

# **Reversibilität im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle**

## **Begriffsbestimmung und Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes von Reversibilität**

---

*Melanie Mbah, Bettina Brohmann, Saleem Chaudry, Roman Seidl*

### **Zusammenfassung**

*Ein Kriterium für Reversibilität ist, dass Fehlentscheidungen, die zu unerwünschten Ergebnissen führen könnten, entweder nicht getroffen werden sollten oder aber zumindest revidierbar sein sollten. Hintergrund ist, dass die Komplexität technologischer Infrastrukturen und gesellschaftlicher Anforderungen zugenommen und die Streuung und Genese neuer Information und neuen Wissens sich beschleunigt haben, sodass insbesondere langfristige Projekte einen zeitlichen Wandel der Rahmenbedingungen zu berücksichtigen im Stande sein müssen. Aus diesem Grund wird zunehmend die Reversibilität von Planungs- und Entscheidungsprozessen gefordert, wie auch im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Zu dem gesetzlich verankerten Anspruch nach Reversibilität im Standortauswahlverfahren (StandAG 2017, §2) sind darüber hinaus Ansprüche an ein reversibles Entsorgungssystem insgesamt zu berücksichtigen, die auf dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe aus dem Jahr 2016 basieren. Ein Konzept dafür, wie reversible Planungs- und Entscheidungsprozesse gewährleistet werden können, gibt es bislang nicht. Der vorliegende Beitrag diskutiert den Begriff der Reversibilität zunächst aus der Perspektive unterschiedlicher Disziplinen, um diesen dann in den Entsorgungskontext zu stellen und einen ersten konzeptionellen Ansatz von Reversibilität im Entsorgungssystem herauszuarbeiten.<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dieser Text ist am Öko-Institut e.V. im Rahmen des Projektes »Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle – SOTEC-radio« entstanden, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) von 2017 bis 2020 gefördert wird (FK 02E11547A). Dort ist er dem Arbeitspaket 3.1 »Bestehende Konzepte für und Erfahrungen mit reversiblen Prozessen« zugeordnet.

## Einleitung

Reversibilität ist in der heutigen Debatte um die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ein zentrales Schlagwort. Dies hat zwei Gründe: Erstens sollten Fehlentscheidungen, welche zu unerwünschten Entwicklungen oder Fehlfunktionen der Entsorgungsinfrastrukturen führen, revidiert werden können. Zweitens fordern Bürger\*innen in vielen demokratischen Systemen bei der Errichtung komplexer Infrastrukturen deliberative Elemente in der Politikgestaltung<sup>2</sup> und die Möglichkeit, rasch und flexibel auf veränderte gesellschaftliche Rahmenbedingungen oder auf neue Forschungserkenntnisse reagieren zu können. Vor diesem Hintergrund werden Ansprüche an den Umbau und die Umkehrbarkeit von Prozessen und Entscheidungen formuliert, die eine Überprüfbarkeit und Anpassungsfähigkeit von Planungs- und Entscheidungsprozessen voraussetzen. In den aktuellen nationalen und internationalen Debatten zum Umgang mit komplexen, risikobezogenen Infrastrukturen oder risikobehafteten Situationen, wie sie in der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle stattfinden, ist Reversibilität ein zentraler, jedoch in diesem Kontext wenig ausgearbeiteter Schlüsselbegriff (Bornemann/Saretzki 2018; Dörner 2011). In den Naturwissenschaften sind Reversibilität bzw. Irreversibilität von Prozessen und Zuständen geläufige Begriffe, die zwar auch in andere Wissenschaften und Bereiche Eingang fanden, jedoch eine mehr oder weniger ausdifferenzierte Detailtiefe erreicht haben.

Nachfolgend gilt es daher zu klären, welches Verständnis von Reversibilität im Zusammenhang von Planungs- und Entscheidungsprozessen im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland zugrunde zu legen ist und welche Möglichkeiten und Herausforderungen sich daraus für die Ausgestaltung von Entscheidungsprozessen ableiten lassen. In Deutschland hat das Konzept der Reversibilität insbesondere aufgrund der Empfehlungen der Endlagerkommission eine zentrale Bedeutung gewonnen.

Es bleibt jedoch bisher in den einschlägigen Regelwerken zum deutschen Entsorgungssystem<sup>3</sup>, wie bspw. dem StandAG (2017), noch recht unscharf und weist damit auf

- 
- 2 Hiermit ist gemeint, dass verschiedene Perspektiven durch öffentliche Beratungen eingebracht werden. Formate von öffentlichen Beratungen sollten idealerweise macht- und herrschaftsfrei sein und jegliche Zwänge vermeiden sowie den gleichen Zugang für alle Interessierten und potenziell Betroffenen ermöglichen, um einen Austausch von Argumenten auf Augenhöhe zu gewährleisten (siehe Habermas 1998).
  - 3 Für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle sind das in Deutschland im Wesentlichen: Das Atomgesetz (AtG), das Standortauswahlgesetz (StandAG), die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmentwickelnder radioaktiver Abfälle des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 30.9.2010, beziehungsweise Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6.10.2020 sowie das nationale Entsorgungsprogramm vom August 2015 und der Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle vom 5.7.2016. Im nationalen Entsorgungsprogramm und dem AtG werden die Begriffe Reversibilität und Bergbarkeit bzw. Bergung nicht verwendet. Rückholung spielt nur im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II eine Rolle, aber die Begriffe erfahren in diesen beiden Werken keine Definition. Daher wird auf diese beiden Regelwerke nicht weiter Bezug genommen.

einen Konkretisierungsbedarf hin. Festzuhalten ist, dass das StandAG<sup>4</sup> nur den Auswahlprozess für den Endlagerstandort regelt, nicht jedoch die nachfolgenden Etappen Errichtung, Einlagerungsbetrieb und Verschluss sowie die Zeit nach Verschluss eines Endlagers, wie das im Bericht der Endlagerkommission angelegt war (Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016).

