

12. Jan. 22.44.30

RES085_Kernkraftwerke

Willkommen zum Forschungspodcast der Helmholtz-Gemeinschaft.

Ich bin Holger Klein und zum 30.

Jahrestag der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl haben wir außerdem eine Webseite eingerichtet, auf der Helmholtz-Forscher erzählen, wie sie das Ereignis erlebt haben und wie sich deren wissenschaftliche Karrieren dadurch verändert haben.

Die Adresse ist helmholtz.de/tschernobyl.

(Musik) Ich bin nach Darmstadt gefahren zum Öko-Institut und mir gegenüber sitzt Christoph Pistner, der ist stellvertretender Bereichsleiter im Bereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit.

Hallo Herr Pistner.

Anlass meines Besuches ist 30 Jahre Tschernobyl.

Dienstag, also dieses Jahr Dienstag, den 26.

April 2016, jährte sich zum 30.

Mal, dass das Atomkraftwerk in Tschernobyl in die Luft geflogen ist.

Es ist tatsächlich in die Luft geflogen.

Kann man so sagen.

Fangen wir ganz vorne an.

Warum sitze ich im Öko-Institut?

Sie sind ja keine Helmholtz, Sie sind kein Helmholtz-Institut.

Gut, warum Sie zu einem Nicht-Helmholtz-Institut gekommen sind, das müssten Sie mir dann erklären.

Wir sind ein unabhängiges Forschungsinstitut, das sich eben jetzt auch seit 30 Jahren mit Fragen der Energieversorgung, aber eben auch der Reaktorsicherheit beschäftigt.

Und unser Bereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit setzt sich eben mit allen möglichen verschiedenen Fragen der Reaktorsicherheit, Entsorgung und allen damit verbundenen Problemen auseinander.

Woher kommt das Öko-Institut?

Ich würde mal sagen, das Öko-Institut ist schon aus der Umweltbewegung und den Diskussionen in den 70er und 80er Jahren hervorgegangen.

Hat sich zunächst mal in Freiburg gegründet als ein Institut, das sich dort schwerpunktmäßig mit Fragen der Energiewende und Alternativen zur damaligen Energieversorgung auseinandergesetzt hat.

Parallel dazu gab es in Darmstadt eine Gruppe, die sich mit Fragen der Reaktorsicherheit beschäftigt hat und die dann eben den Darmstädter Ableger, also das Darmstädter Büro des Öko-Instituts gegründet haben.

Und wovon leben Sie?

Wer finanziert Sie?

Also das Institut ist nicht grundfinanziert, sondern wir leben vollständig von Drittmitteln, die wir einwerben, wobei das breit gefächert ist, sag ich mal.

Das sind EU-Forschungsmittel, das sind Gelder aus dem BMBF, also dem deutschen Forschungsministerium, aber auch von Aufsichtsbehörden, Bund und Länder bis hin auch zu Industrieunternehmen, für die wir Aufgaben übernehmen.

Das hängt ein bisschen davon ab.

Wir haben ja fünf verschiedene Bereiche, die sich mit unterschiedlichen Themenstellungen beschäftigen und je nachdem, welchen Bereich man anschaut, ist das so ein bisschen unterschiedlich zusammengesetzt.

Wenn Sie Geld von der Industrie nehmen, müssen Sie sich dann gelegentlich auch den Vorwurf gefallen lassen, käuflich zu sein?

Ich glaube, den haben wir bisher noch nicht oder wenn überhaupt dann nur extrem selten gehört, zum Glück.

Das sind vorwiegend, sag ich mal, dann auch Projekte, bei denen beispielsweise jetzt Unternehmen untersuchen, wie werden bestimmte Produkte bei uns hergestellt, welcher Energieverbrauch fällt dabei an, welcher Rohstoffverbrauch fällt dabei an und wo können wir da was optimieren, wo sind da Potenziale zu Verbesserungen, sodass das eigentlich eher, sag ich mal, kooperative Projekte sind.

Also nicht so die Abteilung Gefälligkeitsgutachten oder so?

Hoffentlich nicht, nein.

Wäre mir jedenfalls so noch nicht bekannt.

Atomkraftwerke, also wir reden hier über Atomkraftwerke, Chernobyl war eins.

Wie funktioniert ein Atomkraftwerk, Herr Wiesner?

Es gibt den eigentlich kerntechnischen Teil und es gibt den eigentlich konventionellen Teil.

Im Prinzip erzeugt man im Atomkraftwerk hoch konzentriert Wärme, verdampft damit Wasser und verdampfendes Wasser kann man nutzen, um Turbinen anzutreiben, die dann einen Generator antreiben, der Strom produziert und ins Netz speist.

Das kennt man auch aus dem ganz normalen Kohlekraftwerk oder anderen Verbrennungskraftwerken.

Der Unterschied liegt darin, wie man die Wärme produziert im Kernkraftwerk.

Das tut man eben nicht durch eine chemische Verbrennung, sondern das tut man, indem man Atomkerne spaltet und bei dieser Kernspaltung wird Energie frei, wird sehr viel Energie frei, mehr als bei einer chemischen Verbrennung und diese Energie wird in Form von Wärme frei, die dann eben genutzt wird, um Wasser aufzuheizen.

Wie spaltet man die Kerne?

Kerne, also man nimmt schwere Atomkerne, typischerweise Uran.

Wenn Uran einen Neutronen einfängt, dann wird es dadurch angeregt, fängt an zu schwingen und kann in zwei Hälften zerbrechen.

Bei diesem Zerbrechen wird, wie gesagt, Energie frei, aber es werden eben auch Neutronen frei und diese Neutronen kann man jetzt wieder verwenden, wenn die wieder im Uran eingefangen werden, können weitere Kerne gespalten werden, dabei wird wieder Energie frei, noch mehr Neutronen und diese noch mehr Neutronen spalten wieder Kerne und so geht eben eine Kettenreaktion vonstatten, dass eben einfach kontinuierlich Neutronen produziert werden, die

zur Kernspaltung führen, die zu Energie führt, die zu weiteren Kernspaltungen führen und so weiter.

Das heißt, ich brauche im Grunde nur einen Neutron und jede Menge Uran und das Neutron schieße ich da rein und irgendwann macht es bumm und dann gibt es Atombombe.

Das wäre der Fall, wenn ich jetzt eben diese Kettenreaktion nicht kontrolliere, sondern wenn ich eine ausreichende Menge spaltbares Material nehme, ein initiierendes Neutron reingebe und dann eben aus dem einen Neutron drei werden, aus den drei dann neun und so weiter und so fort, dann habe ich eben eine exponentiell ansteigende Energiefreisetzung.

Das ist genau das, was wir in der Kernwaffe sehen, was in der Atombombe passiert.

Das will ich natürlich im Kernkraftwerk nicht haben, weil das kann ich natürlich nicht kontrollieren.

Genau, das ist das, was dann in Tschernobyl letztlich passiert ist.

Da muss ich dafür sorgen, dass eben aus einem Neutron in der nächsten Generation wieder nur ein Neutron wird, also dass sozusagen die Anzahl der Spaltungen über die Zeit konstant bleibt.

Und dazu muss ich eben sicherstellen, dass von den typischerweise zwei bis drei Neutronen, sage ich jetzt mal, die pro Spaltung frei werden, eben nur genau eins wieder zu einer neuen Spaltung führt.

Dann bleibt meine Leistungsfreisetzung über die Zeit konstant.

Und wie mache ich das?

Hat dann so ein Atomkraftwerk so einen Neutronensauger?

Ja, im Prinzip hat es das.

Zunächst muss man mal sagen, wenn wir sagen, es werden bei der Kernspaltung zwei bis drei Neutronen im Schnitt frei, dann klingt es erstmal viel.

Die Neutronen werden jetzt aber natürlich zum einen nicht nur im Uran eingefangen, sondern so ein Kernkraftwerk besteht ja aus verschiedenen Elementen.

Das Uran befindet sich typischerweise in einem Brennstab, in einem Hüllrohr.

Da sind also Metalle, mit denen ich das Uran einschließen muss.

Dann habe ich gesagt, ich muss natürlich die Wärme abführen, dafür brauche ich Wasser.

Das heißt, da ist auch Wasser im Spiel.

Das heißt, da sind andere Materialien.

Teile von diesen Neutronen werden also zunächst mal in den anderen Materialien eingefangen.

Die stehen dadurch einfach schon mal nicht mehr zur Verfügung.

Dann muss ich mir das Uran genauer anschauen.

Das Uran, so wie es in der Natur vorkommt, besteht aus zwei verschiedenen sogenannten Isotopen.

Das ist sozusagen das chemische Element Uran, dessen Atomkern besteht aus 92 Protonen, kann aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten.

In der Natur kommen hauptsächlich zwei verschiedene Urankerne vor.

Eins mit einem Atomgewicht von 238, wo ich also insgesamt 238 Neutronen und Protonen habe.

Und ein Uran 235, wo ich insgesamt 235 Neutronen und Protonen habe.

Er unterscheidet sich also durch drei Neutronen im Kern.

Das Uran 235 ist leicht spaltbar.

Wenn das einen Neutron einfängt, hat das eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit zu spalten.

Das Uran 238 ist nicht spaltbar, jedenfalls nicht mit langsamen Neutronen.

Da müssen die Neutronen sehr hohe Energie haben, um das Uran 238 zu spalten.

Das heißt, da bräuchte ich dann noch einen Beschleuniger daneben.

Ja, beziehungsweise ich brauche eben hochenergetische Neutronen, die kommen teilweise bei der Kernspaltung auch mit diesen hohen Energien vor, werden aber eben sehr schnell durch Stöße im Material abgebremst und dann reicht die Energie nicht mehr aus, um Uran 238 zu spalten.

Wenn ich jetzt in die Natur gucke, finde ich eben diese beiden Isotope, Uran 238 und Uran 235 vor.

Aber nur 0,7 Prozent des Urans in der Natur sind dieses leicht spaltbare Uran 235.

Der Großteil, die 99,3 Prozent, sind dieses Uran 238.

Wenn ich jetzt also dieses Uran aus der Natur nehme und darin versuche, eine Kettenreaktion aufrechtzuerhalten, dann kommt aus einer Spaltung im Uran 235 zwei bis drei Neutronen raus.

Dann haben die natürlich erstmal eine große Wahrscheinlichkeit, von den 99,3 Prozent Uran 238 eingefangen zu werden.

Da sind sie weg.

Warum?

Ja, weil davon einfach mehr da ist.

Achso, weil davon mehr da ist.

Ich dachte, das sind andere Eigenschaften.

99,3 Prozent Uran 238, ja, also man kann dann darüber reden, wie wahrscheinlich ist es jeweils noch eingefangen zu werden, aber es ist einfach viel mehr.

99,3 Prozent.

Wenn ich das da einfange, dann ist es einfach weg, steht für die Kettenreaktion nicht mehr zur Verfügung.

Es passiert dann noch was, es wandelt sich um in einen anderen Stoff, können wir gleich mal darüber reden, aber zunächst mal ist es einfach für die Kettenreaktion weg.

Und wenn ich mir jetzt die Bilanz angucke, ich erzeuge zwei bis drei Neutronen.

Diese Neutronen machen dann erstmal Streuprozesse, also fliegen durch den Reaktorkern durch und werden eben zum Teil vom Uran 238 eingefangen, werden

zum Teil im Wasser eingefangen, werden zum Teil in diesen ganzen Strukturmaterialien, die ich da brauche, Metallhüllrohre und so weiter und so fort eingefangen.

Am Ende bleibt dann eben relativ wenig übrig.

Ich muss also erstmal überhaupt gucken, kann ich meine Kettenreaktion überhaupt aufrechterhalten.

Also eher ein Problem, dass ich zu wenig Neutronen habe.

Kann ich da nicht einfach mehr Uran 235 reinschmeißen?

Ganz genau.

Ich habe jetzt zwei Möglichkeiten.

Wenn ich mit Natururan einen Reaktor bauen will, dann muss ich dafür sorgen, dass diese Neutronenabsorption in den anderen Elementen möglichst gering ist.

Dafür muss ich ganz spezielle Reaktortypen bauen, die zum Beispiel statt normalem Wasser für die Kühlung, schweres Wasser für die Kühlung verwenden.

Das berühmte schwere Wasser.

Das schwere Wasser hat die Eigenschaft, dass der Wasserstoff, der in dem Wasser enthalten ist, eben nicht nur aus einem Proton besteht, sondern aus einem Proton und einem Neutron.

Schwer ist es deswegen und fängt dadurch viel weniger Neutronen ein.

Dadurch stelle ich sicher, dass in diesem schweren Wasser viel weniger Neutronen eingefangen werden, also mehr übrig bleiben für die Kettenreaktion.

Und damit kann ich dann auch mit Natururan eine Kettenreaktion aufrechterhalten.

Die Alternative ist, ich bleibe bei konventionellem Wasser, was einfach viel einfacher verfügbar ist und viel billiger ist.

Dann wird es schwierig mit der Aufrechterhaltung der Kettenreaktion.

Also erhöhe ich den Anteil am Uran-235 in meinem Gesamturan durch die sogenannte Anreicherung.

Das ist das, wofür man dann die berühmten Gas-Ultrazentrifugen braucht?

Ganz genau.

Dafür braucht man zum Beispiel Gas-Ultrazentrifugen.

Die Idee dabei ist einfach, wir haben wie gesagt in dem Uran, das wir draußen in der Natur finden, Uran-238, das ist etwas schwerer, 238 Teile im Atomkern und Uran-235, das ist etwas leichter.

Chemisch sind die identisch.

Ich kann die nicht durch irgendeinen chemischen Prozess voneinander trennen.

Ich muss mir also die Physik zunutze machen.

Im Zweifelsfall hier einfach die Eigenschaft, dass sie unterschiedlich schwer sind.

Also wandle ich das Uran, das ich in der Natur finde, in eine gasförmige Form um, in das sogenannte Uranhexafluorid.

Und als Gas fülle ich das dann in eine Zentrifuge, die sich sehr schnell dreht.

Und das kennen Sie, wenn sich irgendwas sehr schnell dreht, dann separiert sich das aufgrund der Unterschiede im Gewicht.

Das heißt, das schwerere ist dann weiter außen, das leichtere ist weiter innen.

Und das kann ich ja absaugen.

Genau, dann nehme ich innen und außen jeweils getrennt ab und dann habe ich eben eine Trennung der leichteren Isotope von den schwereren Isotopen und kann auf die Art und Weise Uran anreichern.

Es gibt auch noch andere Technologien, die ich dafür verwenden könnte.

Aber heute wird eben typischerweise diese Gasultrazentrifugentechnik dafür großtechnisch eingesetzt.

Aber wie, wenn, also ich haue da jetzt drei Neutronen raus, die verfangen sich hier und da, also im Wasser und im Metall und sonst wo.

Woher weiß ich denn oder wie bekomme ich es hin, dass ich genug Neutronen freisetze, dass überhaupt am Ende noch welche übrig sind, um weiter eine Kernspaltung durchzuführen?

Da habe ich eigentlich wenig Möglichkeiten, denn sozusagen die Frage, wie viele Neutronen kommen raus, das sagt mir einfach die Physik.

Das hängt ein bisschen davon ab, wie viel Energie bringen die Neutronen mit, die zu meiner Spaltung führen.

Neutronen, die aus der Spaltung freigesetzt werden, sind zunächst mal relativ schnell.

Sie sind hoch energetisch.

Die werden dann aber relativ schnell auch abgebremst, indem sie mit dem Material, in dem sie sich befinden, Stöße machen.

Sie kommen in Wasser typischerweise, stoßen und dabei geben sie Energie ab, werden dann abgebremst und werden dann langsam.

Wenn so ein langsames Neutronen eingefangen wird, bringt es im Prinzip nur die Bindungsenergie im Kern mit, aber keine kinetische Energie, weil es selbst keine Energie mehr hat.

Dann werden typischerweise eben so zwei bis zweieinhalb Neutronen pro Kernspaltung frei.

Wenn ich das Neutron direkt aus der Kernspaltung habe und es noch viel Energie mit sich bringt und das direkt eingefangen wird, dann kommen dabei ein bisschen mehr Neutronen raus, dann liege ich eher so bei zweieinhalb bis drei Neutronen.

Das heißt, je nachdem, ob ich schnelle Neutronen für die Kernspaltung verwende oder langsame verwende, kann ich ein bisschen daran drehen, wie viele Neutronen pro Kernspaltung bekomme ich.

Aber das ist eben auch nicht beliebig viel.

Ansonsten muss ich wirklich einfach gucken, dass ich meine Materialbilanz im Kernkraftwerk so einstelle, dass einfach genug Neutronen am Ende übrig bleiben und dass das so funktioniert.

Das hat einfach die Natur gesorgt, weil eben diese 2, irgendwas Neutronen pro Spaltung dann doch gerade ausreichen.

Das heißt, eigentlich ist es Statistik.

Statistik.

Also sie beeinflussen die Statistik natürlich darüber, wie hoch sie das Uran anreichern.

Also in der Natur 0,7 Prozent Uran-235 und dann können sie natürlich jetzt hergehen und können anreichern auf 1 Prozent, 5 Prozent, 20 Prozent, 99 Prozent.

In der Kernwaffe zum Beispiel reichern sie das Uran typischerweise möglichst hoch an, nehmen also eher sowas wie 98, 99 Prozent reines Uran-235, damit sie einfach so viel Spaltung wie möglich bekommen.

Punkt aus.

In einem Kernkraftwerk reichen ihnen schon typischerweise 3 bis 5 Prozent Uran-235, damit sie dann eben eine Kettenreaktion aufrechterhalten können, dass die Gewinn-Verlust-Bilanz okay ist, damit ihr Kernkraftwerk einfach betrieben werden kann.

Was würde passieren, wenn ich da jetzt 20 Prozent drin hätte?

Würde mir dann das Kernkraftwerk um die Ohren fliegen?

Ne, auch mit 20 Prozent können sie ein Kernkraftwerk betreiben.

Es gibt auch durchaus Kraftwerke, die mit hohen Anreicherungen betrieben worden sind.

Der sogenannte Hochtemperatur-Reaktor war so ein Kraftwerkskonzept, das damit gearbeitet hat, dass ich eben hohe Konzentrationen habe.

Das können sie im Prinzip auch machen.

Sie müssen dann eben aber auch entsprechend ihren Reaktor so auslegen, dass

das noch funktioniert, dass die Neutronen-Bilanz trotzdem aufgeht.

Das heißt mehr Wasser, mehr Eisen.

Mehr Wasser, kleinere Reaktorkernen.

Sie haben ja auch Verluste dadurch, dass Neutronen aus dem Reaktorkern nach außen fliegen, nach außen einfach verloren gehen als Leckage in die Umgebung.

Also über solche Dinge können sie dann beeinflussen, wie viele Neutronen bleiben mir eigentlich verfügbar.

Wo entsteht dann die Wärme, die ich abführe und in die Turbine leite?

Oder erst mal mit der ich das Wasser koche?

Ja, die Wärme entsteht zum größten Teil daraus, dass der Uran-Kern in zwei ungefähr gleichschwere, ein bisschen verschieden, aber ungefähr gleichschwere Teile zerbricht und diese beiden Teile bewegen sich mit großer Geschwindigkeit voneinander weg.

Also die stoßen sich elektrisch ab und bewegen sich einfach auseinander.

Und das ist sozusagen die kinetische Energie dieser Atomkerne, die in Wärme umgesetzt wird.

Das ist kinetische Energie, Bewegungsenergie.

Die wird in Wärme umgesetzt, also direkt im Brennstoff, im Kernreaktor.

Der Uran-Brennstoff, der heizt sich sehr stark auf.

Aber wie führe ich diese Wärme ab?

Also ich kann jetzt nicht die Kerne sammeln?

Ne, genau.

Die Kerne stoßen im Uran, führen dazu, dass sozusagen das Uran heiß wird.

Achso, der Brennstab wird heiß?

Der Brennstab selbst wird sehr heiß.

Also die Innentemperaturen liegen bei mehreren hundert Grad.

