den Medien als unbewohnbar bezeichneten „Todeszone“ in Fukushima nur 7,5 mSv/Jahr, der von den japanischen Behörden evakuierte Bereich in Fukushima wies 10 mSv/Jahr auf. In allen Gebieten mit extrem erhöhter natürlicher Radioaktivität konnten bis heute keine ungewöhnlichen Gesundheitsschäden oder gar verringerte Lebensdauern der Menschen aufgefunden werden. Dagegen gibt es deutliche Anzeichen von positiven Effekten, wie bessere Heilung von Wunden. Die oben beschriebene Vermutung eines Trainings unseres Immunsystems liefern Anhaltspunkte für diese Beobachtung, die unter dem Begriff *Hormesis* bekannt ist [29] und seit längerem wissenschaftlich erforscht wird. Zumindest die gesundheitlich fördernde Wirkung von radioaktiven Heilquellen ist auch einem größeren Publikum geläufig, ohne dass es aber daraus die richtigen Schlüsse zieht.

In die offiziellen Strahlenschutzverordnungen hat die *Hormesis* aus folgenden Gründen noch keinen Eingang gefunden: Regierungen – Musterbeispiel Japan – müssen aus politischer Rücksichtnahme Maßnahmen ergreifen, die in Wirklichkeit kontraproduktiv sind. Nach den bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen waren alle Evakuierungsmaßnahmen in Fukushima und Tschernobyl überflüssig [30]. Gesundheitsschäden erfolgten tatsächlich, aber nicht durch radioaktive Strahlung, sondern durch die psychische Belastung der Einwohner, die ihre Häuser und gewohnte Umgebung verloren. In Tschernobyl hat der durch diese Belastung verursachte Alkoholismus mehr Todesopfer als die direkten Toten am havarierten Kernkraftwerk selber gefordert. Entsprechendes hat auch eine begutachtete Studie der Universität Stanford belegt [30]. Der zweite Grund besteht darin, aus *Sicherheitsgründen* die zulässige Strahlenbelastung zu niedrig anzusetzen. Dies beruht auf dem Kenntnisstand der 50er Jahre und war auch damals von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) nur als Vorsichtsmaßnahme empfohlen worden, ausdrücklich nicht jedoch zur Abschätzung von Gesundheitsrisiken [31]. Der dritte Grund schließlich liegt darin, dass es immer noch nicht genügend Langzeitstudien über die Wirkung schwacher radioaktiver Strahlung auf den menschlichen Organismus gibt.

Auf diesem mittlerweile 70 Jahre alten Kenntnisstand, der auch damals schon als vermutlich nicht korrekt eingestuft wurde, beruhen auch die teilweise absurden Sicherheitsmaßnahmen in Bezug auf die Lagerung radioaktiver Abfälle. Sicher sind viele Regeln vernünftig, jedoch sind auch radioaktive Reststoffe letztendlich nicht viel anders als chemisch-toxische Abfälle, wobei letztere – im Gegensatz zu radioaktiv-toxischen Abfällen – nicht unbedingt von selbst zerfallen. Deren Umgang ist trotz der hundertfachen Menge und der teilweise sogar höheren Toxizität in der Bevölkerung allgemein akzeptiert [32]. Man kann heute die Toxizitäten radioaktiver Stoffe, also ihre „Giftigkeit“, sehr gut angeben und sie ohne weiteres sicher endlagern. Im nächsten Abschnitt wird dieses Thema genauer behandelt. Dabei wird sich zeigen, dass tatsächlich nur ein verschwindend geringer Anteil

endzulagern ist, und selbst dieser ist nur eine Folge der unvollständigen Verbrennung in heutigen Kernkraftwerken und fällt bei den zukünftigen schnellen Brütern gar nicht erst an.

