




Article

A First Step towards Zero Nuclear Waste—Advanced Strategic Thinking in Light of iMAGINE

Bruno Merk ^{1,*}, Anna Detkina ¹, Dzianis Litskevich ¹, Maulik Patel ¹, Omid Noori-kalkhoran ¹, Gregory Cartland-Glover ², Olga Efremova ³, Mark Bankhead ⁴ and Claude Degueldre ⁵

¹ School of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, UK

² STFC Daresbury Laboratory, Daresbury WA4 4AD, UK

³ Independent Researcher, Runcorn WA7 1QA, UK

⁴ National Nuclear Laboratory, Chadwick House, Warrington WA3 6AE, UK

⁵ School of Engineering, Lancaster University, Lancaster LA1 4YW, UK

* Correspondence: b.merk@liverpool.ac.uk

Abstract: Traditionally, there has been a gap between reactor operation and the consideration of nuclear waste in the final disposal. Fuel is produced, and fuel must be disposed. In the view of the reactor operator, fuel has to be cleaned in the reprocessing, and new solid fuel has to be produced in the view of the chemist. iMAGINE is designed to overcome this separation through a breakthrough development applying an optimized, integrative approach from cradle to grave of nuclear energy production as a first step to come as close as possible to the vision of zero waste nuclear power. It is described here for the first time in three steps: reactor, fuel cycle, and waste, providing the rationality behind each of the choices made to come to the overall solution to open the discussion and thinking process on what could be achieved by a very innovative approach to integrated nuclear energy production. The opportunities regarding the handling of the remaining waste are discussed with a view on the expectation of the final disposal community, the study “Nuclear waste from small modular reactors”, and the IAEA report “waste from innovative types of reactors and fuel cycles—a preliminary study”. The aim of this work is not to find answers to each of the raised points, but to identify potential approaches and promising ways to go, as well as to stimulate a discussion among experts. In the best case, this could lead to a change of track for nuclear power to become even more sustainable and an important, trusted technology to help solve the net-zero challenge.

Keywords: nuclear; nuclear energy; nuclear waste; final disposal; nuclear reactors; reactor physics; molten salt reactors; nuclear chemistry; fission products; salt clean-up



Citation: Merk, B.; Detkina, A.; Litskevich, D.; Patel, M.; Noori-kalkhoran, O.; Cartland-Glover, G.; Efremova, O.; Bankhead, M.; Degueldre, C. A First Step towards Zero Nuclear Waste—Advanced Strategic Thinking in Light of iMAGINE. *Energies* **2022**, *15*, 7209. <https://doi.org/10.3390/en15197209>

Academic Editor: Alessandro Del Nevo

Received: 5 September 2022

Accepted: 26 September 2022

Published: 30 September 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Traditionally, there has been a gap between reactor operation and the consideration of nuclear waste in the final disposal. Fuel is produced, and fuel must be disposed of. There has been only two options for the fuel cycle, the open fuel cycle with direct disposal versus the partially closed fuel cycle with reprocessing and disposal of vitrified waste. The key driver has been at this point the reactor operation scheme and the planned approaches for closing the fuel cycle through the reuse of Pu in fast reactors [1] without considering the effects on the final disposal.

The discipline of nuclear waste management tried for some time to bridge the gap between reactor operation and final disposal with more or less success; at least, it led to a discussion between the disciplines and partly joint studies of P&T technologies, e.g., Eurotrans [2] and Europart [3] as P&T projects, and their impact on the final disposal of the leftovers, e.g., RED-Impact [4]. However, often, the views significantly diverge between the P&T community, mainly driven by the approach to reduce the radiotoxicity [5] of the spent fuel, and the final disposal community, observing the potential dose released over the very long term from a final disposal facility. Unfortunately, both concepts lead to

very different optimization objectives. The P&T community is concentrating on ways to deal with reducing the transuranium content in the waste stream, while the final disposal community is observing the migration of highly soluble long-lived fission products to the environment to understand the paths leading to potential dose exposure to humans in the far future. Even joint studies such as the German P&T study moderated by an independent body, acatech, the National Academy of Science and Engineering of Germany [6], facilitated intensive discussions, but was not successful in overcoming this gap.

Meanwhile, other countries decided against closed fuel cycle strategies and the related required reprocessing of spent nuclear fuel, due to different drivers, e.g., the U.S., Canada, Sweden, and Finland, with the latter currently at the forefront of the licensing and construction of a deep geological repository [7]. The reasons for these different national approaches are in part driven by our understanding and capability with respect to the underpinning technologies. Reprocessing, fast reactors, and geological disposal are technologically demanding, with respective performance characteristics. They are characterized through large uncertainties, making objective decisions on the system very difficult. As a result, decisions on the fuel cycle have tended to move into political discussion, either within the scientific bodies or at a governmental level.

However, when thinking about new, advanced reactor technologies, there is a fresh tendency, at least formulated in the UK and discussed in the academic community and authorities [8]: the aim is not only to design a reactor, but also to consider how the fuel can be produced, as well as how it can be disposed of. We could see this as a first, important step, if we think about potential breakthrough technologies or game changers such as iMAGINE [9,10]; the view has to go much further. This led to iMAGINE—a breakthrough nuclear technology to operate on spent nuclear fuel without reprocessing.

The question must be, as for other technologies: Can we find reasonable ways for the reuse of the by-products (deliberately not calling them spent fuel or separated fission products' waste), instead of declaring them as waste? Even if comprehensive solutions are not available yet, it is at least worth thinking about and researching it. Can a breakthrough technology reduce the final disposal challenge and, if yes, to what extent? What could be done already in the reactor and the fuel cycle to minimise the effort for dealing with the waste later? Can we achieve these goals only for the future by applying new technologies, or will it be possible to treat legacy wastes? If this is possible, to what extent will it be limited to spent fuel only, or will it also encompass already vitrified remainders of reprocessing?

These points will be discussed with a view on the expectation of the final disposal community [11], the study 'Nuclear waste from small modular reactors' [12], and the freshly published IAEA publication "Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles—A Preliminary Study" [13]. The aim of this publication is not to find an answer to each of the points raised, but to identify potential approaches and promising ways to go. The core point is to stimulate a discussion that could lead in the best case to a change of track for nuclear energy to become an even more sustainable and important, trusted technology to help solve the net-zero challenge.

The manuscript is structured in the following way. The theoretical background is given as a description of how iMAGINE was developed, starting with the choice of the technology option, followed by the description of the optimization of the reactor technology and the integrated fuel cycle. The next step is the description of the waste produced and final disposal opportunities in the proposed system, followed by the potential clean-up approaches for managing undesirable fission products. All information available at this point is used to discuss opportunities for improved waste management to come as close as possible to the vision of zero nuclear waste.

2. The Way to iMAGINE

The way of the development of iMAGINE can be described through a thinking process from the inside—the reactor technology—to the outside—the complete nuclear system from cradle to grave—as shown in Figure 1, with some of the major decision criteria given

in each of the steps. The different steps in the decision criteria and the thinking process are described in the following paragraphs of this section in more detail.

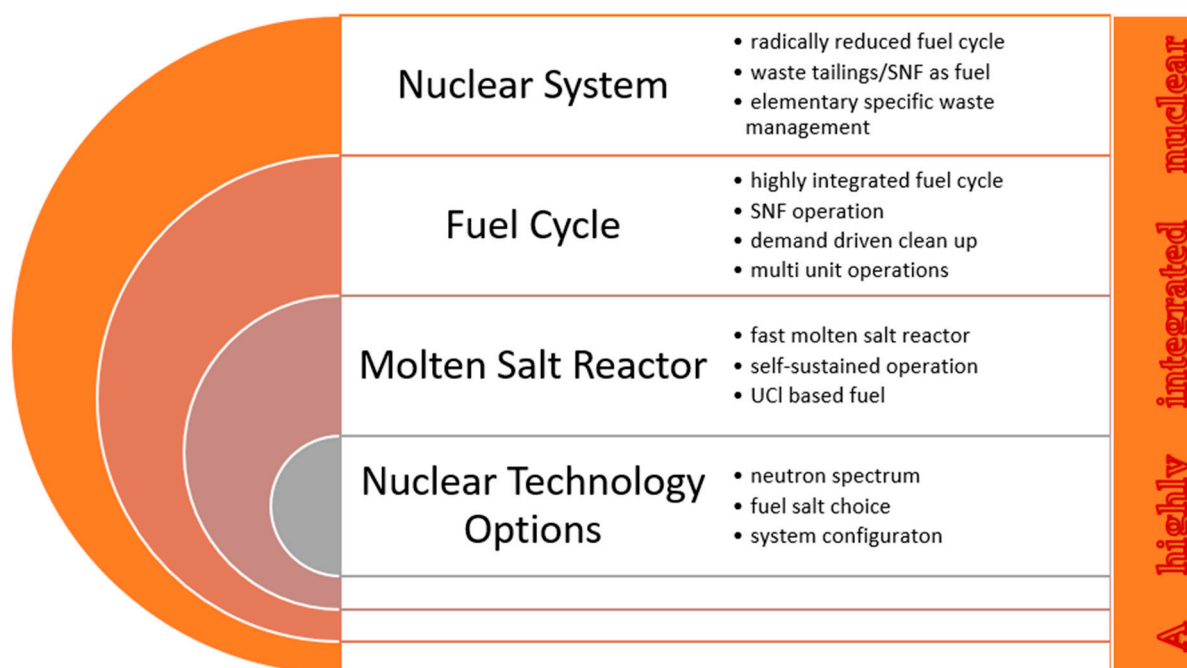


Figure 1. The different levels of decision-making and optimization applied through the development of iMAGINE as a highly integrated nuclear system.

2.1. Optimizing the Reactor Technology

The whole concept of iMAGINE is based on molten salt reactor technology operating on spent nuclear fuel without prior reprocessing and demand-driven salt clean-up. The system optimization for iMAGINE starts by the selection of especially attractive nuclear process technology options given in the scheme of potential molten salt reactor configurations, as presented, e.g., in [14], to make the best possible use of the advantages of a reactor based on liquid fuel, bypassing the challenges and cost of solid fuel production related to conventional closed fuel cycle systems such as sodium-cooled fast reactors [15].

The driver for the choice of a molten salt reactor was based on the demand for self-sustained long-term operation so as to achieve sufficient breeding such that no fissile material needs to be supplied after the start-up phase [1]. The main requirement here is to identify a salt composition with a reasonable melting point and a very high loading of fertile material to ensure the required breeding efficiency [16]. Here, the uranium–plutonium (U–Pu) cycle with a shorter breeding cycle defined through the decay of the interim product Np-239 of ~2.3 days seems to be a practically better option than the thorium–uranium (Th–U) cycle with longer breeding cycle of ~27 days defined through the half-life of Pa-233. In addition, there is higher experience with handling the chlorides of U (e.g., through the usage of uranium chloride salts for pyro-reprocessing) compared to Th, not to forget that there is a significant amount of uranium already available in the form of spent fuel and tailings from LWR operation. These points are making uranium chloride a better option for molten salt reactors. A further advantage of the U/Pu cycle is the significantly higher number of access neutrons in the U/Pu system compared to the Th/U system, which will ease the reactor design by allowing a higher leakage of neutrons and providing a better breeding efficiency. The challenge with the U/Pu system is the requirement for a fast reactor configuration with a significantly higher fuel amount to achieve criticality compared to a Th/U-based system, which would operate in a thermal spectrum.

The following are the opportunities of molten salt reactor technology based on liquid fuel U/Pu salts, compared to currently operating LWRs:

- Online feeding to avoid excess reactivity, which is required to operate an LWR core through one cycle.
- Operating on already used fuel instead of fresh fuel required for the operation of an LWR. In a molten salt reactor, fresh and used fuel will mix in the reactor due to the liquid state of the fuel.
- Internal closed fuel cycle operation through self-sustained breeding instead of a pure converter system like an LWR, which requires fresh, enriched fuel for every cycle and a complex fuel cycle, typically based on aqueous reprocessing to reuse Pu once in MOX fuel, which is then sent to final disposal.
- Temperature level control and resilient operation due to strong feedback effects, instead of burnup compensation based on boric acid in an LWR.
- Online salt clean-up for a closed fuel cycle without waiting times in contrast to cycling times of several years until Pu in the form of MOX fuel can be cycled once back into an LWR.
- Avoiding the costly fuel production of solid reactor systems for closed fuel cycle operation, which is reflected in the high cost of MOX fuel for LWRs and the even higher cost for fuel production in potential fast reactors [15].

2.2. Highly Integrated Fuel Cycle Incorporated in a Reactor System

The reactor designed for self-sustained operation will require a salt clean-up system or reprocessing of the salt. The approach here is to perform salt clean-up or “reverse reprocessing”, i.e., to separate elements that prevent the reactor from long-term operation (fission products) instead of separating the elements that are required for reactor operation (fissile material) [17]. This approach will significantly reduce proliferation risk, since there will be no separated fissile material stream, while allowing for completely new optimization of a molten salt system based on liquid fuel. In contrast to the classical solid fuel, this clean-up approach of liquid fuel will allow reactor operation in online mode without cooling times and transporting of the fuel from the reactor to the reprocessing facility. Finally, through the separation of fission products from the “*fuel-stream*” instead of fissile material from the “*waste-stream*”, potential losses will just stay in the reactor, reducing the demand for the separation rate, which will be extensive when trying to avoid the carryover of fissile material of TRU elements into the final disposal.

The following are the opportunities of molten salt reactor technologies linked to the fuel cycle to harvest additional gains of the technology in simplifying the fuel cycle while harvesting additional gains from the “*fuel-stream*”, compared to the currently established nuclear system based on an LWR and aqueous reprocessing.

- Operating on spent fuel without prior reprocessing, instead of the demand for clean fuel, aqueous reprocessing, and incomplete Pu burning in MOX fuel.
- Tailored salt clean-up to remove fission products that prevent long-term reactor operation, instead of the separation of fissile material, creating proliferation issues.
- Avoid the costly solid fuel production and potential multiple recycling, compared to the requirement for fresh, enriched fuel for each cycle in an LWR.
- Avoid mining and enrichment for new LWR fuel through internal closed fuel cycle operation.
- Deliver breeding of fissile material from U-238, to use available resources currently seen as waste—spent nuclear fuel, as well as tailings; reuse of the remainder of the LWR technology for energy production instead of mining for new, raw materials.

Avoid interim storage of SNF in cooling ponds required in solid-fuel-based technologies, thus reducing demand and costs.

The use of an integrated reactor in self-sustained breeding mode allows an extremely high efficiency in fuel use, creating a massive amount of newly available resources for future generations, while it is based on already mined materials, reducing the production of waste; see the data in Table 1. In iMAGINE, only ~100 kg of fuel, e.g., uranium from SNF, is required for producing 1 TWh of electricity, based on 42.5 kg/TWh thermal [18,19] and a thermal efficiency of 42.5% (reasonable for a temperature level achievable in the MSFR). In

contrast, a classical light water reactor requires ~2500 kg of fresh fuel in the fuel assemblies, based on an average burnup of 50 GWd/tHM for the fuel assembly and a thermal efficiency of 33% (saturated steam process). The LWR fuel must be produced through enrichment of 20 to 25 tons of natural uranium, depending on the enrichment process applied [20] to achieve the target burnup of 50 GWd/tHM. To extract the required 20 to 25 tons of uranium, about 28,500 to 72,000 tons of raw material has to be removed from the ground to separate the uranium oxide (data from Olympic dam, the largest uranium mine with uranium grades averaging from 0.07 to 0.035% U [21]).

Table 1. Fuel required and waste produced for delivering 1 TWh of electricity (30 h electricity for the whole U.K.) or the equivalent of 350,000 tons of coal.

	iMAGINE	LWR
Fuel usage	<p>100 kg from existing sources such as SNF or tailings transformed into uranium chloride</p> <p>Using up already extracted/mined materials</p>	<p>2500 kg in the form of UOX pellets in fuel assemblies</p> <p>Made from 20 to 25 tons of natural uranium through enrichment separated from 28,500 to 72,000 tons of mined material</p>
Waste production	<p>100 kg of fission products to be separated through new processes to ensure long-term operation</p> <p>Opportunity to optimally condition separate elements to limit mobility</p>	<p>2500 kg spent fuel in fuel assemblies containing TRU elements required to be stored and later disposed in a deep geological repository</p> <p>~20 tons of tailings, which have to be stored</p> <p>28,500 to 72,000 tons of mined material with low activity, creating a major source of radiotoxicity to the environment</p>

However, there is the opportunity to extract not only uranium, as many mines in the modern world will extract different metal ores in parallel. In the iMAGINE concept, we already have the raw materials in the form of spent nuclear fuel, which is currently viewed as a liability, requiring USD 10s of billions of investment to deal with the legacy in the UK alone.

Focussing the view back to the U.K., the potential resources, currently declared as nuclear waste materials, give the following picture. NDA data from the radioactive wastes report 2016 [22] indicates 7000 tons of spent fuel and 200,000 tons of uranium tailings as waste. iMAGINE can turn these “waste materials” into an energy resource. These already existing materials can deliver electricity to the UK for about 7500 years based on the 100 kg of uranium required per 1TWh and on the data given above and the current electricity consumption of the UK [23]. No further mining is required for a substantial time. Mining is currently seen as the main source of ecotoxicity [24] and CO₂ release, together with the very energy-intensive enrichment process. Mining is often one of the activities heavily criticised when discussing nuclear power with the public. For countries that do not have vast amounts of spent nuclear fuel and tailings, it could be attractive to avoid mining through the use of non-conventional uranium resources [25] after the start-up of the system based on enriched uranium.