Für die Frage nach der Reversibilität der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle muss das gesamte Entsorgungssystem in den Blick genommen werden. Es müssen folglich sehr lange Zeiträume betrachtet werden, mit stetig ansteigendem finanziellem Aufwand und zunehmender technischer Artefaktschaffung in von Ungewissheiten geprägten Kontexten, insbesondere hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen, die neue Bewertungen erforderlich machen können. Aus diesem Grund können die Dimensionen Zeit, Kosten und Bewertung als zentral für Reversibilität angesehen werden.

In diesem Beitrag werden erstens verschiedene disziplinäre Perspektiven auf Reversibilität beleuchtet und zweitens ein Verständnis von Reversibilität im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle entwickelt. Drittens werden mit der Forderung nach Reversibilität verbundene Herausforderungen benannt sowie Voraussetzungen am Beispiel der Entsorgung radioaktiver Abfälle abgeleitet, die erfüllt sein müssen, um Entscheidungsprozesse reversibel gestalten zu können.

## **Reversibilität in unterschiedlichen disziplinären Kontexten**

Der Begriff der Reversibilität hat zwar seinen Ursprung in den Naturwissenschaften, ist aber auch in anderen Disziplinen gebräuchlich, jedoch mit durchaus verschiedenen Bedeutungen und Interpretationsweisen. Reversibilität bzw. das Adjektiv reversibel (von lateinisch *reversus*, umgekehrt) bezeichnet in der Physik eine umkehrbare thermodynamische Zustandsänderung (sog. reversibler Prozess<sup>5</sup>). Physikalische Prozesse, bei denen der Ausgangszustand nur unter Energieverlust wiederhergestellt werden kann, werden als irreversibel bezeichnet. In der Chemie werden Reaktionen zwischen Stoffen als Gleichgewichtsreaktionen beschrieben, wenn dabei Prozesse vorwärts und rückwärts zugleich ablaufen, aber nicht in einem Endzustand münden. Man spricht von einem umkehrbaren Vorgang bzw. einer reversiblen Reaktion<sup>6</sup>. Vor diesem Hintergrund

4 Mit dem StandAG (2013) wurde in Deutschland erstmals in einem Gesetz der Auswahlprozess für einen Endlagerstandort geregelt. Die Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (2014-2016) nimmt in ihrem Abschlussbericht von 2016 (S. 235-236) auf die verschiedenen Begrifflichkeiten Bezug, definiert diese und gibt teilweise Hinweise zu deren konkreten Ausgestaltung. Mit der Novellierung des StandAG (2017) wurde in Teilen den Empfehlungen der Kommission gefolgt. Das Standortauswahlgesetz (2017) schließlich enthält einen eigenen Paragraphen mit Begriffsbestimmungen. Darin enthalten sind ebenfalls Rückholbarkeit, Bergung und Reversibilität. Die jeweils unterschiedlichen Definitionen werden in den Tabellen 1 bis 3 einander gegenübergestellt.

5 [www.idn.uni-bremen.de/cvpm/content/wkm/show.php?modul=13Dr&file=15&right=reversibel.html](http://www.idn.uni-bremen.de/cvpm/content/wkm/show.php?modul=13Dr&file=15&right=reversibel.html)

6 <https://de.wikipedia.org/wiki/Reversibilität> und <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/reversibel/7953>

sind technische und natürliche Prozesse als irreversible Prozesse zu bezeichnen, da eine Wiederherstellung des Ausgangszustands ohne (Energie)Verlust, insbesondere bei technischen Prozessen (bspw. bei der Errichtung von Bauwerken), nicht möglich ist. Auch natürliche Prozesse, also spontan von allein ablaufende Prozesse, verlaufen nie streng reversibel, d.h. sie bleiben nicht immer in einem Gleichgewichtszustand, sondern können beispielsweise kurzfristig irreversible Zwischenzustände aufweisen.

Einen fachlich gänzlich anderen, aber für die Dimensionen Zeit, Kosten und Bewertung gleichermaßen interessanten Zugang zum Konzept der Reversibilität bietet der Bereich der Denkmalpflege. Hier spielt Reversibilität eine Rolle, wenn es darum geht, eine an einem Baudenkmal vorgenommene Reparatur bzw. Ergänzung wieder rückgängig zu machen (z.B. weil sie fehlerhaft ausgeführt wurde, oder historisch falsch ist) (Althaus 1992). Das kann mit gewissen Kosten verbunden und mehr oder weniger rückstandsfrei – z.B. von Reinigungsmitteln, bei der Reinigung historischer Fassaden – möglich sein. Dabei ist die Frage, ob ein Objekt von einem Zustand direkt in einem Schritt oder über mehrere Zwischenschritte in den Ursprungszustand versetzt werden kann – oder überhaupt nicht, in welchem Fall die vorgenommene Reparatur/Ergänzung irreversibel wäre.