8. Frage: Was ist mit nuklearem Abfall und den Rückbaukosten?

Das nukleare „Abfallproblem“ ist lösbar – sofern man will. Zunächst ist zu beachten: Je stärker eine Substanz radioaktiv strahlt, umso kürzer ist ihre Abklingzeit und umgekehrt. Mit anderen Worten: Starke radioaktive Strahler klingen schnell ab, schwache Strahler langsam. Das von Kernkraftgegnern gerne beschworene Schreckgespenst „*Hochradioaktiver Abfall über Millionen von Jahren*“ gibt es nicht. Statt Abklingzeit wird technisch die „*Halbwertszeit*“ verwendet. Das ist die Zeit, nach der die Stärke des Strahlers unabhängig von seinem aktuellen Zerfallszustand um eine weitere Hälfte abgenommen hat. Man sollte die einmalig positive Eigenschaft radiotoxischer Abfälle, allmählich zu verschwinden, würdigen. Chemieabfälle dagegen, die weltweit das 1000-fache von radioaktiven Abfällen ausmachen, verschwinden vermutlich nie. Wegen ihrer langen Halbwertszeit strahlen außerdem die geologisch endzulagernden Stoffe grundsätzlich nur schwach.

Nach Schätzungen des Bundesamtes für Strahlenschutz wird bei dem heutigen Ausstiegsszenario aus der Kernenergienutzung die Menge endzulagernder nuklearer Stoffe bis 2040 insgesamt auf nur etwa 10.000 Tonnen angestiegen sein. In Fässern neben- und übereinandergestapelt ergibt das einen Würfel mit einer Kantenlänge von 27 Metern. Dies ist der nukleare Abfall der gesamten Geschichte der Bundesrepublik – kein anderer Industriezweig produziert derart **geringe** Abfallmengen. Diese Menge könnte sogar noch viel geringer sein, denn der größte Teil davon, das Uran, muss nur deshalb mitgelagert werden, weil dessen Abtrennung seit 2005 nach deutschem Atomgesetz nicht mehr erlaubt ist. Technische Gründe sprechen nicht dagegen. Würde man das nützliche und radiologisch unbedenkliche Uran abtrennen, so verblieben für die Endlagerung lediglich 540 Tonnen an radiotoxischen Abfällen (zu denen auch Abfall aus der Nuklearmedizin gehört). Dies ist eine Menge, die in Fässern mühelos in einen Würfel mit einer Kantenlänge von 10 Metern passt.

Die Zahlen lassen sich besser veranschaulichen, wenn man sie auf folgenden hypothetischen Fall bezieht: Der gesamte Strom Deutschlands wird aus Kernenergie erzeugt. Ferner wird angenommen, dass das unbedenkliche Uran aus dem Abfall abgetrennt wird (heute in Deutschland verboten, obwohl technisch problemlos). Wie viel radioaktiven Abfall erzeugt dann ein Verbraucher in 80 Jahren Lebensspanne? Die Zahl ist erstaunlich klein – nur 100 Gramm, die endzulagern sind, davon lediglich 20 Gramm über geologische Zeiträume. Die restlichen 80 Gramm sind nach 300 Jahren unterhalb der natürlichen Aktivität des entsprechenden ursprünglich geförderten Natururans. Sie sind dann größtenteils

zu harmlosen, aber wertvollen Metallen zerfallen, die in der Industrie heiß begehrt sind. Aber auch für die 20 Gramm gibt es Lösungen, z.B. in modernen Schnellspaltreaktoren, wie sie in Frage 9 beschrieben werden. Dort werden diese Reststoffe sogar noch energetisch genutzt, vergleichbar mit einer Müllverbrennungsanlage. Ein geologisches Endlager entfele dann völlig.

Und schlussendlich, weil es immer wieder falsch behauptet wird: Der Rückbau von Kernkraftwerken ist strengstens und ausführlich gesetzlich geregelt. Jedes Unternehmen, das Kernkraftwerke baute, wurde regelmäßig auf die Erfüllung seiner Pflicht überprüft, die entsprechenden Rücklagen zu bilden. Dieser Überprüfung hat sich sogar die Europäische Union angenommen [33] [34]. Die Konzerne stehen also für die ursprünglich abgeschätzten Folgekosten voll ein.