The significant gain in available resources for future generations is visualized in Figure 2. The data for this calculation are based on the energy production and resources taken from [26,27], whereas the sum of the reserves and reasonably exploitable resources is used for hydrocarbons as specified in the publications [26,27], a number that is somewhat speculative. Anyway, the figure should be seen as an illustration since resource projections show significant differences (see, e.g., [28]), delivering significantly higher numbers for the fossil fuel reserves. The general numbers coincide with the number delivered by Rosatom [29] for their closed fuel cycle analysis with 94 to 6% hydrocarbon to nuclear now

and 14 to 86% for the closed fuel cycle. The differences can be explained by the different closed fuel cycle efficiency and different resource estimations for hydrocarbons.

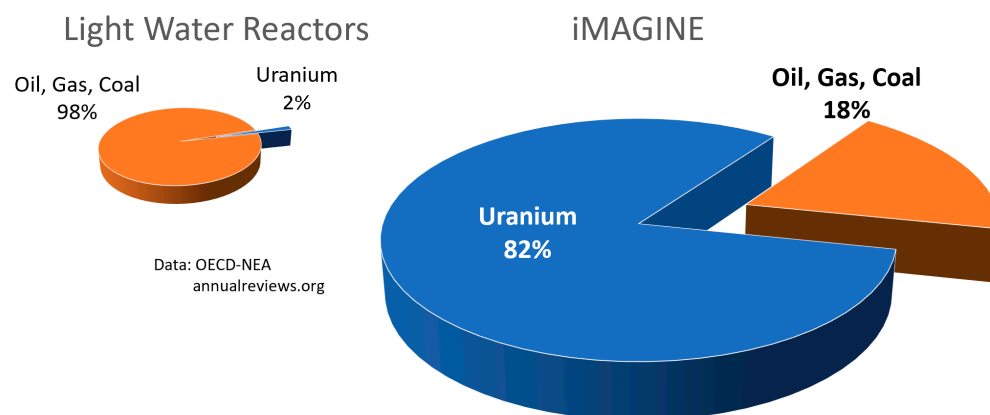


Figure 2. Availability of resources using LWR technology versus the application of iMAGINE (the overall size of the chart replicates the overall amount of available resources).

The application of the iMAGINE technology is active sustainability improvement. iMAGINE delivers more opportunities for future generations through technology development, providing a significantly larger flexible and 24/7-available energy resource, which is of essential interest following COP26 [30].

Following the opportunities of the iMAGINE approach for the reactor and the related highly integrated fuel cycle, the discussion will be opened to investigate potential influences on nuclear waste management. What could be achievable if we think of iMAGINE in an innovative way from cradle to grave?

2.3. Waste Production and Final Disposal Opportunities

Spent nuclear fuel from light water reactors and vitrified wastes from reprocessing form the major contribution to high-level nuclear waste, which is foreseen for deep geological disposal, depending on the strategies of the countries, directly as fuel assemblies or in the form of vitrified waste. According to the IAEA, at the end of 2020, 430+ kt (HM) had been discharged from NPPs [31], out of which about 300+ kt (HM) are stored in facilities at reactor sites or storage sites, while the remainder has been reprocessed. The annual discharge worldwide is currently ~10 kt (HM) [32]. The composition of spent fuel depends on the reactor system, the initial enrichment, and the achieved target burnup. However, a general view is given in Figure 3 with some bandwidth of the composition, delivering the main characteristics with the by-far leading component U-238, a share of fission products, and smaller shares of bred Pu and still-available U-235.

This spent fuel can serve in a future iMAGINE system as fuel without prior reprocessing using the still-available amounts of uranium (U-235 and U-238), as well as plutonium, thus 95+% of a material that is currently considered as waste. The fission products will have to be separated out by the demand-driven salt clean-up system during operation. Uranium and plutonium will be completely utilized, relieving the maximum amount of energy from the fuel. iMAGINE leaves only 100 kg of waste per 1 TWh in fission products instead of 2500 kg in spent nuclear fuel from an LWR. It releases a factor of 25-times more energy from each fuel unit and the related produced waste units.

When discussing nuclear waste, the P&T community delivers the reduction of radiotoxicity over time normalized to one ton (see, e.g., [33,34]), with the caveat that radiotoxicity is a weighted unit, overemphasizing the effect of heavy isotopes due to a higher toxicity index, an approach often criticized in the final disposal community [35]. To take this into account and to facilitate a broader discussion, the following figures are based on the SI unit

activity over time per unit waste mass (Figure 4), in addition to the mass of waste per unit energy produced, as already discussed above.

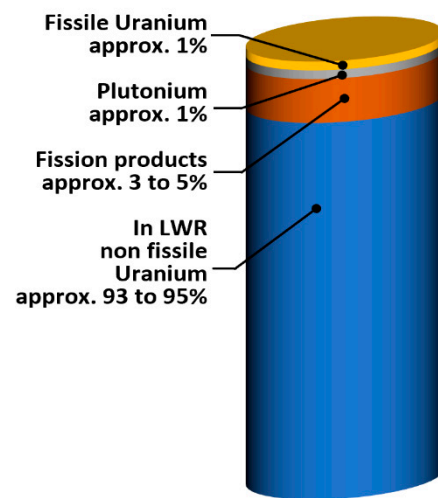


Figure 3. Uranium fuel composition after power generation in an LWR (not to scale).

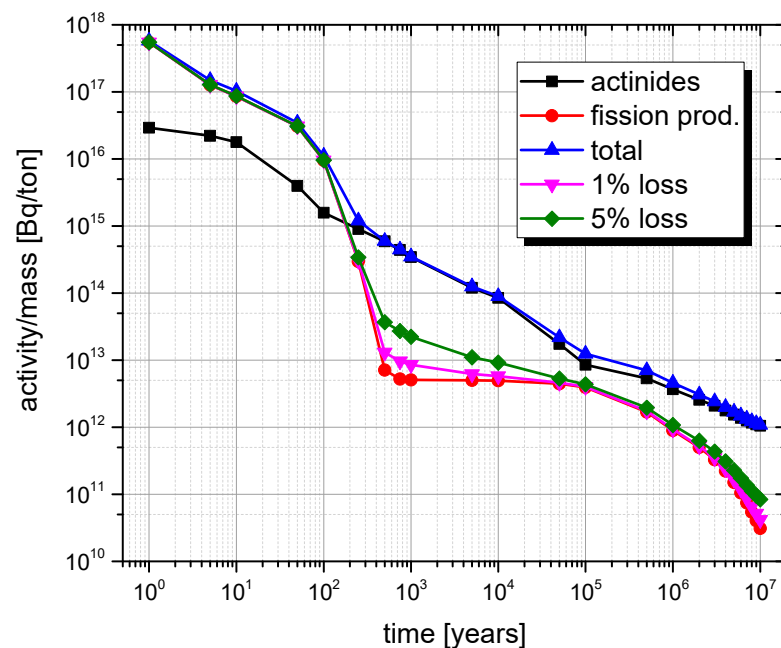


Figure 4. Spent nuclear fuel activity over time separated for actinides and fission products for one ton of fuel and the consequences of the losses of actinides into the waste stream during reprocessing.

Up to now, nuclear waste management through partitioning and transmutation has been concentrated on reducing the activity per ton of spent fuel, as given in Figure 4, using a hard-to-understand double-logarithmic presentation. For better understanding, it is here complemented by Table 2. Figure 4 indicates that the fission products provide by far the largest contribution to the activity, up to 100 years (up to a factor of 10 and higher than the actinides); after about 200 years, the main contribution changes from the fission products to the actinides. The following period shows the biggest difference: actinides contribute ~100 more to the activity than fission products (500 to 1000 years), with this difference slowly reducing over time to a factor of ~5 after 1 mio years and then growing again. The core explanation for these changes are in the different half-lives of the contributors to the long-lived waste: bulk of fission products ~300 years, leading actinide

Pu-239 ~25,000 years, small share of long-lived fission products, e.g., I-129, ~15 mio years, Se-79 between approximately 1.24×10^5 years and 1.13×10^6 years [36].

Table 2. Activities at selected time points for the open fuel cycle, as well as for the application of P&T (without losses) and the resulting potential reductions.

Time Period (Ears)	Activity Reduction Factor
1-500 with P&T	81,036
1-500 without P&T	966
500 gain P&T	84
500-1 mio with P&T	8
500-1 mio without P&T	131
1 mio gain P&T	5.1
500-10 mio with P&T	230
500-10 mio without P&T	552
10 mio gain P&T	35

Analysing time periods instead helps to gain a deeper understanding about what can be achieved through P&T or as a side effect through iMAGINE. The activity of the waste decreases naturally in the period from 1 to 500 years by a factor of 966; this can be significantly be enhanced by P&T to a factor of more than 81,000; P&T would reduce the activity of the waste by a factor of 84 disposing spent fuel. In the second time period from 500 to 1 mio years, the activity reduction after P&T is only a factor of 16, due to long-lived fission products, which do not significantly change before 100,000 years. In this time period (500 to 1 mio years), the activity of the spent fuel reduces due to the decay of the actinides with the leading actinide being Pu-239 with a half-life of a bit more than 24,000 years, which is utilized through P&T. In this time period, the advantage of P&T slowly reduces from a factor of 84 (after 500 years) to a factor of 5. After the observation period of the deep geological disposal, the gain of P&T increases again, which shows that the activity of the waste never disappears completely, which is the nature of the exponential decay function. The reason for the increase of the P&T gain on this very long period is the absence of uranium since this very long-term activity is formed through the decay products of uranium. However, this has to be seen with a caveat: in P&T strategies, the burning of the uranium is never discussed. Thus, it has to be asked where the uranium separated in the reprocessing will go. iMAGINE here delivers a solution, delivering the full use of the uranium. The changes of the P&T gain over the whole period are given in Figure 5.

The comparison changes to a much stronger, more meaningful picture, considering the massively reduced amounts of fuel used per produced amount of energy and, thus, the amount of waste created in iMAGINE. This approach seems to be more natural, since the final product aimed for is not waste; it is low-carbon energy to be produced. This means the amounts of waste will be reduced by a factor of 25, but it should be kept in mind that the activity is in a first-order approximation proportional to the amount of energy produced. The real volume change cannot be reliably justified at this stage since the final volume of the waste is not only determined by the mass and the density when heavy metal is turned into fission products, since the conditioning methods and the limitations in the achievable packing density have to be considered. This general change in the waste properties leads to a wider discussion of the potential influence of the iMAGINE approach on the design of a deep geological disposal facility (GDF).

The current situation is that either spent nuclear fuel is brought into the final disposal (e.g., Finland [37], Sweden [38], or plans of the U.S. and many other countries [39]) or fuel is reprocessed (e.g., in the UK [40], France [41], Russia [42]) and the fission products left over after the solvent extraction process are separated from the chemical solution and vitrified in boron silicate glass as high-level waste. It should be considered here that, due to the stochastic nature of the fission process, almost all elements of the periodic table are contained in the product solution in strongly different concentrations. Thus, the

conditioning of the fission product solution in boron silicate is an engineering compromise, which, though good and reliable, is not ideal for each of the individual elements.

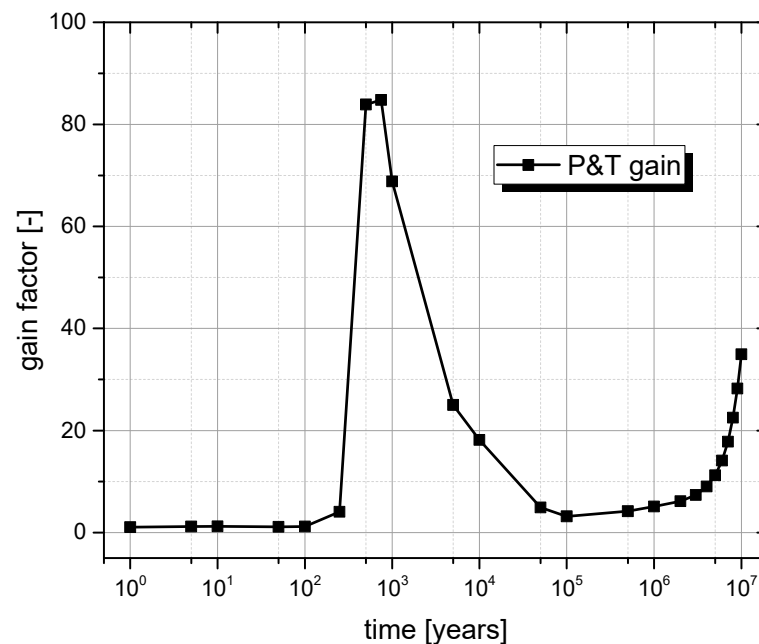


Figure 5. Gain factor of achieved reduction of activity in a final disposal through the application of P&T.

The options are discussed, linked to a conference presentation and the question “how might alternative nuclear fuel cycles impact geological disposal” [12].

Based on a given amount of electric power produced, the authors produced the following list of potential changes:

- Changes in the radionuclide inventory and materials, e.g., due to reprocessing or advanced reactors.
- Changes in the volume of waste, e.g., due to reprocessing or through a new waste to be expected from an advanced reactor (e.g., fuel graphite combination as from a pebble bed reactor).
- Changes in the thermal power of the waste, e.g., through the separation of minor actinides or due to a higher burnup.
- Changes in the durability of the waste in the specific repository environment, e.g., more durable conditioning.

We recommend investigating the effect of the changes for their impact on:

- The repository safety.
- The repository cost and efficiency.

This comprehensive list will be used to facilitate the discussions of the effect of the iMAGINE approach on a geological disposal facility.

2.3.1. Changes in the Radionuclide Inventory and Materials

The radionuclide inventory will change, in a first approach to a configuration close to what is expected to be the end product of P&T; thus, no uranium, no plutonium, and no higher transuranics will be delivered to the GDF. Looking deeper into the opportunities, some more far reaching statements can be made. The amount of fission products to be disposed of per unit energy will not change. However, do all fission products need to be sent to a GDF (especially when considering the significant changes due to the reverse reprocessing approach, the separation of fission products from the “fuel-stream”)? Thus, it would have to be asked which of the separated fission product elements really have to go

into a final disposal and which of the elements with shorter half-lives could be handled in a different, maybe less-costly way.

2.3.2. Changes in the Volume of Waste

The volume of waste per unit of produced energy will change significantly compared to SNF. It will be closer to the volumes expected after reprocessing, since there will be no U-238 put into final disposal. This is one of the key features of the iMAGINE technology to make U-238 accessible as an energy resource. Looking deeper into the opportunities, some more far reaching statements can be made. It is again the change to reverse reprocessing that offers new opportunities. Many of the elements separated will be clean and could have potential further use, while some of the elements with shorter half-lives could be handled in a different, maybe less costly way, helping to reduce the volume. If the volume becomes small enough, this can open the mind to think of whether there are other technologies available that have maybe historically been excluded due to the waste volumes. The easiest and closest could be deep boreholes.

2.3.3. Changes in the Thermal Power of the Waste

The thermal power of the waste per unit of produced energy will almost not change compared to SNF, but the waste materials producing power will be significantly more concentrated, since only specific fission products will be separated from the reactor to go into the waste stream. Looking deeper into the opportunities, some more far reaching statements can be made due to the reverse reprocessing. The most relevant heat-producing elements can either be kept in the reactor, to be directly transmuted in the reactor (e.g., americium), or they can be separated (e.g., strontium). Separation would allow their elimination from thermal power production in the final disposal almost completely, while letting them decay in short-term storage. In this case, only elements with long-lived isotopes, which have a very low power production, would be brought into a final disposal. This would allow a massive densification of the waste for disposal, which should allow a reasonable cost reduction.

2.3.4. Changes in the Durability of the Waste

The durability of the waste is in general dependent on the conditioning. The waste form of iMAGINE is planned to be clearly more stable than SNF, since the waste form will consist of conditioned elementary fission products. The conditioning opportunities for the fission products are different compared to the conditioning of a variety of elements in an engineering compromise. Tailored, highly robust approaches can be used for elements that demand long-term storage, e.g., iodine in silver iodide [43], which has the potential to reduce the impact of highly mobile elements on the safety case of a final disposal. Thus, the enhanced durability of the waste form, which can be chosen specifically for elements that demand high attention, e.g., selenium, technetium, or iodine, will help to improve the safety case. First works are currently already on the way to investigate improved conditioning for Tc.

2.3.5. Risk of Misuse and Theft of Pu

This is another topic that has not been raised in [12], but in [6] “The danger of plutonium being stolen from the repository and misused is diminished [through the application of P&T]”. The iMAGINE technology helps to improve the final disposal safety in the case of human intrusion scenarios since fissile material is no longer sent to final disposal.

The study of nuclear waste from small modular reactors [13] pointed out that the amount of secondary wastes per delivered energy for small modular reactors is significantly higher than for large-scale reactors, which seems to be absolutely reasonable since it follows the economies of scale. Almost the same observation has been made on the amount spent fuel left over from the reactors. This again seems to be reasonable, since, due to the increased neutron leakage from a small core, the achievable burnup will be reduced. However, the

authors did not have a look into the opportunities for the reuse of spent fuel, besides in the case of a very small SFR. This is limiting, since, especially, molten salt systems offer a much better opportunity for the reuse of spent fuel due to the absence of the massive pre- and post-processing, which will allow a much quicker and less expensive turnaround of the fuel after clean-up.

The IAEA document “Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles—A Preliminary Study” [14] concentrates very much on classical fuel cycles using the established reprocessing technologies, either aqueous reprocessing or pyro-reprocessing applied to different advanced reactor types (LMFRs, VHTRs, GCFRs, AHWRs, and MSRs), as well as the decommissioning of the reactors and the related fuel cycle facilities. In addition, design methods are discussed, and the resulting waste from different advanced reactors, water cooled reactors, gas cooled reactors, liquid metal cooled reactors, and dedicated actinide burners—molten salt reactors—are analysed. However, the discussion of the opportunities of molten salt reactors is limited to the appearance of the two different waste streams from gaseous and soluble fission products, while the salt clean-up is discussed, which is expected to be delivered through classical pyro-reprocessing: “The reactor operation wastes are mainly divided into two streams: noble fission products that are extracted on-line during operation, and fission products that remain in the fuel salt (mainly rare earths) and are extracted by a pyrochemical reprocessing of the fuel at a small rate (on the order of 10 L/d/GW(e)). The pyrochemical reprocessing of the fuel salt is compulsory for such reactors. Thus, a solution must be developed for safely handling the salts, and for separating the actinides and fission products from the base salt. Several flowsheets for this are being developed, but a large number of experimental studies are needed to reach laboratory scale feasibility. Waste forms and packages will need to be developed and demonstrated to contain the highly corrosive nature of some salt materials, such as fluoride salts.” [14]. At least the opportunities of the MSR as the breeder or burner, as well as the online reprocessing with the substantially reduced fuel cycle operation times are recognized here.