Wie Franck/Wegener (2002: 21) für die Stadtentwicklung zeigen, implizieren bauliche Veränderungen oft eine praktische Unumkehrbarkeit. Sie identifizieren dabei zwei Faktoren: Kosten (Kapitalinvestitionen) und privates Grundeigentum (also private Infrastruktur). Insbesondere Verkehrsinfrastrukturen können sehr beständig sein, beispielsweise wurden Städte in der Regel selbst nach deren Zerstörung wieder mit denselben räumlichen Strukturen aufgebaut. Franck/Wegener (2002: 20ff.) erklären dies mit den großen Kapitalinvestitionen für Infrastrukturen wie bspw. Kanäle, Eisenbahnen und Straßen sowie der erschwerten Änderung von Wegerechten und Flächennutzungen bei der Trennung öffentlichen und privaten Grundeigentums. Bauliche Infrastruktur kann folglich relativ irreversibel sein und die Grundstruktur, die diese im Raum schafft, lässt sich nur unter hohem Aufwand ändern. Auch mit einem Entsorgungsbergwerk wird eine irreversible Infrastruktur geschaffen, die zwar unter hohen Kosten und hohem Aufwand, bspw. durch den Versatz von Strecken und Kammern sowie dem Verschluss des Bergwerks, dem geologischen Ausgangszustand nachempfunden werden kann, jedoch diesen nicht ohne Störung desselben wiederherzustellen vermag (siehe Mbah 2016).

Dies bedeutet, dass potenziell irreversible Entscheidungen zum Zeitpunkt  $t_0$  sich dadurch auszeichnen, dass die Handlungsoptionen, die zum Zeitpunkt  $t_0$  bestanden, nach der Entscheidung zum Zeitpunkt  $t_{+1}$  nicht mehr bestehen. Durch Kosten und Pfadabhängigkeiten können ökonomische Irreversibilitäten geschaffen werden, beispielsweise durch den Verlust von Kapitalinvestitionen, die nicht umkehrbar sind (David 2007: 101). Ökonomische Irreversibilitäten sind zu differenzieren in technische und dynamische. Als technische Irreversibilitäten werden Systemveränderungen bezeichnet, die nicht wiederherstellbar sind (z.B. das Aufbrauchen nicht erneuerbarer Ressourcen) (Herold/Ahrens 2011; Kroll 1996). Dynamische Irreversibilität meint, dass ein anderer Weg eingeschlagen werden muss, um einen Ausgangszustand wieder zu erreichen. Denselben Pfad zurückzugehen, entspräche der Unmöglichkeit einer zeitlichen Umkehr. Aus ökonomischer Perspektive sind Prozesse folglich dann reversibel,

wenn sie über die Zeit umkehrbar und der Ausgangszustand wieder herstellbar ist, wobei immer dynamische Irreversibilitäten wirken (Herold/Ahrens 2011). Andrae (2017: 18) bezeichnet solche ökonomischen Irreversibilitäten, die aufgrund von politischen Entscheidungen in Transformationsprozessen (bspw. Währungsreformen, Übergang von Zentralverwaltungs- zu Marktwirtschaft, oder kapitalintensive Großprojekte und deren Interdependenzen) entstehen, als »faktische Irreversibilität«. Ein solch kapitalintensives Großprojekt mit zahlreichen Interdependenzen, das Teil eines Transformationsprozesses ist, ist nach Andrae (2017) auch das Bahnhofsprojekt »Stuttgart 21«. Hier kann der Bahnhof nur unter hohem Kapitaleinsatz umgebaut werden und der Umbau impliziert eine faktische Irreversibilität, da der neue Bahnhof in der Nutzung zwar weitestgehend äquivalent sein wird, nicht jedoch im äußeren Erscheinungsbild, der Architektur. Selbst bei originalgetreuem Wiederaufbau sind Veränderungen sichtbar und unumkehrbar.

Durch Infrastrukturmaßnahmen werden grundsätzlich technologische Artefakte<sup>7</sup> geschaffen, welche Folgen erzeugen, d.h. neben Kosten und Umwelteinwirkungen können diese auch soziale Nebenfolgen haben (bspw. in Bezug auf Arbeitsplätze, Lebensqualität etc.). Eine vollständige Umkehr in den Ausgangszustand müsste folglich auch diese (Neben-)Folgen rückgängig machen, dies ist jedoch in vielen Fällen unmöglich. In Ausnahmen ist eine Abmilderung solcher (Neben-)Folgen durch den Einsatz von Technik möglich, wie beispielsweise bei Entsorgungsbergwerken, durch geotechnische Barrieren (Versatz und Verschluss) oder im Fall sozialer (Neben-)Folgen durch politische Maßnahmen (siehe Mbah 2016).

Neben baulichen Maßnahmen und dem Einsatz von Technik sollten auch soziale, gesellschaftliche und psychologische Faktoren unter der Prämisse der Reversibilität betrachtet werden. Es wird beispielsweise betont, dass die Reputation von Einzelpersonen, Unternehmen, Behörden, Organisationen und Assoziationen durch negative Informationen vermindert oder zerstört werden kann. Dabei wirken negative Informationen relativ stärker auf einen Vertrauensverlust als positive vertrauensauffbauend wirken (Falcone/Castelfranchi 2001; Chryssochoidis et al. 2009). Zerstörtes Vertrauen wiederaufzubauen, ist ein sehr aufwändiger Prozess und oft gelingt es nicht, einen Zustand  $t_0$  wieder zu erreichen. Der Aufbau von Vertrauen erfordert eine Zusammenarbeit über längere Zeit und Vertrauensverlust ist nur teilweise als reversibel zu betrachten. Bei langjährigen Prozessen, wie der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, insbesondere mit einer so konfliktträchtigen Geschichte, in der schon viel Vertrauen zerstört wurde, zeigt sich dies deutlich. Behörden und Politik haben das Vertrauen großer Teile der Bevölkerung verloren, welches sie nun über ein partizipatives, transparentes, reflexives und lernendes Verfahren versuchen, wiederaufzubauen.