9. Frage: Hat die Zukunft neuer Kernkraftwerke schon begonnen?

Ganz klar: ja. Die historische Entwicklung verlief hier aber über viele Irrwege. Effektive Konzepte wurden nur halbherzig weiterentwickelt und solche mit Mängeln aus Gründen unterstützt, die heute gar nicht mehr bestehen. Vielversprechende Konzepte fielen in die Zeit des Tschernobyl-Unfalls. Ihre Weiterentwicklung wurde daraufhin paradoxerweise eingestellt, obwohl sie Teil der Lösung, nicht des Problems waren. Speziell in Deutschland hat es den SNR-300 ideologisch hart getroffen, der auch als „schneller Brüter“ oder „KW Kalkar“ bekannt wurde. Er arbeitete nach dem schon beschriebenen Prinzip schneller Neutronen und ist deshalb **nachhaltig**. Als Kühlmittel wählte man flüssiges Natrium. Der SNR war fertig, hatte Betriebsgenehmigung und wartete nur noch auf das „Go“ der Nordrhein-Westfälischen Landesregierung, die ihn bislang wollte. Mit dem Tschernobyl-Unfall kippte die Stimmung in der SPD, und es wurde ausgerechnet jenes zukunftssträchtige Reaktorprojekt eingestampft, das viele Probleme der herkömmlichen Druckwasserreaktoren löste.

Ein ähnliches Schicksal ereilte den THTR-300, den „Hochtemperaturreaktor“ oder „Kugelhaufenreaktor“, ebenfalls ein deutsches zukunftssträchtiges Konzept. Im Gegensatz zum SNR-300 erblickte der THTR wenigstens ein paar Jahre das Licht der Welt, bevor er 1989 stillgelegt wurde. Der THTR war zwar kein schneller Reaktor, er enthielt aber eine ganze Reihe neuer Ideen: Kühlung mit Helium statt mit Wasser bei Temperaturen von nominell 1000 °C – weit über der Arbeitstemperatur normaler Kraftwerke. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten der Prozesschemie, z.B. die CO₂-freie Synthese chemischer Kraftstoffe. Die Brennelemente des THTR sind kugelförmig und können während des Betriebs ausgewechselt werden, auch ein Novum. Als Moderator setzt der THTR auf Graphit, das durch seine besseren Neutroneneigenschaften Thorium als Brennstoff zulässt. Die Leistungsdichte des THTR-300 ist allerdings gering und die Gaskühlung erfordert riesige

Wärmetauscher. Nach dem Rückbau wurden sämtliche Komponenten und Blaupausen an China quasi verschenkt. Dort betreibt man heute noch einen Testreaktor, in Deutschland nicht mehr.

Die Erzeugung künstlicher Treibstoffe, Thorium als Brennstoff und bessere Brennstoffausnutzung durch den SNR-300 waren dem damaligen Zeitgeist verpflichtet, sind aber auch heute noch die gewünschten Eigenschaften – allerdings nun in ganz anderem politischen Umfeld. In den 70er und 80er Jahren des „Kalten Krieges“ sah man sich hauptsächlich durch scheinbare Ressourcenknappheit bedroht. Öl- und Uranreserven wurden als fast erschöpft angesehen, was die Suche nach neuen Methoden beflügelte. Heute wünscht man dagegen „Nachhaltigkeit“, Ressourcenschonung und Naturschutz, was ironischerweise zu genau den gleichen Lösungen in der technischen Umsetzung führt. Dennoch wurde die Entwicklung des THTR und des SNR in Deutschland nicht wieder aufgenommen. Russland hat nun einen SFR (Sodium-cooled fast reactor = natriumgekühlter schneller Reaktor, so die allgemeine Bezeichnung des SNR) gebaut, den BN-800 mit fast dreifacher Leistung, der bereits 2017 kommerziell Strom produzieren wird. In den USA und Frankreich ist man ebenfalls mit dem SFR ganz vorne, und der THTR wird in China weiterentwickelt.

Im „Kalten Krieg“ hatte die Sowjetunion einen bleigekühlten schnellen Reaktor (Lead-cooled fast reactor, LFR) für den Antrieb von U-Booten entwickelt und eingesetzt. Das Prinzip ist das des SFR, nur ist hier Natrium durch flüssiges Blei als Kühlmittel ersetzt. Natrium ist schwer zu handhaben und erfordert aufwendigen Schutz gegen Entflammbarkeit. Dieser Nachteil entfällt mit Blei. Auch beim LFR ist die historische Entwicklung unglücklich verlaufen, denn er muss trotz seiner erheblichen Vorteile mühsam gegen die bereits weit entwickelten natriumgekühlten Konzepte ankämpfen.