In general, the really innovative approach of operating directly on spent fuel without prior reprocessing, as well as the opportunity of the “reverse reprocessing” as part of the game changer technology are not discussed or analysed in all three publications. This discussion follows later in this document, after a first look into potential technologies for the reverse reprocessing.

2.4. Potential Clean-Up Approaches for Managing Undesirable Fission Products

The core of the reverse reprocessing approach is the removal of fission products in elementary form from the reactor salt. The fission products can be separated from the liquid fuel on the basis of their physico-chemical properties through different processes.

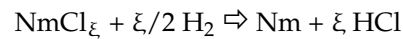
2.4.1. Separation of the Fission Gases

The separation of the fission gases from the liquid fuel was treated in detail by Deguel-dre et al. (2021) [44]. Actually, their solubility in the molten chloride is smaller at a low temperature, e.g., around 500 °C, than in high-temperature conditions. Consequently, such separations would be better to perform after the salt is away from the reactor core region, and preferably, the fission gas should be extracted directly downstream of the heat exchanger, where lower molten salt temperatures are expected, therefore enabling reductions in the dissolved fractions of the gases.

The effective separation of Xe and Kr has traditionally been achieved by the distillation method, e.g., Banerjee et al. (2018) [45]. More efficient alternative approaches such as pressure swing adsorption and temperature swing adsorption, as well as membrane-based separations are based on physical sorption where specific porous adsorbents can be used to preferentially adsorb either Xe over Kr or vice versa. The core challenge will be that the porous material must be totally inert with respect to the molten salt components, specifically the corrosive salt.

2.4.2. Separation of the Noble Metal and Metalloid Components from the Liquid Fuel

The noble metals have been shown to be the most criticality relevant fission products dissolved in the fuel salt. Thus, their separation will be one of the core challenges [46]. The molten salt turns through energy production into $\text{NaCl-UCl}_3\text{-UCl}_4\text{-FpCl}_\xi$, where FpCl_ξ is the chloride of the fission product (Fp), which includes the noble metals (Nm), Tc, Ru, Rh, and Pd and other elements such as Ag, Cd, In, Sn, and Sb, which can precipitate under a reducing atmosphere (e.g., 1% H_2 in Ar). The general reaction for the reduction of the noble metal chlorides is written as:



The reduction process is guided by the values of the metal ion reduction potentials, E° , which are given as a function of temperature for comparison in Figure 6. There is also the chance for the co-precipitation of inter-metallic compounds such as NmU_3 at a lower temperature, e.g., 500 °C, which must be controlled.

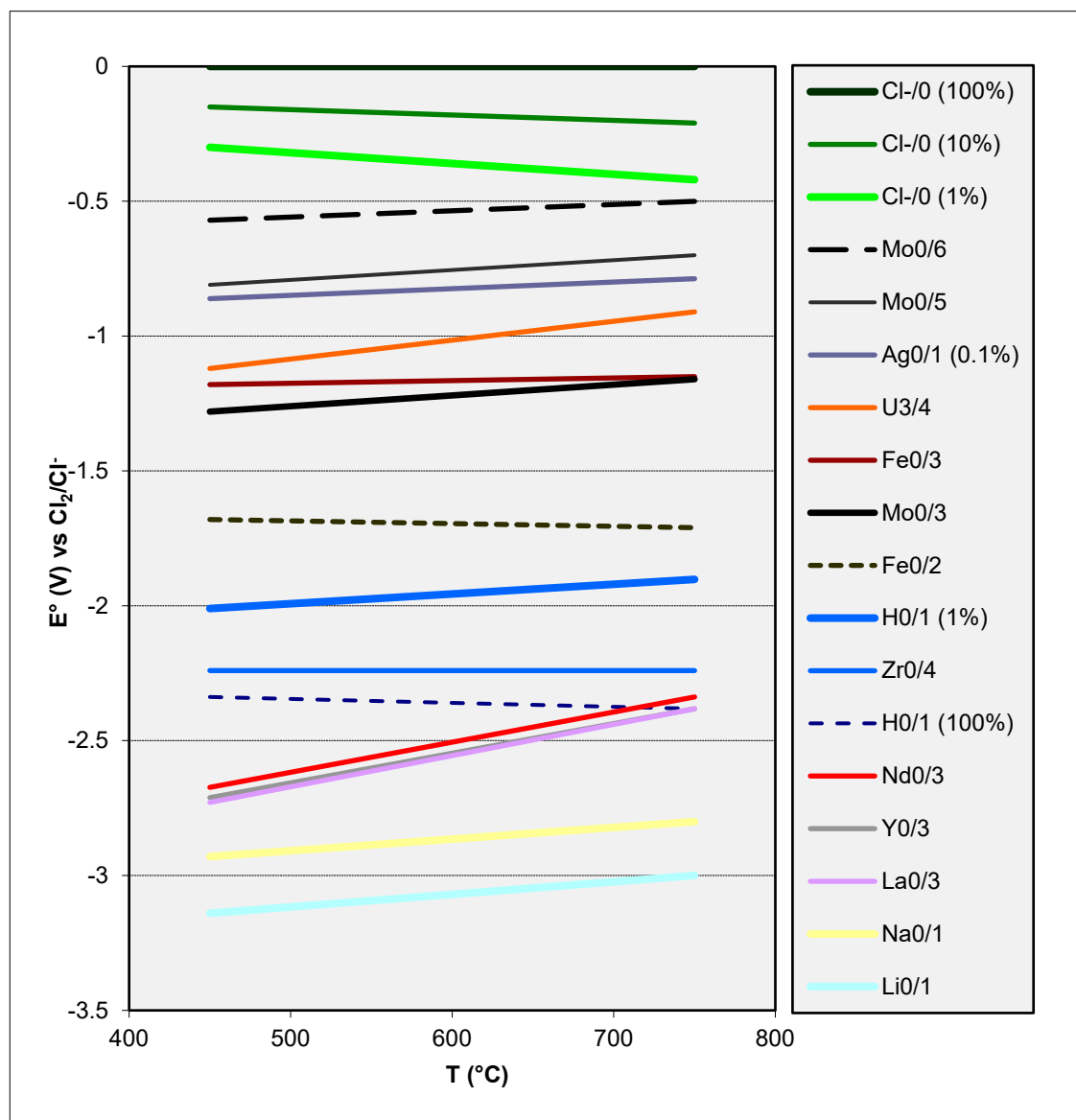
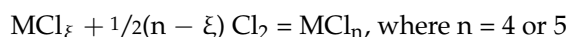


Figure 6. Redox potential vs. temperature of relevant metal couples in chloride salts relevant for the reverse reprocessing (conditions' redox potentials (V) vs. E° (Cl_2/Cl^-), adapted from Young and Sham (2018) [47] and Koyama et al. (1997) [48]).

The precipitation may be completed by additional reduction, e.g., using a H₂-doped Ar atmosphere, with the production of elementary Mo, Ag, Cd, In, and Sn. However, Sb and Te, as well as Se and Br may form SbH₃, H₂Te, and HI, as well as H₂Se and HBr, respectively, and they can be collected separately.

2.4.3. Separation of the Volatile Chlorides

High valence metals such as penta- and tetra-valent fission products or actinides are volatile and can be vaporised or sublimed from the melt. Their production by the oxidation reaction with chlorine can be written as:

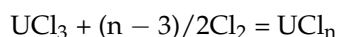


Higher valence chlorides are generally more volatile than those produced at a low valence state. This is not a formal rule, but the thermodynamic data in Table 3 show that this is at least valid for MoCl_n and UCl_n. It is also valid for SnCl_ξ (with T_B SnCl₄: 114 °C) and tentatively for chlorides from the same row: AgCl, CdCl₂, InCl₃, and SnCl₄. This is also the case for ZrCl₃, which readily oxidises in the presence of chlorine to give ZrCl₄, for which T_M: 437 °C and T_B: 331 °C (see Table 3). Such low temperatures suggest that ZrCl₄ could readily evaporate from the molten chloride mixture.

In the molten salt mixture, there will be a combination of Mo(II), Mo(III), and Mo(IV) species, such as MoCl₂, MoCl₃, as well as the corresponding complexes and cluster salts (e.g., [Mo₆Cl₁₄]^{2−}, [MoCl₆]^{2−}). Those species can be oxidised further to give dimer (MoCl₅)₂. Indeed, the high-temperature reactions of molybdenum with chlorine in molten alkali metal chlorides were investigated between 400 and 700 °C by Volkovich et al. (2003) [49] in selected melts: LiCl–KCl, NaCl–CsCl, and NaCl–KCl. In these melts, Mo reacts under a 1% Cl₂–Ar atmosphere and initially produces MoCl₆^{2−}, then a mixture of Mo(III) and Mo(V) chloride complexes; the final proportion depends on the reaction conditions, as reported by Volkovich et al. (2003). The Mo(V) content can be separated from the melt under vacuum as MoCl₅ and, because of its low boiling point, T_M: 194 °C and T_B: 268 °C (see Table 3), can be vaporised from the molten NaCl–KCl.

Similarly, technetium can also form low valency polymeric and/or cluster chlorides (α,β-TcCl₂, α,β-TcCl₃, [Tc₂Cl₈]^{2−}) in the chloride melts, as well as volatile TcCl₄, depending on the concentration of chlorine gas and the temperature [50]. Because of its low boiling point of T_B: 300 °C, technetium tetra-chloride can be separated from the melt.

Subsequently, the uranium separation may be suggested by oxidising U(III) in U(IV), U(V), and U(VI), e.g., using Cl₂ diluted in Ar. Consequently, the part of UCl₃ present in the molten salt may be oxidised according to



if it does not already happen in the reactor due to the chloride ions or atomic chlorine set free from the fission reactions. The free chloride ions or atomic chlorine result from the formation of elements with lower valence states, e.g., BaCl₂ and Kr. The Na(Rb)-UCl₄ binary mixture of the main components is comparably easy to separate by vaporisation of UCl₄, which evolves from the molten salt and crystallizes to enable it to be recuperated for reutilisation in the melt.

Table 3. Comparison of the phase transformation (M: melting, B: boiling) temperature for the increasing valence state of chlorides. Data from Yaws (2015) [51].

FpCl _x	T _M (°C)	T _B (°C)
NaCl	801	1465
RbCl	718	1390
AgCl	455	1547

Table 3. Cont.

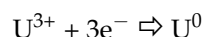
FpCl _x	T _M (°C)	T _B (°C)
CsCl	645	1297
SrCl ₂	873	1249
MoCl ₂	530	1427
CdCl ₂	564	960
SnCl ₂	247	623
BaCl ₂	962	1560
SmCl ₂	855	1950
EuCl ₂	731	2190
YCl ₃	721	1507
ZrCl ₃	627	330
RhCl ₃	450	717
InCl ₃	497	586
SbCl ₃	73	220
LaCl ₃	858	1000
CeCl ₃	817	1727
PrCl ₃	786	1710
NdCl ₃	758	1600
PmCl ₃	737	1670
UCl ₃	837	1657
PuCl ₃	760	1793
ZrCl ₄	437	331
MoCl ₄	552	322
TcCl ₄		300
TeCl ₄	224	387
UCl ₄	590	791
NbCl ₅	205	254
MoCl ₅	194	268
UCl ₅	287	
UCl ₆	177	527

The separation includes first MoCl₅, followed by TcCl₄, ZrCl₄, and TeCl₄ and, finally, by UCl₄ with AnCl₄ (NpCl₄, PuCl₄, and AmCl₄), where the actinides should not be separated. Thus, a careful control of the processes and the related temperature will be required. Purification can also be carried out during condensation and crystallization.

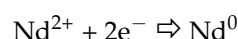
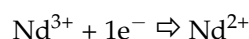
2.4.4. Separation by Electro-Reduction

For electro-reduction, specific voltammograms have already been recorded, for example, for uranium in LiCl-KCl by Masset et al. (2005) [52] and for neodymium in LiCl-KCl also by Kim and Lee (2020) [53]; thus, the data are already available in the community. They clearly display the waves due to the electro-deposition of U⁰ and of Nd⁰.

The electrodeposition of U³⁺ would be the first to take place according to the voltammogram. The electrodeposition potential is −1.5 V (vs. Ag/AgCl at 430 °C) for the reaction, which highlights the requirement to oxidise the U³⁺ as described above to avoid the reaction:



which is similar to the E° of the U^{3+/0} couple: 1.68 V (vs. Ag/AgCl) (see Figure 6). For Nd³⁺, the electroreductions start by the production of Nd²⁺ at −1.7 V, followed by the electrodeposition of Nd⁰ at −2.2 V (vs. Ag/AgCl).



The electrodeposition of U can be discriminated from that of Nd in the case of a non-successful U³⁺ to U⁴⁺ transfer before the initiation of the electroreduction.

3. Opportunities for Improved Waste Management

The above-described changes are the result when analysing the challenges with a singular view. Changing to a more global approach and taking forward the demand-driven thinking following the vision of zero nuclear waste, it would be reasonable to ask what would be needed to either significantly reduce the final disposal challenge or, in the best case, to make the final disposal of the currently planned form obsolete.

We define the demand by understanding the challenges in a much more open discourse in contrast to the final disposal concepts that were partly defined in the 1980s, but based on even earlier plans [54,55]. These concepts have mainly been driven by the waste forms provided by the reactors and the reprocessing technology developed at the same time. Understanding the demand will allow the development of the relevant processes in the most appropriate way to support tailored final disposal solutions, e.g., through the specific separation of elements that contain long-lived isotopes or elements that are carrying the isotopes responsible for the major decay heat production. This can be delivered in the same way as identifying the elements that have a major influence on the reactor's long-term operation [18,46]. This approach has identified elements to be separated through the salt clean-up system, e.g., Ru, Mo, Pd, Cs, Nd, and Tc [46], using the processes described above, while most other fission products will be kept in the salt as long as the solubility limits allow. Adopting a study based on final disposal requests will support the discussion. It will help to understand the effect of the separation of specific elements and their optimized conditioning on a future strategy for final disposal. In addition, some of the volatile fission products elements, e.g., iodine, or noble gases will naturally bubble out of the salt and will have to be captured in the off-gas treatment and conditioned out of this waste stream.

Recycling of Fission Products for Alternative End Use Applications

“Reverse reprocessing” based on the processes described in potential clean-up approaches for managing undesirable fission products will deliver clean elementary streams of materials. This will allow the reuse of fission products in alternative end use applications. Some initial research on the separation of noble metals and technetium demonstrates that there is initial growing interest [56–58]. Other opportunities would be to investigate the rare earth elements and noble metals, even if they will contain radioactive isotopes [59]. In addition, India is already planning on the reuse of nuclear waste materials “Main fission products like Cs-137 & Sr-90 present are recovered using in-house developed technologies and deployed for societal applications covering medical applications, external irradiators and other medical applications.” [60].

In general, the fission products are produced in comparably small amounts, roughly 800 to 900 kg per year in a reactor delivering a power of 1 GWe. Table 4 gives a list of fission and activation products to be expected with the concentration of the different elements after a full operational time of ~30 days without any clean-up. The percentages in the third column have to be seen as a share of the overall 800 to 900 kg of fission products produced in one year to facilitate the future discussion of the potential use for other potential applications instead of directly forwarding these elements to final disposal. Some of the elements will have to be separated due to criticality issues, but other elements could be separated in case there is a path that can be developed for further use.

In any of the opportunities, the volumes of the solid fission products to be separated and conditioned would be very limited; thus, other opportunities than non-retrievable deep geological repository could be envisaged; thus, they should be researched and discussed.

Applying and researching these new opportunities including the exact determination of the masses of different elements to be expected, combined with a plan for future amounts of “energy production” from nuclear energy and potential conditioning technologies would open a new approach to deliver at least partly on the vision of zero nuclear waste. This should lead to an approach that should be much closer to other technologies, where the primary solution is to find a reasonable use for the by-products instead of defining these products as waste without considering other approaches first, such as the reuse of, e.g.,

ruthenium, niobium/neodymium in magnets, or maybe, radio-isotopes for therapies. This approach is used in other industries. In the area of industrial chemistry, the worldwide market for noble metal catalysts is expected to reach USD 17 billion by 2026 [61]. Catalytically active by-products include Rb, Nb, Ag, Ce, La, Ba, and Sr. With nuclear energy being viewed as a potential energy source for hydrogen and synthetic fuel (and chemical) production, there would be an opportunity to reuse the by-products from nuclear fission to drive downstream processes, including the reverse water–gas shift reaction for synthetic hydrocarbon production from atmospheric CO₂. With the potential that these processes could occur on the same site or adjacent to the reactor, the mechanics of reuse would be simplified, and even the use of radioisotopes cannot be ruled out given that the site would already be licensed to handle radioactive material.

Researching these opportunities in parallel to research and studies on the classical deep geological disposal should open new ways in the handling of materials that we currently tend to call nuclear waste. Using the described approaches could bring the old dream of the P&T community, the 500-year final disposal, into reality and the world closer to the vision of zero nuclear waste. There may be a way to tackle the problem via a completely different approach. We could separate out some materials with short half-lives of typically around 30–50 years, which could be almost completely decayed after more than 10 half-lives within 500 years. We can then take some small quantity of well-conditioned long-lived elements with a very low radiation/activity level that could be safely stored while we could research their potential reuse [62].