Im hier untersuchten Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird Reversibilität, wie oben eingeführt, vor allem im Zusammenhang mit Entscheidungsprozes-

---

<sup>7</sup> Technologische Artefakte sind nach Ropohl (2009: 30ff.) alle vom Menschen geschaffenen künstlichen Gebilde sowie die menschlichen Handlungen und Einrichtungen, in denen solche Artefakte entstehen, inklusive der menschlichen Handlungen bei der Verwendung von Artefakten. In einem sozio-technischen System werden technische Artefakte, soziale und organisationale Elemente zusammengefasst betrachtet. Diese verknüpfte Betrachtung gibt Aufschluss darüber, ob eine Technologie in der geplanten Weise implementiert werden kann (siehe Weyer 2008: 37ff.).

sen betrachtet. Auch in den Politikwissenschaften hat der Begriff der Reversibilität eine wichtige Bedeutung, insbesondere in der politikwissenschaftlichen Demokratieforschung. Hier wird der Begriff Reversibilität auf politische Prozesse angewendet (Pickel 2010). Reversibilität bezieht sich auf den Optionenraum zur Lösung eines Problems. Wenn eine Politikoption in ihren Konsequenzen reversibel ist, »ohne dass Kosten anfallen, so bleibt der Optionenraum in der kurzen Frist unverändert [...]. Ist die gewählte Politikoption in ihren Konsequenzen strikt irreversibel, so verengt sich der Optionenraum in der kurzen Frist« (Andrae 2017: 17). Nach Guggenberger/Offe (1984) dürften Mehrheitsentscheidungen

»nur über solche Sachfragen [in] legitimer Weise getroffen werden, von denen angenommen werden kann, dass sie jedenfalls im Prinzip revidierbar, reversibel oder hinsichtlich ihrer potenziellen negativen Konsequenzen korrigierbar sind. Selbst aus noch so großen Mehrheiten könnte also nicht das Recht abgeleitet werden, für unabsehbare Zeit unumstößliche, vor allem in ihren Risiken und Bedrohungen nicht-revidierbare Tatsachen zu schaffen, welche dann naturgemäß die Entscheidungsfreiheit zukünftiger Mehrheiten mit anderen Präferenzen einschränken.« (Guggenberger/Offe 1984: 163).

Aus Perspektive der politikwissenschaftlichen Demokratieforschung sollten in einer Demokratie grundsätzlich nur Entscheidungen getroffen werden, die reversibel sind, um Pfadabhängigkeiten (siehe Beitrag Losada »Pfadabhängigkeiten in der Endlagerpolitik« in diesem Band) zu vermeiden<sup>8</sup> (Andrae 2017; Guggenberger/Offe 1984). Allerdings sieht die Realität häufig anders aus, denn in der Vergangenheit wurden immer wieder Pfadabhängigkeiten geschaffen. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung der Kernenergie, die Veränderungen im Sinne von Pfadabhängigkeiten bei der Energieinfrastruktur und dem Nachfrageverhalten nach Strom sowie der Produktentwicklung stromverbrauchender Geräte nach sich zog. Deren Nebenfolgen (z.B. die radioaktiven Abfälle und der Umgang mit diesen) wirken bis in die Gegenwart bzw. Zukunft. Allerdings bieten Entscheidungsprozesse in demokratischen Systemen mit deliberativen Möglichkeiten für Beteiligung und Aushandeln unter Einbezug der Öffentlichkeit grundsätzlich gute Voraussetzungen für reversible Verfahren. Solche deliberativen oder partizipativen Räume können sowohl Auslöser als auch Austragungsort für Expertendissens sein (siehe Beitrag Chaudry/Seidl »Expert\*innendissens und das reversible Verfahren der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle« in diesem Band). In deliberativen Foren und partizipativen Formaten können zudem früh eine Vielzahl an Meinungen und Interessen, aber auch Wissensformen<sup>9</sup> (z.B. Praxiswissen, Expertenwissen etc.) berücksichtigt werden. Dadurch können kritische Aspekte (zum Beispiel potenzielle (Neben-)Folgen) erst erkannt und einer Diskussion zugeführt werden. Partizipative Formate können zur gemeinsam-kollaborativen Lösungsausgestaltung beitragen oder

---

8 Entscheidungen sollten unter nicht zu hohem Aufwand revidierbar sein, damit die Gesellschaft unter anderen Mehrheiten oder gar späteren Generationen nicht ihrer Handlungsoptionen beraubt ist (Andrae 2017; Guggenberger/Offe 1984).

9 Siehe zu Wissensformen weiterführend zum Beispiel Matthiesen 2005.

zum Erkennen relevanter Erkenntnisdefizite, die beispielsweise zu einer Vergabe weiterführender Forschungsaufträge führen können. Partizipation und Deliberation sind folglich zentrale Stichworte, wenn Entscheidungsprozesse zu technischen Infrastrukturen reversibel ausgestaltet werden sollen.

Im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle haben Partizipation und das Konzept der Rückholbarkeit eine hohe Bedeutung, um die Reversibilität im Entsorgungsprozess zu gewährleisten. Hierbei setzt Partizipation zu einem frühen Zeitpunkt an, während der Standortauswahl, während Rückholbarkeit erst in der Betriebsphase nach der Errichtung des Entsorgungsbergwerks zum Tragen kommt und so auch zu einem bereits sehr fortgeschrittenen Stadium noch einen gewissen Grad von Reversibilität aufrecht erhalten soll. Partizipative Elemente des Standortauswahlverfahrens dienen dazu, dass nicht allein eine Bundestagsmehrheit die Entscheidung fällt, sondern schon im Vorhinein der interessierten Öffentlichkeit Raum für Mitgestaltung gegeben wird. Das Konzept der Rückholbarkeit<sup>10</sup> soll Reversibilität langfristig gewährleisten und soll mit dem Grundsatz der theoretischen Bergbarkeit über einen sehr langen Zeitraum aufrechterhalten werden (siehe Abschnitt »Terminologie des deutschen Entsorgungssystems«).