Soweit gibt es also als bereits erprobte Konzepte: Den **SFR**, den **LFR** und den **VHTR** (very high temperature reactor) als allgemeine Bezeichnung des THTR-300. Ein viertes Konzept ist der **GFR**, die schnelle Variante des VHTR. Ein fünftes Konzept bezieht sich nur auf die Art der Wasserkühlung und ist somit lediglich eine Verbesserung heutiger Druckwasserreaktoren, die damit die Entwicklung bei Kohlekraftwerken nachvollziehen. In diesem Konzept werden Druck und Temperatur des Wassers erhöht und damit ein spezieller Aggregatzustand, der „superkritischer Zustand“, erreicht, der die positiven Eigenschaften von Dampf und Flüssigkeit vereinigt – **SCWR** (supercritical water reactor). Dies ist freilich kein neues Nuklearkonzept, denn an hunderten von Kohlekraftwerken befindet sich superkritisches Wasser bereits im Einsatz.

Das sechste, wohl wichtigste Konzept ist der Flüssigsalzreaktor **MSR** (molten-salt reactor). Viele Fachleute sprechen vom zukunftsträchtigsten Design. Feste Brennelemente gibt es bei ihm nicht mehr, der flüssige nukleare Brennstoff zirkuliert ständig und kann während des Betriebs nicht nur ausgewechselt, sondern auch aufbereitet werden. Solche Flexibilität ist für die erreichte inhärente Sicherheit maßgebend. Im Falle einer Überhitzung fließt der Brennstoff kontrolliert auf vorgegebenen Bahnen ab, was bei einem

Reaktor mit festem Brennstoff nicht möglich ist. Durch die ständige Aufbereitung der Flüssigkeit können unerwünschte Spaltprodukte ständig abgezogen werden. Sie häufen sich damit nicht – wie bei festen Brennelementen – im Reaktorkern an, wo sie ein Gefahrenpotential darstellen und zudem die Effizienz einschränken. Kombiniert man die schnelle Variante des MSR mit Brennstoffaufbereitung, kann Natururan und sogar erstmals Thorium zu 100% genutzt werden. Der MSR kommt somit dem Ideal eines „nachhaltigen“ Reaktors am nächsten. Er ist inhärent sicher („run-away safe“) und macht ein geologisches Endlager überflüssig. Seine Spaltprodukte müssen nämlich nur wenige hundert (statt hunderttausende) Jahre gelagert werden. Wirtschaftlich ist sein einfaches Konzept ohnehin allen anderen Reaktortypen überlegen, die heutigen Typen eingeschlossen. Insbesondere gegenüber den fossil-gefeuerten Kraftwerken, die nach wie vor den Markt dominieren, hätte der MSR erstmals einen beträchtlichen Wettbewerbsvorteil.

Auch der MSR lief bereits, und zwar in den 60er und 70er Jahren am Oak Ridge National Laboratory (USA). Alle Tests wurden mit Erfolg abgeschlossen. Nach den schon erwähnten historischen Fehlentwicklungen überrascht es dann nicht mehr, dass ausgerechnet dieses optimale Konzept am wenigsten unterstützt wurde. In den 80er und 90er Jahren endete die Forschung auf diesem Gebiet. Erst in jüngster Zeit wird das Konzept wieder entdeckt und erfreut sich breiter Zustimmung in Fachkreisen [35]. Eine ernsthafte Weiterentwicklung mit staatlicher Unterstützung blieb jedoch bisher weltweit aus [36].

Die hier vorgestellten Zukunftskonzepte laufen alle unter „Generation IV“. Das Generation-IV-Forum ist eine internationale Plattform, die eben jene sechs Konzepte erhält und sie fördert. Auf der „Generation IV“ Webseite [37] findet man die Technik aller sechs Konzepte beschrieben. Deutschland ist in diesem Forum nicht vertreten, obwohl es einst führend in innovativer Nukleartechnik war.