Table 4. Specific element content in the fuel salt of a molten salt reactor based on 42.5% NaCl–17.25% UCl₃–40.25% UCl₄ fuel at a burnup of 100 GWd/itHM, structured by the top elements by concentration, the top of the rarest metals produced, to noble gasses, the rare earth elements, and other notable elements, all with a concentration near to or greater than 1 ppm. * S and H: S is formed as an activation product of Cl³⁵, while a portion of H forms as a portion of the activation of Cl³⁵.

Categories of Activation and Fission Products	Elements	Concentration (ppm)	Percentage Fraction of the Activation and Fission Products
Top Five	Zr	4526	13.1
	Mo	3934	11.4
	Xe	3736	10.8
	Nd	3155	9.11
	Cs	3093	8.93
Top four rarest elements	Ru	2562	7.40
	Pd	1184	3.42
	Rh	705	2.03
	Te	425	1.23
Noble gases	Xe	3736	10.8
	Kr	497	1.43
	Ar	217	0.63
	He	145	0.42
	Ne	3	0.01
Lanthanides above 1 ppm	Nd	3155	9.11
	Ce	1979	5.71
	La	1010	2.92
	Pr	913	2.63
	Sm	924	1.98
	Y	600	1.73
	Pm	89	0.26
	Eu	56	0.16
	Gd	33	0.1
	Tb	1.35	0.004
	Dy	0.96	0.003

Table 4. Cont.

Categories of Activation and Fission Products	Elements	Concentration (ppm)	Percentage Fraction of the Activation and Fission Products
Other notable elements above 1 ppm	Ba	1336	3.86
	Sr	1072	3.10
	Tc	900	2.60
	H ^x	657	1.90
	Rb	473	1.37
	I	182	0.53
	S *	99	0.29
	Se	79	0.23
	Ag	74	0.21
	Cd	60	0.173
	Sn	58	0.167
	Sb	15	0.04
	Nb	9	0.03
	In	5	0.015
	Ge	1	0.003

4. Conclusions

Nuclear technologies have a great potential to contribute to future low carbon societies, and at least, some governments have decided that nuclear power should play a significant role in their low carbon strategies. In today's world, most of these strategies are built on using light water reactors. However, when thinking about new, advanced reactor technologies, there is a new, very important tendency, at least formulated in the UK and discussed in the academic community and authorities: the aim is not only to design a future reactor, but also to consider where the fuel will come from, as well as where the fuel is going to be disposed of. This has motivated looking into more integrated system development, instead of concentrating only on very focussed reactor development. This widened view is essential to understand the opportunities of an innovative, highly integrated nuclear system. It is given in three steps: reactor, fuel cycle, and waste.

Optimizing the reactor part through innovative thinking has led to the strategic decision of molten salt reactors with a fast spectrum to ensure sufficient breeding to allow operation on spent fuel only, without prior reprocessing. This requirement led to the choice of a chlorine-based molten salt, which allows an exceptionally high load of fertile material to support the required breeding.

The highly integrated fuel cycle from cradle to grave all incorporated into a reactor system leads to the next step of optimization. Due to the specifics of the molten salt reactor, it will be possible to operate on spent fuel from LWRs without prior reprocessing, since the required salt clean-up system can be designed in a way that it can deal with this extra amount of inserted fission products. The integrated fuel cycle will take advantage of the absence of the traditional pre- and post-processing required for solid fuel reactors (cooling and dissolution of solid fuel and solid fuel production). The salt clean-up will be based on "reverse reprocessing" (separating fission products from the fuel stream), which will help to avoid proliferation, since no fissile material will be separated. As side effect of the new processes will open new opportunities in future waste management.

The waste production in the form of fission products for any nuclear reactor is more or less proportional to the amount of energy delivered. However, the proposed reverse reprocessing has the potential to deliver massive, new opportunities for final disposal. It delivers, in contrast to aqueous reprocessing, clean streams of separated fission products instead of "the soup" containing a wide mix of different elements. The analysis showed that the radionuclide inventory and materials, will change since only the separated fission products will have to be stored, while all fissile and fertile materials stay in the reactor until they are completely burnt. This will lead to a significant reduction in the volume of

waste, even if some new form of process waste will potentially be produced. The thermal power of the waste to be disposed of can be brought down to extremely low levels, since the major contributors to the decay heat production can be separated and stored in a cooled environment instead of being part of the general waste stream. This should allow significantly denser packing of the waste canisters. Finally, the separated elements will allow developing and applying specific conditioning methods instead of a compromise for a wide mix of elements. This will help to increase the durability of the waste in the specific repository environment. All the proposed changes will have a significant effect on the repository safety; perhaps, this will even lead to a massively changed set of requirements for the disposal; this should be investigated in the future with an open mind to harvest as many opportunities as possible to come as close as possible to the vision of zero nuclear waste. In addition, this new approach has the potential to lead to a clear reduction of the repository cost, helping to deliver a more efficient way of dealing with the residual products of nuclear energy generation; again, the dimension of the changes is so great that more detailed investigations will be required in the future to understand all the impacts in detail.

Author Contributions: Conceptualization, B.M.; data curation, O.E. and C.D.; formal analysis, D.L., G.C.-G. and M.B.; investigation, B.M.; methodology, O.E.; resources, O.N.-k., O.E. and C.D.; software, A.D.; supervision, B.M., M.P. and M.B.; validation, A.D., M.P. and G.C.-G.; visualization, B.M.; writing—original draft, B.M.; writing—review and editing, A.D., D.L., M.P., O.N.-k., G.C.-G., M.B. and C.D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was supported by the Science and Technology Facilities Council (grant numbers: ST/W002310/1 and ST/W002388/1) and by the Royal Academy of Engineering through the Chair in Emerging Technology scheme **CiET2021\161**, which gave the main author the freedom to think about new solutions to long-term challenges.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Merk, B.; Stanculescu, A.; Chellapandi, P.; Hill, R. Progress in reliability of fast reactor operation and new trends to increased inherent safety. *Appl. Energy* **2015**, *147*, 104–116. [CrossRef]
2. IP EUROTRANS. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/516520> (accessed on 21 December 2021).
3. EUROPART. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/508854> (accessed on 21 December 2021).
4. RED-Impact. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/2408> (accessed on 21 December 2021).
5. Physics and Safety of Transmutation Systems: A Status Report, Nuclear Science, NEA No. 6090. Available online: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea6090-transmutation.pdf> (accessed on 21 December 2021).
6. acatech (Ed.): Partitioning and Transmutation of Nuclear Waste. Opportunities and Risks in Research and Application (acatech POSITION PAPER), Munich. 2014. Available online: <https://en.acatech.de/project/the-societal-implications-of-partitioning-and-transmutation-research/> (accessed on 21 December 2021).
7. Chatzis, I. Solving the Back End: Finland's Key to the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. Available online: <https://www.iaea.org/newscenter/news/solving-the-back-end-finlands-key-to-the-final-disposal-of-spent-nuclear-fuel#:~:text=While%20a%20number%20of%20countries%20are%20considering%20deep,is%20expected%20to%20receive%20waste%20for%20about%20> (accessed on 21 December 2021).
8. Nuclear Academics Meeting Bangor 2019. Available online: <https://www.nuclearuniversities.ac.uk/nuclear-academics-meeting-bangor-2019/> (accessed on 21 December 2021).
9. Merk, B.; Litskevich, D. On a Long Term Strategy for the Success of Nuclear Power. *Energies* **2015**, *8*, 12557–12572. [CrossRef]
10. Merk, B.; Litskevich, D.; Peakman, A.; Bankhead, M. iMAGINE—A disruptive change to nuclear or how can we make more out of the existing spent nuclear fuel and what has to be done to make it possible in the UK? *ATW* **2019**, *65*, 353–359. Available online: <https://www.yumpu.com/en/document/view/62740120/international-journal-for-nuclear-power-atw-2019-06-07> (accessed on 25 September 2022).
11. Laura Price, Peter Swift, and David Sassani: Geologic Disposal of High Activity Radioactive Waste, Waste Forms, and Waste Streams: Considerations for Disposal, Waste Management 2021 Panel 088A, SAND2021-1319C. Available online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1844946> (accessed on 25 September 2022).
12. Krall, L.M.; Macfarlane, A.M.; Ewing, R.C. Nuclear waste from small modular reactors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2022**, *119*, e2111833119. [CrossRef]

13. *Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles—A Preliminary Study*; IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2019.
14. Merle, E. Molten Salt Reactors: A Game Changer in the Nuclear Industry, IAEA Webinar. Available online: <https://www.iaea.org/nptd-webinars/4-molten-salt-reactors-a-game-changer-in-the-nuclear-industry> (accessed on 21 December 2021).
15. Dekusar, V.; Usanov, V.; Yegorov, A. Comparative Analysis of Electricity Generation Fuel Cost Component at NPPs with WWER and BN-type Reactor Facilities. In Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), Yekaterinburg, Russia, 26–29 June 2017; Available online: https://www-legacy.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2017/2017-12-12-12-12-NPTDS-test/FR17_WebSite/papers/FR17-435.pdf (accessed on 26 February 2019).
16. Merk, B.; Detkina, A.; Atkinson, S.; Litskevich, D.; Cartland-Glover, G. Evaluation of the Breeding Performance of a NaCl-UCI-Based Reactor System. *Energies* **2019**, *12*, 3853. [CrossRef]
17. Merk, B.; Litskevich, D.; Gregg, R.; Mount, A.R. Demand driven salt clean-up in a molten salt fast reactor—Defining a priority list. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0192020. [CrossRef]
18. Merk, B.; Litskevich, D. A disruptive approach to eliminating weapon-grade plutonium—Pu burning in a molten salt fast reactor. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0192020. [CrossRef]
19. Merk, B.; Rohde, U.; Glivici-Cotruta, V.; Litskevich, D.; Scholl, S. On the Molten Salt Fast Reactor for Applying an Idealized Transmutation Scenario for the Nuclear Phase Out. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e92776. [CrossRef]
20. Uranium and Depleted Uranium. WNN. Available online: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-and-depleted-uranium.aspx> (accessed on 17 December 2021).
21. Geology of Uranium Deposits. WNN. Available online: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/geology-of-uranium-deposits.aspx#:~:text=Uranium%20grades%20average%20from%200.07%20to%200.035%25%20U%2C,the%20origin%20of%20the%20deposit%20are%20still%20uncertain> (accessed on 17 December 2021).
22. Radioactive Wastes in the UK: A Summary of the 2016 Inventory. NDA. Available online: <https://ukinventory.nda.gov.uk/wp-content/uploads/2017/03/High-Level-Summary-UK-Radwaste-Inventory-2016.pdf> (accessed on 17 December 2021).
23. Electricity Consumption from All Electricity Suppliers in the United Kingdom (UK) from 2002 to 2020. Statista. Available online: <https://www.statista.com/statistics/322874/electricity-consumption-from-all-electricity-suppliers-in-the-united-kingdom/> (accessed on 17 December 2021).
24. Poinssot, C.; Bourg, S.; Ouvrier, N.; Combernoux, N.; Rostaing, C.; Vargas-Gonzalez, M.; Bruno, J. Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles. *Energy* **2014**, *69*, 199–211. [CrossRef]
25. Degueldre, C.A.; Dawson, R.J.; Najdanovic-Visak, V. Nuclear fuel cycle, with a liquid ore and fuel: Toward renewable energy. *Sustain. Energy Fuels* **2019**, *3*, 1693–1700. [CrossRef]
26. Uranium Resources, Production and Demand, NEA No. 7551. Available online: https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_-_resources_production_and_demand_2020_web.pdf (accessed on 17 December 2021).
27. Rogner, H.-H. An Assessment of World Hydrocarbon Resources. *Annu. Rev. Energy Environ.* **1997**, *22*, 217–262. [CrossRef]
28. Fossil Fuel Reserves. Available online: <https://fossilfuel.com/fossil-fuel-reserves/#:~:text=%20Fossil%20Fuel%20Reserves%20%201%20Coal.%20Total,2.9%20percent%2C%20which%20is%20the%20most...%20More%20> (accessed on 17 December 2021).
29. IAEA. General Conference 2021 Side Event: New Technological Platform—The Path to Green Energy. In Proceedings of the 65th IAEA General Conference, Vienna, Austria, 20–24 September 2021.
30. COP26 OUTCOMES. Available online: <https://ukcop26.org/the-conference/cop26-outcomes/> (accessed on 6 January 2022).
31. Spent Fuel Storage Options: Challenges and Solutions. In Proceedings of the ESPACE Event 65th IAEA General Conference, Vienna, Austria, 22 September 2021. Available online: https://nucleus.iaea.org/sites/connect/SFMpublic/Docs%20IAEA%20Presentation%20on%20Spent%20Fuel%20Storage_GC65_SFM_RRs.pdf (accessed on 12 January 2022).
32. Espartero, A.G. Spent Fuel Management Situation Worldwide. On-Going IAEA Activities on Spent Fuel from Current Reactors Fleet and on Innovative Systems. In Proceedings of the Technical Meeting on Strategies and Opportunities for the Management of Spent Fuel from Power Reactors in the Longer Timeframe, Bahadurgarh, India, 25–29 November 2019. Available online: <https://nucleus.iaea.org/sites/connect/SFMpublic/TM%20on%20Strategies%20%20Opportunities%20for%20the%20Management/Spent%20Fuel%20Management%20Activities%20at%20the%20IAEA%20by%20Dr.%20Amparo%20IAEA.pdf> (accessed on 11 January 2022).
33. Abderrahim, H.A.; Giot, M. The Accelerator Driven Systems, a 21st Century Option for Closing Nuclear Fuel Cycles and Transmuting Minor Actinides. *Sustainability* **2021**, *13*, 12643. [CrossRef]
34. Bourg, S.; Geist, A.; Adnet, J.-M.; Rhodes, C.; Hanson, B.C. Partitioning and transmutation strategy R&D for nuclear spent fuel: The SACSESS and GENIORS projects. *EPJ Nucl. Sci. Technol.* **2020**, *6*, 35. [CrossRef]
35. Kessler, J.; Sowder, A.; Apted, M.; Kozak, M.; Nutt, M.; Swift, P. 'Radiotoxicity Index': An Inappropriate Discriminator for Advanced Fuel Cycle Technology Selection-12276. In Proceedings of the WM2012: Waste Management 2012 Conference on Improving the Future in Waste Management, Phoenix, AZ, USA, 26 February–1 March 2012.
36. The Half-Life of Se-79. Available online: https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt6/forschungsnachrichtenabt6/news-from-the-annual-report.html?tx_news_pi1%5Bnews%5D=3589 (accessed on 13 January 2022).

37. Responsible Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. Available online: <https://tem.fi/en/final-disposal-of-spent-nuclear-fuel> (accessed on 10 March 2022).
38. Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. Available online: <https://www.government.se/articles/2022/01/final-disposal-of-spent-nuclear-fuel/> (accessed on 10 March 2022).
39. Geological Disposal of Spent Nuclear Fuel. Available online: <https://www.stimson.org/2021/geological-disposal-and-spent-nuclear-fuel/> (accessed on 10 March 2022).
40. Spent Fuel Reprocessing, NDA Fact Sheet. Available online: <https://ukinventory.nda.gov.uk/wp-content/uploads/2014/01/Fact-sheet-spent-fuel-reprocessing.pdf#:~:text=Spent%20fuel%20from%20both%20Magnox%20and%20AGR%20reactors,detailed%20here.%20Magnox%20fuel%20is%20a%20uranium%20metal> (accessed on 10 March 2022).
41. Krikorian, S. France's Efficiency in the Nuclear Fuel Cycle: What Can 'Oui' Learn? IAEA Department of Nuclear Energy. Available online: <https://www.iaea.org/newscenter/news/frances-efficiency-in-the-nuclear-fuel-cycle-what-can-oui-learn> (accessed on 10 March 2022).
42. Jawerth, N. Under One Roof: Russia's Integrated Strategy for Spent Fuel Management, IAEA Office of Public Information and Communication. Available online: <https://www.iaea.org/newscenter/news/under-one-roof-russias-integrated-strategy-for-spent-fuel-management> (accessed on 10 March 2022).
43. Asmussen, R.M.; Ryan, J.V.; Matyas, J.; Crum, J.V.; Reiser, J.T.; Avalos, N.; McElroy, E.M.; Lawter, A.R.; Canfield, N.C. Investigating the Durability of Iodine Waste Forms in Dilute Conditions. *Materials* **2019**, *12*, 686. [CrossRef]
44. Degueldre, C.; Dawson, R.; Cooley, I.; Besley, E. Fission gas released from molten salt reactor fuel: The case of noble gas short life radioisotopes for radiopharmaceutical application. *Med. Nov. Technol.* **2021**, *10*, 100057. [CrossRef]
45. Banerjee, D.; Simon, C.M.; Elsaidi, S.K.; Haranczyk, M.; Thallapally, P.K. Xenon Gas Separation and Storage Using Metal-Organic Frameworks. *Chem* **2018**, *4*, 466–494. [CrossRef]
46. Merk, B.; Detkina, A.; Litskevich, D.; Drury, M.; Noori-Kalkhoran, O.; Cartland-Glover, G.; Petit, L.; Rolfo, S.; Elliott, J.P.; Mount, A.R. Defining the Challenges—Identifying the Key Poisoning Elements to Be Separated in a Future Integrated Molten Salt Fast Reactor Clean-Up System for iMAGINE. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 4124. [CrossRef]
47. Young, G.A.; Sham, S. *Initial Assessment of Metallurgical Interaction of Clad/Base Metal Systems*; ANL-ART-139; Argonne National Laboratory: Argonne, IL, USA, 2018. [CrossRef]
48. Koyama, T.; Iizuka, M.; Shoji, Y.; Fujita, R.; Tanaka, H.; Kobayashi, T.; Tokiwai, M. An Experimental Study of Molten Salt Electrorefining of Uranium Using Solid Iron Cathode and Liquid Cadmium Cathode for Development of Pyrometallurgical Reprocessing. *J. Nucl. Sci. Technol.* **1997**, *34*, 384–393. [CrossRef]
49. Volkovich, V.A.; Griffiths, T.R.; Thied, R.C.; Lewin, B. Behavior of molybdenum in pyrochemical reprocessing: A spectroscopic study of the chlorination of molybdenum and its oxides in chloride melts. *J. Nucl. Mater.* **2003**, *323*, 93–100. [CrossRef]
50. Poinneau, F.; Johnstone, E.V.; Czerwinski, K.R.; Sattelberger, A.P. Recent Advances in Technetium Halide Chemistry. *Acc. Chem. Res.* **2014**, *47*, 624–632. [CrossRef]
51. Yaws, C.L. *The Yaws Handbook of Physical Properties for Hydrocarbons and Chemicals*; Gulf Professional Publishing: Houston, TX, USA, 2015. [CrossRef]
52. Masset, P.; Bottomley, P.D.W.; Konings, R.; Malmbeck, R.; Rodrigues, A.; Serp, J.; Glatz, J.-P. Electrochemistry of Uranium in Molten LiCl-KCl Eutectic. *J. Electrochem. Soc.* **2005**, *152*, A1109–A1115. [CrossRef]
53. Kim, S.; Lee, S.-H. Electrochemical Properties of NdCl₃ and CeCl₃ in Molten LiCl-KCl Eutectic Salt. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7252. [CrossRef]
54. Brennecke, P.W.; Röthemeyer, H.; Thomauske, B.R. Realization of the German Repository Concept—Current Status and Future Prospects. In Proceedings of the WM'99 Conference, Tucson, AZ, USA, 28 February–4 March 1999. Available online: <http://archive.wmsym.org/1999/26/26-2.pdf> (accessed on 4 September 2022).
55. Bodansky, D. U.S. Waste Disposal Plans and the Yucca Mountain Repository. In *Nuclear Energy*; Springer: New York, NY, USA, 2004. [CrossRef]
56. Ning, S.; Zhang, S.; Zhang, W.; Zhou, J.; Wang, S.; Wang, X.; Wei, Y. Separation and recovery of Rh, Ru and Pd from nitrate solution with a silica-based IsoBu-BTP/SiO₂-P adsorbent. *Hydrometallurgy* **2020**, *191*, 105207. [CrossRef]
57. Naito, K.; Matsui, T.; Kitagawa, M.; Nakahira, H.; Okada, H. Recovery and mutual separation of noble metals from the simulated insoluble residue of spent fuel. *J. Nucl. Mater.* **1991**, *184*, 30–38. [CrossRef]
58. Moon, J.-K.; Han, Y.; Lee, E.; Jung, C.-H.; Lee, B. Recovery of Noble Metals and Technetium from Nuclear Waste. In Proceedings of the WM'06 Conference, Tucson, AZ, USA, 26 February–20 March 2006. Available online: <https://xcdsystem.com/wmsym/archives//2006/pdfs/6010.pdf> (accessed on 14 March 2022).
59. Bourg, S.; Poinssot, C. Could spent nuclear fuel be considered as a non-conventional mine of critical raw material. *Prog. Nucl. Energy* **2017**, *94*, 222–228. [CrossRef]
60. Kumar, S. India Is the First Country to Reuse Nuclear Waste on Large Scale—Minister. 2017. Available online: <https://ultra.news/s-k/30110/india-first-country-reuse-nuclear-waste-large-scale-minister> (accessed on 14 March 2022).