Reversibel sind Entscheidungen demnach nur solange, wie innerhalb eines zumutbaren Rahmens noch alternative Handlungsweisen gewählt werden können, also der Optionenraum noch nicht stark eingeschränkt ist, d.h. dass in einem zumutbaren Rahmen noch alternative Wege und Entscheidungen möglich sind. Dieser zumutbare Rahmen ist jeweils zwischen den institutionellen (staatlichen) und weiteren Akteuren (NGO, Unternehmen etc.) auszuhandeln. Damit sind Planungs- und Entscheidungsprozesse solange reversibel, wie mit als vertretbar ausgehandeltem Aufwand ein Umbau oder ein Umsteuern möglich sind. Voraussetzung ist eine regelmäßige Überprüfung, ob es einer Anpassung oder gar einer Umkehr bedarf, um ggf. früh umsteuern zu können und somit möglichst geringe Kosten zu verursachen. Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016: 29) schreibt im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II beispielsweise: »je später ein Fehler erkannt wird, desto teurer wird die Korrektur«. Frei von Kosten oder (Neben-)Folgen ist ein Umsteuern jedoch nie. Für die Überprüfung von Anpassungs- oder Umkehrbedarfen sind Planungen für langfristige Infrastrukturvorhaben folglich so anzulegen, dass diese auch fernere (potenziell mögliche) Zukünfte berücksichtigen (siehe Kuppler/Hocke 2019). Wie das für den Fall der tiefengeologischen Entsorgung radioaktiver Abfälle mit der Option der Rückholbarkeit inklusive des Standortauswahlverfahrens zu beurteilen ist, wird in den nachfolgenden Kapiteln vertieft betrachtet.

## **Reversibilität im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle**

Im deutschen Standortauswahlverfahren ist der Begriff der Reversibilität zentral (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016; StandAG 2017). Gleichzeitig bleibt bisher unklar, wie in diesem konkreten Fall Reversibilität zu verstehen

---

<sup>10</sup> Mit Rückholbarkeit ist die Rückholung der Endlagergebinde aus dem Bergwerk gemeint.

ist und vor allem wie die praktische Umsetzung erfolgen soll. Denn auch international bestehen bisher keine Erfahrungen mit der Umsetzung von Reversibilität im Entsorgungskontext. Der Begriff wird international insbesondere von der OECD/NEA näher ausgeführt und hat damit Eingang in nationale Programme zur Entsorgung radioaktiver Abfälle gefunden.

Die Definition und Verwendung von Begrifflichkeiten (wie Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit) sowie die konkrete Ausgestaltung des Entsorgungssystems<sup>11</sup> und dessen Umsetzung auf nationaler Ebene sind sehr verschieden. Die stufenweise oder phasenweise Prozessgestaltung ist jedoch in allen nationalen Konzepten berücksichtigt, wenngleich die Schwerpunkte unterschiedlich gesetzt werden.

Die OECD/NEA (2001: 11, 2012: 8) definiert Reversibilität als die Möglichkeit, Entscheidungen während des Implementierungsprozesses eines Endlagers rückgängig zu machen. Voraussetzung dafür ist, dass in den jeweiligen Prozessphasen reflektiert und evaluiert wird sowie entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um einen Rücksprung bzw. eine Umkehr zu ermöglichen (OECD/NEA 2012, 2001). Das heißt, dass der gesamte Prozess der Entsorgung flexibel und anpassungsfähig sein soll. Um Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten, soll das Entsorgungssystem in Stufen bzw. Phasen unterteilt werden und auch Haltepunkte berücksichtigen, an denen jeweils eine Überprüfung der Maßnahmen erfolgen und eine Entscheidung über das weitere Vorgehen – wie geplant oder abweichend davon – getroffen werden kann (OECD/NEA 2001: 13). Diese internationalen Standards sind recht allgemein gehalten und bedürfen bei Übernahme in nationale Programme einer Präzisierung.

## **Die Phasen eines tiefengeologischen Entsorgungssystems – internationale Vorgaben und nationale Umsetzungen**

Aus dem bisher Diskutierten könnte man Reversibilität als Überbegriff und Konzept für sämtliche Prozesse in Planungs- und Entscheidungsverfahren einordnen, die Rücksprünge vorsehen oder in denen diese möglich sind. In diversen internationalen Konzepten der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle werden weitere Begriffe genannt, die zum Teil auch auf zukünftige Phasen (nach der Standortauswahl) rekurrieren. Dieses Kapitel zeigt die verschiedenen Phasen des geologischen Entsorgungssystems auf und systematisiert die unterschiedlichen Begrifflichkeiten.

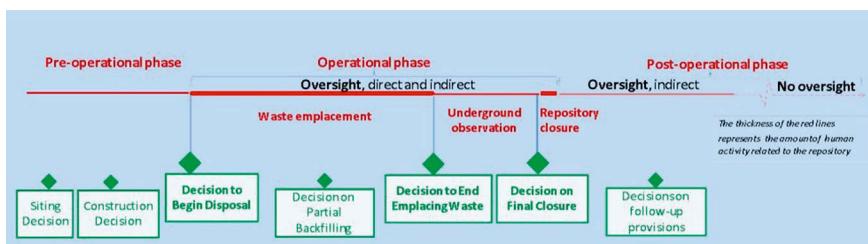
Es können drei maßgebliche Phasen eines geologischen Entsorgungssystems unterschieden werden: die Vorbetriebs- (*pre-operational*), die Betriebs- (*operational*) und die Nachbetriebsphase (*post-operational*) (siehe Abb. 1). Die Vorbetriebsphase umfasst nach OECD/NEA (2013) sowohl die Standortauswahl, die Genehmigung als auch die Konstruktion des Endlagers. Mit der Entscheidung über den Beginn der Einlagerung startet die Betriebsphase (*operational phase*), die bis zum endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerks andauert. Das heißt, dass die Betriebsphase neben der Einlagerung und Streckenverfüllung auch eine Monitoringphase vor dem endgültigen Verschluss