Oberflächentemperatur dann so bei, weiß gar nicht, drei, vierhundert Grad, sowas in dem Dreh.

Und der Brennstab ist aber relativ dünn.

Also das sind so Stäbe von knapp einem Zentimeter Durchmesser und vier Meter Länge, in dem sich das Uran als Uran-Dioxid, als keramisches Uran befindet.

Ist von einem Metallhüllrohr umgeben, um es eben einzuschließen.

Und dann zwischen diesen Brennstäben fließt dann das Wasser, das zur Kühlung verwendet wird.

Und der heiße Brennstab gibt einfach dann über thermische Leitung sozusagen seine Energie an das Wasser.

Das heißt, das Ding kocht im Grunde direkt das Wasser, in dem es steht?

Das kocht direkt das Wasser, in dem es ja nicht nur steht, sondern das strömt dann natürlich durch, weil sie natürlich die großen Wärmemengen, die da im Reaktorkern anfallen, kontinuierlich abfüllen müssen.

Da strömt schon eine ordentliche Menge Wasser einfach auch durch.

Dann gibt es das auch was, was man immer wieder hört, die Steuerstäbe.

Was ist das?

Genau.

Also ich habe gesagt, sie müssen natürlich, sie kriegen aus der Kernspaltung eine bestimmte Anzahl an Neutronen.

Von denen gehen dann je nach Aufbau ihres Reaktorkerns Neutronen verloren, weil sie eingefangen werden, weil sie im Wasser eingefangen werden, weil sie im Uran-238 eingefangen werden, weil sie den Reaktorkern verlassen.

Sie stellen sozusagen durch die Geometrie, durch die Anordnung, durch die Wahl der Anreicherung sicher, dass sie sozusagen in dem Bereich liegen, in dem sie aber genau die Kettenreaktion aufrechterhalten können.

Jetzt verändert sich aber natürlich im Laufe des Betriebs verändern sich verschiedene Faktoren.

Die Temperaturen in ihrem Reaktor verändern sich, was zu Unterschieden führt, wie gut sie Neutronen einfangen oder nicht einfangen.

Die Dichten verändern sich.

Und vor allem verändert sich auch die Zusammensetzung des Brennstoffs selbst.

Denn sie spalten ja das Uran-235, das sie am Anfang eingesteckt haben.

Das wird also im Laufe der Zeit weniger.

Stattdessen entstehen radioaktive Spaltprodukte, die Neutronen einfangen

können und ihnen wegschlocken zusätzlich.

Das heißt, diese Neutronenbilanz, wie viele stehen mir für die Kernspaltung zu Verfügung, die ändert sich kontinuierlich.

Und das müssen sie irgendwie kompensieren, das müssen sie steuern können.

Dafür gibt es zwei Wege.

Den einen, das ist das, was Sie angesprochen haben, das sind die sogenannten Steuerstäbe.

Das sind einfach, ähnlich wie Brennstäbe, Stäbe, die sie in den Reaktorkern einfahren und aus ihm herausziehen können und die Neutronen absorbieren.

Einfach sehr stark Neutronen wegschlucken, Neutronen wegsaugen, wie Sie es vorher gesagt haben.

Wenn ich die in den Reaktorkern einfahre, absorbieren die die Neutronen.

Dadurch nimmt meine Kettenreaktion ab und ich schalte den Reaktor ab.

Wenn ich sie rausziehe aus dem Reaktorkern, können mehr Neutronen wieder zur Kernspaltung führen.

Dadurch nimmt meine Reaktivität zu und meine Leistung kann steigen.

Auf die Art und Weise kann ich den Reaktorkern steuern.

Und das Instrument, auf das ich gucke, um das zu steuern, ist am Ende wahrscheinlich nur, wie viel Strom produziert das Ding gerade, oder?

Sie gucken natürlich insgesamt auf deutlich mehr.

Sie haben Neutronenmonitore im Reaktor, die Ihnen wirklich sagen, wie hoch ist der Neutronenfluss aktuell.

Sie haben Durchsatzzahlen für das Wasser und Sie haben die Temperaturen am Einlauf, am Auslauf, wo Sie sozusagen gucken können, wie ist die Bilanz der Wärmemenge, die innen drin freigesetzt wird.

Also Sie haben schon verschiedene Anzeigen, die Ihnen sagen, in welchem Zustand befindet sich mein Reaktor gerade und läuft das alles so, wie ich es mir denke.

Sind diese Steuerstäbe, muss ich mir das vorstellen, wie so ein Akkumulator, der irgendwann voll ist?

Oder ist, wenn die einmal drin sind und die Kettenreaktion hat aufgehört, dann hat die auch aufgehört?

Also zunächst mal, wenn die drin sind und die Kettenreaktion hat aufgehört, dann ist Schluss.

Also die Steuerstäbe sind typischerweise, also die sind aus einem starken, neutronenabsorbierenden Material wie Bohr zum Beispiel aufgebaut und die sind sozusagen, die sind schwarz für Neutronen.

Also wenn da Neutronen reingehen, werden die absorbiert.

Natürlich baut sich auch dieses Bohr im Laufe der Zeit ab.

Insofern sind auch Steuerstäbe jetzt nicht unendlich lange einsetzbar, aber sozusagen kurz, also auf der Zeitskala, auf der wir jetzt reden, sind die einfach schwarz und ein Neutron, das da reinkommt, wird absorbiert, ist weg.

Punkt.

Und die bleiben auch so.

Und wenn der Reaktor mal ausgeschaltet ist, haben Sie zwar kontinuierlich noch eine Neutronennachproduktion aus den radioaktiven Zerfällen, aber das sind eben nur noch sehr, sehr wenige und sie sind eben so weit unterkritisch, dass da keine Kettenreaktion mehr anläuft.

Was war die andere Möglichkeit, den Reaktor zu steuern?

Sie sagten Steuerstäbe und?

Genau, also die andere Möglichkeit, das gilt jetzt wiederum nur für einen bestimmten Reaktortyp, der aber eigentlich international am weitesten verbreitet ist, den sogenannten Druckwasserreaktor.

Bei dem können Sie außerdem dem Kühlmittel selbst einen Neutronengift eben auch Bohr zusetzen und Sie können, das Kühlmittel wird ja kontinuierlich umgewälzt, es wird auch gereinigt, weil darin auch radioaktive Stoffe anfallen und Sie können eben diesem Kühlmittel auch Bohrsäure zugeben und durch diese Bohrierung haben Sie sozusagen einen zusätzlichen Neutronenabsorber im Reaktorkern.

Wenn Sie jetzt den Reaktor gerade frisch beladen haben und er besonders viel Uran-235 hat, also sehr reaktiv ist, dann tun Sie viel Bohr in das Kühlmittel und wenn dann im Laufe des Reaktorbetriebs über ein Jahr typischerweise eben immer mehr von dem Uran-235 verbrannt wird, dann reduzieren Sie diese Menge an Bohr, die Sie gleichmäßig im Kühlmittel gelöst haben und kompensieren damit sozusagen den Uranabbrand.

Das hilft Ihnen einfach dabei, dass Sie nicht ständig Steuerstäbe reinfahren und rausziehen müssen und dass die auch nicht die ganzen sozusagen am Anfang weit drin sein müssen, um die Überschussreaktivität zu kompensieren, sondern Sie haben das eben über dieses im Kühlmittel gelöste Bohr schon erreicht.

Das klingt alles eigentlich ziemlich trivial.

War das schwer rauszufinden, dass sowas funktioniert, also die Erfindung des Kernkraftwerks?

Also ich würde mal sagen... Also wenn man das Pferd von hinten aufzäumt, klingt so ziemlich alles trivial.

Ja naja, also vielleicht erstmal muss man unterscheiden natürlich zwischen der Physik und der Technik.

Also die Physik ist dann eigentlich, klingt relativ einfach.

Ich nehme ein Neutron, das wird eingefangen, das spaltet, dabei wird Wärme frei, damit heizt sich Wasser auf und dann treibe ich damit eine Turbine und ein Generator an den Punkt.

Auf die Idee muss man erstmal kommen.

Na, so weit aber erstmal so einfach, so trivial, so genial.

Die technische Umsetzung ist dann eine andere Frage, weil da tauchen dann nämlich die eigentlichen wirklichen Probleme auf.

Aber ich sag mal, die Idee, als man irgendwann mal festgestellt hat, es gibt diesen Prozess der Kernspaltung.

Also das war ja nicht von Anfang an klar.

Man kannte irgendwann mal sozusagen die natürlichen Elemente, die es in der Umwelt so gibt.

Man kannte auch radioaktive Zerfälle, bei denen sich sozusagen schwerere Elemente in leichtere umwandeln.

Aber die sind immer, sag ich mal, nur in Einzelschritten passiert.

Das heißt, sie haben vielleicht mal einen Proton in einen Neutron oder umgekehrt umgewandelt oder sie haben vielleicht mal ein Alpha-Teilchen bestenfalls aus dem Kern ausgestoßen und sind dadurch von sehr schweren zu langsam etwas leichteren Kernen gegangen.

Solche Kettenreaktionen kannte man.

Und dann hat man aber irgendwann genau diesen Prozess sozusagen festgestellt, wenn jetzt ein Neutron eingefangen wird, kann der Kern tatsächlich in zwei Hälften zerbrechen.

Das war bis zu dem Zeitpunkt eigentlich unvorstellbar gewesen.

Damit hatte man sozusagen vorher nicht gerechnet.

Dann war zunächst mal die Frage noch offen, okay, wie passiert das?

Wie kann man das auslösen?

Da ging es eben um die Frage, okay, das kann ich durch den Einfang von Neutronen auslösen.

Und dann war die Frage, die danach kam, und wo kommen denn jetzt diese Neutronen her?

Wollte ich auch gerade fragen, wo kriegt man die eigentlich her?

Und da konnte man dann aber eben auch relativ schnell feststellen, dass bei diesem radioaktiven Zerfall eben auch Neutronen freigesetzt werden zusätzlich.

Und nachdem diese Elemente dann irgendwann mal bekannt waren, ein Kern

kann in zwei Hälften zerbrechen, dabei wird sehr viel Energie frei und es werden Neutronen frei, da war dann auch sehr schnell klar, okay, das kann man zur Energie erzeugen im großen Stil theoretisch nutzen.

Und dann hat man es gebaut und die technische Umsetzung macht die eigentliche Probleme, haben Sie gesagt.

Was sind die Probleme?

Die Probleme, also sag ich mal, für die unmittelbare Anwendung liegen natürlich in der dabei entstehenden Radioaktivität zunächst mal ganz wesentlich.

Also der Kern spaltet in zwei Hälften.

Der Spaltungsprozess ist ein statistischer Prozess, also da entsteht breites Spektrum an verschiedenen Spaltprodukten, einfach mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten, das können ganz unterschiedliche chemische Elemente sein mit unterschiedlichem Gewicht.

Sie haben auch den Effekt, ich habe ja vorher gesagt, es gibt im Atomkern Protonen und Neutronen.

Die Protonen machen aus, um welches chemisches Element handelt es sich und je nach Neutronenzahl unterscheiden wir dann bei einem chemischen Element nochmal verschiedene Isotope, wie das Uran-235 und das Uran-238.

Wenn man sich das jetzt auf einer Karte, der sogenannten Nukleot-Karte anschaut, dann sieht man, dass man sozusagen im Bereich ganz leichter Elemente typischerweise ungefähr gleich viele Neutronen und Protonen im Kern hat.

Wenn man aber zu sehr schweren Elementen geht, dann überwiegt die Anzahl der Neutronen im Kern gegenüber den Protonen.

Das liegt daran, dass sich die Protonen elektrisch abstoßen, die Neutronen nicht.

Wenn ich also umso schwerere Kerne aufbaue, dann stoßen sich mehr Protonen umso stärker ab und um das zu kompensieren, habe ich mehr Neutronen drin, die durch die starken Kernkräfte für die Bindung sorgen.

Wenn ich aber jetzt einen schweren Kern nehme, zerbreche den in zwei Hälften, dann gehe ich ja so in diesen mittleren Bereich, wo ich eigentlich eher Protonen und Neutronen haben will.

Also habe ich da tendenziell einen Neutronenüberschuss.

Und das führt eben dazu, dass die Spaltprodukte, die entstehen, eben typischerweise zu viele Neutronen haben und danach eine radioaktive Zerfallskette durchlaufen hin zu stabileren Elementen beziehungsweise Isotopen.

Und radioaktiv Strahlen heißt, es gibt Neutronen ab?

Radioaktiv Strahlen heißt in dem Fall vor allem Alpha- und Beta-Zerfälle, Gamma-Zerfälle für die interne Abregung, zum Teil auch Neutronen.

Ein paar Neutronen kommen auch aus den Spaltprodukten raus, aber vor allem sind das Alpha- und Beta-Zerfälle, bei denen aber auch zusätzlich Wärme und Energie dadurch freigesetzt wird.

Was ist denn das Gefährliche?

Also sind die Neutronen das Ungesunde oder ist die Alpha-Strahlung oder die Beta-Strahlung das Ungesunde oder alles?

Alles.

Alles.

Das hängt ein bisschen davon ab, was sie mit der Radioaktivität machen.

Wir haben vier Strahlungsarten, letzten Endes, wenn wir über die radioaktiven Spaltprodukte im Kernkraftwerk reden, Alpha-Strahlung, Beta-Strahlung, Gamma-Strahlung, Neutronen-Strahlung.

Alpha-Strahlung ist im Prinzip ein Zerfall, bei dem ein Heliumkern, also ein relativ schweres Teilchen aus dem Kern rausfliegt.

Dadurch, dass es ein relativ schweres Teilchen ist, kommt es nicht sehr weit, wird sehr schnell eingefangen, bringt aber viel Energie mit sich.

Wenn ich einen Alpha-Strahler draußen in der Natur habe, dann kommt typischerweise dessen Alpha-Strahlung nicht bis zu mir, macht mir also erstmal nichts.

Wenn ich ihn aber bei Unfällen oder anderen Dingen in den Körper aufnehmen würde, dann kann mich gerade diese Strahlung natürlich besonders stark belasten, weil sie schon immer im Körper drin ist, viel Energie lokal deponieren kann.

Es gab diese Geschichte von diesem russischen Geheimagenten, der in London mit irgendeiner Strahlungsquelle vergiftet wurde.

Polonium 210.

Genau.

Ist das das?

Genau.

Ist das ein Alpha-Strahler?

Müsste ich ehrlich gesagt selbst nachholen.

Wahrscheinlich ja.

Schreiben wir in die Show-Notes.

Ja, weil sie natürlich bei einem Alpha-Strahler genau den Vorteil haben, dass sie ihn sehr gut abschirmen können, sie ihn von außen dann eigentlich nicht messen können, er aber so wie sie ihn in den Körper aufnehmen eben sehr stark wirkt.

Beta-Strahler, bei der Beta-Strahlung wandelt sich im Atomkern ein Proton in eine Neutron oder umgekehrt um und dadurch wird ein Elektron frei.

Dieses Elektron ist ein leichteres Teilchen, hat dadurch eine größere Reichweite, etwas weniger Energie als ein Alpha-Strahler.

Ist nicht mehr ganz so leicht abzuschirmen, aber ist dadurch auch nicht mehr ganz so effektiv.

Dritte Strahlungsart, Gamma-Strahlung.

Wenn so ein Kern sich durch Alpha- oder Beta-Strahlung umgewandelt hat, ist er typischerweise noch angeregt, schwingt noch und muss sich sozusagen selbst abregen und gibt dadurch Energie einfach in der Form von einer Gamma-Strahlung, also einer harten elektromagnetischen Strahlung ab.

All die Strahlungsarten können zu biologischen Schäden bei Menschen führen, wenn sie nicht abgeschirmt sind und wenn ich damit sozusagen in Kontakt komme mit einem entsprechenden Strahler.

Neutronen-Strahlung noch als viertes, ebenfalls eine Teilchen-Strahlung.

Also Neutronen wird aus meinem Kern ausgestoßen.

Neutronen sind auch elektrisch neutral, können deswegen erstmal auch relativ hohe Reichweiten erreichen, werden aber natürlich in leichten Materialien, wie in Wasser zum Beispiel, sehr schnell absorbiert.

Da hängt es also dann so ein bisschen davon ab, habe ich es abgeschirmt oder habe ich es frei als Teilchen.

Wie groß sozusagen die biologische Gefährdung dann durch Neutronen-Strahlung ist.

Woher kommt die biologische Gefährdung?

Also die Alpha-Beta-Gamma-Strahlung ist einfach sehr, also hoch energetische, elektromagnetische Strahlung.

Das ist halt als würde ich mich irgendwie, weiß ich nicht, mich unter die Höhensonne setzen, nur halt in größter Ordnung darüber.

Und die Neutronen, wie energieintensiv sind die?

Die Neutronen können eben auch entweder Energie deponieren, indem sie Stöße machen, oder sie können eben eingefangen werden und dann eben zu radioaktiven, zu Umwandlungen von Atomen führen und dann zu radioaktiven Folgeprozessen.

Und das natürlich auch im Körper, weil letztendlich sind wir ja auch Atome.

Ja, ja, wir bestehen ja auch aus Atomen.

Was gibt es eigentlich für Reaktortypen?

Sie sagten eben schon der Hochtemperaturreaktor und vermute ich gibt es den, also ich habe das alles schon mal gelesen, aber nie verstanden.

Ich bin kein Wissenschaftler.

Schon okay.

Ja, also es gibt eine große Vielzahl an Reaktortypen, kann man sagen, die sich sozusagen technisch dann in verschiedensten Punkten unterscheiden.

Aber es gibt so ein paar Hauptlinien.

Die eigentlich größte oder wichtigste Linie, habe ich vorher schon mal kurz genannt, ist der sogenannte Druckwasserreaktor.

Druckwasserreaktor heißt er zum einen, weil er mit normalem Wasser gekühlt wird.

Und dieses Wasser wird in einem Primärkreislauf so unter hohem Druck gehalten, dass es nicht siedet.

Ja.

Das heißt, ich habe meinen Reaktorkern, der ist heiß.

Ich pumpe kaltes Wasser von unten typischerweise durch den Reaktorkern hindurch.

Dabei wird es heiß, nimmt Wärme auf.

Ich halte aber den Druck so hoch, dass es nicht anfängt zu siedet.

Das heiße Wasser fließt dann oben wieder aus dem Reaktorkern raus, aus dem Reaktordruckbehälter raus und wird dann über entsprechende Kühlmittleitungen in einen sogenannten Dampferzeuger geführt.

Und in diesem Dampferzeuger wird die Energie, die Wärme, auf einen

sekundären Kühlkreislauf übertragen.

Auf der sekundären Seite verdampft dann tatsächlich Wasser.

Der Dampferzeuger hat eine Primärseite, wo das heiße Wasser aus meinem Reaktorkern durchfließt und hat eine sekundäre Seite.

Auf die speise ich Wasser ein und das verdampft dann durch den Wärmeübertrag aus der Primärseite.

Das heißt, mein Kernreaktor ist im Grunde die Kohle, die ich unten in die Dampfmaschine schaufle.

Genau.

Aber eben nicht unmittelbar siedendes Wasser erzeugt, sondern erstmal nur heißes Wasser erzeugt und erst in einem Dampferzeuger erzeuge ich dann in der sekundären Seite Dampf und der treibt dann meine Turbine an.

Das ist der Druckwasserreaktor.

Zweiter, bei uns in Deutschland auch existierender Reaktortyp, ist der sogenannte Siedewasserreaktor.

Da habe ich eben genau nur einen Kühlkreislauf, das heißt, ich speise Wasser in den Reaktorkern ein und dort siedet es direkt.

Also mein Druck ist nicht so groß in meinem Kühlkreislauf, das Wasser kann kochen und es entsteht heißer, überhitzter Dampf.

Diesen Dampf führe ich direkt auf die Turbine, kondensiere ihn danach und speise das Wasser wieder ein.

Das ist der Siedewasserreaktor.