-
61. Noble Metal Catalyst Market Overview, Abstract. Available online: <https://www.industryarc.com/Research/Noble-Metal-Catalyst-Market-Research-501629#:~:text=The%20noble%20metal%20catalysts%20demand%20is%20being%20driven,metals%20and%20they%20offer%20oxidation%20even%20in%20moist> (accessed on 27 July 2022).
 62. HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01-03: Multi-Recycling of Spent Nuclear Fuel from Light Water Reactors (LWR) (RIA). Available online: <https://www.innovationplace.eu/fund/horizon-euratom-2021-nrt-01-03-multi-recycling-of-spent-nuclear-fuel-from-light-water-reactors-lwr-ria/5146> (accessed on 14 March 2022).

Notizen zur Kernenergie:

Die folgenden Notizen sollen anlässlich des „3. Akademiegesprächs“, zum Thema Atomkraft, am 23.02.2023, einen Überblick über wichtige Aspekte der Kernenergie geben, sie sind keine vollständige Darstellung des Themas.

Kernenergie¹ entsteht durch Fusion oder Spaltung von Atomkernen.

- **Kernfusion:** Zwei Atome verschmelzen zu einem größeren Atom - z.B. Sonne und Sterne nutzen die entstandene Energie, um Strahlen auszusenden – vgl. unten.

- **Kernspaltung:** Atome zerteilen sich in kleinere Atome – es wird **Energie u. radioaktive Strahlung** frei. Kernenergie hat Vor- und Nachteile:²

- **Vorteile Kernkraft:** Reduzierter Verbrauch fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl); weniger CO₂; Kernenergie braucht wenig Brennstoff für sehr viel Energie; dadurch geringe Kosten für Abbau, Transport, Verarbeitung; bessere Luftqualität – trägt nicht zur Klimaerwärmung bei.

- **Nachteile Kernkraft:** Radioaktive Strahlung; verheerende Folgen bei Atom-Unglück; Entsorgung radioaktiver Abfälle (ca. 90 % Abfälle schwach- bis mittelradioaktiv, 10 % hochradioaktiv); Jahrhunderte bis radioaktive Strahlung aufhört; **Endlager** für hochradioaktiven Müll fehlen (Radioaktivität erst nach einigen tausend Jahren oder gar nach Hunderttausenden Jahren abgeklungen); für schwach- bis mittelradioaktiven Müll „**Zwischenlager**“; begrenzte Lebensdauer, daher Bau neuer Anlagen nötig, aber sehr teuer.³

- **Geschichte:** 1896 Entdeckung der Radioaktivität durch *Henri Becquerel*; für Fortentwicklung wichtige Forscher: *Marie Curie*, *Ernest Rutherford*, *Niels Bohr*...

- *Erstes Atomkraftwerk 1954 in Obninsk, Russland;*

- *1955 England in Calder Hall;*

- *1957 Deutschland Forschungsreaktor München-Garching und 1961 Kernkraftwerk Kahl (bei Karlstein/Main); 1966 in DDR erstes Kernkraftwerk Rheinsberg.*

- **Störfälle/Unglücke:** Die wichtigsten sind 1979 „Three Miles Island“ bei Harrisburg, 1986 Tschernobyl, 2011 Fukushima (wegen Erdbeben und Tsunami).

- **Atomkraftwerke heute weltweit:** Rund 440 (Wikipedia am 11.12.2022: 423) Atomkraftwerke in Betrieb, sie tragen 11 % der weltweiten Stromerzeugung bei; 100

¹ Zahlreiche der im Folgenden aufgeführten Informationen sind entnommen den instruktiven und ausführlichen (41 DIN-A4-Seiten umfassenden) Darstellungen in WIKIPEDIA: „Kernenergie“, Stand: 11.12.2022, sowie WIKIPEDIA: „Kernenergie in Deutschland“; ferner WIKIPEDIA: „Liste der Kernreaktoren in Deutschland“, dazu zählen auch Forschungsreaktoren sowie Reaktoren, die nicht in Betrieb gingen.

² Verivox: „Atomstrom – Vor- und Nachteile der Kernenergie“, sowie Verivox: „Was ist Kernenergie?“ für beide: <https://www.verivox.de/strom/themen/kernenergie>, Aufruf: 15.2.2023.

³ Zu Zwischen- und Endlagern s.u.

Kraftwerke sind in Planung für nächstes Jahrzehnt;⁴

- **USA:** Präsident *Barack Obama* verkündete den Bau einer „neuen Generation sauberer, sicherer Atomkraftwerke“;
- **Frankreich:** *Präsident Holland* vereinbarte mit den GRÜNEN 24 der 58 Kernkraftwerke stillzulegen – legte jedoch keinen einzigen still; 2022 verkündete *Präsident Macron* die „Renaissance der Kernkraft“;
- **China:** 2021 sind 17 Reaktoren im Bau;
- **Japan:** Es gingen 8 Reaktoren 2019 wieder ans Netz, die jetzige Regierung hat 2022 einen Kurswechsel hin zu mehr Kernenergie eingeleitet;
- **Indien, Russland, Südkorea...** überall werden Reaktoren gebaut und geplant;
- **Europa:** 185 (der rund 440) Atomkraftwerke – durchschnittliches Alter der Anlagen: 30 Jahre; sie decken etwa 25 % des Strombedarfs;
- **Anbieter in Deutschland:** RWE, E.ON, EnBW und Vattenfall dominieren.

Kernreaktor, Funktionsweise:⁵

- **Kernkraft produziert Strom aus Wärme** – ohne Luftschadstoffe und Treibhausgase. Spaltung von Atomkernen setzt *Energie* frei – diese *heizt Wasser* auf – es entsteht *heißer Dampf* - dieser *treibt* eine *Dampfturbine* an – sie ist mit einem *Generator* verbunden – der Generator *erzeugt Strom* – der *Strom wird zum Konsumenten geleitet*.
- **Reaktorbestandteile:** Ein Reaktor besteht aus zwei Teilen:
Konventioneller Teil – Nuklear-Teil.
- Im **nuklearen Teil** wird durch *Kernspaltung Wärme* erzeugt.
- Im **konventionellen Teil** wird diese *Wärme in Strom* umgewandelt.
- **Konventioneller Teil** ist ähnlich wie Kohle-, Gas-, Erdwärmekraftwerke - *Kühltürme* sind daher keine Besonderheit der Kernkraft, was daraus aufsteigt ist eine reine *Nebelfahne*.
Kühltürme: Kühlung mit Flusswasser - Hybridkühlturm
- **Nuklearteil:** Er ist Herzstück der Anlage, der *Reaktorkern*. Er befindet sich in einem dickwandigen *Reaktordruckbehälter* aus Stahl und besteht aus mehreren meterlangen *Brennelementen*. *Brennelemente* bestehen wiederum aus Bündeln *dünner Brennstäbe*. In ihnen befindet sich der *Kernbrennstoff* in Form kleiner, *uranhaltiger Tabletten* (sog. *Pellets*). In den luftdichten Brennstäben läuft die *Kernspaltung* ab, bei der *Wärme entsteht*.



2 Uranoxid-Tabletten können so viel Strom erzeugen wie ein 4-Personen-Haushalt in einem Jahr verbraucht.

⁴ neu – Energie- und Umweltagentur Niederösterreich: Daten & Fakten zur Atomkraft, <https://www.enu.at/daten-und-fakten-zur-atomkraft>, Aufruf: 15.2.2023.

⁵ Siehe etwa *Swissnuclear*, 2023: „Kernenergie - So funktioniert ein Kernkraftwerk“.

Reaktorsysteme:

1) Leichtwasserreaktor (2 Typen; Druckwasser– u. Siedewasserreaktor). Wasser hat zwei Aufgaben: **a)** es dient als Kühlmittel und es transportiert die Energie aus dem Reaktor zu den Dampfturbinen, **b)** es bremst die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen (elektrisch neutrale Bausteine des Atomkerns) ab und wirkt damit als „Moderator“ – nur wenn die Neutronen gebremst werden, können sie weitere Kernspaltungen auslösen = **Kettenreaktion**.

2) Druckwasserreaktor: Im Reaktor wird Wasser unter hohem Druck erhitzt, *ohne* dass es zu *sieden* beginnt. Erhitztes Wasser wird zu Dampferzeugern außerhalb des Reaktors geleitet, dort gibt es seine Wärme an einen weiteren Wasserkreislauf ab. Das Wasser in dem zweiten Kreislauf erhitzt sich, verdampft – der Dampf treibt die Turbinen im konventionellen Teil des Kernkraftwerks an.

- **Der Dampf** wird nach Austritt aus der Turbine in einem *weiteren Wasserkreislauf* abgekühlt, wird zu Wasser und mit einer Pumpe zurückbefördert in den Dampferzeuger (Druckwasserreaktor) bzw. in das Reaktordruckgefäß (Siedewasserreaktor) – dort wieder aufgeheizt und als Dampf zur Turbine geleitet... etc.
Kühlung mit Flusswasser: Für die **Kühlung des Dampfs** beim Austritt aus der Turbine wird **Flusswasser** genommen, es gelangt leicht erwärmt in den Fluss zurück. Da dieser Wasserkreislauf vom Reaktor getrennt ist, gelangen keine radioaktiven Stoffe in den Fluss.

Kühlung mit Kühlturm: Die Wasserkühlung erfolgt durch einen Kreislauf vom Kraftwerk zum Kühlturm und zurück. Im Kühlturm wird das im Kraftwerk erwärmte Wasser „verrieselt“, dabei geben die herunterfallenden Wassertröpfchen Wärme an den Luftzug im Kühlturm ab (*Kamineffekt*). Ein kleiner Teil des Wassers verdunstet – sichtbar als *Nebelfahne* über dem Turm, sie besteht aus *reinem Wasser*, für die Umwelt unbedenklich. Der verdunstete Anteil des Wassers wird durch Flusswasser ersetzt. Auch hier ist der Wasserkreislauf vom Reaktor getrennt.



- **Wirkungsgrad Kernkraftwerk** (mit 300 Grad betrieben): Ein Drittel der durch Kernspaltung freigesetzten Wärme wird in Strom umgewandelt (**33 %**)
- Gas- u. Dampfkraftwerk (mit 1.200 Grad betrieben): bis **58 %**
- **künftig Ultrahochtemperaturreaktor: 70 % Wirkungsgrad möglich.**

3) Brutreaktor: Er stellt mehr Brennstoff her als er verbraucht. Zweck ist demgemäß die bessere Ausnutzung der Kernbrennstoffe. Es gibt *Schnelle Brüter* und *Thermische Brüter*.

4) Kugelhaufenreaktor: Der Reaktorkern besteht aus tennisballgroßen Grafitkugeln, in denen wiederum winzige Uranbällchen sind. Er ist eine Bauform des Hochtemperaturreaktors; es gibt schwierige Entsorgungsprobleme.

5) Small Modular Reactor - SMR:⁶ Er ist kleiner als herkömmliche Reaktoren, evtl. in Fabrik herstellbar und an den Montage-Ort zu bringen. Er erfordert geringeren Aufwand vor Ort, bringt höhere Sicherheit (keine Evakuierungszonen nötig) und ist perfekt mit *Erneuerbaren Energien kombinierbar*. Er ist hilfreich um Klimaziele zu erreichen und ferner schnell ein- und abschaltbar. Er produziert wenig Abfälle; die Entsorgung mit Abwracken ist problemlos (vgl. aber unten „Einwände“); die Finanzierung ist einfacher. Es gibt verschiedene Entwürfe, etwa: verkleinerter Kernreaktor, IV. Kraftwerks-Generation, thermische und schnelle Neutronenreaktoren. Es gebe *ca. 70 Konzepte*, jedoch sei eine internationale Harmonisierung der Regulierung dieser nächsten Generation der Kernenergie erforderlich sowie eine effektive internationale Aufsicht.⁷

Prototypen: SMRs werden derzeit lizenziert und gebaut in: *Argentinien, Kanada, China, Russland, Südkorea, USA*.⁸ **Beispiele:** *Russland* - Schwimmendes Kernkraftwerk auf 150 Meter langen Barke, mit zwei Druckwasserreaktoren; *Argentinien* - Carem-2t5, kleiner Druckwasserreaktor (Forschung?); *China*: 2021 zwei Kugelhaufenreaktoren; *Oregon/USA*: Start-up *Nuscale Power* will gebrauchsfertige Reaktormodule bauen; *Rolls-Royce*: Druckwasserreaktor als SMR, mit LKW transportierbare Massenproduktion; *Kanada*: schwimmende SMR.

Standorte evtl.: *Argentinien, Kanada, China, USA, Russland, Großbritannien, Polen, Rumänien, Estland, Tschechien, Schweden, Niederlande, Südkorea* (**Anm.:** Alle diese Länder sind interessiert an der Weiterentwicklung – *Deutschland* dagegen bewegt sich nicht und wird damit künftig womöglich noch mehr abhängig von anderen.)

Einwände: Wenn die gleiche Leistung wie bei AKWs erzeugt werden soll, sind *viele tausend SMR* nötig; zwar ist ein einzelnes SMR sicherer, aber *viele tausend* stellen doch wieder ein *erhöhtes Risiko* dar; wegen geringerer elektrischer Leistung sind *Baukosten relativ doch höher* als ein großes AKW. **BMUV:**⁹ „Unterm Strich werden die Anlagen kleiner, die Probleme in der Summe aber eher größer. SMR sind kein Weg in die Zukunft, sondern in die falsche Richtung“. Ähnlich *Paul Dormann* (Vorsitzender *Nuclear Consulting Group, Großbritannien*): Im Gegensatz zu den Behauptungen spricht eine neue Bewertung dafür, dass die SMR-Technologie das Volumen von Atommüll pro Kilowattstunde erheblich erhöhen werden.¹⁰ (**Anm.:** Also dann doch lieber großes AKW als so viele „Kleinkram“??)

6) Flüssigsalzreaktor: Diese Reaktoren der IV. AKW-Generation befinden sich weitgehend noch in der Entwicklung. Sie benötigen keine Uranbrennstäbe, sondern werden mit in Flüssigsalz aufgelöstem Thorium (Thorium ist ein radioaktives Mineral) betrieben, das bei einem Leck schnell abkühlt. Da der Druck im Reaktor geringer ist, ist auch das Sicherheitsrisiko deutlich geringer.¹¹ Flüssigsalzreaktoren seien bzgl. Effizienz, Flexibilität, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit herkömmlichen Kernkraftwerken weit überlegen. Er produziert nur wenig Atommüll und braucht kein Wasser als Kühlmittel und daher keinen Fluss zur Kühlung, er kann auch in trockenen Gegenden gebaut werden. Es gäbe

⁶ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Small Modular Reactors – Was ist von den neuen Reaktorkonzepten zu erwarten? WIKIPEDIA: Small Modular Reactor, Aufruf: 4.2.2023.