---

11 Mit Entsorgungssystem ist die Gesamtheit aller Schritte und Phasen der tiefengeologischen Entsorgung radioaktiver Abfälle mit all seinen Subsystemen (Umwelt, Wirtschaft etc.) gemeint.

umfasst. Die Nachbetriebsphase (*post-operational phase*) beginnt dann direkt nach dem endgültigen Verschluss des Bergwerks und umfasst zunächst eine indirekte Überwachung des Endlagersystems, in der Entscheidungen zu Folge-Vorkehrungen getroffen werden. Diese indirekte Überwachung wird voraussichtlich mit zunehmender Dauer nach Verschluss weniger und irgendwann nicht mehr stattfinden. Die verschiedenen Begriffe, die international im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle zu Reversibilität verwendet werden, beziehen sich zumeist auf die Phasen nach der Standortauswahl bzw. sogar nur auf die Betriebs- und Einlagerungs- sowie die Nachbetriebsphase (OECD/NEA 2013).

Abbildung 1: Phasen eines tiefengeologischen Entsorgungssystems



Quelle : OECD/NEA (2013a) : 13

International finden sich neben den Begriffen *reversibility/irreversibility* (z.B. Aparicio 2010; OECD/NEA 2004, 2001) auch die Begriffe *retrievability* (Dumont et al. 2009; OECD/NEA 2001) und *flexibility* (OECD/NEA 2013). Reversibilität und Irreversibilität wird bei (Aparicio 2010) aus der Historie der Entsorgungsfrage und dem favorisierten Konzept der geologischen Tiefenlagerung abgeleitet. Mit dem Scheitern des klassischen *decide-announce-defend*-Ansatzes für das favorisierte Endlagerkonzept der geologischen Tiefenlagerung ohne Rückholbarkeit hat sich als Kompromiss das Endlagerkonzept mit Rückholbarkeit auf Basis von *stage-by-stage decisions* (Aparicio 2010: 20) als präferiertes Konzept durchgesetzt. Nach Aparicio (2010: 20) schließt Reversibilität ein, dass nach jeder Phase darüber entschieden wird, den Prozess entweder fortzuführen, zu beenden oder aber zu einer vorhergehenden Phase zurückzugehen. Sollten sich unvorhergesehene Entwicklungen abzeichnen, besteht so die Möglichkeit, die Vor- und Nachteile zu diskutieren, bevor zur nächsten Phase übergegangen wird. Reversibilität ist untrennbar verknüpft mit der Rückholbarkeit, welche jedoch im Laufe der Zeit schwieriger und, vor allem hinsichtlich der Kosten, teurer wird und damit unwahrscheinlicher. Das heißt nach Aparicio (2010: 21), dass auch die reversible geologische Tiefenlagerung letztlich in eine irreversible mündet. Die OECD/NEA (2004: 9) hat in Bezug auf den *stepwise approach* in Entscheidungen festgestellt, dass nicht jede Stufe voll reversibel sein kann; insbesondere, wenn technologische Artefakte geschaffen wurden (z.B. ein Schacht abgeteuft wurde), können diese nicht ohne jegliche Veränderung der Umwelt in den Ausgangszustand zurückversetzt werden bzw. mögliche Folgen auch nur unter Zuhilfenahme von Technik abgemildert werden (Mbah 2016). Der Begriff der *retrievability* bzw. Rückholbarkeit bezieht sich dann auf den Zeitpunkt während bzw. nach der Abfallein-

lagerung, die die Möglichkeit der Umkehrbarkeit vorsehen soll, also entweder einzelne Abfallbehälter oder gar das gesamte Abfallinventar wieder aus dem Endlager herauszuholen (OECD/NEA 2001: 12). Mit dem Begriff der *flexibility* (OECD/NEA 2013) ist hingegen die Eigenschaft gemeint, die der gesamte Prozess durch ein stufenweises Vorgehen erlangen soll. Konkret kann das bedeuten, dass in jeder Phase des Entsorgungssystems alternative Optionen offen gehalten werden sollen, d.h. dass bspw. grundsätzlich Alternativen mitgedacht und erarbeitet werden sollen (OECD/NEA 2001: 13f.).

Dem von der OECD/NEA skizzierten Konzept der Reversibilität wird in den nationalen Entsorgungskonzepten sehr unterschiedlich Rechnung getragen. Gemein haben alle Konzepte, dass sie in unterschiedliche Phasen eingeteilt sind. Die Einteilung und Ausgestaltung der Phasen sind jedoch verschieden, wie auch die Definition und Verwendung von Begrifflichkeiten, sodass die Entsorgungskonzepte hinsichtlich des jeweiligen Anspruchs an Reversibilität durchaus unterschiedlich zu bewerten sind.