Neben diesen beiden Haupttypen, die wir jetzt hier in Deutschland auch haben, gibt es jetzt noch eine Anzahl verschiedener anderer Reaktoren.

Wir haben vorher darüber geredet, dass es zum Beispiel Natururanreaktoren gibt, also sogenannte Schwerwasserreaktoren, bei denen eben die Abbremsung der Neutronen nicht mit dem Wasser, mit dem normalen Kühlwasser passiert, sondern mit schwerem Wasser passiert.

Dafür kann ich dann eben Natururan einsetzen, weil ich weniger Neutronenverlust an das Wasser habe.

Es gibt Grafitmoderierte Reaktoren, bei denen ich zur Abbremsung der Neutronen statt dem Wasser Grafit verwende, also Kohlenstoff verwende, auch ein leichtes chemisches Element, das einfach Überstöße, die Neutronen abbremst, aber eben nicht zur Kühlung eingesetzt wird.

Grafitmoderierte Reaktoren, da wird diese Moderationsfunktion eben von dem Grafit übernommen.

Steuerstäbe war das, oder?

Ne, Moderation ist das Abbremsen der Neutronen.

Wenn die Neutronen freigesetzt werden, wie gesagt, sind sie sehr schnell und typischerweise bremsen ich die Neutronen ab auf langsame Energie, da sie einfach thermalisiert sind, thermisch geworden sind und diese Neutronen werden dann erst eingefangen.

Wenn ich den Job vom Grafit machen lasse, muss ich aber natürlich trotzdem noch die Wärme irgendwo abführen, die ich in meinem Reaktor erzeugt habe, dann gibt es Grafitmoderierte gasgekühlte oder Grafitmoderierte wassergekühlte Reaktoren.

Also ich muss den Kühlungsjob immer noch machen lassen, dafür nehme ich dann leichtes oder schweres Wasser.

Da gibt es dann verschiedene Spielarten, wie man das machen kann.

Das sind alles jetzt Reaktorgruppen, bei denen ich die Neutronen, wie eben gesagt, abbremsen, also thermalisiere, sogenannte thermische Reaktoren.

Ich kann aber auch direkt mit den schnellen Neutronen arbeiten, so wie sie aus der Kernspaltung kommen.

Das sind dann sogenannte schnelle Reaktoren, auch schnelle Brüter bekannt.

Ganz genau.

Viel was gelernt.

Ganz genau.

Wenn ich die Neutronen nicht abbremsen will, sondern als schnelle Neutronen verwenden will, bringt mir das zwei Vorteile.

Bei der Spaltung mit den schnellen Neutronen bekomme ich etwas mehr Neutronen pro Spaltung raus.

Ich brauche also weniger Uran.

Ich brauche weniger Uran, beziehungsweise kann mit den Neutronen noch was anfangen.

Ich kann was erbrüten.

Kommen wir gleich noch zu, vielleicht.

Und ich habe eine höhere Spaltausbeute.

Also die Wahrscheinlichkeit, dass man Neutronen nicht einfach nur eingefangen wird, sondern tatsächlich zu einer Spaltung führt, wird größer.

Das sind Konkurrenzprozesse in meinem Uran.

Das Neutron kann eben zur Kernspaltung führen.

Es könnte aber theoretisch auch einfach nur angelagert werden und mein Uran umwandeln in ein anderes chemisches Element.

Das heißt, mit schnellen Neutronen bin ich diesbezüglich einfach effizienter, besser.

Mein Problem ist aber natürlich, ich erzeuge Wärme.

Die Wärme muss ich abführen.

Ich muss den Reaktor also irgendwie kühlen.

Kühlen tut man großtechnisch eben typischerweise mit Wasser.

Wenn ich Wasser in den Reaktorkern bringe, dann stoßen die Neutronen, die aus der Kernspaltung frei werden, mit den Wassermolekülen und werden abgebremst.

Dann sind sie langsam.

Wenn ich das vermeiden will, kann ich also kein Wasser verwenden zur Kühlung meines Reaktors.

Ich muss mir irgendwas anderes überlegen, um den Reaktor zu kühlen.

Ich muss große Wärmemengen auf kleinem Raum abführen, kann kein Wasser dafür nehmen.

Deswegen werden solche Reaktoren dann eben typischerweise mit einem Flüssigmetall gekühlt.

Man nimmt also Natrium oder Blei als typische Kühlmittel und erhitzt das so weit, dass es flüssig wird und wälzt dann einfach flüssiges Metall um, das eben die Wärme aus dem Reaktorkern aufnimmt und dann an der sekundären Seite mit Wasser abkühlt.

Ich finde, jetzt wird es gespenstisch irgendwie.

Aber wahrscheinlich auch nur, weil wir alle Terminator gesehen haben.

Ja, naja, gut.

So intelligent ist das Metall jetzt nicht.

Aber es ist eben flüssig und es wird insofern gespenstisch.

Also es wird nicht wirklich gespenstisch, aber es wird tatsächlich problematisch.

Mit Wasserkühlung hat man eben sehr, sehr viel großtechnische Erfahrung.

Das kennt man, das weiß man, wie man es geht.

Aber zum ganz konventionellen Kraftwerksbau mit Metallkühlung eben nicht so viel Erfahrung.

Das macht man eben typischerweise nicht.

Deswegen waren auch sehr viele dieser schnelle Brüterprojekte von Störungen, Störfällen, Unfällen geplagt, die gar nicht mal so sehr mit dem Reaktorkern zu

tun hatten, sondern wirklich mit den Kühlkreisläufen zu tun hatten.

Typischerweise, wenn Sie Natrium nehmen, flüssiges Natrium, hochreaktiv, so wie Sie irgendwo ein kleines Leck bekommen, Natrium strömt aus, bekommen Sie Natriumbrand, der natürlich sich dann auf Ihren Reaktor, auf Ihren Kühlkreislauf alles auswirken kann.

Das heißt, gerade bei dem Reaktorkonzept ist eben die Kühlung technisch dann schon auch ein großes Problem.

Ist sowas denn je irgendwo in Betrieb genommen worden oder ist das nur im Versuchsstadium geblieben?

Es sind schon verschiedene schnelle Brüter auch weltweit gebaut und betrieben worden.

Es gibt zurzeit einen als kommerziellen Reaktor bezeichneten schnellen Brüter in Russland.

Ein zweiter wird auch gerade angefahren, bei dem es läuft.

Aber es gab weltweit Programme für schnelle Brüter, auch in Deutschland.

Kalkar, damals in Bau befindliche Anlage, die aber nie fertiggestellt wurde.

Aber es gab auch experimentelle Vorlagen.

Ist da eigentlich jetzt immer noch dieser Vergnügungspark drin?

Das Gärtenwasser Wunderland hieß das Ding dann irgendwann.

Ganz genau.

Aber es gab auch in Frankreich Phoenix und Super Phoenix.

Es gibt in Japan den Monju-Reaktor, der als Prototyp-Reaktor für einen schnellen Brüter dienen sollte.

Das ist aber genau so ein Beispiel.

Monju ist wenige Jahre gelaufen, hat dann eben so ein Kühlmittel-Lack bekommen, hatte einen großen Natriumbrand und steht jetzt im Prinzip seit 15, 20 Jahren still.

Es wurde immer mal wieder über die Wiedereinbetriebnahme geredet.

Die sollte dann auch irgendwann mal stattfinden.

Dann ist er sofort durch eine Störung wieder abgeschaltet worden, steht bis heute eigentlich im Wesentlichen still und wird jetzt auch darüber diskutiert, ob man ihn jetzt endgültig stilllegt oder welche Zukunft diese Reaktorkonzepte haben.

Was erbrütet man da noch?

Genau, das Konzept ist ja nicht nur deswegen attraktiv, weil man mehr Neutronen pro Spaltung bekommt oder sozusagen die Spaltausbeute erhöht, sondern man brütet.

Was heißt brüten?

Ich habe vorher gesagt, wir haben ja auch viel Uran-238 im Reaktor-Kern.

Das Uran-238 fängt mir Neutronen weg, die mir erstmal zu Nichtsnütze sind.

Aber dadurch wandelt sich das Uran-238 um.

Es hat einen Neutron eingefangen, das ist also erst mal Uran-239 und macht

dann zwei Beta-Zerfälle und so entsteht Plutonium-239.

Ein anderes chemisches Element, das auch andere kernphysikalische Eigenschaften hat.

Anders als das Uran-238 ist Plutonium-239 nämlich hervorragend spaltbar.

Es ist zwar radioaktiv und toxisch, aber es ist ein sehr gut spaltbares Material.

Würde ich dann nicht sinnvollerweise daraus ein Plutonium-Reaktor bauen?

Genau.

Also die Idee ist natürlich, Sie können theoretisch von den 99,3% Uran-238, die Sie draußen in der Natur finden, dieses durch Neutroneneinfang in Plutonium umwandeln und dann das Plutonium benutzen, um damit Energie zu erzeugen.

Das findet auch in allen Kernreaktoren der Welt statt.

Das ist genau der Prozess, der sozusagen nebenbei im Kernreaktor läuft.

Das Uran-235 wird gespalten, Neutronen werden frei.

Von diesen Neutronen werden auch viele im Uran-238 eingefangen.

Das Uran-238 wandelt sich in Plutonium um.

Im Laufe des Reaktorbetriebs entsteht so im Brennelement ein gewisser Anteil an Plutonium.

Gegen Ende des Reaktorbetriebs ist das typischerweise so die Größenordnung 1% des Urans, das dann in Plutonium umgewandelt ist.

Und dieses Plutonium wird dann auch während der Zeit schon wieder gespalten.

Das heißt, es trägt dann auch schon zur Energieerzeugung in nennenswertem Umfang bei, insofern ein weiteres Prozent des Urans wurde in Plutonium umgewandelt und ist bis zum Ende auch schon wieder gespalten worden.

Und das könnten Sie natürlich versuchen zu optimieren.

Das war das Konzept des schnellen Brüters.

Möglichst viele Neutronen im Uran-238 auch einfangen lassen, um damit Plutonium-239 zu produzieren, um damit neuen Spaltstoff zu erzeugen.

Tatsächlich sogar mehr neuen Spaltstoff, als ich am Anfang reingesteckt habe.

Ich muss ja am Anfang sozusagen einen spaltbaren Anteil drin haben im Reaktor.

Ich stecke also Uran-235 rein.

Mehr Plutonium-239, als Sie Uran-235 gebraucht haben.

Genau.

Ich fange mit einer gewissen Menge Uran-235 an.

Die brauche ich am Anfang sozusagen als Kick-off, als Start.

Und wenn ich aber meinen Brennstoff sozusagen dann am Ende entlade, habe ich zwar weniger Uran-235 drin, habe aber mehr Plutonium-239 nachproduziert, als ich sozusagen während der Zeit verbrannt habe.

Was mir auf die Art und Weise theoretisch das Potenzial geben würde, sozusagen meine Uranreserven, die ja, wenn ich nur das Uran-235 nutzen könnte, relativ begrenzt wären, eben um Faktor 100 zu strecken.

In der Theorie.

Warum macht man es in der Praxis nicht?

Weil nur der schnelle Brüter das kann und der nicht sicher genug läuft?

Ja, also es gibt verschiedene Gründe dafür.

Zum einen die tatsächlich technischen Probleme damit.

Sie müssen sozusagen einen schnellen Brüter betreiben können mit den damit verbundenen Problemen Flüssigmetallkühlung, Konstruktion des Reaktorkerns, Reaktivitätsfragen, die Sie beim schnellen Brüter haben.

So.

Dann haben Sie erst mal das Plutonium produziert.

Dann müssen Sie natürlich das Plutonium irgendwie erst mal wieder separieren.

Sie haben Ihren Brennstoff verbraucht, entladen ihn aus dem Reaktor.

Jetzt haben Sie ein Gemisch aus Uran, Plutonium und hochradioaktiven Spaltprodukten.

Um jetzt das Plutonium wiederverwenden zu können als Brennstoff, müssen Sie das auftrennen.

Zentrifugieren?

Nein, das machen Sie chemisch, weil es ja verschiedene chemische Elemente sind.

Das heißt, Sie machen eine chemische Wiederaufarbeitung.

Sie lösen Ihren Brennstoff.

Sind wir jetzt in der Wiederaufarbeitungsanlage Laarck?

Genau, dort sind wir jetzt angekommen.

Also zwar typischerweise in Laarck jetzt nicht mit Schnellreaktor-Brennstoff, weil wir eben keine schnellen Reaktoren haben, aber genau das ist der Prozess, der dort passiert.

Ich beginne gerade zum ersten Mal zu verstehen, was da überhaupt passiert.

Das ist sehr schön.

Sie nehmen den abgebrannten Brennstoff, zerschneiden ihn mechanisch in kleine Stücke, lösen ihn in Salpetersäure auf und dann fangen Sie an, die verschiedenen Elemente chemisch voneinander abzutrennen.

Das heißt, Sie bekommen einen Abfallstrom mit dem Uran, Sie bekommen einen Abfallstrom mit dem Plutonium und Sie bekommen einen Abfallstrom mit dem ganzen Rest, den ganzen hochradioaktiven Spaltprodukten.

Und das ist das, was wir im Kastor dann irgendwo versenken, wo es dann vor sich hin rostet.

Also die Kastoren versenken wir bis jetzt noch nicht, die stehen an der Oberfläche rum.

Die fahren wir dann wieder zurück hier in oberirdische Zwischenlage.

Langfristig wollen wir sie irgendwann mal versenken, aber bisher haben wir Kastoren jetzt noch nicht versenkt.

Aber genau das ist das, was dann passiert.

Die hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, die werden heute verglast.

Das heißt, die werden in eine Glasmatrix eingebunden, also die flüssige Glasschmelze wird in sogenannte Kokillen vergossen, also in Metallbehälter vergossen, wo sie dann erstarrt, die hochradioaktiven Spaltprodukte bindet.

Diese Glaskokillen werden dann in solche Kastorbehälter geladen und sollen dann später entgelagert werden.

Die anderen anfallenden Stoffe, Uran und Plutonium, könnten Sie jetzt theoretisch für die Energieerzeugung nutzen.

Praktisch wird das nur in sehr begrenztem Umfang gemacht.

Das hat dann wieder was mit der Technik zu tun.

Der Umgang mit Plutonium ist deutlich gut angenehmer als der Umgang mit Uran, weil Plutonium eben sehr radioaktiv ist, sehr hochtoxisch ist.

Das heißt, wenn Sie Plutonium verarbeiten wollen, müssen Sie das sehr, sehr gut abgeschirmt machen.

Sie müssen das alles fernhantiert machen und Sie müssen sicherstellen, dass von dem Plutonium nichts freigesetzt wird.

Das ist also sehr aufwendig und sehr teuer.

Deswegen ist Brennstoffherstellung aus Plutonium im Vergleich zur Brennstoffherstellung aus Uran außerordentlich aufwendig und teuer und wird heute eigentlich nicht gemacht.

Das ist ökonomisch unattraktiv, weil wir nach wie vor genug Uran haben.

Es gibt noch genug Uran 235.

Wir können es zu sehr geringen Preisen nach wie vor produzieren und bereitstellen.

Deswegen ist es eigentlich unattraktiv heute, Plutonium wieder zu verwenden.

Jetzt habe ich halbwegs begriffen, wie so ein Atomkraftwerk und der Prozess dahinter funktioniert.

Warum funktioniert es dann trotzdem nicht?

Oder anders gefragt, was ist in Tschernobyl passiert?

Weil eigentlich klingt das ja, also ich muss das nur moderieren und die Steuerstäbe rein und dann ist ja alles in Ordnung.

Genau, jetzt kommen wir zu den Sicherheitsproblemen.

Wir haben vorher gesagt, das Hauptproblem besteht eigentlich zunächst mal darin, dass wir sehr, sehr, sehr, sehr, sehr, sehr große Mengen an radioaktiven Stoffen produzieren.

Die sind jetzt zunächst mal hochkonzentriert.

Was heißt sehr, sehr große Mengen?

Kann man das in irgendwelchen Verhältnissen, also eine Stadt wie Frankfurt am Main, um die mit Strom zu versorgen, produzieren wir wie viel radioaktiven Müll pro Jahr?

Also da müssen wir jetzt unterscheiden, ob wir jetzt in der Menge reden von

Kilogramm und Tonnen, dann ist es sehr wenig.

Oder kommen wir mal von der Energiefreisetzung.

Ich habe vorher gesagt, wir machen hier eine kernphysikalische Energiefreisetzung statt einer chemischen Verbrennung.

Die ist ungefähr um den Faktor eine Million wirksamer als eine chemische Verbrennung.

Ich bräuchte also ein Millionen mal so viel Kilogramm Kohle.

Ja, also wenn Sie jetzt mal die technischen Effekte rausnehmen, vielleicht 100.000.

Also wir reden da wirklich um großen, großen Faktor, was Sie mehr an Kohle brauchen im Vergleich zu Uran.

Das heißt, wenn Sie jetzt nur von der Masse reden, brauchen Sie relativ wenig Uran.

Sie beladen typischerweise in so ein großes Kernkraftwerk, was wir heute stehen haben, 1000 Megawatt elektrischer Leistung, beladen Sie typischerweise im Jahr 30 Tonnen Uran und Brennstoff in den Reaktor und entladen eine entsprechende Menge wieder, um die Energie über ein Jahr zu produzieren.

Das sind also massenmäßig gesehen sehr kleine Mengen, massen- und volumenmäßig gesehen.

Aber das ist ja druckhaft.

Wenn wir über die Radioaktivität reden, die darin gebunden ist, dann ist das eben eine sehr, sehr große Menge.

Wenn Sie ein abgebranntes Brennelement nehmen, entladen es aus dem Reaktor und stellen sich einfach nur daneben, sind Sie nach sehr kurzer Zeit tot.

Ja.

Wenn Sie die darin gebundene Menge anreizen... Sehr kurz im Sinne von Minuten. ...sehr kurz im Sinne von Minuten.

Okay.

Genau.

Wenn Sie diese Menge an Radioaktivität eben in die Umwelt freisetzen würden, können Sie damit auch sehr große Flächen so stark kontaminieren, dass dann ein langfristiger Aufenthalt dort eben nicht mehr möglich wäre.

Das heißt, Ihr zentrales Sicherheitsproblem ist es, den Einschluss dieser Radioaktivität sicherzustellen.

Sie müssen verhindern, dass diese Mengen an Radioaktivität in die Umwelt freigesetzt werden.

Das machen Sie zunächst mal einfach durch physikalische Barrieren.

Also Sie haben Ihren Uranbrennstoff, den schließen Sie in das sogenannte Hüllrohr ein.

Das ist also eine Metallhülle, die die Uranpellets umgibt, damit zum Beispiel gasförmige Spaltprodukte nicht freigesetzt werden können.

Und dann haben Sie natürlich einen Kühlkreislauf, der das Ganze umgibt und alles einschließt.

Und dann haben Sie noch einen Sicherheitsbehälter, der das Ganze umgibt, falls

Radioaktivität im Inneren freigesetzt werden sollte, dass sie nicht nach außen gehen kann.

Dann haben Sie das Reaktorgebäude, das den Sicherheitsbehälter gegen Einwirkungen von außen schützen soll, also Stürme, Regen, Wind und so weiter und so fort.

Sie haben also physikalische Barrieren, um Ihre Radioaktivität einzuschließen.

Jetzt haben Sie aber natürlich leider auch Kräfte, die diese Barrieren zerstören könnten.

Denn Sie erzeugen sehr viel Energie im Inneren eines Kernreaktors.

Und Sie müssen jetzt sicherstellen, dass diese Kräfte nicht Ihre Barrieren zerstören.

Und da gibt es im Wesentlichen, sage ich mal, zwei ganz relevante Wege, wie so eine Zerstörung passieren könnte.

Das eine ist, Sie machen Fehler bei der Kontrolle Ihrer Leistungsfreisetzung.

Also wir haben ja vorher darüber geredet, wir haben eine Kettenreaktion, die müssen wir kontrollieren, die muss gleichmäßig ablaufen.