⁷ *Rumina Velshi*, Präsidentin der Kanadischen Nuklear-Sicherheits-Kommission, Vortrag „Fünf Schritte zum Paradigmenwechsel bei SMRs“, world nuclear news, 25.10.2022.

⁸ *Jamie Durran*: Die nächste Generation kleiner Kernreaktoren wird bei der Produktion radioaktiver Abfälle groß sein“, Chemistry World, 31.05.2022.

⁹ BMUV: AKW-Laufzeitverlängerung.

¹⁰ *Jamie Durran*, wie Fn. 8.

¹¹ *Jan Fleischer*, Flüssigsalzreaktoren – Hohe Sicherheit und Thorium als Brutmittel, scinexx.de>>>; Aufruf am 13.02.2023.

Berechnungen, wonach eine Tonne Thorium 28 Millionen Kohle ersetzen könne. In *China* (Sachstand Mitte 2021 – China will bis 2060 kohlendioxidneutral sein! – und Januar 2022) soll in *Wuhe*, am Rand der Wüste Gobi, als Versuchsreaktor der erste Reaktor dieses Typs in den Testbetrieb gehen. Chinesische Forscher sagen, dass 99,99 Prozent des Atom Mülls nach spätestens 300 Jahren in harmlose Elemente zerfallen sind.

Eine Variante dieser Technologie erlaube es sogar, Atom Müll „zu verbrennen“ – ein Endlager würde damit überflüssig. Ein solcher Reaktor sei so klein, dass er auf einen LKW passt und in Fabriken im Baukasten-System vormontiert werden könne. Ein weiteres Argument für diese Reaktoren ist, dass Thorium weit häufiger vorkommt als Uran.¹²

Auch *Japan* und *USA* wollen einen Flüssigsalzreaktor bauen.¹³ In *Dänemark* plante der Reaktorentwickler *Copenhagen Atomics* Ende 2022 – da in *Dänemark* der Einsatz radioaktiver Materialien verboten ist – einen nicht-nuklearen Prototyp, den „Waste Burner“, zu testen; er solle bis 2025 betriebsbereit sein und 2028 außerhalb *Dänemarks* in Betrieb gehen; er könne nicht nur Atom Müll wiederverwerten, sondern auch neuen Brennstoff erbrüten.¹⁴

Kritisch gesehen wird u.a., dass bisher noch kein solcher Reaktor in der avisierten Leistungsgröße gebaut wurde, die Technologie sei unausgereift, es fehlten daher Nachweise für die behaupteten Vorteile und günstigen Eigenschaften.¹⁵

6) Dual Fluid Reaktor. Er ist bisher nur als *Blaupause* existent – jedoch patentiert in *USA* und *Europa*.¹⁶ Dieser Reaktor will die Vorteile des Flüssigsalzreaktors kombinieren mit denen des metallgekühlten Reaktors. Damit sollen die Nachhaltigkeits-, Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsziele der sog. *Kernenergie der IV. Generation* erreicht werden.

7) Fusionsreaktor:¹⁷ Er befindet sich noch im *Forschungsstadium*.¹⁸

Im Gegensatz zur Kernspaltung werden bei der Kernfusion leichte Atomkerne miteinander verschmolzen (fusioniert), wobei Bindungsenergie freigesetzt wird, die anschließend in nutzbare Energieformen überführt wird. Um die Atomkerne, die sich zunächst stark abstoßen, trotzdem verschmelzen zu können, müssen extrem hohe Drücke und Temperaturen (von ca. 150 Millionen Grad!) erzeugt werden.¹⁹

*Hoffnung:*²⁰ Mit diesem Reaktor mehr Energie zu gewinnen als hineinzugeben. Damit entstünden nahezu unbegrenzte Energiereserven; zudem gäbe es keinen CO₂-Ausstoß, keine

¹² Zu den Angaben zum Flüssigsalzreaktor siehe auch *Wolfgang Kempkens*: „Ist der Flüssigsalzreaktor das perfekte Kraftwerk?“, *Edison*, 11.01.2022.

¹³ Zu den Angaben zum Flüssigsalzreaktor vgl. ferner *Robert Klatt*, „Erster Flüssigsalzreaktor in China kurz vor Inbetriebnahme“, *Forschung & Wissen*, 20.07.2021.

¹⁴ *Nuklearforum Schweiz*, „Dänemark: Prototyp eines Thorium-Flüssigsalzreaktors soll vor Ende 2022 in Betrieb gehen“, 30.11.2022, unter Berufung auf *Financial Times* v. 25.11.2022.

¹⁵ Siehe insgesamt zu dieser Reaktorart: WIKIPEDIA Flüssigsalzreaktor; Aufruf: 13.02.2023.

¹⁶ *Edgar Gärtner*: *Kernenergie der 4. Generation – der Dual Fluid Reaktor*; 7.1.2020.

¹⁷ Vgl. die umfangreiche Darstellung bei WIKIPEDIA „Kernfusionsreaktor“, sowie WIKIPEDIA: „Fusionsenergie“, Stand: 4.12.2022. Siehe ferner: *Paola Rosa-Aquino*: „Wie Kernfusion funktioniert und warum der neue ‘Durchbruch’ für die grüne Energie von großer Bedeutung ist“, *business insider*, 15.12.2022;

¹⁸ Schon 2014 meldete der Rüstungskonzern *Lockhead Martin* „Durchbruch – Fusionsreaktor der auf die Ladefläche eines LKW passt“. Andere Experten reagierten mit Spott – vgl. *WirtschaftsWoche*, 17.10.2014: „Unternehmen verkündet Durchbruch bei Kernfusion“.

¹⁹ *Constantin Häfner*: „Energiesouveränität – langfristig durch Kernfusion?“ 20.01.2023, <https://www.fraunhofer.de/fraunhofer-strategische-forschungsfelder/ressourceneffizienz...> Aufruf: 22.01.2023.

²⁰ *Vince Ebert*, *FOCUS* 39/2022, S. 80: „Wir müssen beim Weltverbessern neu denken“. Regelrecht euphorisch die Pressemeldung des *Fraunhofer-Instituts ILT* v. 13.12.2022: „Historischer Durchbruch in der Fusionsforschung: Laser haben die Kernfusion gezündet“.

- Explosionsgefahr, keine radioaktiven Endprodukte (oder nur wenig). *Ziel:* Klimaneutralität.
- **USA:** Anfang Dezember 2022 wurde aus den USA ein Erfolg gemeldet: Es sei die Kernfusion am 5. Dezember 2022 bei dem Experiment in USA gelungen.²¹ Andere sagen, dies sei Ansichtssache,²² es komme darauf an, ob man jeglichen Input mitgerechnet habe.²³ Mit Laseranlage müsse man schweren Wasserstoff in *Millionen Grad heißes Plasma* wandeln (150 Mio Grad – 10x heißer als die Sonne in ihrem Kern)²⁴. Noch viele technische Probleme seien zu lösen, bevor ein Fusionsreaktor gebaut werden könne – u.a.: Es müssen Temperaturen von etlichen Millionen Grad erreicht werden (**Anm.:** Welche Materialien halten das aus?).
 - **Südfrankreich:** Der Kernfusionsreaktor ITER²⁵ ist seit 2007 in *Südfrankreich* im Bau, Inbetriebnahme erfolge evtl. 2030; bis 2040 soll der Betrieb mit brennendem Plasma erreicht werden, in welchem mehr Fusionsenergie freigesetzt wird als Heizenergie eingekoppelt wird.
 - **Deutschland, Greifswald:** Fusionsexperiment „Wendelstein 7-X“ in Greifswald hat noch keine Fusionsenergie erzeugt, er dient der Forschung.²⁶

8) Mikrokernreaktoren:²⁷ Immer wieder ist von neuen Ansätzen zu lesen, so etwa vom Mikrokernreaktor des Start-ups *Oklo*. Solche Reaktoren sollen nur einzelne Standorte wie Unternehmen, Universitätsgebäude oder abgelegenen Standorte mit Strom versorgen. Der Aufbau soll nicht mehr als ein Jahr dauern und dann Energie aus bereits verbrauchtem spaltbarem Brennstoff gewinnen. Damit würden Materialien, die bisher zur Entsorgung bestimmt waren, zur Energiegewinnung genutzt werden. Der dann verbleibende Abfall müsse nur noch „einige hundert“ Jahre gesichert werden. Die Erfinder von *Oklo* meinen, dass ihr Reaktor keine menschliche Bedienung benötigen – dies wird jedoch von anderen Sicherheitsexperten bestritten.

Kosten – Sicherheit

- **Kosten:** Unmittelbare laufende Strom-Produktionskosten sind ursprünglich eher gering. Sehr teuer sind jedoch Bau und Rückbau des Reaktors – sie sind durch gestiegene Sicherheitsmaßnahmen noch teurer geworden; die Finanzierungsbedingungen am Kapitalmarkt sind schwierig. Daher erfolgt der Bau neuer Reaktoren insbes. dort, wo

²¹ Zahlreiche Medien berichteten davon, etwa: manager-magazin v. 13.12.2022: „Durchbruch bei Kernfusion – Eine neue Ära der Energiegewinnung?“ RedaktionsNetzwerk Deutschland v. 13.12.2022: „Wissenschaftliche Sensation – US-Forschern gelingt Durchbruch bei Kernfusion“; *Tanja Banner*, Frankfurter Rundschau v. 15.12.2022: „USA melden Durchbruch in der Kernfusion – Eine historische Leistung“; *Dirk Eidemüller*, FAZ v. 18.12.2022: „Vision mit Fragezeichen“.

²² *Spektrum.de*, 12.12.2022: „Ist in der Fusionsforschung ein Durchbruch gelungen?“

²³ *Laura Gaida* in UTOPIA: „Kernfusion zur Energiegewinnung – Forschende feiern Durchbruch – doch Hürden sind hoch.“

²⁴ *Scott Elder*, „Fusionskraftwerk ITER: Der Traum von unendlicher Energie – und seine Realität“, National Geographic v. 13.12.2022.

²⁵ *Scott Elder*: „Fusionskraftwerk ITER: Der Traum von unendlicher Energie - und seine Realität“, National Geographic v. 13.12.2022; ferner schon *Michael Freshko/Jason Treat*: „Sonnenfeuer“, National Geographic v. Dezember 2021, S. 34.

²⁶ NDR 1 v. 9.8.2022: „Kernfusions-Experiment – „Wendelstein 7-X ist fertig“. Auch *Deutschland* verspürt den Aufwind: „Neue Expertengruppe soll Kernfusion in Deutschland voranbringen“, berichtet *Teresa Stiens* im Handelsblatt v. 23.12.2022. Siehe auch *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik*: „Fusionsforschung in Europa“, danach ist die europäische Fusionsforschung als Verbund organisiert, in dem die Fusionszentren der *Europäischen Union*, der *Schweiz* und der *Ukraine* zusammengefasst sind.

²⁷ Vgl. den Artikel von *Katharina Clifford*: „Oklo hat einen Plan, winzige Kernreaktoren zu bauen, die Atommüll verbrennen“, CNBC (Consumer News and Business Channel), 28.6.2021.

staatliche Gelder eingesetzt werden (USA) – dies fordern in Europa auch Großbritannien, Frankreich, Polen und Tschechien – oder wenn in diesem Bereich keine marktwirtschaftlichen Regeln gelten (z.B. Frankreich), oder in autoritären Staaten. Oft sind Kohlekraftwerke und Offshore-Windparks kostengünstiger (Kosten für Speicherung von Solarstrom wurden jedoch bei der Untersuchung nicht berücksichtigt). Eine Haftpflichtpolice würde 72 Mrd. Euro/Jahr kosten. In Deutschland müssen Kraftwerksbetreiber 500 Mio/Jahr Rückstellung bilden für den Rückbau - inzwischen haben sie Rückstellungen von 36 Mrd. Euro aufgehäuft. Im Jahr 2015 sagte das Handelsblatt, Atomkraft sei wohl die größte und schlechteste Investition in der Geschichte der Bundesrepublik.

- **Kosten bei nuklearem Unfall:** 2,5 Mrd. sind von einer Unfallversicherung gedeckt - vgl. Atomgesetz. Allerdings würde dieser Betrag nicht genügen – er schafft jedoch Anreiz für Investitionen, die bei unbegrenzter Haftung ausbleiben würden. De facto zahlt bei einem Atomunfall also den Rest der Staat. Eine französische Regierungsstudie geht (für Frankreich) von insgesamt ca. 430 Mrd. Schadenssumme aus. Private Haftpflichtversicherungen treten für Atomschäden nicht ein.

Gefahren

- **Todesfälle:** Ausschließlich auf Todesfälle bezogen, ist Kernenergie das sicherste Mittel zur Stromproduktion.

- **Unfallwahrscheinlichkeit und Folgen:** Deutsche Risikostudie 1979:
Unfallwahrscheinlichkeit 1x in 2 Mrd. Jahren;

- **Tote:** 14.500 sofort, 104.000 spätere Todesfälle;

- **Evakuierung** von 5.600 Qu.Km wegen starker Kontamination und **Umsiedlung** von 2,9 Mio Menschen.

- **Andere Annahmen:** Evakuierung im Umkreis von 100 km; Unfall 1x in 280.000 Betriebsjahren - oder alle 1.700 Jahre. Schätzungen gehen (auch je nach polit. Färbung der Studien) sehr weit auseinander, von ein paar Zehntausend bis zu ein paar Hunderttausend.

- **Eingetretene Unfälle: Tschernobyl:** Reaktor war veraltet und ohne Sicherheitsbehälter. Fukushima wurde ohne ausreichendem Flut- und Erdbebenschutz gebaut – und das in einem Tsunami- und Erdbebengebiet. Eine österreichische Veröffentlichung zählt 8 AKW-Unfälle auf von 1957 bis 2011.²⁸

- **Leukämie** bei Kindern: Bundesamt für Strahlenschutz fand erhöhte Leukämiezahlen bei Kindern, die weniger als 5 km von AKW entfernt lebten, von 1980–2003 waren es 37 Fälle (Anm.: also 37 in 23 Jahren). Die Ursache ist bis heute strahlenbiologisch nicht geklärt und demnach umstritten.

- **Unfallgefahren** sind: Atommüll-Transport; Austritt Radioaktivität bei Wiederaufbereitungsanlagen;

- **Militärische Nutzung:** Wiederaufbereitungsanlagen und Anreicherungsanlagen produzieren waffenfähiges Plutonium. Deutschland: Urananreicherungsanlage Gronau.

- **Kriegerische Gefahren:**
- Drohungen mit Angriffen durch Terroristen u. Kriminelle. Nach Terror-Anschlag am 22. März 2016 in Brüssel wurden mehrere Kernkraftwerke teil-evakuiert, es wurde bekannt, dass

²⁸ Neu – Energie- und Umweltagentur Niederösterreich „Daten & Fakten zur Atomkraft“.

Terroristen AKWs ausgespäht hatten.

- **Aufprall Kampfflugzeuge:** AKW sind grundsätzlich nicht darauf ausgelegt, militärischen Angriffen standzuhalten. *Saporischschja* soll jedoch einen Aufprall von 10 Tonnen mit 750 km/h standhalten. Andere (westliche?) AKW sind heute durch Beton-Ummantelung geschützt gegen Aufprall mit 800 km/h. Anschlag mit **Großflugzeug** wäre dagegen eine Katastrophe. Gegen Hohlladungsgeschosse besteht bisher keine Abwehrfähigkeit.
- **Nuklear-Terrorismus:** Gefahr durch "schmutziger Bombe" aus radioaktiven Abfällen.
- **Krieg: Ukraine**²⁹ hat 15 Atomreaktoren (Druckwasserreaktoren sowjetische Bauart) an 4 Standorten in Betrieb. Russischer Überfall auf *Ukraine*: Am 4.3.2022 wurde das Kernkraftwerk *Saporischschja* – das leistungsfähigste AKW in *Europa* – mit russischen Raketen beschossen, ein Gebäude brannte. Folgen eines unmittelbaren militärischen Angriffs auf ein ukrainisches AKW sind unabsehbar – hätte allerdings auch für *Russland* und *Belarus* unkalkulierbare radiologische Folgen. Für die Sicherheit der ukrainischen AKW wurde durch Nachrüstungsprogramme viel getan.
- **Unterirdische Bauten:** Wäre es eine Möglichkeit, evtl. AKW *unterirdisch* zu bauen? Jedoch: Nicht nur AKW sind gefährdet im Krieg, auch z.B. Staudämme, Treibstofflager, U-Bahnhöfe...

- **Nukleare Brennstäbe:** Zur Herstellung muss man den natürlichen Anteil spaltbaren Uran-Isotops 235 von 0,7 auf 4,0 erhöhen (*Uran-Anreicherung*), damit es eine *Kettenreaktion* hervorrufen kann. *Kernkraftgegner* befürchten, man könne auch waffenfähiges Uran 80% Urab-235-Gehalt produzieren. Umgekehrt kann hochangereichertes Uran aus ehemaligen *Kernwaffen* zu *Kernbrennstoff* für Reaktoren verarbeitet werden („Megatonnen – Megawatt-Programm“: 425 Kernwaffen verarbeitet).

- **Gesetzliche Regelungen: Europa** - 1957 Gründung der „Europäischen Atomgemeinschaft“, seitdem wurde Kernenergie politisch u. wirtschaftlich gefördert;
Internationale Verträge: Atomwaffensperrvertrag und Atomhaftungsübereinkommen.
Deutschland – Atomgesetz. **Österreich** - seit 1999 Verbot kommerzieller Nutzung mit Verfassungsrang.