Dazu passt es auch, dass ein völlig neues Konzept aus Deutschland, der **Dual Fluid Reaktor (DFR)**, von der Politik hierzulande bisher völlig ignoriert wird. Wir werden dieses Konzept hier kurz vorstellen, da aber zwei der Autoren an diesem Konzept selbst beteiligt sind, sollte sich der Leser auch unabhängig informieren. Für technisch versierte gibt es eine extern begutachtete Fachpublikation, siehe [38]. Zur Grundidee: Berücksichtigt man die bisherigen Fortschritte in *anderen* Bereichen, insbesondere der Material- und Fertigungstechnik, können die bisherigen Konzepte noch einmal verbessert werden. Der DFR stellt entsprechend eine *Synthese mehrerer Generation-IV-Konzepte* dar:

- Es wird ein flüssiger Brennstoff verwendet, mit allen positiven Eigenschaften des MSR, jedoch hochkonzentriert.
- Die Wärme wird mit flüssigem Blei abgeführt, wie beim LFR mit seiner hohen Leistungsdichte und besonders hohen Schnelle der Neutronen.
- Die Arbeitstemperatur beträgt 1000 °C, so dass Prozesswärme für die Chemie bereitgestellt werden kann, wie beim VHTR und GFR.

Dadurch, dass zwei Flüssigkeiten für den Brennstoff und das Kühlmittel verwendet werden – eben durch die *Dual Fluid* Technik – ist der Reaktor inhärent passiv sicher und hat trotzdem eine so hohe Leistungsdichte, dass ein entscheidender Vorsprung gegenüber den fossilen Wettbewerbern erreichbar ist. Als Brennstoff dienen Uran, Thorium und gerne auch der „Atommüll“ der bisherigen Kernkraftwerke zwecks Neutralisierung. Weitere Informationen findet man auf der Webseite der Erfinder [39]. Die Flüssigsalz-Konzepte, der DFR sowie die Nutzung von Thorium scheinen auch einen gewissen Reiz auf Filmemacher auszuüben. Demnächst erscheint bei dem französisch-deutschen Sender ARTE eine Dokumentation über Thorium-basierte Flüssigsalzreaktoren, an der auch zwei der Autoren mitgewirkt haben [40]. Der genaue Sendetermin steht noch nicht fest.

Während also in der ganzen Welt die Generation-IV-Konzepte weiterentwickelt werden, weidet man sich hierzulande in Politik und Medien lieber an der vorgeblichen Unlösbarkeit des nuklearen Abfallproblems, der angeblichen Unkontrollierbarkeit von Kernkraftwerken und verfremdeten Schreckensbildern aus Fukushima und Tschernobyl. Wirkliche Lösungen werden konsequent ignoriert. Kernenergie ist die einzige Zukunftstechnologie, die eine Menschheit von bald 10 Milliarden effizient, sicher, nachhaltig und naturschonend mit beliebig viel Strom versorgen kann, doch sie wird hierzulande nicht mehr beachtet. **Man muss sich fragen, was an einem Kraftwerkskonzept, das inhärent sicher ist, nur kurzlebigen Abfall erzeugt, über Brennstoff für viele hundert Millionen Jahre verfügt, keine Emissionen erzeugt und gegenüber den sog. erneuerbaren Energien nur einen verschwindenden ökologischen Fußabdruck erzeugt, so unerwünscht sein kann, dass man nichts von ihm wissen will.**

Fazit

Kernkraftwerke werden weltweit gebaut und neue geplant. Deutschland als viertgrößte Industrienation der Erde hat sich aus diesem Zukunftssektor verabschiedet und wird seine befremdlichen Vorstellungen über die Nutzung der Kernenergie der restlichen Welt nicht aufprägen können. Ähnliche Versuche waren immer wieder in seiner Geschichte erfolglos, ja unglücklich verlaufen. Wenn ein Hinweis auf die vielen, an Anzahl stetig steigenden Kernkraftwerke unweit der deutschen Grenzen beantwortet wird mit „*wir müssen nicht die gleichen Fehler wie die anderen begehen*“, sollte man fragen, wer hier wohl die Falschfahrer auf der Fortschritts-Autobahn sind. Deutschland schaltet Kernkraftwerke ab, die von allen Methoden der Stromerzeugung die wirtschaftlichste, umweltfreundlichste, nachhaltigste und ungefährlichste ist. Dieser Fehler wird schließlich extrem verschärft, indem man die Kernkraft nicht durch Kohle sondern durch „Erneuerbare“ ersetzen will, die umgekehrt zu den unwirtschaftlichsten und naturschädigendsten Methoden der Stromerzeugung überhaupt gehören (Windräder und Energiemais) [9].