Wenn Sie jetzt auf einmal zu viel Reaktivität im Reaktorkern hätten, kann Ihre Leistung exponentiell ansteigen.

Dann wird auf einmal in sehr kurzer Zeit sehr viel Energie freigesetzt, ähnlich wie bei der Kernwaffe.

Und so schnell kriege ich die Steuerstäbe dann nicht mehr rein.

Wenn ich mal in einen bestimmten Bereich komme, in dem meine Kontrolle dann

sozusagen nicht mehr ausreicht, kriege ich dann so schnell meine Steuerstäbe nicht mehr rein.

Es kann zu einer Leistungsexkursion kommen.

Das ist das, was in Tschernobyl letzten Endes passiert ist oder was in Kernwaffen passiert.

Extrem schnelle Leistungsexkursion, sehr große Energiefreisetzung, Zerstörung meiner Barrieren.

Das heißt Tschernobyl war im Grunde eine Atombombe?

Ich würde jetzt nicht direkt sagen eine Atombombe, aber sozusagen im Grunde der ähnliche physikalische Effekt.

Sie haben die Kontrolle über die Kettenreaktion verloren und sie ist eben, sie hat eine exponentielle Exkursion der Leistungsfreisetzung und dadurch sehr, sehr viel Energie in sehr kurzer Zeit produziert.

Der zweite Fall, der Ihnen passieren kann, ist das zweite Problem.

Wir haben gesagt, es entsteht sehr viel Radioaktivität, die ist nicht nur schädlich für den Menschen, sondern sie produziert auch Wärme.

Wenn Sie ein Kohlekraftwerk abschalten, ist es abgeschaltet.

Kernschmelze.

Genau.

Wenn Sie ein Kernkraftwerk abschalten, also die Kettenreaktion unterbrechen, ist es immer noch heiß.

Es ist immer noch heiß und es wird weiter Wärme produziert, weil die Radioaktivität im Inneren im Reaktorkern weiterhin durch radioaktive Zerfälle sehr große Mengen an Wärme produziert.

Jetzt habe ich Kernschmelze verstanden.

Genau, so direkt nach der Abschaltung, also Sie lassen jetzt alle Steuerstäbe einfahren, schalten die Kettenreaktion ab, es wird keine neue Wärme mehr produziert, aber die Radioaktivität zerfällt weiter und direkt nach Abschaltung werden ungefähr sieben Prozent Ihrer normalen Leistung weiterhin über radioaktive Zerfälle frei und das klingt dann eben erst im Laufe von Stunden, Tagen, Wochen, Monaten, Jahren exponentiell ab.

Und das heißt, Sie müssen kontinuierlich weiter sehr große Mengen Wärme abführen.

Wenn Sie das nicht tun können, weil Ihnen Ihre Kühlsysteme versagen, dann bleibt die Wärme im Brennstoff, der Brennstoff heizt sich auf und dann kommt es zu allen möglichen Prozessen, über die wir noch reden können, die aber im Prinzip eben genau in der Kernschmelze zusammen kumuliert.

Das heißt, der Brennstoff heizt sich so weit auf, dass er aufschmilzt, dass er mit dem umgebenden Materialien reagiert und dann wird eben auch die im Kernbrennstoff gebundene Radioaktivität in den Reaktor freigesetzt und kann in die Umgebung kommen.

Das sind so die beiden Hauptszenarien, die Sie verhindern müssen.

Reaktivitätsexkursionen, also Leistungsexkursionen oder eben die Nachwärmeproblematik, also die Abfuhr der radioaktiven Zerfallswärme auch nach Abschaltung des Reaktors.

Womit wir bei Fukushima wären, da hat genau das mit mir nicht mehr funktioniert.

Warum kriegen wir das nicht in den Griff?

Das ist doch nun wirklich trivial.

Also klar, menschliches Versagen ist immer dabei, wenn jetzt einer das Anzeigeelement nicht richtig interpretiert oder sowas.

Also es ist, sag mal, es klingt erstmal trivial, aber Sie dürfen nicht vergessen, wir haben vorher gesagt, wir haben einen Faktor, Hausnummer eine Million wirksamere Energiefreisetzung im Kernreaktor als im Kohlekraftwerk.

Das bedeutet natürlich auch, dass ich auf sehr kleinem Raum sehr viel Energie freisetzen kann.

Das heißt, ich habe sozusagen aus Effizienzgründen möchte ich natürlich meinen Reaktor klein bauen und möchte hochkonzentriert diese Energie freisetzen.

Das stellt aber dann natürlich auch extrem hohe Anforderungen an meine Kühlung.

Und die Wärmemengen, die freigesetzt werden, sind eben extrem groß.

Auch nach Abschaltung meines Reaktors extrem groß.

Wenn ich meinen Reaktor abschalte und unterbreche, dann unmittelbar meine Kühlung für eine Stunde oder für zwei Stunden, dann reicht das aus, dass der Uranbrennstoff auf 2000 Grad aufheizt und in die Kernschmelze läuft.

Also direkt nach Abschaltung ein, zwei Stunden Unterbrechung der Kühlung und ich bekomme schon ein Problem.

Ich muss das also eben mit einer sehr, sehr hohen Sicherheit quasi kontinuierlich sicherstellen und wenn mir das eben nicht gelingt, dann laufe ich in die

Kernschmelze.

Was ich mich gerade frage, Sie sagten, wenn ich mich neben so einen Brennstab stelle, dann bin ich innerhalb weniger Minuten tot.

Ich habe Bilder im Kopf von Tschernobyl, wo Menschen praktisch in gar keinen Schutzanzügen, also mit irgendwie so Plätzchen oder irgendwie sowas, in diesem Reaktor rumgelaufen sind.

Hätten die nicht nach Minuten umfallen müssen?

Also es sind natürlich auch einige der Liquidatoren damals so hohen Strahlen Dosen ausgesetzt worden, dass sie tatsächlich dann aufgrund von akuten Strahlenschäden relativ bald nach dem Ereignis gestorben sind.

Da reden wir größenordnungsmäßig über 30 bis 50 Personen, die sozusagen unmittelbar so stark betroffen worden waren.

Was natürlich jetzt dann dazu kommt, ist, dass sie sozusagen zum einen eine große Menge an Aktivität direkt in die Umwelt freigesetzt hatten.

Die ist einfach bei der Explosion schon rausgeblasen worden sozusagen in die Umwelt und verteilt worden und dann gibt es natürlich sehr viel an kurzlebiger Aktivität, die relativ schnell dann auch abfällt.

Das heißt, nach wenigen Tagen ist viel der ganz kurzlebigen Aktivität auch schon wieder abgesunken.

Aber Sie haben vollkommen recht.

Die Arbeiten damals mussten so durchgeführt werden, dass zum Teil Personen sich Bleiplatten umgehängt haben, um sie abzuschirmen und dann auf ein Dach gelaufen sind, dort radioaktives Material, das rausgeschleudert worden war, in die Raktoruine zurückgeschaufelt haben und dafür ungefähr 30 Sekunden bis

eine Minute jeweils Zeit hatten und danach wieder weg mussten.

Da sind eben wirklich große Anzahl an Personen hingefahren worden, durften einen kurzen Einsatz hinrennen, ein bisschen arbeiten, wieder weg, damit sozusagen für den Einzelnen die radioaktive Belastung begrenzt wird.

Wissen wir, wie viele Opfer das dann letztendlich gefordert hat?

So richtig genau kann das niemand sagen, weil natürlich unter den damaligen Bedingungen keiner wirklich kontrolliert hat, welche Personen sind, welche Strahlendosis, über welche Zeiträume wirklich ausgesetzt worden.

Das wollte wahrscheinlich auch niemand wissen, oder?

Kann man darüber spekulieren, ob es niemand so genau wissen wollte.

Selbst wenn man es gewollt hätte, wäre es natürlich schwierig gewesen.

Man musste eben, man hat versucht in sehr kurzer Zeit sehr viele Personen vor Ort zu bringen, um eben mit den Auswirkungen des Unfalls umzugehen und diese zu begrenzen.

Und in so kurzer Zeit dann für so viele Personen ordentliche Schutzkleidung zu besorgen, Dosimetrie zu besorgen, die ordentlich zu überwachen, das alles zu kontrollieren, war natürlich schwierig.

Und ich würde mal schon auch unterstellen, es war natürlich auch klar, wenn ich das alles ordentlich machen will, dann kann ich die Leute vielleicht immer mal nur wenige Minuten einsetzen, muss sie dann eigentlich wieder heimschicken.

Ich habe aber gar nicht genug Leute.

Ich will sie also vielleicht doch länger einsetzen, als ich es eigentlich tun kann.

Und dann trage ich halt doch mal keinen Dosimeter und habe dadurch keine Dosis bekommen und kann dann auch länger eingesetzt werden.

Ist jemals wirklich nachvollzogen worden, wo genau der Fehler passiert ist in Tschernobyl?

Also es gibt natürlich umfangreiche Studien dazu, wie sich der Unfallablauf aus heutiger Sicht sozusagen erklären lässt.

Das hat sich auch im Laufe der Jahre tatsächlich ein bisschen gewandelt.

Es gab Erklärungsansätze noch aus dem Jahr 86, so unmittelbar danach, wo man sehr stark betont hat, dass von der Bedienmannschaft Fehler gemacht wurden, dass man sich über Betriebsvorschriften hinweg gesetzt hat und den Reaktor in einen Zustand gefahren hat, der so nicht zulässig war.

Aber warum hätte man das tun sollen?

Das ist dann, kommen wir vielleicht gleich dazu, aber es ist später dann so ein bisschen auch relativiert worden im Laufe der Jahre und man hat gesehen, naja, da waren schon noch deutlich andere beitragende Faktoren dabei, sodass man einfach nicht nur dem Bedienpersonal die Schuld geben kann, sondern wie bei jedem schweren Unfall eigentlich sagen muss, naja, es war schon etwas komplexeres Zusammenspiel verschiedener Faktoren.

Kommen wir mal zum Unfallablauf.

Was war eigentlich sozusagen der Grund für den Unfall?

Was man machen wollte, war eigentlich einen sicherheitstechnischen Versuch durchführen.

Wir haben darüber geredet, Kernreaktoren müssen kontinuierlich gekühlt werden, damit wir die Wärme im Reaktorkern abführen, damit es nicht zur

Kernschmelze kommt.

Um kontinuierlich zu kühlen, brauche ich natürlich Kühlmittelpumpen, die einfach Wasser umwälzen und um diese Kühlmittelpumpen zu betreiben, brauche ich Strom.

Genau so.

Den ich selbst erzeuge mit meinem Kraftwerk.

Im Idealfall mit meinem Kraftwerk natürlich selbst erzeuge, das ist das, was im Leistungsbetrieb passiert.

Ich erzeuge selbst Strom, betreibe damit meine Hauptkühlmittelpumpen.

Im Havariebetrieb brauche ich natürlich einen Generator an der Seite.

Im Havariebetrieb schalte ich natürlich meinen Reaktor ab.

Das heißt, mein Reaktor selbst erzeugt erstmal keinen Strom mehr.

Jetzt habe ich zwei Möglichkeiten.

Ich kann meinen Strom aus meinem externen Stromnetz ziehen.

Das ist sozusagen im abgeschalteten Zustand der Normalfall, wenn ein Kernkraftwerk still steht, hängt es am normalen Stromnetz, bezieht aus dem normalen Stromnetz Strom, betreibt damit seine Kühlmittelpumpen.

Im Ereignisfall kann ich mich darauf aber nicht verlassen, weil es schon durchaus sein kann, gerade wenn so ein Kraftwerk in den Störfall reinläuft, trägt es ja selbst sozusagen auch zu Störungen im Netz bei.

Es kann einfach passieren, dass ich meinen Anschluss ans externe Stromnetz

verliere.

Jetzt muss ich aber die Kühlung trotzdem aufrechterhalten.

Das heißt, ich brauche auf dem Anlagengelände selbst Notstromgeneratoren, die mir meine Pumpen mit elektrischer Energie versorgen.

Die habe ich auch in jeder Anlage heute stehen.

Aber so ein Notstromdieselmotor läuft nicht die ganze Zeit, sondern den starte ich dann, wenn ich ihn brauche.

Und manchmal startet er dann halt gar nicht, weil er ewig nicht gelaufen ist.

Entweder startet er gar nicht, aber vor allem braucht es seine Zeit, bis er startet.

Der ist ja nicht einschalten und eine Sekunde später liefert er mir volle Leistung, sondern es braucht Zeit, bis der hochläuft.

So, in der Zeit, ich verliere mein externes Netz, ich schalte meinen Reaktor ab, bis mein Notstromdieselmotor angelaufen ist, vergeht eine gewisse Zeit.

Will ich jetzt in der Zeit ganz ohne Kühlung dastehen?

Nein, ich will natürlich schon, dass weiter Wasser in meinen Reaktorkern gepumpt wird, um ihn zu kühlen.

Die Idee, die man in Tschernobyl hatte, war, in dieser Phase läuft meine Turbine, meine Hauptturbine nach wie vor weiter.

Mein Generator läuft nach wie vor weiter, erzeugt nach wie vor noch ein bisschen elektrische Leistung, die nicht mehr nach außen ins Netz abgegeben wird, die aber ausreichen kann, um meine Kühlmittelpumpen zu betreiben, solange bis die Notstromdieselmotoren anspringen.

Eigentlich eine gute Idee.

Eigentlich eine gute Idee.

So, sollte auch funktionieren, wollte man jetzt aber nochmal testen, reicht diese Energie, die der Generator erzeugt, um solange meine großen Kühlmittelpumpen weiter zu betreiben, bis die Notstromdiesel angesprungen sind und dann eben Notkühlpumpen mit Energie erzeugen können und ich meine Kühlung eben sozusagen weiter garantieren kann.

Den Test wollte man jetzt durchführen.

Dazu wollte man den Reaktor sukzessive abschalten, hat Kühlmittelpumpen sozusagen abgeschaltet, um nur noch mit einem geringeren Anteil an Kühlmittelpumpen den Reaktor weiter zu kühlen und diese dann mit der noch verfügbaren Energie mit Strom zu versorgen.

Und jetzt müssen wir uns ein bisschen die Reaktorphysik wieder anschauen.

Wir sind in Tschernobyl in einem sogenannten RBMK Reaktor, das ist ein russisches Akronym, steht für einen Graphit moderierten Druckröhren-Siedewasser-Reaktor.

Viele Begriffe.

Graphit moderiert, vielleicht als erstes Mal.

Graphit moderiert heißt, meine Neutronen, die aus der Kernspaltung kommen, werden vom Graphit runter moderiert, abgebremst, damit sie für die Kernspaltung besser verfügbar sind.

Ich habe in meinem Reaktorkern große Mengen Graphit, die die Moderation der Neutronen übernehmen.

Die Kühlung meines Reaktors stelle ich mit Wasser sicher.

Mein Reaktorkern ist in diesem speziellen Reaktor aufgebaut aus lauter einzelnen Druckröhren.

Diese Druckröhren sehen so aus, dass ich in der Mitte im Prinzip meinen Brennstab habe mit dem Uran drin.

Dann fließt durch diese Druckröhre Kühlmittel, also Wasser, durch.

Das nimmt die Energie aus dem Uran-Brennstoff auf, wird dabei verdampft, siedet, deswegen Siedewasser-Reaktor, und strömt als Dampf aus dieser Druckröhre oben wieder raus und wird dann oben in einem Dampfsammler gesammelt.

Wo ist das Graphit?

Alle meine Brennstäbe sind in der einzelnen Druckröhre und zwischen diesen verschiedenen Druckröhren sitzt das Graphit und moderiert die Neutronen, die jetzt zwischen den verschiedenen Druckröhren hin und her fließen.

Aber ich habe eben nicht einen großen Behälter, in dem im Inneren die Brennelemente sind, die vom Wasser durchströmt werden, sondern ich habe lauter einzelne Druckröhren, in denen die einzelnen Brennelemente sitzen, die gekühlt werden individuell, und drumherum das ganze Graphit.

Und jetzt kommen wir zu Designproblemen, also Auslegungsproblemen mit diesem Reaktortyp.

Das eine Auslegungsproblem bei diesem Reaktortyp war, wir kühlen die Brennelemente mit Wasser.

Das Wasser hat in diesem Reaktortyp tatsächlich schwerpunktmäßig die

Eigenschaft, dass es jetzt Neutronenfrist einfängt.

Wenn ich jetzt weniger Wasser in meinem System habe, weil mehr Wasser verdampft, fängt es auch weniger Neutronen ein.

Das heißt, es bleiben mehr Neutronen für die Kettenreaktion übrig.

Das heißt, meine Leistung kann steigen.

Wenn meine Leistung steigt, produziere ich mehr Wärme.

Wenn ich mehr Wärme produziere, verdampft mehr Wasser.

Das heißt, ich habe noch weniger Wasser, noch weniger Neutronen gehen verloren, noch mehr Leistung.

Ich habe also eine positive Rückkopplungsschleife, wenn mein Wasser verdampft, dass ich mehr Leistung produziere, noch mehr Wasser verdampfe.

Das ist ein Effekt, den ich haben kann.

Der kann bis zu einem gewissen Grad tolerierbar sein, wenn ich über andere Mechanismen das eben entsprechend abfange und kompensiere.

Das ist aber ein positiver Rückkopplungseffekt, den ich eigentlich nicht haben will.

Einen typischen Druckwasserreaktor, wie wir ihn hier in Deutschland haben, haben wir so einen Effekt nicht.

Zweiter Effekt, auch bei dem Reaktor gab es Abschaltstäbe.

Diese Abschaltstäbe fahren von oben in den Reaktor ein und absorbieren dann die Neutronen.

Wenn diese Abschaltstäbe aus dem Reaktor rausgezogen sind, habe ich da jetzt sozusagen ja einen Leerraum, den ich irgendwie füllen kann und will.

Der war in diesem Reaktortyp mit einem Grafittstab sozusagen dann gefüllt, den ich dann nach unten schiebe, wenn ich den Abschaltstab reinfahre.

Ansonsten habe ich Grafitt an der Stelle.

Jetzt hatte man in diesem Reaktor einen Fehler bei der Konstruktion gemacht und hat nicht den gesamten Raum mit Grafitt gefüllt, sondern hat im unteren Bereich zur Kühlung noch eine Wassersäule stehen gehabt.

Diese Wassersäule hat auch als Neutronenabsorber gedient im unteren Bereich.

Was jetzt dazu geführt hat, dass wenn ich meinen Abschaltstab eingeführt habe in den Reaktor, er diesen Grafittstab nach unten geschoben hat und dieser hat das Wasser im unteren Bereich verdrängt.

Das heißt, ich habe oben angefangen Neutronen zu absorbieren, aber unten habe ich Wasser verdrängt, das mir Neutronen weggefangen hat.

Im unteren Bereich des Reaktors habe ich Luft statt Wasser.

Ja, beziehungsweise jetzt Grafitt sogar statt Wasser, was noch besser moderiert.

Und das Wasser hat mir Neutronen weggeschluckt, das schiebe ich jetzt aber raus und dadurch können unten im unteren Bereich des Reaktors die Neutronen erst mal sogar noch mehr Kernspaltung erzeugen.

Das ist der gegenteilige Effekt, den ich eigentlich haben will.

Achso, ich habe gerade einen Denkfehler gemacht.

Grafitt schluckt keine Neutronen, sondern verlangsamt sie nur.

Nein, Grafitt verlangsamt sie nur.

Genau, das schluckt keine Neutronen, verlangsamt sie nur.

Jetzt bin ich wieder da.

Genau, genau.

Aber ich will abschalten.

Ich fahre von oben die Steuerstäbe ein und drücke mir unten aber Wasser raus, sodass in dem unteren Bereich des Reaktors ich sogar noch mehr Kernspaltung erzeugen kann.

Und jetzt kommen wir zu den Versuchsbedingungen, die an diesem Tag geherrscht haben.

Man wollte eben, wie gesagt, den Reaktor abschalten, um dann zu gucken, ob der auslaufende Generator genug Strom produzieren kann für die Kühlmittelpumpen.