- **Gefährliche Nachbarschaft:** Auch wenn ein Land selbst keine Anlagen hat, liegen die Anlagen angrenzender Länder oft in der Nähe – z.B. *Österreich*: 55 km von Horn bis Dukovany/Tschechien.³⁰

- **Atomkraft versus Klimaschutz:** Kernkraft verursacht keine CO₂-Emissionen, jedoch entstehen beim Abbau von Uran wie Bau/Abbau bzw. Entsorgung eines Atomkraftwerks Treibhausgas-Emissionen (**Anm:** Wie ist es bei Windkraft und Solaranlagen, wenn man die Gewinnung der nötigen Materialien, Transport etc. mit einbezieht?). Zudem gibt es bei Uranabbau massive Umweltschäden und soziale Folgen.³¹

Studie 2005: Atomkraftwerke produzieren über die Laufzeit eines AKW etwa *so viel CO₂ wie Windenergie* und *weniger als Photovoltaik*.

Die *Flächenansprüche* sind bei AKW die geringsten im Vergleich zu Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen.

Die finanziellen Übergangskosten zu 100% erneuerbaren Energien wäre (gerechnet bis zum

²⁹ BMUV vom 25.02.2022. Vgl. auch *bmu* vom 22.09.2022: Angriffskrieg auf die Ukraine rückt Strahlenschutz stärker ins Bewusstsein.

³⁰ *neu* – Energie- und Umweltagentur Niederösterreich: „Daten & Fakten zur Atomkraft“, <https://www.enu.at/daten-und-fakten-zur-atomkraft>, Aufruf: 15.3.2023.

³¹ BMUV: AKW-Laufzeitverlängerung.

Jahr 2050) teurer als der Ausbau AKW. *Fusionsenergie* für kommerzielle Nutzung womöglich erst 2050 verfügbar.

- **Ziel:** Stabile und bezahlbare Energieversorgung *plus* Klimaschutz

- *Zukunftstechnologien:* Windkraft und Photovoltaik,

- *Brückentechnologie:* Kohle.

- **Erforderliche Technologien:** Bergwerke zur Förderung von Uran; Anlagen zur Uran-Anreicherung (um Erz in Kernbrennstoff zu verwandeln), Zwischenlager (sichere Aufbewahrung von abgebrannten Brennstäben, Abklingbecken), kernchemische Anlagen (radioaktiven Abfall zur langfristigen Lagerung herrichten), *Endlager*; ggfls. *Wiederaufbereitungsanlagen* (eine war in *Deutschland* in Wackersdorf im Bau, sie wurde nicht fertiggestellt wegen Protesten); Transportbehälter (z.B. Castor-Behälter).

- **Urangewinnung:** *Deutschland* kein Abbau – Uran wird importiert (früher: in *DDR* Uranabbau in Wismut). *Europa* importierte im Jahr 2020 aus *Russland* 20 %, aus *Kasachstan* ebenfalls 20 % seines Bedarfs; andere große Produzenten sind: *USA, Kanada, Australien* und einige ehemalige *französische Kolonien*.

Politik Deutschland:

- **1950er Jahre:** Atom-Euphorie, Nutzung galt als selbstverständlich. RWE plante in den 1950er Jahren den ersten Reaktor, Wesentlicher Antrieb war auch, den Anschluss an die Entwicklung nicht zu verlieren.

- **1957 – 2004:** Insgesamt 110 kerntechnische Anlagen, viele für Forschung.

- **1955:** Etablierung des „Bundesministeriums für Atomfragen“ (Minister: *F.J. Strauß*) - Ziele: Einführung Atomenergie, Förderung – Schaffung gesetzlicher Grundlagen. Konzerne sollten bauen, Staat Verlustbürgschaften übernehmen und Investitionshilfen gewähren.

- **1957:** Inbetriebnahme des ersten Reaktors, *Forschungsreaktor* München Garching.

- **1.1.1960:** *Atomgesetz verabschiedet am 23.12.1959, in Kraft getreten am 1.1.1960.*

- **1961:** Versuchsreaktor Kahl in Betrieb, Reaktortechnik von *General Electric* (USA).

- **1970er Jahre:** insbes. ab 1973 nach Ölkrise, wurde Bau von Kernkraftwerken forciert

- **1986 Reaktorunglück in Tschernobyl**

- **15.6.2000, Atomkonsens:** BReg. und Energieversorgungsunternehmen vereinbaren: Kein Neubau von Reaktoren mehr (Forschung nicht betroffen), **2002** entspr. *Änderung Atomgesetz* tritt in Kraft.

- **Oktober 2010:** Bundestag (schwarz-gelbe Mehrheit) beschließt *Laufzeitverlängerung* („Ausstieg aus dem Ausstieg“) für im Durchschnitt **12 Jahre**

- **2011 Reaktorunglück in Fukushima**

- **2011 BReg.:** Im März wurde ein dreimonatiges *Atom-Moratorium* beschlossen; dann neuer „Atomkonsens“, **Energiewende:** Im Sommer wurde die *Laufzeitverlängerung von 2010 zurückgenommen*, die 8 ältesten Kraftwerke wurden sofort stillgelegt, für die anderen 9

wurde ein **gestaffelter Ausstieg bis 31.12.2022 beschlossen**. Die letzten drei AKW sollten **Ende 2022** vom Netz gehen.³²

- **2016: Bundesverfassungsgericht** erklärte auf Klage von E.ON, RWE und Vattenfall: Atomausstieg ist **grundgesetzkonform** – mit 2 Ausnahmen: u.a. „frustrierte Investitionen“. Bundesregierung beschloss angemessenen **finanziellen Ersatz** für nicht mehr verstrombare Reststrommengen. Die Höhe soll **erst 2023** feststehen, wenn letzte Atommeiler vom Netz sind und dann klar ist, wie viel Reststrom vorliegt.

2022: Atomgesetz heute

Bisher

§ 7 Abs. 1a) Satz 1 Nr. 6: Beendigung Betriebsberechtigung für Kernkraftwerke Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 bis **31. Dezember 2022**.

Dann:

19. Novelle zum Atomgesetz vom 04.12.2022 (BGBl. 2022 I, S. 2153): Artikel 1, Änderung § 7 Abs. 1e).

Jetzt:

Neu § 7 Abs.1e) Satz 1: Erlöschen der Betriebsgenehmigung für die 3 noch laufenden AKW (Isar 2, Neckarwestheim 2 und Emsland) **mit Ablauf des 15. April 2023**.

Bis **Mitte April 2023** erfolgt jedoch nur Weiterbetrieb mit den in den Anlagen **vorhandenen Brennelementen** = sog. **Streckbetrieb** = Leistung nimmt langsam ab. Der Staat übernimmt **keine Kosten** für den Streckbetrieb.³³

- **Bis 2050 soll Deutschland seine Energie aus „regenerativen Quellen“ beziehen:** Energie aus Wind, Wasserkraft, Geothermie, Sonne. Zudem appelliert die Bundesregierung an die Bevölkerung und die Industrie, den **Energieverbrauch nachhaltig zu senken!**³⁴

Die Deutsche Diskussion:

- **Befürworter:** Nachhaltige Technologie, erhöht Versorgungssicherheit, reduziert Abhängigkeit vom Import von fossiler Energie; es entstehen viel weniger Treibhausgase oder Smog als bei fossilen Kraftwerken. Kernenergie ist grundlastfähig im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie, die nur mit *Speicherkraftwerken* einen hohen Anteil am Strommix erreichen (*Speicherung verursacht CO2!*). Problem Endlagerung sei gering und könne durch moderne Technologien wie *Transmutation* (langlebige radioaktive Atomkerne werden in kurzlebige oder stabile Atomkerne umgewandelt)³⁵ weiter gesenkt werden. Die Sicherheitsbilanz der Kernenergie in der westlichen Welt sei gut im Vergleich zu anderen großen Energieträgern. Nachgerüstete Kernkraftwerke der Generation II sowie neue AKW der Generation III/IIIa bieten beste Sicherheit und haben Laufzeiten bis 60 Jahren. Auch „Small

³² Aufstellung *bmu*.

³³ Vgl. gemeinsame Pressemitteilung *bmu* mit *BM-Wirtschaft u. Klimaschutz*, Nr. 140/22, „Nukleare Sicherheit“.

³⁴ *Verivox*, „Kernenergie“; <https://www.verivox.de/strom/themen/kernenergie/>; Aufruf: 15.2.2023.

³⁵ Besteht bisher nur im Labor, sagt *Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung*. Aber in *Belgien* wird milliardenteurer Prototyp gebaut, auch *Großbritannien* sieht eine Perspektive darin. Die Hoffnung ist, die Lagerungszeit von 300.000 Jahren zu verkürzen auf 300 Jahre und auch die Menge zu reduzieren – vgl. *tagesschau.de* v. 4.9.2022 „Löst Transmutation das Atommüll-Problem?“ von *Michael Grytz*. Vgl. auch *Klaus Stratmann*, in: *Handelsblatt* v. 25.11.2022 „Ein neues Verfahren könnte Atommüll harmloser machen - und die Suche nach Endlagern vereinfachen“.

Modular Reactors“, mit denen Kernkraftwerke „nach unten skaliert“ werden könnten, seien eine gute Möglichkeit.³⁶ Die Abhängigkeit vom *Stromimport* aus anderen Ländern würde verringert/beseitigt. Insbes. im Winter wird nach jetzigem Stand dieser Import=*Auslandsabhängigkeit* mangels eigenen Atomstroms jedoch noch lange nötig sein - Problem dabei: Auch die Atomstrom liefernden Staaten stehen vor dem Problem, fossile Energie zu ersetzen, ihre *Lieferfähigkeit* ist daher fraglich und damit die Versorgungssituation in Deutschland gefährdet.³⁷

Ein besonderer Streitpunkt ist Wasserstoff, der mit Hilfe von aus Kernenergie gewonnenem Strom hergestellt wird. In der *EU* wollen etwa *Frankreich, Tschechien, Polen, Ungarn* - insgesamt acht Staaten – dass ein solcher Wasserstoff als „grün“ und damit als umweltfreundlich eingestuft wird. Die Deutsche „Ampel-Regierung“ ist darüber zerstritten – eine Enthaltung der deutschen Regierung in *Brüssel* würde einen entsprechenden Beschluss nicht hindern.³⁸

- **Gegner:** Es bestehen viele Gefahren für Mensch und Umwelt; Probleme ergeben sich bei Verarbeitung, bei Transport und Lagerung von radioaktivem Abfall; Gefahr von Lieferung an Terroristen; Gesundheitsrisiken, Gefahren durch Uranabbau. Hauptproblem sei Unwirtschaftlichkeit verglichen mit schnell günstiger werdenden Windkraft-Anlagen und Photovoltaik-Anlagen, die sich dezentral und viel schneller errichten und installieren lassen. Fehlfunktionen und Fehlbedienung seien auf Dauer unvermeidlich. Risiken seien durch Fortentwicklung von Reaktoren nicht vollständig auszuräumen; berücksichtige man die ganze *Kette vom Uranabbau bis zur Endlagerung* und dem Rückbau der einzelnen Kernkraftwerke, sei Kernenergie weder eine CO₂-neutrale noch wirtschaftliche Energiequelle. Außerdem sei nuklearer Uranbrennstoff begrenzt und bedeute *Abhängigkeit von Uranlieferländern* (**Anm:** Was ist bei Windkraft/Photovoltaik mit Abhängigkeit von im Ausland bezogenen Stoffen und Hilfstechniken wie Chips?) Das Potential von „Small Modular Reactors“ wird bezweifelt.
- **Erneuerbare Energien contra Kernenergie:** Die Notwendigkeit des Ausbaus erneuerbarer Energie ist unstrittig.
Aber: Der komplette Ersatz aller fossilen Energie fraglich – dazu wären nötig: *massive Subventionen* und *Raumplanung für sehr schnellen Ausbau*. Zudem: Mit größerem Anteil der Erneuerbaren wird auch der Anteil an *unregelmäßiger Einspeisung* (Sonne ungleichmäßig, Wind unterschiedlich) immer umfangreicher. Daher braucht es neue *Speicher- und Regelkapazitäten*. Und: *Speicherung* verursacht auch CO₂.
Graue Energie: Es gibt keine CO₂-freie Energie, denn *Materialinvestitionen* sind überall erforderlich.
Kosten: Am ehesten vergleichbar mit Atomenergie ist Photovoltaik. Neues AKW mit 1 GW Leistung würde ca. 8 Mrd. (Franken!) kosten; vergleichbare Jahreserzeugung durch Photovoltaik (*schwankende Lieferung*, insbes. im Winter!) sind 8 GW zu

³⁶ Small Modular Reactor (SMR) - kleiner Reaktor, der in einer Fabrik hergestellt und dann zum Montageort verbracht werden kann – geringerer Aufwand, höhere Sicherheit, geringere Kosten. Es gibt verschiedene Entwürfe für SMR. Das Bundesamt hat 31 Konzepte analysiert (im Auftrag *Öko-Institut*).

³⁷ So *Eduard Kerner*, ehem. Direktor des Bundesamts für Energie (Schweiz), in: *WWarum, die Kernenergie sinnvoll ist und nötig bleibt*“; Nuklearforum Schweiz. 15.7.2022.

³⁸ *FAZ, Wirtschaft*, v.22.02.2023: „Lindner – Kein Berliner Nein zu Wasserstoff aus Atomstrom“. Siehe auch *FAZ, Politik*, v. 22.02.2023: „Rot-grüne Dogmen“.

installieren, Kosten ca. 12 Mrd. (Franken), *zusätzlich* sei teure Regulierung und Speicherung.

Investitionsbereitschaft: Bei Kernenergie Zurückhaltung der Elektrizitätswirtschaft, u.a. wegen erwartetem *Widerstand* und überlangen *Bewilligungsverfahren*. Gäbe es Subventionen wie bei Erneuerbaren, wäre die Bereitschaft größer.

Zeitbedarf für Neubau:

a) AKW mit 4 TWh 14 Jahre: Genehmigung, Baubeginn, Bauzeit, Betriebserlaubnis – bei Investitionsbereitschaft der Elektrizitätswirtschaft.

b) Photovoltaik mit 13 GW: Flächenbedarf ca. 65 Quadratkilometer und 3,7-fache Menge der bisher gebauten Anlagen, Bauzeit etwa wie bei AKW.

c) Aber: In Wintermonaten bei Photovoltaik trotzdem Engpass!

Auslandsabhängigkeit: Europas Solarbranche ist nahezu vollständig abhängig von Lieferungen aus China. Peking droht neuerdings mit Exportbeschränkungen und liefert neuerdings keine Anlagen mehr, die zur Herstellung von Photovoltaikmodulen erforderlich sind.

Gaskraftwerke als Zusatz: Gas – wie Öl – kommt überwiegend aus autoritären Staaten, Uran ist dagegen auch aus westlichen Staaten beziehbar und Brennelemente jahrelang lagerbar.

Raumplanung: Sie kommt nicht voran!

Seltsame Widersprüchlichkeit: Während in *Deutschland* Atomkraftwerke abgeschaltet werden, ist es in *Schweden* über das - wegen drohender Insolvenz verstaatlichte - deutsche Unternehmen *Uniper* an drei profitablen Atomanlagen beteiligt: mit Mehrheitsbeteiligung am Atommeiler Oskarshamn 3 sowie mit Minderheitsbeteiligungen jeweils an den Atomkraftwerken Forsmark und Ringhals.³⁹

Fortsetzung des Betriebs eines abgeschalteten AKW⁴⁰

- Die Fortsetzung – genauer: die Wiederinbetriebnahme - eines abgeschalteten Atomkraftwerks kann nicht „von heute auf morgen“ erfolgen. Es muss dafür ein umfangreicher Prozess in Gang gesetzt werden. Die Bestellung und Lieferung **neuer Brennelemente** für die Fortsetzung des Leistungsbetriebs würde ca. 1 Jahr dauern. – Da nach der Abschaltung viele bisherige Mitarbeiter gegangen sind, müsste eine **neue Mannschaft angelernt** werden. Die Teilnehmer müssten Fachkundenachweise erwerben. Um verantwortlich einen Atommeiler betreiben zu können, bedarf es einer Ausbildung von ca. 3 ½ Jahren.

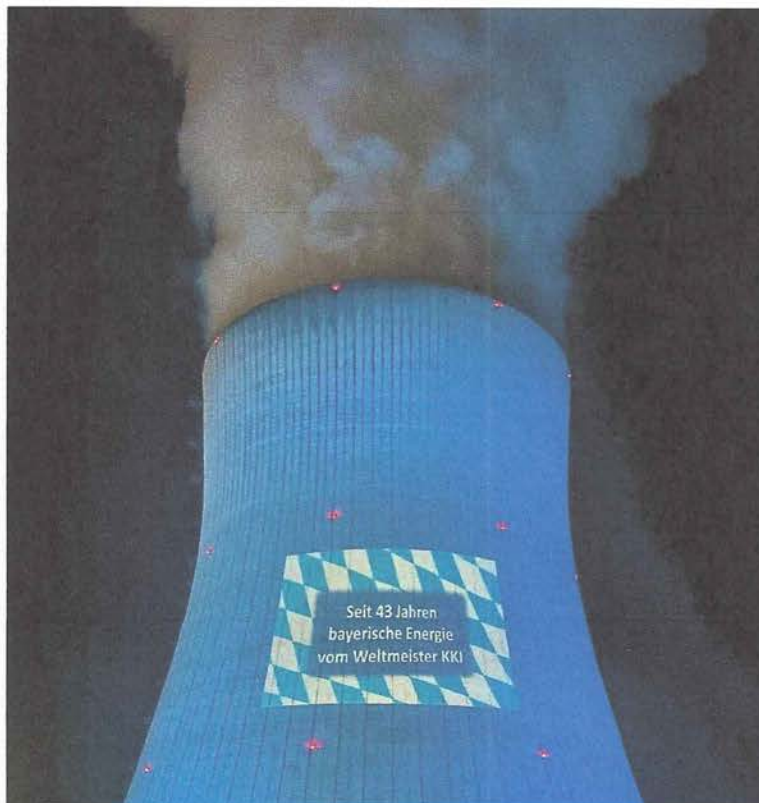
- Es müsste eine **neue „periodische Sicherheitsüberprüfung - PSÜ“** stattfinden; sie dauert idR mehrere Jahre. Denn diese PSÜ ist viel umfangreicher als die „**Wiederkehrende Prüfung – WKP**“: Diese überprüft nur die Einhaltung der geltenden technischen Anforderungen, die PSÜ dagegen prüft auch, ob sich aus dem Erkenntnisfortschritt weitere Sicherheitsanforderungen ergeben und wie eine Nachrüstung erfolgen kann – diese Nachrüstung dauert üblicherweise mehrere Jahre. - Für die drei AKW Emsland, Neckarwestheim 2 und Isar 2 fand die **letzte PSÜ im Jahr 2009** statt. Auf eine weitere PSÜ wird jedoch verzichtet, wenn der Betreiber zusichert, das AKW definitiv **3 Jahren nach der letzten vorgesehene PSÜ** abzuschalten. Dies wäre der **31.12.2022** gewesen.