In Finnland und Schweden ist beispielsweise das Konzept der Reversibilität kein expliziter Bestandteil des Entsorgungssystems, denn auch die Rückholbarkeit ist kein Bestandteil des dortigen Entsorgungskonzeptes. Reversibilität wird insofern in den Standortauswahl- und Genehmigungsverfahren angelegt, als dass es sich hierbei um stufenweise Prozesse handelt (OECD/NEA 2012: 28). Dies soll garantieren, dass Entscheidungen kontinuierlich überprüft werden. Hierbei soll ggf. auch die Notwendigkeit eines Rücksprungs im Verfahren eruiert werden, indem bspw. ein Halt im Verfahren zur Überprüfung stattfindet – der nicht schon zuvor eingeplant sein muss, wie im Falle der aktuellen Debatte um die Kupferkorrosion (Mbah April 2019b). Derzeit ist in Schweden bezüglich der Kupferkorrosion noch nicht abschließend geklärt, ob das Entsorgungskonzept – wie vorgelegt – genehmigt wird oder ob ggf. ein Rücksprung erforderlich ist, denn das bisherige Behälterkonzept wurde vom Gericht angezweifelt und wurde einer erneuten Prüfung unterzogen. Die Entscheidung steht zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels noch aus, sie wird voraussichtlich im Laufe des Jahres 2020 gefällt werden. Wenn das Einlagerungskonzept von der Regierung abgelehnt würde, müsste entweder ein neues Endlagerkonzept oder gar ein anderer Standort mit anderen geologischen Voraussetzungen gefunden werden. Die Studie von Palm (2020) zeigt, dass über die Hälfte der Mitglieder des schwedischen Parlaments der Auffassung ist, dass bei der Auslegung des Endlagers eine Rückholbarkeit vorgesehen werden sollte.

Im Schweizer Entsorgungskonzept ist Reversibilität ebenfalls kein zentraler Begriff und kommt im Konzeptteil des Sachplans nur im Zusammenhang mit der Rückholbarkeit vor (<https://www.nagra.ch/de/rueckholbarkeit.htm>; Bundesamt für Energie (BFE) 2008, 2011). Rückholbarkeit soll sowohl während der Einlagerungsphase (Betriebsphase) als auch während einer längeren Beobachtungsphase vor Verschluss sowie darüber hinaus – dann unter größerem Aufwand – möglich sein. Im Schweizer Sachplanverfahren offenbart sich die Praxis darin, dass beispielsweise während der zweiten Etappe Anpassungen bei der Zeitplanung vorgenommen wurden, und in der aktuellen dritten Etappe Veränderungen beim Einbezug der als betroffen definierten Gemeinden in die Partizipation stattfanden, in Abhängigkeit der schrittweisen Konkretisierung des Lagerprojekts (BFE 2018). Das Schweizer Verfahren ist folglich in einem gewissen Rahmen offen für Änderungen und Anpassungen. Rücksprünge auf frühere Stationen in

der Planung bzw. im Sachplanverfahren waren bisher als nicht erforderlich angesehen worden und sind in dieser Form weder eingeplant noch vorgesehen.

In Kanada soll Reversibilität ebenfalls durch ein schrittweises Standortauswahlverfahren<sup>12</sup>, das sehr stark an der Mitwirkung kommunaler Gebietskörperschaften und der Öffentlichkeit orientiert ist, gewährleistet werden (siehe NWMO 2005, 2019). Es basiert auf intensivem Austausch mit der Öffentlichkeit und eröffnet bspw. Anpassungen im Zeitplan, falls die Öffentlichkeit an den jeweiligen zu untersuchenden Standorten mehr Zeit für Abstimmungen oder für den Entscheidungsprozessen vorgelagerte Zeremonien der indigenen Bevölkerung<sup>13</sup> verlangt (Mbah April 2019a). Der Zeitplan ist insofern flexibel, als dass Möglichkeitsräume für Änderungen bestehen, und kann auf dieser Ebene als erstes Indiz für einen reversiblen Prozess gewertet werden.

In den USA wird ein Konzept von Reversibilität nur auf die Phase vor Beginn der Abfalleinlagerung angewendet, während beispielsweise in Belgien das Konzept der Reversibilität sich ausschließlich auf die Betriebsphase bezieht (OECD/NEA 2013: 10).

Zusammenfassend zeigt dies, dass erstens in den einzelnen Ländern unterschiedliche Begrifflichkeiten in Bezug auf Reversibilität Anwendung finden und zweitens Begrifflichkeiten unterschiedlich ausgelegt werden. Die Entsorgungskonzepte sind nicht direkt vergleichbar und sind nicht umstandslos übertragbar auf andere internationale Endlagerprojekte. Dennoch können aus der Betrachtung und dem internationalen Vergleich einzelner Aspekte Rückschlüsse gezogen werden, die zu einem Lernen im bundesdeutschen Entsorgungssystem beitragen können. Des Weiteren ist das Konzept der Reversibilität häufig auf die eher technisch orientierten Phasen nach der Errichtung des Endlagers und der darauffolgenden Einlagerung der Abfälle sowie nach dem Verschluss des Endlagers gerichtet. Die Gestaltung der Planungsphase eines Endlagers wird international weniger im Konzept der Reversibilität berücksichtigt, obwohl hier die Flexibilität noch am größten ist/wäre und gerade auch gesellschaftliche Beteiligungsprozesse Anstöße für Reversibilität liefern könnten (siehe Beiträge Mbah/Kuppler »Raumsensible long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben« und Mbah/Brohmann »Das Lernen in Organisationen« in diesem Band).