Der Wohlstand Deutschlands zählt heute und weltweit zu den höchsten. Er gründet sich

auf technischer Finesse und guter Arbeit der „Produktiven“ in Wirtschaft und Industrie, deren Wertschöpfung direkt von der Effizienz der Kraftwerkstechnik abhängt. Dies übersehen viele Vertreter von Politik, Verwaltung und insbesondere Medien, die der Realität und Güterproduktion entfremdet sind, obgleich eben diese Industrie ihre berufliche Existenz erst ermöglicht. Die Produktiven werden dabei oft noch verachtet und Kraftwerke nicht selten als Relikte einer kapitalistischen Großindustrie vorgestellt, die es schnellstens zu beseitigen gilt. Nur durch technische Innovation und fleißige Produktion konnte sich Deutschland aber nach einem verlorenen Krieg wieder an der industriellen Weltspitze etablieren. Der gnadenlose globale Konkurrenzkampf kennt kein Erbarmen; insbesondere die **Energiekosten** sind ein maßgebender Faktor im internationalen Wettbewerb [41]. Es ist höchst bedenklich, unseren Vorsprung durch die überstürzte Aktion der Energiewende inklusive Abschalten der Kernkraftwerke aus der Hand zu geben. Unsere Energiewende ist nämlich real nichts anderes als der Versuch, preisgünstige, umweltfreundliche Energie durch teure und unsere Umwelt schwer schädigende Energie zu ersetzen.

Eine vernünftige Strategie würde die wirtschaftlichen Laufzeiten unserer Kernkraftwerke, die zu den sichersten weltweit gehören, ausnutzen, und sich gleichzeitig wieder der internationalen Entwicklung der neuen Generation IV von Kernkraftwerken anschließen. Die Hauptziele dieser neuen Typen sind höchste Wirtschaftlichkeit, inhärente Sicherheit, verschwindender Abfall und optimaler Naturschutz – was kann man eigentlich mehr wollen? Wenn diese neuen Kernkraftwerke für den Einsatz bereit stehen, wird auch in Deutschland der Umstieg auf diese neue Kernkraftwerke erfolgen. Zukünftige, intelligentere Entscheidungsträger in Deutschland, als sie heute den Mainstream bestimmen, werden es tun.

Literatur

- [1] Wikipedia: *Ethikkommission für eine sichere Energieversorgung*, tinyurl.com/pbcaadx
- [2] Nucleopedia: *Liste der geplanten Kernkraftwerke*, tinyurl.com/nsfazj
Statista: *Anzahl der geplanten Atomreaktoren in ausgewählten Ländern weltweit im August 2015*, tinyurl.com/qjywxqk
DAf: *Kernkraftwerke weltweit*, tinyurl.com/9nen763
- [3] Verein Kritikalität: *Hundert gute Antworten*, 100-gute-antworten.de
- [4] Webauftritt von UNSCEAR, unscear.org
- [5] Webauftritt der Internationalen Atomenergie-Organisation, iaea.org

- [6] ZEIT: *Report: Tschernobyl - Wie viele Opfer gibt es wirklich?*, tinyurl.com/ord3klt
- [7] ENS: *Fuel comparison*, tinyurl.com/qx4829o. Der Wert für die Spaltstoffe unterscheidet sich wenig für deren Isotope; ebenso für den künstlichen Spaltstoff Plutonium.
- [8] L. M. Miller et al.: *Two methods for estimating limits to large-scale wind power generation*, PNAS, 11169-11174, DOI: 10.1073/pnas.1408251112
MPI: *Turbinen schwächen die Windenergie*, tinyurl.com/q297hft
- [9] EIKE: *9 Fragen zur Energiewende*, tinyurl.com/np2c95t
- [10] Uni Stuttgart: *Stromerzeugungskosten im Vergleich*, tinyurl.com/pn6d5yx
Fraunhofer ISE: *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*, tinyurl.com/o8aoh8e
- [11] Science Skeptical Blog: *Die Energiewende und der energetische Erntefaktor*, tinyurl.com/osgxzg3. Die Kosten finden sich unten im Artikel und sind sorgsam aus verschiedenen Quellen zusammengestellt.
- [12] VDI: *Der Beitrag der Kernenergie zu einer nachhaltigen wirtschaftlichen und ökologischen Entwicklung*, tinyurl.com/puymtty
Uni Stuttgart: *Wege der Energiewirtschaft zu einer nachhaltigen Energieversorgung*, tinyurl.com/8mfjvzk
- [13] Wikipedia: *Liste von Unglücken im Bergbau*, tinyurl.com/ocpr97y
Wikipedia: *Liste von Stauanlagenunfällen*, tinyurl.com/nsepxye
- [14] Greenpeace Hannover: *20 Jahre Tschernobyl - immer noch 20% Atomstrom!*, tinyurl.com/ob7r22w
- [15] Wei Luxin et al.: *Epidemiological Investigation of Radiological Effects in High Background Radiation Areas of Yangjiang, China*, DOI: 10.1269/jrr.31.119
- [16] Bürger für Technik: *Bemerkungen zur LNT-Hypothese*, tinyurl.com/ngt4o63
- [17] Wikipedia: *Naturreaktor Oklo*, tinyurl.com/qfzjx6l
- [18] Wikipedia: *Liste von Brutreaktoren*, tinyurl.com/q8qu5vb
- [19] Deutschlandfunk: *Kostenexplosion beim finnischen AKW-Bau*, tinyurl.com/nt6kyol