Man hat den Reaktor vorher in seiner Leistung reduziert, ist dabei aber in einen sehr niedrigen Leistungsbereich gefahren, in dem man den Versuch eigentlich nicht durchführen hätte sollen.

Man musste dann aufgrund von Anforderungen vom externen Netz aber länger Strom produzieren, als man eigentlich gedacht hatte, also den Versuch verschieben.

Man ist also in diesem Bereich erst mal längere Zeit noch gefahren, weil einfach der Strom gebraucht wurde.

Dann hat man versucht, den Reaktor wieder in den Leistungsbereich zu bringen, indem man den Versuch eigentlich durchführen wollte, hat dazu Steuerstäbe aus dem Reaktor rausgefahren.

Und hier kommen wir jetzt zu dem ersten Punkt, was die Betriebsrandbedingungen angeht.

Wegen dieses Effekts, über den wir gerade geredet haben, dass die Steuerstäbe, wenn man sie komplett rausgezogen hat und sie einfährt, erst mal sogar den gegenteiligen Effekt erzeugen können, gab es Vorschriften, dass man immer eine bestimmte Mindestanzahl an Steuerstäben im Kern haben muss.

Wenn man das eingehalten hätte, dann wäre dieser Effekt kompensiert worden.

Um aber den Reaktor jetzt wieder, die Leistung wieder anzuheben, um wieder in den Bereich zu kommen, in dem man den Versuch fahren wollte, hat man mehr Steuerstäbe aus dem Reaktor rausgezogen, als eigentlich zulässig war.

Um ein bisschen Zeit zu sparen.

Nein, um den Reaktor einfach wieder so weit hochfahren zu können, dass man wieder genug Energie erzeugt, die man ja braucht für den Strom um die Kühlmittelpumpen.

Ja, aber man hätte doch, also der Reaktor, der war ja, weiß ich nicht, wenn er normalerweise auf 100 Prozent läuft und jetzt ist er gerade, bevor wir die Steuerstäbe rausgezogen haben, auf 10 Prozent gelaufen, irgendwie hätte man den ja auch sonst wieder auf 100 Prozent kriegen müssen.

Nee, man kriegt den genau dadurch auf die 100 Prozent, sozusagen, dass man jetzt anfängt, Steuerstäbe rauszufahren, dadurch wird er wieder kritisch und dadurch geht die Leistung hoch.

Ja, genau.

Aber man durfte das eigentlich zu dem Zeitpunkt nicht mehr, weil man nur noch die vorgeschriebene Mindestmenge an Steuerstäben im Reaktor drin hatte.

Aber man hat ihn dadurch in einen Zustand gefahren, in dem genau der Effekt, über den wir gerade geredet hatten, auftreten konnte, dass nämlich, wenn man jetzt wieder Steuerstäbe einführt, er kritisch wird.

Also vorgeschrieben, mindestens 30 müssen drin sein.

Jetzt war man aber mit der Leistung zu niedrig, wollte die Leistung wieder annehmen, um den Versuch durchführen zu können, hat also mehr Steuerstäbe rausgezogen, als eigentlich zulässig war.

Dadurch stieg die Leistung wieder an.

Aber man war jetzt in dem Bereich, wenn man jetzt die Steuerstäbe einführt, schaltet man nicht ab, sondern macht genau das Gegenteil, führt Reaktivität zu.

Durch diese Betriebsbedingungen kamen jetzt verschiedene Faktoren zusammen.

Dritter Faktor käme auch noch dazu.

Xenon-Vergiftungen wollen wir jetzt vielleicht nicht auch noch vertiefen.

Aber man hatte jetzt eben verschiedene Effekte, als man jetzt den Versuch eingeleitet hat.

Man hat Kühlmittelpumpen abgeschaltet, weniger Wasser wurde durch den Kern geleitet, dadurch wird er heißer, mehr Dampf entsteht, weniger Absorption, es wird mehr Energie erzeugt.

Jetzt schaltet man den Reaktor ab, fährt die Steuerstäbe von oben ein, drückt

unten Wasser aus dem Kern raus.

Auf einmal läuft die Maschine wieder hoch.

Ja, jetzt läuft die Maschine so richtig los.

Und in der Summe haben diese unterschiedlichen Beiträge dazu geführt, dass der Reaktor so genannt prompt überkritisch wurde.

Das heißt, die Leistung steigt auf einer sehr kurzen Zeitskala exponentiell an und eine sehr große Menge Energie wird freigesetzt.

Der Brennstoff verpufft, das Wasser verpufft und explodiert.

Also man hat jetzt in sehr kurzer Zeit sehr viel Energiefreiheit.

Hätten die irgendeine Chance gehabt, das noch abzufangen?

Nee, zu dem Zeitpunkt, als sie das sozusagen ausgelöst haben, lief das so schnell ab, das waren dann Sekunden, da war dann nichts mehr zu machen.

Man hätte nur im Vorfeld sozusagen diese Designprobleme bemerken, beheben, besser verstehen müssen.

Sie hätten dem Betriebspersonal besser bekannt sein müssen, sie hätten wissen müssen, wo die Probleme liegen, warum es diesen vorgeschriebenen Wert der 30 Steuerstäbe gibt.

Das war den Leuten nicht so präsent und nicht so bewusst.

Der war auch nicht auf der Warte angezeigt in großen roten Lettern.

Achtung, ihr habt jetzt nicht mehr die vorgeschriebenen 30 Steuerstäbe drin, sondern man musste dann zu einem Gerät gehen, musste irgendwie Knöpfe

drücken, was ausrechnen lassen, dann hat man irgendwann auch so bekommen, sind jetzt noch 27 drin und dann musste man nachgucken, oh sind aber 30 vorgeschrieben, geht nicht.

Das war den Leuten nicht so präsent, welche Wichtigkeit dieser Wert hat und das Zusammenspiel aus diesen Designfehlern, aus den Randbedingungen, mit denen man den Versuch durchführen wollte und dann aber real durchführen musste und dadurch, dass man sich dann eben über bestimmte Vorschriften hinweggesetzt hat, ist man einfach in Zustände und in Bereiche bekommen, die so nicht vorgesehen waren und wo dann einfach der Reaktor unkontrolliert explodiert ist.

Hat man die Möglichkeit, dass das passiert, vorher schon gekannt oder kennen wir die erst, seit das Ding in die Luft geflogen ist?

Also die Möglichkeit, also dass man die Reaktivität genau kontrollieren muss, also dass sozusagen eine überkritische Leistungsexkursion unbedingt vermieden werden muss, das war natürlich vorher klar.

Das ist, wie gesagt, das ist das, was in der Kernwaffe passiert und das ist... Ne, ich meine, also das, ja doch, die werden es ja vorher gewusst haben, sonst hätten sie nicht gesagt, wir brauchen mindestens 30 Stäbe da drin.

Also das, dass man die Reaktivität genau kontrollieren muss, war klar.

Das sozusagen, dieses Zusammenspiel der verschiedenen Effekte, wie wirkt es sich aus, wenn meine Wasser, mein Wasserdurchsatz abnimmt und ich mehr Dampf produziere, wie wirkt sich das auf die Reaktivität aus, wie wirkt es sich aus, wenn die Steuerstäbe dann auf einmal eingeschaltet werden, wie wirkt sich das aus?

Wie wirkt sich das insbesondere aus in einem Zustand, in dem ich den Reaktor in der Leistung schon runtergefahren hatte, auf einen sehr niedrigen Wert, dann über lange Zeit betreibe und dann wieder versuche, die Leistung anzuheben?

Das waren alles Betriebsrandbedingungen, das hatte so vorher keiner durchgerechnet oder sich klargemacht, ja, dass unter diesen Randbedingungen dann der Effekt so groß ist, dass es eben zu so einer explosionsartigen Leistungsfreisetzung kommt.

Kann so was nochmal passieren?

Also eigentlich dürfte es ja nicht, weil jeder Reaktor dieser Bauart müsste jetzt... Also diese 1 zu 1 Frage ist natürlich so der Klassiker, sag ich mal, und der ist aber natürlich auch im Prinzip dann schon Tage oder Wochen nach Tschernobyl eigentlich immer damit beantwortet worden.

So 1 zu 1, ne?

Also jetzt wissen wir, was schiefgegangen ist, jetzt passiert es uns wahrscheinlich nicht mehr.

Immer dann, wenn wir es wissen, sagen wir mal, also wenn wir so blöd sind, dass uns exakt derselbe Fehler nochmal passieren würde, das wäre wirklich schlimm.

Dann haben wir es aber auch nicht besser verdient.

Dann hätten wir, aber ich sag mal, der 1 zu 1 Ablauf, der wird natürlich so nicht wieder passieren.

Es gibt ja ein paar grundlegende Elemente, ne?

Diese Fehlkonstruktion der Abschaltstäbe, das ist natürlich dann erkannt worden in der Folge und das ist dann auch behoben worden.

Das hat man dann entsprechend vom Design her geändert.

Also so eine 1 zu 1 Übertragung ist natürlich nicht möglich.

Das aber natürlich vergleichbare Zusammenspiel von, wir haben einen Designfehler gemacht, haben den lange nicht erkannt, er liegt lange in der Anlage vor und dann treten auf einmal besondere Randbedingungen ein, unter denen dieser Designfehler zum Tragen kommt und dann tun sich vielleicht Leute nochmal falsch verhalten oder übersehen irgendwie was oder es kommen andere ungenutzte Randbedingungen zusammen und durch dieses Zusammenspiel von Ereignissen kommt es dann zu schweren Unfällen.

Das kann aber natürlich immer wieder passieren.

Das ist ja letzten Endes, wenn wir dann nach Fukushima zu dem anderen Unfallablauf gucken, auch genau der Punkt.

Ich meine, die Anlage war gegen Tsunamis ausgelegt, aber die Annahme war eben, dass an diesem Standort Fukushima Tsunamis maximal eine Wellenhöhe von 5,5 Metern haben werden.

Entsprechend war die Anlage dafür konzipiert, das abzukönnen.

Was real aufgetreten ist, waren dann Tsunamis mit einer Wellenhöhe von 14 bis 15 Metern.

Also wesentlich höher als das, was man jemals vorher geplant hatte.

Das heißt, man hat dann Designdefizit einfach gehabt und die Anlage war ja 40 Jahre gelaufen.

Das hat ja nicht sofort sozusagen nach Einschaltung des Raktors zu Buche geschlagen, sondern man hat 40 Jahre den Reaktor betrieben und dann kam aber auf einmal das Ereignis, wo das Designdefizit zu Tage tritt.

Und das Problem ist natürlich ein grundsätzliches Problem.

Ein Kernreaktor ist ein sehr großes, komplexes, kompliziertes System, letztlich

technisch.

Und da können über lange Zeiträume auch Dinge einfach im Reaktor nicht so sein, wie sie sein sollen, ohne dass wir es merken.

Und erst unter ungünstigen Rahmenbedingungen schlägt es auf.

Sind wir da heute vielleicht ein bisschen besser dran, wo wir überall Supercomputer stehen haben und sowas simulieren können?

Ja, das ist immer sehr schwer zu sagen.

Auf der einen Seite, natürlich haben wir heute mehr verstanden, wissen wir heute mehr, können mehr simulieren, können mehr berechnen.

Macht das Atomkraftwerke sicherer?

Das macht Atomkraftwerke sicherlich auch sicherer.

Auf der anderen Seite darf man aber natürlich auch nicht vergessen, weil man früher unsicherer war an bestimmten Stellen, hat man vielleicht auch sehr konservativ gebaut.

Man hat vielleicht hohe Sicherheitszuschläge draufgetan, hat das Ganze eher nochmal eine Schippe draufgeladen, sehr robust gebaut.

Heute können wir das alles wesentlich besser berechnen, bauen also auch entsprechend nicht mehr so konservativ.

Nehmen Sicherheitszuschläge, die früher notwendig waren, weil wir es nicht so genau sagen konnten, auch raus und gehen dann eher wieder an die Grenzen.

Das kann natürlich auch wieder dazu führen, dass wenn wir dann doch noch irgendwas übersehen haben, wir nicht mehr so viel Speck haben, wie wir ihn

vielleicht früher noch hatten.

Also natürlich sind wir heute schon schlauer, wissen viel mehr, haben ja auch aus ganz vielen Ereignissen, die es in der Geschichte der Kerntechnik gab, immer mal wieder gelernt und Dinge versucht zu verbessern, sodass bestimmte Ereignisse, Ereigniskategorien wahrscheinlich sich so nicht wiederholen werden.

Aber man sieht eben auch, wenn man sich anschaut, welche Ereignisse gibt es weltweit in der Kerntechnik, dass bestimmte Dinge auch immer wiederkehren.

Es ist ja nicht so, dass zwischen Tschernobyl und Fukushima nichts passiert wäre.

Es ist kein schwerer Unfall passiert, aber es gab natürlich auch eine große Anzahl an Störfällen und an Ereignissen, die ziemlich gravierend waren, wenn sie auch nicht zu radioaktiven Freisätzen geführt haben und mit denen man vorher so nicht gerechnet hätte.

Was heißt gravierend?

Ja, gravierend heißt, man kann ja mal so ein paar Beispiele mal so überlegen oder kurz mal diskutieren.

Nehmen wir zum Beispiel den Fall Blayers.

Blayers war eine französische Anlage, Vorgänger eigentlich von Fukushima, würde ich jetzt mal zum Beispiel sagen.

Also technisch?

Also nicht technisch Vorgänger, sondern von den Ereignissen Vorgänger.

Blayers war eine Anlage, die an der Rohen stand, also an einem Fluss stand.

Der Fluss hat auch noch Einfluss von der Meereseite sozusagen.

Dort hatte man auch bestimmt, was ist das maximale Hochwasser, das auftreten kann.

Hatte die Anlage dagegen entsprechend geschützt.

Dann trat irgendwann eine Sturmflut auf, die mit einem Hochwasser im Fluss sozusagen zusammenlagerte und aufgrund des starken Windes kam es zu hohem Wellenaufbau, der über den Deich drüber geschwappt ist und das Anlagengelände überflutet hat.

Dadurch kam es auch zum Ausfall von einer Menge von Sicherheitssystemen, weil man damit auch nie gerechnet hatte.

Also auch vor Fukushima hatten wir schon Überflutungsereignisse in Anlagen weltweit, bei denen Sicherheitssysteme beeinträchtigt waren und ausgefallen sind.

Es war nie so schlimm, dass man deswegen die Kontrolle über den Reaktor verloren hätte, aber man hat schon gesehen, da haben wir wohl offensichtlich was nicht mit bedacht.

Oder anderes Beispiel, Anlage Davis-Bessey in den USA ist auch ein Druckwasserreaktor.

Wir haben vorher gesagt, Druckwasserreaktoren setzen ihrem Kühlmittel zum Beispiel Bor in der Form von Borsäure zu, um die Reaktivität zu kontrollieren.

Ist aber Borsäure, also ist chemisch aggressiv.

Der Reaktordruckbehälter, in dem sich der Reaktorkern befindet, ist von innen mit einer Edelstahlplattierung versehen, sodass diese Borsäure nicht das Metall des Reaktordruckbehälters angreifen kann.

In Davis-Bessey kam es aber jetzt zu ganz feinen Rissen im Bereich des Deckels des Reaktor-druckbehälters, wo die Steuerstäbe durchgehen.

Dadurch sind kleine Mengen Kühlmittel ausgetreten aus diesen Rissen und auf den Reaktor-druckbehälter ausgetreten.

Und dort ist sozusagen das Wasser dann verdampft, die Borsäure aber dageblieben und hat sozusagen von außen den Reaktor-druckbehälter angefangen durchzukorrodieren.

Und das hat über viele, viele, viele Jahre niemand bemerkt, bis von dem ungefähr 30 Zentimeter dicken Stahl des Reaktor-druckbehälters praktisch nur noch die innere Plattierung übrig war.

Also wenn der Reaktor noch weiter betrieben worden wäre und man es nicht bemerkt hätte, war die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass irgendwann an dieser Stelle sozusagen der Behälter versagt und es zu einem Kühlmittelverluststörfall gekommen wäre.

Was hätten die in dem Fall gemacht?

Hätten die das Ding noch runterfahren können?

Kann man jetzt darüber spekulieren.

Das hängt dann davon ab, wie lange wäre das noch so weitergegangen, wie wäre das Ereignis dann tatsächlich im Detail abgelaufen?

Möglicherweise hätte man das beherrschen können, ganz sicher weiß man es aber nicht.

Fakt ist aber jedenfalls, man hat eben über viele Jahre sozusagen diesen Austritt von Kühlmitteln nicht bemerkt, obwohl man Indizien hatte im Vorfeld, wo man

hätte sagen können, irgendwas stimmt hier nicht.

Irgendwie ist der Kühlmittelverbrauch zu hoch.

Vor allem hat man Bohr im Sicherheitsbehälter gefunden, also außerhalb des Kühlkreislaufs, wo es einfach nicht hingehört, wo man mal hätte dann sagen können, wie kommt es da hin, warum, wieso.

Hat man aber nicht gemacht.

Man hatte auch sozusagen so Verkrustungen oben auf dem RDB-Deckel, die man normalerweise reinigen sollte, entfernen sollte.

Das ist aber natürlich, kostet Zeit und Geld.

In der Revision muss der Reaktor für abgeschaltet sein.

Hat man eben nicht in der Intensität gemacht, wie man es hätte machen sollen.

Ich wollte gerade fragen, ist das ein Kapitalismusproblem?

An der Stelle hat tatsächlich der Betreiber hinterher selbst gesagt, naja, wir waren an der Stelle wohl eher darauf bedacht, den Reaktor sozusagen nicht zu lange im Stillstand zu haben und weiterlaufen zu lassen, als aus Sicherheitsgründen hier sehr genau hinzuschauen und zu kontrollieren, was da eigentlich Sache ist.

Das hat der Betreiber selbst so gesagt.

Das heißt, solche Ereignisse, die jetzt nicht zur Katastrophe geführt haben, aber die durchaus gezeigt haben, da sind Dinge schiefgelaufen.

Da gab es eine große Anzahl, auch zwischen Tschernobyl und Fukushima.

Man kann jetzt nicht sagen, es gab diese beiden komischen Ereignisse, wo jetzt irgendwie viel passiert, aber ansonsten war ja alles in Ordnung.

Sondern es gibt, wenn Sie in die Geschichte der Kernenergie gucken, eben wirklich viele Ereignisse, unterschiedlicher Schwere und auch immer wieder Ereignisse, wo dann alle Experten sagen, ups, da haben wir ja vorher so gar nicht dran gedacht.

Fast wäre es schiefgegangen.

Wie sieht es in Deutschland aus?

Es gibt ja so dieses, ja, bei uns ist Kernkraft ja sicher, das passiert ja nur den Russen.

Sind wir tatsächlich besser dran?

Also der Vergleich jetzt tatsächlich, wer ist besser, der ist natürlich wirklich ganz schwer zu machen, auch von außen ganz schwer zu machen, weil Sie dazu vergleichen müssen, welche Reaktortypen haben wir, wie sieht es vom Design aus, wie sieht es von den Sicherheitssystemen aus.

Dann kommt da aber natürlich auch dazu, dass was so als Sicherheitskultur bezeichnet wird.

Also wie wird der Reaktor betrieben, welches Selbstverständnis hat der Betreiber, welchen Stellenwert misst er der Sicherheit zu, wie ist die technische Kompetenz.

Dann kommt auch dazu, welche Aufsichtsbehörden haben sie.

Also wie wird kontrolliert, was der Betreiber macht, dass er die Sicherheit ausreichend sicherstellt, dass er sich ausreichend darum kümmert.