³⁹ FAS, *Wirtschaft*, v. 19.02.2023: „Von wegen Atomausstieg“.

⁴⁰ BmVU: AKW-Laufzeitverlängerung

Fortsetzung Betrieb Isar 2⁴¹

- **Isar 1:** Der Block 1 (= Isar 1) wurde erstmals 1979 in Betrieb genommen; im März 2011 wurde er – mit insgesamt sieben anderen Atomkraftwerken – im Rahmen des Atomausstiegs abgeschaltet.
- **Stilllegungs- und Rückbaugenehmigung** erfolgte im Januar 2017 = nach 6 Jahren!
- **Isar 2:** Der Block 2 (= Isar 2), ein Druckwasserreaktor, wurde 1988 in Betrieb genommen, er sollte 2022 abgeschaltet werden, seine Laufzeit wurde nun jedoch im Atomkompromiss Ende 2022 bis *15.04.2023 verlängert* – er läuft nunmehr bis zu diesem Termin im sog. **Streckbetrieb**: Mit den bereits im Reaktordruckbehälter befindlichen Brennelementen wird Strom erzeugt, wobei die Leistung der Anlage langsam sinkt. Damit kann das Kernkraftwerk Isar 2 (KKI 2) rund 2 Milliarden Kilowattstunden Strom ins Netz einspeisen und so eine kritische Versorgungssituation abmildern.
- Bei Abschaltung Mitte April 2023 war Isar 2 rund 44 Jahre in Betrieb. Kernkraftwerke sind jedoch nach ihrer technischen Auslegung **keine „Reservekraftwerke“, die variabel an- und abgeschaltete werden können**. Daher brauchen sie Planungssicherheit – sie sind wie Riesentanker, man kann mit ihnen nicht auf hoher See einfach einen 90-Grad-Winkel hinlegen (so **Carsten Müller**, Werksleiter Isar 2).



Verabschiedung von Isar 2 für seine Mitarbeiter und die Region.

⁴¹ Vgl. *Preussen Elektra*, Kernkraftwerk Isar, <https://www.preussenelektra.de/de/unsere-kraftwerke/kraftwerkisar.html>; Aufruf: 24.02.2023.

Zwischenlager

Die Entsorgung von hochradioaktiven Brennelementen erfolgt in **Deutschland nur in „Zwischenlagern“ und „Versuchslager“**, z.B. **Schachanlage Asse**. Es gibt derzeit **16 Standorte**, in denen Abfälle oberirdisch - und nicht ausreichend gesichert - lagern.⁴²

*Standorte der Zwischenlager:*⁴³

zentrale Zwischenlager: Gorleben und Ahaus,

dezentrale Zwischenlager: die 12 Zwischenlager, die Anfang 2000 durch die Energieunternehmen *an den Atomkraftwerken* errichtet wurden,

Zwischenlager Jülich und Lubmin haben eine Sonderstellung – sie liegen zwar nahe bei Atomkraftwerken, wurden jedoch nicht von den Unternehmen und bereits vor dem Jahr 2000 errichtet.

Insgesamt also: **16 Zwischenlager**

Endlager-Problem in Deutschland: nicht gelöst (s.u.).

Schweiz: Endlagerstätte „Nördlich Lägern“, bei deutscher Grenze beim Ort Hohentengen.

Endlager

Ausländische Stimmen:

Einerseits - Laurie Swami, Präsidentin und CEO *der Kanadischen Nuclear Waste Management Organization*:⁴⁴ Klimakrise und Krieg in der Ukraine hätten die Notwendigkeit verstärkt, den Einsatz fossiler Brennstoffe (insbes. Gas und Öl aus *Russland*) zu reduzieren. Selbst Länder, die bisher auf Kernenergie verzichtet hätten, würden nun die Kernenergie als Weg zur Netto-Null-Emission als bedeutend ansehen. Es sei daher an der Zeit, die Wahrnehmung, die Atomindustrie habe ein „Abfallproblem“, zu ändern. Es sei die Wahrheit, dass Käufer Kernbrennstoff in Zwischenlagern auf der ganzen Welt sicher und verantwortungsbewusst handhaben. In *Kanada* habe eine neue Ära der Entsorgung nuklearer Abfälle in *Tiefenlagern* begonnen, dies sei ein globales Modell.

Schon 2018 habe der IPCC-Bericht (*International Panel on Climate Change*) eine schnelle dreifache Steigerung der globalen Kernstromerzeugung gefordert, damit das Klima bis 2050 nicht um mehr als 1,5 Grad steigt. Dieses Ziel könne *nur durch den Bau neuer Kernreaktoren* erreicht werden. Es bestehe wissenschaftlicher Konsens, dass die *geologische Tiefenlagerung der beste Weg* sei für einen Hunderttausende Jahre sicheren Umgang mit gebrauchtem Kernbrennstoff.

Dies sei nicht nur eine theoretische Lösung, es bestünden und entstünden Tiefenlager in *Finnland* (auf der Insel Olkiluoto); in *Schweden* sei die Genehmigung erteilt worden für ein Endlager bei der Gemeinde Östhammar; in der *Schweiz* sei ein Standort für ein Endlager ausgewählt worden bei Lägern; in *Frankreich* sei die Baugenehmigung erteilt worden für ein Tiefenlager in Meuse/Haut-Marne; auch in *Kanada* würde eine Entsorgungsplan vorangetrieben, potentielle Standorte könnten im Nordwesten und im Süden von *Ontario* sein, bis

⁴² *Ausgestrahlt – gemeinsam gegen Atomkraft*: Standortsuche: Der Startschuss ist gefallen... das Ziel längst verfehlt.

⁴³ *Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung*.

⁴⁴ Siehe *Laurie Swami*, Standpunkt: Es ist an der Zeit, die Welt wissen zu lassen, dass wir Atommüll sicher entsorgen können, world nuclear news, 19.01.2023.

2024 sei ein Standort ausgewählt.

Regierungen auf der ganzen Welt würden die Kernenergie als *saubere Energie* betrachten, die geologischen Tiefenlager seien ein nachhaltiger Ansatz zur sicheren Lagerung gebrauchter Kernbrennstoffe über Jahrtausende hinweg.

Andererseits - US Nuclear Waste Technical Review Board, in einem Schreiben an den Kongress im April 2021: „Der Mangel an Fortschritten bei der Entwicklung und dem Betrieb eines geologischen Endlagers... behindert die damit verbundenen potenziellen Vorteile der Kernenergie als Teil einer kohlenstofffreien Zukunft zur Eindämmung des Klimawandels“. Wieder anders die **International Atomic Energy Association:** „Der flexible Betrieb von Kernkraftwerken ... unterstützte die Bedürfnisse der Netzbetreiber und demonstrierte die Fähigkeit der Kernenergie, sich in einem nachhaltigen Energiesystem der Zukunft zu integrieren.“

Insgesamt bestehe ein internationaler Konsens, dass hochradioaktiver Abfall endgültig *tief unter der Erde entsorgt* werden solle in geologischen Stätten, wo er bis weit in die Zukunft von Oberfläche und Atmosphäre abgeschirmt bleiben könne. Die Bemühungen etwa in *Schweden, Frankreich, Vereinigtem Königreich, Kanada* und der *Schweiz* befänden sich in einer *Endphase der Standortauswahl*. Regierung und Privatsektor bemühten sich, den Privatsektor, d.h. lokale Kommunen in zustimmungsbasierte Standortprozesse einzubeziehen – dies erfordere viel Zeit, *Kanada* habe fast 20 Jahre, *Finnland* 17 Jahre und *Schweden* fast 30 Jahre gebraucht, die Öffentlichkeit aufzuklären, bevor sie die geologischen Speicherstätten auswählten.⁴⁵

Deutschland:

Endlagersuche in Zahlen:

Es wird ein Endlager für 27.000 Kubikmeter hochradioaktiven Müll gesucht. Das Ziel ist ambitioniert, die Aufgabe gigantisch: In den nächsten Jahrzehnten soll innerhalb Deutschlands dafür ein Endlagerstandort gefunden werden - ein Standort, der die bestmögliche Sicherheit für **eine Million Jahre** bietet.⁴⁶

Regelungen:

Artikel 73 Abs. 1 Nr. 14 Grundgesetz: Der Bund hat die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz für die Entsorgung radioaktiver Stoffe.

- „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde hochradioaktive Abfälle (**Standortauswahlgesetz**)“ vom **23.07.2013**,

- **ersetzt durch**

„Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (**Standortauswahlgesetz**) vom **05.05.2017** (BGBl. 2017 I, S. 1074); zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom **07.12.2020** (BGBl. 2020 I, S. 2760).

§ 1 Zweck des Gesetzes,

Absatz 2 Satz 1:

Das **Standortauswahlverfahren** soll partizipativ,

⁴⁵ Jenny Johnson: Die nukleare Renaissance hängt von der Lösung des Abfallproblems ab“, chinadialogue – <https://chinadialogue.net/energy>.

⁴⁶ Zum Verfahren siehe *Bundesgesellschaft für Endlagerung* – Endlagersuche, Aufruf: 12.02.2023.

wissensbasiert,
transparent,
selbsthinterfragend und
lernend
sein.

Absatz 5

Satz 1: Das Standortauswahlverfahren ist **reversibel**.

Satz 2: Die Festlegung des Standortes wird für das Jahr **2031 angestrebt**.

§ 20 Absatz 2:

Über die Annahme des Standortvorschlags wird durch **Bundesgesetz** entschieden.

Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl sind geregelt in **§§ 22 ff.:**

- Ausschlusskriterien, § 22
- Mindestanforderungen, § 23
- Geowissenschaftliche Abwägungskriterien, § 24
- Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien, § 25
- Sicherheitsanforderungen, § 26
- Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, § 27

Ist-Stand: Unterscheide

- **Suche nach Endlager**

- **Inbetriebnahme des Endlagers**

Seit 2017 läuft die bundesweite Endlagersuche. Die hochradioaktiven Abfälle sollen tiefegeologisch in Salz-, Ton- oder Kristallingestein eingelagert werden.⁴⁷

Anfang 2023:⁴⁸

- Die Brennelemente landen derzeit in **Zwischenlagern**, die sich meist an den **Standorten der Atomkraftwerke** befinden (s.o.).

- **Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) - zur Endlagersuche:**⁴⁹

Veröffentlichung „Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE“ vom **16.12.2022**. Seite 10:

„**Zusammenfassung:** Die Endlagersuche in Deutschland ist ein **weltweit einzigartiges Projekt**. Das Endlager soll den sicheren Einschluss der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle für **eine Million Jahre** gewährleisten.“

Seite 10 weiter: Das Zeitziel **2031 ist unrealistisch**.

Beteiligte:

- 1) Endlagerkommission („Lagerung hoch radioaktiver Stoffe“)
- 2) Bundesamt für die nukleare Entsorgung (BASE)
- 3) Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE),
- 4) Nationales Begleitgremium (NBG) mit 4 Fachgruppen:
Fachgruppe I Öffentlichkeitsbeteiligung,

⁴⁷ Vgl. Fn. 16.

⁴⁸ Vgl. u.a. *tagesschau* 10.11.2022 „Zeitplan bis 2031 nicht haltbar“.

⁴⁹ *Bundesgesellschaft für Endlagersuche: Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE*, vom 16.12.2022.

Fachgruppe II Geologie & Grundlagendaten

Fachgruppe III Strahlenschutz & Sicherheit.

Fachgruppe IV Selbsthinterfragendes Verfahren & Institutionengeflecht

5) Bundesumweltministerium,

6) Staatlicher Geologischer Dienst (SGD),

7) Deutscher Bundestag

8) Öffentlichkeitsbeteiligung der Bürgerinnen u. Bürger/ Regionalkonferenzen⁵⁰

9) Gerichte

Zu beachten sind u.a.:

1) repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU),

2) Gebiete der Methodenentwicklung (GzME),

3) öffentliche Methodendiskussion,

4) geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK),

5) planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (planWK).

Zeitbedarf:⁵¹

- **Phase I: Erkundung** wie viele übertägige Standorte zu erkunden sind, etwa **bis 2027**

- **Phase II: übertägige Erkundung** ca. **10 – 12 Jahre**;

- **Phase III: untertägige Erkundung:**

a) nur mit Bohrungen: **5 bis 6 Jahre**,

b) mit Bergwerken bei Steinsalz **13 bis 21 Jahre**,

c) bei Tongestein und kristallinen Wirtsgestein **15 bis 23 Jahre**.

- **Der Zeitplan** für hochradioaktiven Atommüll **bis 2031 ist nicht haltbar**, die Suche dauert länger. Die *Bundesanstalt für Endlagersuche mbH (BGE)* teilte dies dem *Bundesumweltministerium* mit – der Grund seien die „hohen Anforderungen an die Auswahl des Standortes“; der Sprecher des Ministeriums sagt: „**Dem Grundsatz der bestmöglichen Sicherheit haben sich auch Zeitvorgaben unterzuordnen, gleichzeitig darf das Ziel nicht aus dem Blick geraten.**“

- **BGE, Herbst 2020** - Zwischenbericht Teilgebiete: **90 Gebiete in Deutschland sind geologisch günstig für die Endlagerung.**⁵² Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) erfolgen nun für **alle 90 Gebiete**; **4 Gebiete dienen zur Methodenentwicklung** – die Methoden sollen umfassend auch **öffentlich diskutiert** werden.

- **BGE: Standortentscheidung** fällt statt 2031 frühestens erst in den **2040er Jahren**

- Die **BGE** prognostiziert als **günstigstes Szenario 2046** – in einer zweiten Alternative sogar erst **2068**⁵³ (**Anm.:** das wären **37 Jahre später als geplant!**)

⁵⁰ Vgl. „Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche - Herausforderungen eines generationenübergreifenden, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens“, *Öko-Institut* im Auftrag des *Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung*, Berlin, Mai 2021.

⁵¹ *BGE*, Zeitliche Betrachtung... , v. 16.12.2022, S. 12.

⁵² *BGE*: Endlagersuche

⁵³ Berechnung der *BGE*, Bericht: Atommüll-Endlager kommt frühestens 2046 – oder sogar erst 2068.

- **Inbetriebnahme: Ab 2050** sollte dann das Endlager **in Betrieb gehen**.
- Die „**Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)**“ veröffentlichte am 28.09.2020 eine **Landkarte** mit aus ihrer Sicht günstigen geologischen **Voraussetzungen für sichere Endlager**. Dort werde in den nächsten Jahren nach einem **Endlager-Standort gesucht**.⁵⁴

Schachtanlage Asse II

- Die Schachtanlage liegt im Landkreis Wolfenbüttel in Niedersachsen.
- Es lagern dort rund 47.000 Kubikmeter *schwach-bis mittelradioaktive* Abfälle.
- *Hochradioaktive Abfälle sind nicht dabei.*
- Die *Langzeitsicherheit* ist nach heutigem Kenntnisstand *nicht nachgewiesen*.
- Im **Jahr 2013** wurde die Rückholung *gesetzlicher* Auftrag, **§ 57b AtomG**..
- Im Jahr 2020 legte die *BGE* ihren Rückholplan vor.
- Nach der Rückholung soll das Bergwerk stillgelegt werden.
- Mit der Rückholung sind eine große Zahl Akteure befasst wie BMUV, BASE, BGE, Niedersächs. Umweltministerium, Landesamt für Bergbau etc. etc.
- Bisher besteht in Deutschland *kein annahmefähiges Endlager* für die Asse-II-Abfälle.
- Wegen der Risiken dort kann jedoch mit der Rückholung nicht gewartet werden.
- **Daher werden die radioaktiven Abfälle so lange in geeigneten Einrichtungen an der Tagesoberfläche zwischengelagert**, bis sie in ein Endlager abgegeben werden können.
(Anm.: das ist also etwa im **Jahr 2068??**)

Schachtanlage Konrad⁵⁵

- Die Schachtanlage Konrad liegt im niedersächsischen Salzgitter.
- Seit 1964 erfolgte dort Eisenerzabbau, 1976 bereits beendet, weil unwirtschaftlich.
- Dann Untersuchungen ob geeignet als **Endlager für schwach- u. mittelradioaktive Abfälle**.
- Geeignetheit wird nach wissenschaftlichen Untersuchungen bejaht.
- Anlage Konrad wird zum **ersten Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle**
- **2027 Beginn der Einlagerung** geplant, bis zu 303.000 Kubikmeter radioaktiver Abfälle.
- **Derzeit lagern diese Abfälle noch oberirdisch in Zwischenlagern u. Landessammelstellen.**
- Übersicht der BZG: **derzeit 16 Zwischenlager**, von Ahaus bis Würgassen.

Erfurt, 24.02.2023



(Prof. Dr. Wolfram Eberbach)

⁵⁴ Karte der *BGE* in der **Anlage**.

⁵⁵ *BGE*: Endlager Konrad für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle – Kurz zusammengefasst.