- [20] EIKE: *9 Fragen zum Klimaschutz* tinyurl.com/p2qtczp
- [21] Horst-Joachim Lüdecke: *Energie und Klima*, expert Verlag, 2015.
- [22] IFK: *Reichweite nuklearer Ressourcen*, tinyurl.com/ck2nwsa
- [23] Wikipedia: *Erneuerbare Energien*, tinyurl.com/nw75ypc
- [24] UNSCEAR: *The Chernobyl accident*, tinyurl.com/m2s98
- [25] WNA: *Fukushima Accident*, tinyurl.com/oqvxbcyc
- [26] BVG: Urteil vom 8.8.1978 zum KKW „Kalkar“, tinyurl.com/otm63j2
- [27] EIKE: *Die radioaktive Verstrahlung in Fukushima: Kerngedanken*, tinyurl.com/q3vzmy4
- [28] EIKE: *Fukushima Propaganda á la Tagesschau*, tinyurl.com/pm8jehx
- [29] EIKE: *Jede Strahlung ist schädlich! Stimmt das wirklich? Die LNT Hypothese*, tinyurl.com/m4yb39w
- [30] John E. Ten Hoevea, Mark Z. Jacobson: *Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident*, tinyurl.com/k2l7e55
- [31] Internationale Strahlenschutzkommission ICRP, Report 103, Absatz 66, tinyurl.com/pv8w4mf
- [32] Max Daunderer: *Herfa-Neurode größte Sondermülldeponie der Welt*, tinyurl.com/oehfsgn
- [33] DAtF: *Rückstellungen – Finanzielle Entsorgungsvorsorge aus Sicht der Betreiber*, tinyurl.com/qy6pmxp
- [34] TU-Berlin: *Rückstellungen für den Rückbau von Kernkraftwerken*, tinyurl.com/ofyyfhx
- [35] Webauftritt der Weinberg-Foundation als Beispiel für die Wiederentdeckung und Pflege des MSR-Wissens, the-weinberg-foundation.org
- [36] Staatliche Unterstützungen wie z.B. des Europäischen Flüssigsalzprojekts SAMOFAR, heise.de/-2807018, sind dabei eher als Almosen, nicht als ernstzunehmendes FuE-Programm zu sehen.

- [37] Webauftritt des Generation-IV-Forums, gen-4.org
- [38] Begutachtete Publikation zum DFR, DOI: 10.1016/j.anucene.2015.02.016 (kostenpflichtig)
Inhaltsgleiche freie Version hier: tinyurl.com/q6ue68f
- [39] Webauftritt des Dual Fluid Reaktors, dual-fluid-reaktor.de
- [40] Citizen Films: *The far Side of Nuclear Power*, citizen-films.fr/en/thorium/
- [41] KfW Volkswirtschaft kompakt, Nr. 54, 2014: *Steigende Energiepreise – Wie anfällig ist der Mittelstand?*, tinyurl.com/nwhh6se
KfW Fokus Volkswirtschaft Nr. 97, 2015: *Energiekostentreiber: Es geht nicht nur um Strom!*, tinyurl.com/o9guemm