Das ist sozusagen ein komplexes Wechselspiel zwischen Technik, habe ich die ordentlich gemacht, zwischen Betrieb mache ich die ordentlich, zwischen Aufsicht kontrolliere ich das Ganze ordentlich und wer da weltweit wie gut dasteht, hätten Sie mich vor Fukushima gefragt, wie sieht es in Japan aus, hätte ich wahrscheinlich auch gesagt, also Japan, hoch technologisiertes Land, ordentliches Land, wo man sehr genau drauf schaut, die werden sehr genau wissen, was sie tun, aber auch da sind offensichtlich eben zwischen Betreiber und Aufsichtsbehörde Absprachen gelaufen, hat man nicht so genau hingeschaut, hat man Nachrüstungen verzögert, hat Probleme, die bewusst waren, nicht thematisiert, wo man aus heutiger Sicht sagen würde, ja, also das darf halt nicht passieren, wenn man keine Energie betreiben will.

Dann frage ich mal anders, fühlen Sie sich wohl in Deutschland mit den Kernkraftwerken, die wir hier haben?

Also wir haben ja in Deutschland einen Beschluss gefasst, aus der Kernenergie auszusteigen und wir haben den Beschluss so gefasst, dass wir nicht gesagt haben, wir schalten jetzt sofort alle Kernkraftwerke ab, sondern wir haben noch eine Restlaufzeit, die sehr limitiert ist und so lange betreiben wir unsere Kernkraftwerke und ich habe jetzt nicht das Gefühl, dass sozusagen aus den deutschen Kernkraftwerken ich morgen damit rechnen muss, dass hier die schwere Katastrophe passiert, aber natürlich kann man auch für deutsche Kernkraftwerke nicht ausschließen, dass es in deutschen Kernkraftwerken zu einem Unfall kommen könnte.

Insofern ist es ein nachvollziehbarer Beschluss zu sagen, wir wollen langfristig aus der Kernenergie aussteigen, wir bauen die Alternativen auf und wir schalten sukzessive unsere Kernkraftwerke ab.

Jetzt gibt es so einzelne Kernkraftwerke, so Fessenheim ist da ja öfter mal in den Medien, die als marode gelten.

Was ist daran das Marode, also was kann uns da blühen?

Also das Marode ist natürlich immer so ein bisschen ein schwieriger Begriff.

Da bröseln alles weg.

Ich würde mal sagen, man kann da so ein paar Ebenen vielleicht unterscheiden.

Also es gibt natürlich in Kernkraftwerken auch Alterung, also die klassische Alterung, wie wir sie auch vom Auto kennen, also irgendwas rostet, Gummi wird hart, zerbröseln irgendwann und so weiter und so fort.

Diese Form der physischen Alterung ist natürlich grundsätzlich bekannt.

Da gibt es im Kernkraftwerk so ein paar Effekte durch die Neutronenstrahlung und durch die Radioaktivität, die sehr spezifisch für ein Kernkraftwerk ist, wo man sehr genau hinschauen muss, so dass man da das Problem hat, man muss Ermüdungen, Alterungen, Versprödung und so weiter und so fort alles berücksichtigen, muss sich überlegen, was bedeutet das für meine Systeme und Komponenten, wie lange kann ich die betreiben, ab wann muss ich sie austauschen oder ab wann ist einfach auch Schluss mit dem Betrieb des Reaktors.

Dafür gibt es Alterungsmanagementprogramme, um genau das zu versuchen und das zu tun.

Daneben gibt es aber natürlich auch, sag ich jetzt mal so, konzeptionelle Alterung.

Was heißt konzeptionelle Alterung?

Die heißt, Kernkraftwerke, die heute betrieben werden, sind typischerweise oft 30 bis 40 Jahre alt.

Das heißt, sie sind in den 70er Jahren gebaut worden und das heißt, sie sind in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts konzipiert und durchdacht worden.

Das heißt, denen liegt zugrunde, was hat man sich in den 60er oder 70er Jahren des letzten Jahrhunderts gedacht, was kann an Ereignissen passieren, welche Einwirkungen von außen können auf die Anlage einwirken, was sind die schwersten Ereignisse, die wir zu unterstellen haben.

Da hatte man natürlich bestimmte Vorstellungen, aber man hat eben in den letzten 30, 40 Jahren gelernt, man hat seine Regelwerke weiterentwickelt, man stellt neue, andere Anforderungen an Kernkraftwerke heute, als man es vor 40 Jahren getan hat.

Eine Altanlage würde diese heutigen Anforderungen sicher nicht erfüllen in aller Regel, weil sie einfach nie so gebaut worden ist, nie so konzipiert worden ist.

Natürlich versucht man durch Nachrüstungen auch Altanlagen an solche modernen Anforderungen heranzuführen, das wird man aber nie vollständig schaffen.

Das geht einfach nicht, weil in ihren Nachrüstungen einfach auch Grenzen gesetzt sind.

Das ist ja im Vergleich mit einem alten Auto, passt da ja sehr gut.

Genau, also Sie können auch an einem alten Auto natürlich erstmal so die physikalische Alterung begrenzen, indem Sie Reifen auswechseln, Bremsbeläge auswechseln und so weiter und so fort.

Sie könnten vielleicht auch an einem alten Auto anfangen, bestimmte Dinge irgendwie nachzurüsten, aber Sie werden in ein altes Auto keinen ABS einbauen, Sie werden keinen Airbag einbauen und ja, also bestimmte Dinge kriegen Sie einfach nicht hin.

So, insofern kann man schon sagen, alte Reaktoren haben das spezifische Problem der Alterung, das berücksichtigt werden muss und haben das

spezifische Problem von konzeptionellen Unterschieden zu neueren Reaktorkonzepten, wo man einfach dann sagen muss, sie sind nicht vergleichbar in ihrem Sicherheitsniveau, das Delta wird größer im Laufe der Zeit und die Frage ist einfach, wie lange ist man bereit, dann solche Reaktoren zu betreiben.

Ursprünglich konzipiert wurden Reaktoren typischerweise so für Betriebszeiten in der Größenordnung 30 bis 40 Jahre.

Das sind so die Laufzeiten, die wir heute eigentlich in einem Großteil der Reaktoren weltweit eigentlich schon sehen.

Also die Reaktoren heute sind im Schnitt 27, 28 Jahre alt.

Das heißt, die nähern sich all dieser ursprünglichen technischen Grenze 30 bis 40 Jahre, manche sind schon drüber, viele liegen gerade in diesem Bereich 30 bis 40 Jahre.

Die Frage ist also jetzt, schaltet man sie nach 40 Jahren ab, lässt man sie länger laufen und wenn man sie länger laufen lässt, welche Anforderungen stellt man dann an solchen längeren Betrieb?

Werden überhaupt noch neue gebaut momentan?

Ja, es werden auch neue Kernkraftwerke gebaut, allerdings sind die Zahlen da relativ gering, also die große Bauphase der Kerntechnik war in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts.

Als das Versprechen von billigem Strom noch geglaubt wurde.

Genau, als man den Eindruck hatte, Ölkrise, Ölpreisschock, wir brauchen Alternativen, wir haben mit der Kerntechnik eine zuverlässige, günstige, saubere Energiequelle, hat man sehr viele Reaktoren gebaut.

Seit den Ereignissen dann auch in Three Mile Island 1979 und in Chernobyl 1986

und seit man gesehen hat, dass Kernenergie eben auch doch nicht so billig ist, wie man es sich am Anfang gedacht hat, weil sie technisch sehr, sehr aufwendig und schwierig ist, sind die Bauzahlen eben deutlich zurückgegangen und eigentlich stagniert.

Man hat heute im Moment 444 Kernreaktoren weltweit laufen und die Zahl ist seit vielen Jahren mehr oder minder konstant, sage ich mal.

Es sind im Moment Größenordnungen, genau zahlweise 65, 68 Reaktoren weltweit in Bau.

In den Hochphasen waren das eher 200 Reaktoren, die gleichzeitig in Bau waren.

Ist davon auszugehen, dass die auch alle in Betrieb genommen werden oder kann es auch genauso gut sein, dass das auch wieder so baugün werden?

Kann man nicht abschätzen.

Es gab in der Vergangenheit immer wieder eine große Anzahl an Projekten, die begonnen wurden, die dann zum Teil über 15, 15 Jahre gebaut wurden und dann irgendwann entweder tatsächlich nach 20 Jahren fertiggestellt wurden oder aber auch einfach beerdigt wurden und niemals fertiggestellt worden sind.

Das heißt, man kann nicht bei allen Projekten, die heute in Bau sind, auch sicher davon ausgehen, dass sie in Betrieb gehen würden.

Selbst wenn wir haben heute 444 Kernkraftwerke in Betrieb.

Ich habe vorher gesagt, die sind im Mittel so 27, 28, 29 Jahre alt.

Wenn man jetzt mal davon ausgehen würde, dass die Kernkraftwerke durchschnittlich 40 Jahre betrieben werden, dann würde das heißen, dass eigentlich in den nächsten zehn Jahren ein Großteil dieser 444 Reaktoren ersetzt werden müsste.

Wie lange ist die Bauzeit für so einen?

Bauzeit von einem Reaktor hängt ein bisschen davon ab, wo wir hingucken.

Wenn es gut läuft, sind es vielleicht vier bis fünf Jahre.

Typisch bei uns waren bei den letzten Bauprojekten in Deutschland eher so acht, neun Jahre, zehn Jahre.

Es gibt heute auch Bauprojekte in Westeuropa wie in Finnland oder in Frankreich, wo die Bauzeiten jetzt auch schon wieder bei jenseits der zehn Jahre liegen.

Das heißt, wenn wir heute 68 Reaktoren im Bau haben und typischerweise auch fünf bis zehn Jahre rechnen müssten, um neue Reaktoren zu bauen, kann man sich schon relativ leicht ausrechnen.

Wenn die Reaktoren nach 40 Jahren abgeschaltet werden würden, dann wird die Zahl der Reaktoren in den nächsten Jahren sehr, sehr schnell runtergehen.

Es gibt deswegen heute ganz klare Tendenz, darüber zu reden, Reaktoren statt 40 Jahren eher 50 oder 60 Jahre oder mehr auslaufen zu lassen.

Ich wollte gerade sagen, das ist ja eine politische Entscheidung, keine technische.

Das ist auch eine technische Entscheidung manchmal, wenn es harte Kriterien gibt, dass einfach der Betrieb des Reaktors so nicht mehr verantwortbar ist.

Aber in vielen Fällen ist das ja eher eine weiche Entscheidung, dass man sagt, naja, es ist zwar ein altes Reaktorkonzept.

Ein gutes Lobbying betrieben, wir machen mal zehn Jahre länger.

Der entspricht jetzt nicht einem Reaktor, wie wir ihn heute neu bauen würden, aber er ist irgendwie dann doch noch sicher genug, dass wir ihn halt irgendwie einfach 20 Jahre weiter betreiben.

Das ist so eine staatliche Entscheidung, eine politische Entscheidung, nicht zuletzt auch.

Als Tschernobyl dann explodiert ist, es heißt, das Ding hätte sein gesamtes Material rausgeschleudert, habe ich auch nur gerüchteweise gehört.

Ist das tatsächlich so?

Ist da nichts mehr übrig gewesen?

Also es ist schon noch was übrig.

Es ist natürlich sehr viel Radioaktivität freigesetzt worden unmittelbar, weil natürlich gerade so leichtflüchtige Stoffe, also einige der radioaktiven Spaltprodukte, die besonders biologisch auch wichtig sind, wie Jod, wie Xenium, wie Cesium, die sind sehr leichtflüchtig.

Wir haben die Explosion gehabt und wir hatten danach über viele Tage einen Grafitbrand.

Also das Grafit, das wir im Raktorkern hatten, das zur Moderation diente, hat sich entzündet, hat gebrannt.

Also über viele Tage hatten wir hohe Temperaturen im Raktorkern, Thermikfreisetzung in die Umwelt.

Das heißt, viel an den leichtflüchtigen Stoffen sind in die Umgebung freigesetzt worden.

Es ist natürlich durch die Explosion auch einiges von den schweren, also gerade

von dem Uran und dem erzeugten Plutonium und den sehr schweren Elementen freigesetzt worden.

Aber davon ist eben auch noch sehr viel in der Raktorruiene selbst übrig geblieben und nicht alles davon ist natürlich freigesetzt worden in der Umgebung.

Erinnern Sie sich daran, als das Ding 86 uns um die Ohren geflogen ist?

Weil ich denke natürlich die ganze Zeit darüber nach, wie war das eigentlich damals?

Aber so eine richtige Erinnerung habe ich nicht.

Also ich bin 46 Jahre alt, das heißt, ich habe das irgendwie in der Pubertät mitgekriegt.

Ich kann mich noch nicht mal daran erinnern, Angst gehabt zu haben, wenn ich rausgegangen bin oder so.

Also ich kann mich schon noch daran erinnern.

Ich kann mich insbesondere daran erinnern, dass natürlich damals, 80er Jahre ja auch noch der Zusammenhang zwischen ziviler und militärischer Kernenergie Nutzung wesentlich präsenter war.

Das waren ja noch Zeiten, in denen Kernwaffen eine politisch deutlich größere Rolle gespielt haben als heute.

NATO-Doppelbeschluss war damals natürlich auch noch ein größeres Thema, Anfang der 80er Jahre gewesen.

Und in dem Kontext war die Kernenergie ja auch stark politisch umstritten.

Und dann kam natürlich Tschernobyl sozusagen nochmal obendrauf als

deutlicher Hinweis darauf, dass eben die kerntechnische Sicherheit doch nicht so groß ist, wie man sich das vielleicht immer einreden wollte oder immer geglaubt hat.

Pilze durften man nicht essen.

Darf man heute eigentlich wieder Pilze essen?

Man darf heute natürlich auch Pilze essen, aber es kann Ihnen passieren, wenn Sie in Teilen Bayerns Wildschweine jagen gehen, dass Sie die nicht essen dürfen, sondern dass die nach wie vor so hoch kontaminiert sind, dass die zum Verzehren nicht geeignet sind.

Warum denn ausgerechnet Wildschweine?

Die sind doch frisch geboren.

Weil Wildschweine sich, naja, also natürlich schon ältere Wildschweine, aber die ernähren sich natürlich zum Beispiel von Pilzen und von anderen am Boden wachsenden Pflanzen, die dann eben stark Cesium aufnehmen und über die Nahrungskette reichert sich dann dieses Cesium eben an, das eine Halbwertszeit von 30 Jahren hat, deswegen heute noch in großen Mengen da ist.

Gerade Wildschweine zum Beispiel sind deswegen oft noch sehr stark belastet.

Die Bundesrepublik zahlt nach wie vor Jägern in Bayern Geld dafür, wenn sie sozusagen Wildschweine haben, die nicht zum Verzehr geeignet sind, die aus dem Verkehr gezahlt werden müssen, da fallen erkleckliche Beträge jedes Jahr nach wie vor an.

Das heißt, die bayerischen Jäger haben immer einen Geigerzähler dabei, um zu gucken, ob das Schwein strahlt?

Wie, wann und wie das genau gemessen wird, das kann ich Ihnen nicht sagen,

aber es wird kontrolliert, ja.

Sie sagten eben kurz, das ist ja auch eine saubere Energiequelle.

Das ist ja nur eine Lüge gewesen, oder, also ich behaupte, das ist eine Lüge gewesen, weil jeder, der es damals wissen wollte, der konnte wissen, dass wir heute ein Müllproblem haben werden.

Werden wir dieses Müllproblem jemals in den Griff kriegen?

Er lacht.

Ich lache nicht, ne, aber es ist natürlich, es fängt bei den Fragen ja immer damit an, was heißt in den Griff kriegen?

Der Endlager, was schon mal total klasse ist.

Was haben wir da für Halbwertszeiten, schlimmstenfalls?

Naja, die Halbwertszeiten gehen von Sekunden und Minuten bei den schnell Zerfallenen über die 30 Jahre, über die wir beim Cesium zum Beispiel reden, über die 24.000 Jahre, wenn wir über das Plutonium reden, bis hin zu Millionen von Jahren, wenn wir über Uran oder andere langlebige Schweinsprodukte reden.

Das heißt, wir müssten ein Schild erfinden, das Achtung radioaktiv anzeigt und auch in 100.000 Jahren noch verstanden wird.

Genau, also wenn wir das Material hier oben bei uns sicher lagern wollen würden, um zu verhindern, dass es irgendwann mal in die Biosphäre kommt und vom Menschen aufgenommen werden kann, dann müssten wir wahrscheinlich in solchen Weg gehen.

Der ist jetzt, würde ich jetzt mal bewerten, nicht besonders realistisch.

Also eine überirdische Lagerung, bei der ich mich darauf verlasse, dass ich Menschen über die nächsten, ja ich will gar nicht mehr über 100.000 Jahre reden, 10.000 Jahre, ich will auch nicht über 1.000 Jahre reden, sondern alles was so jenseits von, keine Ahnung, 100, 200 Jahren ist, würde ich mich ehrlich gesagt nicht auf menschliche, organisatorische, staatliche Strukturen verlassen wollen, weil wenn wir über die letzten 200 Jahre Europa zurückschauen, welche politischen Umwälzungen, Verwerfungen, Kriege, andere Dinge wir hatten, sozusagen so eine aktive Bewachung und ein aktiver Schutz, für mich nur schwer vorstellbar.

Aber wie will man es denn dann passiv machen?

Ja, das ist genau sozusagen die Frage, wie macht man es passiv?

Die ergebnisoffene Suche nach einem Endlager.

Genau, die Idee der Passivität ist eben ein sogenanntes geologisches Endlager zu suchen.

Was heißt die Geologie darin?

Das heißt eben, wenn wir über verschiedene Zeitskalen reden, dann sind eben so die menschlichen und historischen Zeitskalen spielen sich eben für uns eher so auf der Größenordnung 100 oder 1.000 Jahre ab, aber wenn wir über die Geologie reden, also darüber wie sich sozusagen die Erdkruste verändert, dann reden Geologen eben durchaus auch mal über Zeiträume von 100.000 Jahren oder von einer Million Jahre, über die sie glauben sagen zu können, wie verändert sich eigentlich unsere Geologie, wie entstehen Berge, wie tragen sie sich ab, also wie verändern sich Gesteinsschichten, wie verändert sich die Erdkruste.

Das Problem ist nur, dass auf die Geologen ist schon mal nicht gehört worden, darum haben wir sowas wie die Asse, darum haben wir sowas wie Gorleben.

Das ist richtig.

Jetzt muss man aber vielleicht ein bisschen unterscheiden zwischen Asse und Gorleben.

Asse war ja zunächst mal schon ein Salzbergwerk, bevor man es jetzt benutzt hat, um schwache und mittelradioaktive Abfälle dort einzulagern.

Das heißt, wir hatten hier einen Salzstock, der schon vorher für kommerzielle Zwecke komplett ausgehüllt worden ist, um einfach Salz zu gewinnen.

Und man hat damals eben dieses Bergwerk günstig bekommen können, weil es nicht mehr genutzt werden wollte und hat dann beschlossen, dort eben zu Versuchszwecken schwache und mittelradioaktive Abfälle einzulagern, um einfach die Einlagerung prüfen zu können.

Eine Geologin hat mir mal erzählt, dass man damals noch nicht wusste, dass Salz so schnell fließt, also in geologischen Größenordnungen so schnell fließt, wie es dann letztlich geflossen ist.

Das mag auch ein Faktor sein, dass man tatsächlich auch in den letzten 30, 40 Jahren natürlich noch sehr viel dazugelernt hat.

Ich denke, es ist aber auch klar, aus heutiger Sicht kann man glaube ich von vornherein sagen, die Idee, einfach schon einen existierenden Salzstock zu verwenden, wo man quasi schon Aushöhlungen bis an die Ränder des Salzstocks macht, ist einfach per se schon mal nicht so besonders gut.

Das würde man natürlich, wenn man eigentlich ernsthaft über Endlagerung redet, genauso nicht machen wollen.

Aber dann würde man auch keinen Salzstock nehmen.

Man würde vielleicht Salz als Medium nehmen, aber man würde eben in eine

geologische Formation gehen, die zunächst mal möglichst groß ist, um möglichst große Abstände zur Umgebung sozusagen zu haben.

Und man würde sie dann eben nicht so weit aushöhlen, dass man eigentlich schon bis an die Ränder dieser geologischen Formation kommt, sondern man würde sich eine geologische Formation suchen, die möglichst stabil ist, von der man glaubt, dass man wirklich so sicher, wie das eben Menschen möglich ist, voraussagen kann, wie sie sich über lange Zeiträume entwickeln wird und müsste dann versuchen, die hochradioaktiven Stoffe in diese geologische Formation einzubringen und das hinterher wieder ordentlich zu verschließen.

Über wie viel Müll reden wir da eigentlich?

Wir reden für Deutschland über, was die hochradioaktiven Abfälle, also die abgebrannten Brennelemente angeht, über ungefähr 10.000 Tonnen Schwermetallanteil, also abgebrannte Brennelemente, plus nochmal eine weitere Menge an diesen Glaskokelen, über die wir am Anfang geredet haben, die aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen in Frankreich erzeugt worden sind und auch als hochradioaktive Abfälle zu uns zurückkommen.

Kann man das in Güterwagen ausdrücken?

Das ist vom Volumen her nicht unendlich viel.

Da müssen Sie natürlich auch immer wieder gucken, reden wir jetzt nur über das reine Schwermetall, reden wir dann darüber, dass dieses Schwermetall in Brennelementen ist, reden wir dann darüber, dass diese Brennelemente nochmal in Castorbehälter eingeschlossen sind, um sie sicher einzuschließen, die natürlich auch wieder ein größeres Volumen und eine größere Masse haben und reden wir dann über die Abstände, die wir zwischen diesen Castoren brauchen, damit auch die Wärmeabfuhr an der Umgebung ausreicht.

Deswegen muss man immer gucken, worüber reden wir jetzt eigentlich.

Wenn Sie einen einzelnen Castor nehmen, haben Sie damit einen Güterwaggon voll und dann reden wir über mehrere hundert Castoren.

Haben Sie schon eine Ahnung, wo das Endlager sein wird?

Da halte ich mich zum Glück raus, weil mein Schwerpunkt auf den Themen der Anlagensicherheit liegt.

Aber Sie sind ja das Öko-Institut und Sie haben sicher eine ehefrohende Vorstellung daran.

Die Idee ist ja aber jetzt zunächst mal eben genau zu sagen, wir legen uns nicht von vornherein fest, sondern wir versuchen mit einer weißen Landkarte anzufangen und wir versuchen zunächst mal zu definieren, was sind Kriterien, die ein solches Endlager mal erfüllen muss.

Aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht, aber auch aufgrund des sozialen Umfelds, aufgrund sonstiger Randbedingungen, welche Kriterien müssen an eine solche Endlagerformation gestellt werden.

Mit solchen Kriterien kann man dann an eine Landkarte rangehen und kann sozusagen eingrenzen Gebiete, die man von vornherein ausschließen kann, weil sie geologisch nicht stabil genug sind.

Brandenburg.

Ja, und wo man sozusagen sagen kann, also hier kommt es sicherlich nicht in Frage.

Man kann dann andere Regionen identifizieren, wo es potenziell denkbar wäre.

Man muss diese Regionen dann erkunden.

Man muss dann Orte sozusagen identifizieren, in denen die Geologie geeignet

sein könnte, in denen man glaubt, dass die geologischen Formationen geeignet sein könnten.

Diese muss man dann eben entsprechend weiter erkunden, ob das auch tatsächlich so ist, wie man es sich vorstellt.

Dazu wird man dann erstmal oberirdische, aber später auch unterirdische Erkundungen durchführen müssen und auf diese Art und Weise hofft man eben dann zu einem geeigneten Endlagerstandort zu kommen.

Ist das irgendeinem Land weltweit schon gelungen?

Also es gibt mittlerweile ein beantragtes Endlager in Finnland, Schweden, jetzt müsste ich selbst sagen.

Skandinavien.

Es gibt mittlerweile ein Endlager in Skandinavien.

Man muss dazu allerdings auch sagen, die Endlagerkonzepte sind weltweit durchaus unterschiedlich.

Also es gibt unterschiedliche Konzepte.

Will man sich eher stärker auf die Geologie verlassen?

Will man sich eher auch auf technische Barrieren verlassen?

Also bei diesem Endlagerkonzept geht man beispielsweise auch davon aus, dass man besonders für die ersten tausend von Jahren die Brennelemente in Kupferbehälter einschließt und das Kupfer einfach dafür sorgt, dass die Elemente auch chemisch gut eingeschlossen sind, also dass nicht korrodiert, nicht freigesetzt wird.

Da unterscheiden sich also auch sozusagen die Endlagerkonzepte weltweit.

Will man sich mehr oder weniger auf die Geologie verlassen?

Entsprechend werden auch unterschiedliche Gesteinsformationen untersucht.

Will man eher in Granit gehen, will man eher in Tongestein gehen, untersucht man eher Salz.

Verschiedene Länder sind da unterschiedlich weit, aber es gibt noch kein in Betrieb befindliches Endlager für hochradioaktive Abfälle weltweit.

Und deutet sich ein Patentrezept an?

Ich würde sagen nein.

Also so ein wirkliches Patentrezept, dass jetzt alle sagen, das ist die optimale Gesteinsformation und das ist die optimale Lage, die optimalen Randbedingungen, kann man nicht sagen.

Was man sagen kann, ist, dass im Prinzip weltweit alle sozusagen als die heute am stärksten diskutierte Option von geologischer Endlagerung ausgehen.

Das kann man schon sagen.

Es wird ja viel auch über Alternativen zur geologischen Endlagerung geredet und die kann man dann durchdeklinieren und kann sich überlegen, machen die Sinn oder machen die keinen Sinn?

Und da würde ich sagen, ist man sich weltweit schon sehr einig, dass geologische Endlagerung von allen Lösungsansätzen der vernünftigste Lösungsansatz ist.

Aber die konkrete technische Ausführung ist länderspezifisch sehr

unterschiedlich.

Aber das hängt natürlich auch davon ab, welche Geologien haben sie überhaupt zur Verfügung.

Die Antwort darauf wird in Japan wahrscheinlich anders aussehen, als sie eben in Europa oder als sie in den USA aussehen wird.

Mir hat mal jemand erzählt, man könnte diesen Atombüll auch weiter zerstrahlen, sodass da weniger von übrig bleibt.

Ist das eine Legende oder ein Mythos oder geht das wirklich?

Also ich würde sagen, es ist schon, wenn man alles zusammen nimmt, eher ein Mythos, als dass ich glaube, dass das wirklich gehen würde.

Ich meine, die Idee dahinter ist relativ simpel.

Wir haben am Anfang darüber geredet, wie produzieren wir überhaupt die Energie.

Die produzieren wir dadurch, dass schwere Atomkerne Neutronen einfangen und dann spalten.

Neutronen führen also zur Umwandlung von einem chemischen Element in ein anderes chemisches Element, hier dann durch Kernspaltung.

Das heißt, ich müsste den Müll nur lang genug mit Neutronen beschießen, dann würde da irgendwann... Theoretisch könnte ich jetzt auf die Idee kommen, mit Neutronen Elemente umzuwandeln.

Nee, so einfach ist es eben genau nicht.

Ich kann nicht den Müll hernehmen und den beschießen, weil ich dafür

überhaupt nicht genug Neutronen hätte.

Die muss ich ja irgendwo herbekommen und wenn ich jetzt einfach den Müll wahllos damit beschießen würde, dann würde ich zum einen aus kurzlebigen Spaltprodukten möglicherweise längerlebige aufbauen.

Die, die vielleicht langlebig sind, würde ich vielleicht gar nicht erreichen und und und.

Also einfach nur so den Müll hernehmen geht nicht.

Was ich machen muss, das Konzept, das da verfolgt wird, nennt sich Partitionierung und Transmutation.

Das sind zwei Teile, wie der Name schon sagt.

Eine Partitionierung, also Unterteilung.

Mülltrennung.

Genau, Mülltrennung und eine Transmutation, also Umwandlung.

Mülltrennung heißt eben wirklich, der hochradioaktive Abfall wird selektiv aufgetrennt.

Wir haben am Anfang darüber geredet, es gibt die sogenannte Wiederaufarbeitung, bei der ich versuche Uran oder Plutonium abzutrennen aus dem Brennstoff.

Hier reden wir dann wirklich darüber, selektiv nicht nur Uran und Plutonium abzutrennen, sondern selektiv zum Beispiel die ganze Gruppe der Aktiniden, wo dann neben Plutonium auch noch Ameritium, Curium, Neptunium dazuzählen, abzutrennen.

Aber gegebenenfalls müsste ich dann auch darüber reden, nicht nur diese Gruppe, sondern auch langlebige Spaltprodukte, Jod, Technetium, Cäsium mit langlebigen Isotopen selektiv abzutrennen, damit ich es dann umwandeln kann.

Das ist natürlich einfach schon mal von der Chemie her schwierig.

Ich rede ja jetzt nicht nur einfach von chemischen Prozessen, sondern ich rede davon mit hochradioaktiven Abfällen umzugehen und genau die schlimmen, langlebigen, hochtoxischen Stoffe abzutrennen.

Da mache ich nicht mal eben Bunsenbrenner dran.

Sondern ich gehe hier wirklich genau mit dem Material um, was ich loswerden will, weil es besonders problematisch ist.

Und das ist von daher schon technisch, von der Technik selbst, von der Abschirmung, vom Umgang damit extrem aufwendig, extrem schwierig.

Angenommen, ich würde das schaffen und könnte diese Elemente selektiv abtrennen, dann muss ich sie irgendwie umwandeln.

Umwandeln durch Einfang von Neutronen.

Wo bekomme ich die Neutronen her?

Aus Kernspaltung.

Ich erzeuge neuen Müll, mit dem ich den alten Müll... Das ist vielleicht nochmal ein Problem, was dann auch nochmal dazu kommt.

Aber zunächst mal brauche ich auf jeden Fall Kernreaktoren, um mir Neutronen zu erzeugen, um dieses Material umzuwandeln.

Das heißt, ich muss diese hochradioaktiven Abfälle in speziellen Kernreaktoren

wiederum einsetzen.

Also ich bringe meine hochradioaktiven Stoffe nochmal in den Kernreaktor ein.

Mit allem damit verbunden, ein Problem auch erstmal für die Raktorsicherheit.

Auch diese Kernreaktoren dürfen dann keine Unfälle bauen, weil ich natürlich gerade auch besonders viele radioaktive Stoffe in diesen Kernreaktoren habe.

Und dann muss natürlich auch die Neutronenbilanz aufgehen.

Das heißt, ich erzeuge Neutronen aus der Kernspaltung.

Ich bringe jetzt aber nochmal zusätzliche Stoffe ein, die diese Neutronen einfangen sollen, um dadurch transmutiert zu werden.

Das heißt, ich muss auch da gucken, habe ich überhaupt genug Neutronen aus meiner Kernspaltung, um all das, was ich transmutieren will, auch transmutieren zu können.

Das klappt gut, wenn wir über diese schweren Elemente wie Plutonium, Ameritium, Curium, Neptunium, also die Akteniden reden, weil diese im Wesentlichen dadurch transmutiert werden, dass ich sie eben spalte.

Also die sind zu einem gewissen Anteil spaltbar und zerfallen in zwei Hälften, produzieren wir dann auch selbst wieder Neutronen.

Das heißt, mit der Gruppe ist das so einigermaßen denkbar.

Bei den langlebigen Spaltprodukten ist das nicht so.

Selbst wenn ich die chemisch abtrennen könnte und dann zu Targets verarbeite und in Reaktoren einsetze, fangen die einfach nur Neutronen ein und werden dann mehr oder minder schnell umgewandelt.

Das heißt, das wäre ein extrem langwieriger, extrem aufwendiger, extrem teurer Prozess.

Wie effizient der dann wäre, hängt eben davon ab.

Kann ich all diese Elemente wirklich abtrennen?

Kann ich sie überhaupt durch Neutroneneinfang vernünftig umwandeln?

Nicht alle von diesen langlebigen, gerade von den Spaltprodukten, fangen überhaupt Neutronen in Nennerdeumfang so ein, dass ich sie dann schnell wegkriege.

Und wie kann ich dieses ganze Konzept dann eben auch technisch realisieren und wie kann ich es auch bezahlen?

Das ist extrem aufwendig.

Da sind sehr viele technische Detailfragen ungeklärt.

Und ich würde da unendlich viele Fragezeichen hinten dran machen.

Das heißt, es probiert auch gerade niemand.

Also es baut auch gerade niemand einen Forschungsreaktor dazu.

Doch, es werden international auch zu diesem Bereich Forschungen durchgeführt.

Es fängt an, da sind wir wieder vorher bei den schnellen Brütern, also schnelle Brutreaktoren, die ursprünglich mal dazu gedacht waren, genau Plutonium zu produzieren als neuen Brennstoff für Kernreaktoren, werden heute auch diskutiert vor dem Hintergrund, genau das Gegenteil zu machen.

Also genau diese Aktenidengruppe, Plutonium, Ameritium, Curium, Neptunium, als Brennstoff einzusetzen und zu verbrennen, damit wir davon nicht beliebig viel mehr erzeugen über die nächsten Jahre und Jahrzehnte.

Aber auch für andere Anwendungen wird das diskutiert.

Die Idee dabei ist eben wirklich zu versuchen, die Mengen an hochradioaktiven Abfällen, wenn man sie auch nicht vollständig beseitigen kann, so weit zu reduzieren, dass ich nicht in wenigen Jahren oder Jahrzehnten nicht nur ein Atomarusendlager brauche, sondern vielleicht zwei, drei oder fünf.

Also große Länder wie Frankreich oder USA, die ja noch einen deutlich größeren Umfang als wir Kernenergie produzieren, haben natürlich auch entsprechend größere Mengen an radioaktiven Abfällen, sodass da relativ klar ist, da wird irgendwann ein Endlager einfach nicht mehr reichen.

Also in meiner Wahrnehmung klingt das mit der Transmutation realistischer, als den Krempel für 100.000 Jahre zu vergraben, ehrlich gesagt.

Aber das mag daran liegen, dass ich von der Physik keine Ahnung habe.

Also wie gesagt, es kommen da in der ganzen Kette sozusagen technische Detailfragen.

Das fängt an bei der Frage, kann ich denn überhaupt diese ganzen chemischen Elemente so selektiv voneinander trennen oder gehen nicht auch in so hoher Anteil schon als Verluststrom mit meinem Abfallstrom rein, dass ich am Ende zwar vielleicht 90 oder 95 Prozent transmutiere, aber 5 Prozent immer noch übrig bleiben oder 10 Prozent.

Dann habe ich zwar das Ganze um Faktor 10 vielleicht reduziert, das hilft mir aber natürlich auch noch nicht wirklich weiter, sondern ich muss ja wirklich dann auf den Faktor 100 oder 1000 oder sowas kommen, um wirklich signifikant was zu

erreichen.

Selbst wenn ich das geschafft habe, muss ich wie gesagt diese Reaktoren konzipieren und bauen.

Da kann ich nicht die heutigen Leistungsreaktoren für nehmen, weil ich eben ganz andere Elemente umsetzen und verbrennen muss.

Ich brauche eigene Brennstofffertigungsfabriken, die mit diesen hochradioaktiven Stoffen umgehen können.

Ich brauche eigene Reaktoren dafür.

Also das ist schon extrem schwierig und aufwendig.

Jetzt haben wir festgestellt, dass das mit der Kernenergie keine so gute Idee war.

Wir schalten die Dinger ab und dann bauen wir die zurück.

Richtig.

Hört sich ja leicht an.

Man bekommt eine große Eisenkugel und reißt das Ding.

Das geht ja auch nicht, oder?

Nein, ganz so einfach geht es nicht.

Das strahlt ja.

Weil natürlich auch im Kernkraftwerk neben den Brennelementen, in denen natürlich der Großteil der Radioaktivität eingebunden ist, auch andere radioaktive Materialien entstanden sind.

Also wir haben die Neutronen, die im Reaktorkern entstehen.

Nicht alle werden aber im Reaktorkern eingefangen, sondern viele verlassen eben auch den Reaktorkern, aktivieren das Kühlmittel, aktivieren den Reaktordruckbehälter, der den Reaktorkern einschließt, aktivieren sonstige Materialien, das Beton, das dann den Reaktordruckbehälter umgibt.

Das heißt, ich erzeuge Radioaktivität im Reaktor.

Ich setze auch geringe Mengen an Radioaktivität aus den Brennelementen ins Kühlmittel frei, die dann durch die Kühlkreisläufe transportiert werden, sich dort ablagern.

Das heißt, ich habe im Kernkraftwerk durchaus auch noch radioaktive Materialien, die ich so nicht unkontrolliert jetzt beseitigen kann, also einfach nur mit der Abrissbirne hinkommen, sondern ich muss schon erstmal diese radioaktiven Materialien entfernen, bevor ich dann einen konventionellen Rückbau machen kann.

Wo tue ich die dann hin?

In die Asse?

In die Asse tun wir heute nichts mehr rein.

Da wollen wir ja eher alles, was da schon drin ist, wieder rausholen.

Wir laden da heute nichts mehr rein.

Ich habe jetzt keine Aussage in die Zukunft gemacht, auch wenn ich mir da sehr sicher wäre.

Nein, also wir werden, auch da muss man jetzt wieder unterscheiden.

Es wird, also die am höchsten radioaktiven Materialien, die wir haben, das sind die abgebrannten Brennelemente und diese Kokillen aus der Wiederaufarbeitung.

Da ist das Groß der Radioaktivität drin.

Das sind auch die wirklich stark strahlenden Materialien.

Die müssen auf jeden Fall in ein Endlager für hochradioaktive Abfälle.

Wenn wir uns jetzt das Kernkraftwerk angucken, wie gesagt, das ist der Großteil dessen, was wir haben.

Da sind aber auch stark aktivierte Materialien im Kernkraftwerk, also gerade aus dem kernnahen Bereich, Reaktordruckbehälter, anderes.

Das ist auch sehr hochradioaktiv.

Davon werden möglicherweise ein geringer Anteil dann auch in so ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gehen müssen.

Viele andere Abfälle, die da aufgetreten sind, werden deutlich weniger aktiviert sein, auch bei weitem nicht so langlebig sein.

Das heißt, da werden auch sehr große Mengen anfallen, die als sogenannte schwach- und mittelradioaktive Abfälle bezeichnet werden.

Die sollen nach heutigem Stand in ein anderes Endlager, nämlich das Endlager Konrad, gebracht werden und dort entgelagert werden.

Wo ist das?

Das ist auch in Niedersachsen.

Das ist ein altes Eisenerzbergwerk und dort sollen eben diese sehr großen Mengen dafür eher schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden.

Das heißt, was man beim Rückbau des Kernkraftwerks machen wird, machen muss, ist sozusagen eine Trennung der radioaktiv kontaminierten Materialien in Höhe aktivierte, in Schwäche aktivierte und in solche, die eben tatsächlich praktisch nicht mehr radioaktiv kontaminiert sind und die freigegeben werden können und direkt entsorgt werden.

Also nicht entgelagert werden müssen.

Also ich überlege gerade, wenn Sie genau wie ich zu Tschernobyl in der Pubertät waren, hat das dazu geführt, dass Sie Physiker geworden sind und dann zum Öko-Institut gegangen sind?

Also Tschernobyl hat nicht dazu geführt, dass ich Physiker geworden bin.

Das habe ich tatsächlich aus Interesse an der Physik gemacht.

Ich habe dann allerdings im Physikstudium mich hier in der TU Darmstadt in eine Arbeitsgruppe engagiert, die sich mit Rüstungskontrolle und Abrüstungsfragen von Kernwaffen beschäftigt hat und habe mich da angefangen mit der Problematik zu beschäftigen, was passiert eigentlich aus dem spaltbaren Material, das aus der Abrüstung von Kernwaffen freigesetzt wird.

Das war Anfang, Mitte der 90er Jahre eine sehr intensive Diskussion, gerade das Plutonium, das man produziert hatte für Kernwaffen, wird jetzt heute in großem Umfang wieder als nicht mehr länger benötigt für den militärischen Bereich deklariert und wird zurzeit in den Kernwaffenstaaten USA und Russland gelagert.

Da reden wir über, je Land haben über 30 Tonnen als Überschuss über ihre Bestände deklariert.

Das wird einfach gelagert und keiner weiß, was man irgendwann mal damit tun

soll.

Was könnte man denn damit tun?

Strom erzeugen?

Da sind zwei wesentliche Pfade diskutiert worden.

Der eine ist eben genau der, man nimmt das Plutonium, verarbeitet das zu Uran, Plutonium Mischoxid, Reaktorbrennstoff, setzt es in Reaktoren ein, produziert Strom.

Haben wir am Anfang darüber geredet, ist nicht ganz so einfach, weil das Plutonium sehr radioaktiv ist, sehr hochtoxisch ist.

Das heißt, das zu Brennstoff zu verarbeiten, ist sehr aufwendig und sehr teuer, ist ökonomisch nicht attraktiv.

Keiner der Betreiber sagt, ja, will ich haben, sondern zahlt mir was dafür, wenn ich das einsetzen muss.

Das liegt echt rum jetzt, wird jetzt gelagert in den USA und in Russland.

Und es gibt seit den 90er Jahren eine Diskussion darüber, machen wir das?

Es ist in den USA irgendwann mal entschieden worden, dass eine solche Fabrik zur Herstellung von Mischoxid-Brennstoff gebaut werden soll, um das Plutonium umzuwandeln und dann in Reaktoren einzusetzen.

Ist auch angefangen worden, die zu bauen, weil die aber sehr, sehr viel Geld kostet und auch der Bau nicht ordentlich vorangeschritten ist.

Steht das Projekt im Moment still und seit Anfang der 90er Jahre hat sich nichts getan.

Das Material wird einfach gelagert.

In Russland hat man sich entschieden, das Plutonium eben zur Energieerzeugung einzusetzen und in diesen sogenannten schnellen Brutreaktoren einzusetzen, von denen jetzt ein Reaktor in Russland gerade in der Betriebnahme ist.

In dem soll später mal auch dieses Plutonium aus der Abrüstung von Kadorf eingesetzt werden, um damit Energie zu produzieren.

Die Alternative, die man diskutiert hatte damals, war, das Plutonium eben in eine direkte Entlagerung zuzuführen.

Also es als hochradioaktiven Abfall einzustufen und es dann so in eine feste Matrix einzubinden, also so einzubinden, dass man es dann später mal in ein Endlager bringen kann.

Das nennt man dann Immobilisierung, dass Plutonium im Immobilien gemacht wird und nicht mehr so einfach freisetzbar ist.

Strahlen tut es trotzdem noch, aber es ist einfach nicht mehr leicht freisetzbar.

Es wird ja im Moment wirklich gelagert als entweder Plutoniummetall oder Plutoniumdioxid und könnte dann auch relativ leicht freigesetzt werden.

Wie lagern die das?

In Bleikisten?

In kleinen Mengen gut abgeschirmt.

Die Alternative zum Einsatz in Raktor wäre, das Plutonium in eine Form zu überführen, in der es eingebettet ist, zum Beispiel synthetische Keramik, wo es einfach in feste Keramik sicher eingebunden ist, die dann eben auch zu

verglasen, wie die hochradioaktiven Abfälle, und dann eben später in den Endlager zu bringen und direkt entzulagern.

Sie machen so einen positiven Eindruck, wenn man so etwas hört.

Man wacht doch schreiend auf nachts und fragt sich, haben wir noch alle Tassen im Schrank?

Also wir Menschheit.

Ist das eine Frage, die Sie sich stellen?

Oder denken Sie, das steht mir nicht zu?

Wenn man gerade über die Frage der Kernwaffen nachdenkt, dann stellt man sich die Frage natürlich schon immer wieder, warum baue ich weltweit 30.000 Kernwaffen, wenn ich mit 100 Kernwaffen das menschliche Leben auf der Erde de facto eigentlich auslöschen könnte, wenn ich sie geschickt genug einsetze.

Also das sind Fragen, wo man dann sehr lange mit Politikwissenschaftlern darüber diskutieren kann, was das Konzept der nuklearen Abschreckung bedeutet und warum es Sinn macht oder nicht Sinn macht und welche Relevanz dann große Stückzahlen an Kernwaffen haben.

Das Problematische daran ist, dass man irgendwie das Gefühl hat, dass es funktioniert hat mit dieser Abschreckung.

Es sieht halt so aus.

Dass es 50 Jahre nicht schiefgegangen ist, würde ich eben nicht so interpretieren, dass es funktioniert hat.

Das ist ja genau das Problem.

Natürlich kann man sich auch mit einem nicht so guten Konzept sicherlich mal über das eine oder andere Jahr oder Jahrzehnt retten, aber das ist ähnlich wie mit den schweren Unfällen in der Kernenergie.

Sie passieren nicht oft, aber wenn sie passieren, sind sie schlimm und wenn Abschreckung irgendwann heute mal versagen würde, wir dürfen ja nicht vergessen, wir haben nach wie vor einige Kernwaffenstaaten auf der Welt, zwei davon mit Indien und Pakistan, die sich auch durchaus aggressiv gegenüberstehen, immer mal wieder militärische Konflikte austragen.

Es ist nach wie vor eine sehr, sehr große Zahl an Kernwaffen in der Welt, auch on hair trigger alert, also jederzeit bereit abgeschossen zu werden.

Wenn bei dem Konzept irgendwann mal was schief geht, sei es unfallbedingt, weil jemand einen Fehler macht, weil jemand durchdreht oder weil sich eben tatsächlich militärische Eskalationen irgendwann mal dahin bringen, dass irgendjemand beschließt, es sei doch gut, sie einzusetzen, dann ist das Konzept schief gegangen und dann werden wir das alle bereuen.

Blicken wir positiv in die Zukunft, wie sieht die Zukunft aus?

Wie sieht die Zukunft der Kernenergie oder der Energieerzeugung aus?

Was wäre dann jetzt daran positiv?

Der Blick in die Zukunft ist per se positiv, Herr Bissner.

Also ich persönlich glaube ja, dass die Kernenergie keine Zukunft hat, sondern ein Auslaufmodell darstellt.

Ich denke, dass sie angesichts der wirtschaftlichen Probleme der Kernenergie, der Sicherheitsprobleme der Kernenergie, sowohl was einfach die Reaktorsicherheit, Unfallgefahren, als auch was die zivil-militärischen Komponente betrifft, dass Kernenergie wahrscheinlich ein Auslaufmodell ist.

Das wird nicht von heute auf morgen passieren.

Es wird natürlich Staaten geben, die noch über längere Zeit auf Kernenergie setzen werden.

Es wird andere Staaten geben, die mehr oder minder schnell aus der Kernenergie aussteigen werden.

Entscheidend wird dabei natürlich sein, wie steht es um die Alternativen.

Also wie schnell gelingt es uns, Alternativen für eine umweltfreundliche, saubere Energieversorgung aufzubauen, die auch aufzubauen, so dass sie ökonomisch konkurrenzfähig sind.

Wie schnell gelingt es uns, die dann weltweit in den Markt zu bringen.

Wenn wir es nicht ökologisch sauber machen wollen würden, wären wir in der Lage, unsere Kernkraftwerke durch fossile Brennstoffe, durch fossile... Aktuell wäre das kein Problem.

Das haben wir im Prinzip in Japan gesehen.

Ich meine, Japan hat zum Zeitpunkt des Fukushima-Unfalls 56 Kernkraftwerke laufen gehabt und etwa 30 Prozent seiner Stromerzeugung über Kernenergie gedeckt gehabt.

Hat dann im Prinzip von heute auf morgen alle Kernkraftwerke, also innerhalb kurzer Zeit, innerhalb eines halben Jahres, alle Kernkraftwerke abgeschaltet.

Hat in der Folge nur zwei Kernkraftwerke mal kurzzeitig wieder in Betrieb genommen im Jahr 2012.

Und bis letztes Jahr ist es ohne Kernkraftwerke ausgekommen.

Also hat das geschafft, von heute auf morgen sozusagen konventionelle Kapazitäten hochzufahren.

Wir haben natürlich auch massive Maßnahmen unternommen, um Strom einzusparen, um Energie einzusparen, was dann natürlich auch notwendig war.

Also im Grunde ist das sicherlich möglich.

Es ist aber natürlich dann eine langfristige Frage, wie nachhaltig ist das auf Dauer.

Wir wissen alle, welche Probleme mit Verbrennung von fossilen Materialien dann natürlich einhergehen würden.

Also langfristig wäre das natürlich keine Alternative.

Sind wir eigentlich schon an einem Punkt angelangt, wo wir mit alternativer Energieerzeugung, also Wind, Wasser, Sonne, uns versorgen könnten, wenn wir das wollten?

Ich denke im Grunde ja.

Die großen Probleme liegen natürlich in der Speicherung und Verteilung der Energie.

Also grundsätzlich haben wir natürlich verschiedene Energiequellen, verschiedene regenerative Energiequellen, die eigentlich genug Potenzial haben, dass wir uns mit Energie versorgen könnten.

Die technischen Schwierigkeiten, also neben den ökonomischen Schwierigkeiten, sind wir heute schon konkurrenzfähig mit fossilen Energien, liegen natürlich die technischen Schwierigkeiten heute wirklich hauptsächlich noch in der Frage, wie Sorge ich dafür, dass die Energie sozusagen dann auch verfügbar ist, wenn ich

sie brauche?

Wie speichere ich Energie, die eben möglicherweise zu Zeitpunkten erzeugt wird, wo ich sie nicht unmittelbar brauche?

Und wie verteile ich die Energie dahin, wo ich sie tatsächlich brauche?

Das ist für den Privathaushalt wahrscheinlich einfach zu beantworten, für die Industrie ist das ein Problem.

Genau, also sozusagen individuelle Lösungen wären da heute sicherlich schon relativ einfach möglich.

Gesellschaftliche Lösungen sind dann natürlich ein bisschen komplexer, aber da sind wir auf einem guten Weg.

Wir haben über die Frage der Erakter-Sicherheit geredet, als eines der Probleme der Kernenergie.

Wir haben über die Frage der Endlagerung geredet, als ein zweites Problem der Kernenergie und ein drittes Problem, was oft nicht so wahrgenommen wird oder nicht so offensichtlich ist.

Es ist eben das Problem der Verquickung zwischen Kernenergie und Kernwaffen und der Frage, welche Bedeutung auch zivile Kernenergieprogramme für die internationale Sicherheit haben können.

Da gibt es ja nun Beispiele, wenn wir einfach in den Iran schauen.

Der Iran ist Mitglied des Atomwaffensperrvertrags.

Das heißt, er hat unterschrieben, dass er nicht anstrebt, Kernwaffen zu bauen und hat unterschrieben und dafür im Gegensatz sozusagen zugesichert bekommen, dass er zivile Kerntechnik entwickeln und einsetzen darf.

Das ist sozusagen der Deal im Atomwaffensperrvertrag.

Ich verzichte auf Kernwaffen, ich bekomme zivile Kerntechnik.

Aber es ist ja eine Dual-Use-Technik letztlich.

Der Iran hat sozusagen seine zivile Kerntechnik so aufgebaut, dass er das volle Programm fahren will.

Das heißt, er hat Forschungsreaktoren, die er braucht für Forschung und Entwicklung, für die medizinische Isotopenproduktion.

Er hat Leistungsreaktoren, mit denen er Energie produzieren will.

Er hat Anreicherungsanlagen, mit denen er Brennstoff anreichern können will, um ihn in Leistungsreaktoren einsetzen zu können.

Er hat experimentelle Wiederaufarbeitung, um sozusagen auch einen geschlossenen Brennstoffkreislauf irgendwann mal anstreben zu können.

Also alles das, was sozusagen zur zivilen Kerntechnik dazu gehört.

Aber natürlich sind das auch genau die Technologien, durch die man Zugriff auf Kernwaffenmaterialien bekommt.

Kernwaffen baut man aus typischerweise zwei Materialien, entweder aus hoch angereichertem Uran oder aus Plutonium.

Das heißt, wenn ich Anreicherungsanlagen habe, mit denen ich Uran anreichern kann, tue ich das für die zivilen Anwendungen typischerweise auf drei bis fünf Prozent anreichern, für manche Forschungsreaktoren vielleicht auf 20 Prozent anreichern.

Könnte es aber eben auch auf 90 Prozent anreichern, dann kann ich es für Kernwaffen nutzen.

Muss nur meine Zentrifuge lang genug laufen lassen.

Muss dann nur meine Zentrifuge lang genug laufen lassen.

Wenn ich Wiederaufarbeitungstechnologien habe, wie wir es zum Beispiel in der Nordkorea gesehen haben, als Weg, den Nordkorea gewählt hat, dann kann ich meine abgebrannten Brennelemente aus meinen Reaktoren wieder aufarbeiten und kann dabei Plutonium gewinnen.

Das ich auch als Spaltmaterial in Kernwaffen verwenden kann.

Da kann man dann jetzt länger darüber diskutieren, ob in typischen Leistungskernreaktoren, wie wir sie jetzt hier in Deutschland eingesetzt haben, das Plutonium, das dort erzeugt wird, ist sicherlich nicht besonders gut geeignet für Kernwaffen.

Da würde man eher Plutonium verwenden aus Brennstoffen, die nur sehr kurz im Reaktor eingesetzt worden sind.

Aber es ist technisch möglich, damit Kernwaffen zu bauen.

Das heißt, über diese Pfade Reaktoren, Plutoniumproduktion, Anreicherung eröffnet man sich auch die Möglichkeit, auch gleichzeitig den Weg hin zu Kernwaffen.

Und deswegen gab es natürlich einfach über die letzten Jahrzehnte auch intensive Diskussionen über das iranische, als zivil deklarierte nukleare Programm, weil eben viele Staaten die Befürchtung hatten, naja, das ist eben nicht so zivil, sondern es wird auch genutzt, um sich damit die Optionen, Zugang zu Kernwaffen zu eröffnen.

Aber das wird es doch eigentlich immer.

Es sei denn, ich habe nur einen Leistungsreaktor da stehen und kaufe mein angereichertes Uran von außerhalb, um es da zu verbrennen.

Das ist genau das Problem, wenn Sie die Technologien beherrschen und können, wenn Sie die Menschen haben, die damit umgehen können, wenn Sie das Know-how haben, wenn Sie den Zugriff auf die Materialien und so weiter und so fort haben, dann haben Sie sozusagen immer auch das Potenzial, wenn Sie sich politisch dafür entscheiden, diese Technologien einzusetzen, um Kernwaffen zu produzieren.

Das heißt, es ist dann im Wesentlichen eine politische Frage, will ich das tun oder will ich das nicht tun?

Es kommt dann die Frage der Sanktionierungen rein, wenn Sie sich dafür entscheiden, das zu tun.

Und da werden natürlich andere Staaten versuchen, Sie daran zu hindern.

Je früher man das bemerkt, dass Sie das tun wollen, umso schneller wird man Druck ausüben, umso höher wird der Druck vielleicht auch dann sein können.

Es ist die Frage, nehmen Sie das in Kauf oder nehmen Sie es nicht in Kauf.

Aber wenn Sie die Technologien haben, sind Sie auf jeden Fall eben einfach schon mal einen deutlichen, großen Schritt näher an der Möglichkeit, Kernwaffen zu produzieren, wenn Sie sich irgendwann politisch dafür entscheiden.

Insofern ist da immer ein Zusammenhang zwischen der Frage, beherrsche ich bestimmte als zivil deklarierte Technologien, habe ich solche Anlagen vielleicht bei mir im Land, habe ich Personen im Land, ausgebildetes Personal und so weiter und so fort und welche Möglichkeiten habe ich, auch Zugriff auf Kernwaffen zu bekommen, wenn ich das will?

Am Ende heißt das doch eigentlich, es gibt überhaupt keine rein zivile Nutzung von Kernenergie.

Nur punktuell, in einem Leistungsreaktor umstromt, also die eigentliche Stromerzeugung ist die zivile Nutzung, aber die militärische Komponente ist da nie rauszurechnen.

Am Ende heißt es, Sie können es nie hundertprozentig trennen, sondern Sie können nur versuchen durch Kontrollen zu überprüfen, ist das, was passiert, entspricht es tatsächlich dem, wofür es deklariert ist oder gibt es Anzeichen dafür, dass da auch noch mehr gemacht wird.

Je nachdem, was Sie tatsächlich dastehen haben, wenn Sie nur einen reinen Leistungsreaktor dastehen haben, dann ist der Schritt immer noch relativ groß.

Wenn Sie jetzt schon eine Anreicherungsanlage dastehen haben, ist der Schritt schon deutlich kleiner.

Wenn Sie eine Wiederaufarbeitung haben, ist der Schritt auch schon deutlich kleiner.

Umso schwerer wird es dann eben, Sie herzustellen, dass nicht jemand diese Technologien jetzt einfach verwendet, um Zugang zu Kernwaffen zu bekommen.

Das ist eine Kontrollfrage, das ist eine Vertrauensfrage, aber das ist keine, wo Sie technisch sagen können, ist komplett harmlos.

Insofern ist das auch ein Themenfeld, was... Da habe ich tatsächlich noch nie drüber nachgedacht.

Ja, es ist etwas, was wir natürlich, sag ich mal, in Deutschland, also mein Selbstverständnis als deutscher Bundesbürger ist, dass wir nicht anstreben, Kernwaffen zu bekommen.

Und dass dieses Thema deswegen zumindest heute in der Bundesrepublik eigentlich keine ausgeprägte Rolle spielt.

Das war in den 50er, 60er Jahren natürlich auch noch anders.

Da gab es ja durchaus Diskussionen über einen Atomwaffen-Sperrvertrag der Bundeswehr.

Da war dann durchaus auch die Diskussion deutlich intensiver.

Das war natürlich auch ein Grund für den Atomwaffensperrvertrag, dass man gucken wollte, kann man sicherstellen, dass Deutschland nicht versucht, irgendwann Zugang zu Kernwaffen zu bekommen.

Auch wenn wir das heute sozusagen als selbstverständlich annehmen, dass Deutschland es heute nicht will, war das mal ein Thema in der Vergangenheit.

War auch in anderen Ländern wie in der Schweiz, in Schweden, in ganz vielen anderen Ländern gab es mal Programme, dass man sich überlegt hat, wollen wir Kernwaffen entwickeln, was brauchen wir dafür, haben wir die Technologien, bauen wir uns da Expertise auf.

Also dieser Zusammenhang war in der Vergangenheit immer mal da.

Der ist mal weniger präsent, mal mehr präsent.

In Deutschland ist er für uns hier natürlich nicht so präsent, aber so wie wir eben über die deutschen Grenzen hinaus schauen, in den Iran schauen, nach Nordkorea schauen, in andere Länder schauen, ist der Zusammenhang natürlich schon wesentlich präsenter.

Wenn wir nach Israel oder die Vereinigten Arabischen Emirate schauen, Israel zählt zu den de facto Kernwaffenstaaten.

Andere Länder um Israel herum finden das natürlich nicht so schön.

Hätten darum auch gerne welche?

Insofern steht da immer auch die Frage im Raum, wie können wir sicherstellen, dass wenn ein Land tatsächlich für zivile Zwecke Kernenergie einsetzen will, wie stellen wir sicher, dass es das eben auch nur für zivile Zwecke tut?

Und das ist immer eine sehr aufwendige und schwierige Frage.

Was ein weiteres Argument dafür ist, die Dinge einfach weltweit abzuschalten.

Was ein weiteres Argument dafür ist, warum es auch so schwierig vorzustellen ist, dass wir sozusagen einen weltweit massiven Boom, eine massive Expansion der Kernenergie bekommen würden.

Denn das würde ja wirklich auch bedeuten, dass wesentlich mehr Reaktoren in wesentlich mehr Ländern als heute gebaut werden müssten, was gerade auch diese Probleme natürlich noch mal deutlich verschärfen könnte.

Christoph Bissner, vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.