Letztlich ist der gemeinsame Nenner zwischen den nationalen Programmen bezüglich Reversibilität darin zu sehen, dass stufen-/phasenweise vorgegangen wird. Hierbei sollen Überprüfungen vorgesehen werden, die ein Anpassen und Umsteuern ermöglichen. In diesem Zusammenhang weist die OECD/NEA (2004: 55) auf die Notwendigkeit hin, Zeit für Reflexion in jeder Phase einzuplanen und empfiehlt, dass »decision making should be iterative and should provide for adaptation to contextual changes« (OECD/NEA 2004: 60). Grundsätzlich gilt für jede Phase, dass Haltepunkte festzulegen und Vorkehrungen zu treffen sind, die Alternativen inkludieren, und dass die Reflexion

12 Der *adaptive-phased-management* Ansatz verknüpft die technische Erkundung potenzieller Standortregionen mit einer flexiblen Umsetzungsweise durch intensive Beteiligung von Stakeholdern und Öffentlichkeit. Das bedeutet, dass das Verfahren in Phasen gegliedert ist, in welchen jeweils die adaptiven Entscheidungsprozesse stets unter Beteiligung von Stakeholdern und Öffentlichkeit stattfinden. Ziel ist es, ein offenes, faires und inklusives Standortauswahlverfahren durchzuführen, das durch ein schrittweises Vorgehen Reflexion und Anpassung ermöglicht (NWMO 2005).

13 Der indigenen Bevölkerung Kanadas kommt eine besondere Bedeutung zu, der hiermit Rechnung getragen wird, siehe auch NWMO-Konzept (NWMO 2005).

und Entscheidung über das weitere Vorgehen jeweils unter Beteiligung verschiedener Akteure zu treffen ist, um auch gesellschaftliche Erwartungen zu berücksichtigen.

## **Reversibilität im bundesdeutschen Standortauswahlverfahren und in den einzelnen Phasen des tiefengeologischen Entsorgungssystems**

Im Folgenden wird ein Überblick über die Terminologie gegeben und der Bezug zu den einzelnen Phasen des Entsorgungssystems hergestellt. Abschließend werden Hinweise zu möglichen Konkretisierungen zur Gewährleistung von Reversibilität im gesamten Entsorgungssystem formuliert.

### **Terminologie des deutschen Entsorgungssystems**

Der Anspruch, ein reversibles Verfahren auszustalten sowie Reversibilität im gesamten Entsorgungssystem umzusetzen, wurde in Deutschland durch die Empfehlung der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe im Abschlussbericht (2016) gefestigt. Sie sprach sich für ein tiefengeologisches Endlager mit Rückholbarkeit aus und begründete die Reversibilität mit zwei zentralen Argumenten:

- Erstens sollen durch eine ergebnisoffene Erkundung verschiedener potenzieller Standort(regionen) im Verlauf des Standortauswahlverfahrens – ausgehend von einer zunächst weißen Deutschlandkarte – alte Konflikte überwunden und Vertrauen aufgebaut werden (siehe Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016, 28ff.).
- Zweitens soll der Entsorgungsprozess im ersten Schritt, dem Standortauswahlverfahren, als selbsthinterfragendes System ausgestaltet werden, das von einer unabhängigen Instanz mehrfach im Laufe des Verfahrens evaluiert werden soll – unter Beteiligung der Öffentlichkeit –, um ggf. ein Umsteuern oder Fehlerkorrekturen zu ermöglichen. Daher sollen getroffene Entscheidungen grundsätzlich reversibel sein, um das Ziel bestmöglicher Sicherheit zu erreichen und einen Optionenraum für zukünftige Generationen offenzuhalten – »Irreversibilitäten müssen vermieden werden« (Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016: 30f.).

Hier zeigt sich, dass mindestens zwei Ebenen der Reversibilität angesprochen werden. Zum einen geht es um das Standortauswahlverfahren, in dessen Verlauf nach Möglichkeit keine irreversiblen Entscheidungen getroffen werden sollen. Gleichzeitig soll das Verfahren möglichst reflexiv, transparent und lernend ausgestaltet werden, um sicherzustellen, dass der Standort mit bestmöglicher Sicherheit gefunden wird. Zum anderen geht es nach dem Ende der Betriebsphase und dem Verschluss des Endlagers darum, auch nachfolgenden Generationen noch einen gewissen Optionenraum offenzuhalten und Kontrollmöglichkeiten über das Monitoring zu eröffnen, indem ein tiefengeologisches Endlager mit Rückholbarkeit gebaut werden soll. Reversibilität soll folglich in allen Phasen der tiefengeologischen Entsorgung gewährleistet sein, wobei hier nach

Verschluss zwei weitere Begrifflichkeiten eingeführt werden – Rückholbarkeit und Bergung (siehe unten). In dem Fall erhält auch Reversibilität einen anderen Charakter (siehe Abb. 2).

Bei Betrachtung des gesamten Entsorgungssystems, wie es in Deutschland geplant ist, ist das Standortauswahlverfahren der kürzeste Zeitraum, für den Reversibilität gewährleistet werden soll (siehe Abb. 2). Die Errichtungs- und Betriebsphase ist der nächstlängere Zeitraum, der dann in die Nachverschlussphase I mündet, in der eine Bergbarkeit bis 500 Jahre nach Verschluss gefordert wird. Daran anschließend folgt die Nachverschlussphase II, in der die Abfälle für einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre sicher von der Umwelt ferngehalten werden sollen.

In den einschlägigen Regelwerken, die während der einzelnen Etappen des Entsorgungssystems relevant sind, wird zwischen Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit unterschieden. Reversibilität ist hierbei die umfassendste Terminologie, welche für den gesamten Entsorgungspfad gewährleistet werden soll. Diese nimmt aber aufgrund der zunehmenden Kosten durch getätigte Investitionen sowie mit der Schaffung technologischer Artefakte sukzessive ab und mündet letztlich in eine faktische Irreversibilität.

Im StandAG von 2017 ist der Reversibilitätsbegriff (siehe Tab. 1) deutlich enger gefasst als in der Version von 2013. Statt der Rückabwicklung von Entscheidungen und Rücksprüngen im Verfahren ist nur noch eine Umsteuerung zur Fehlerkorrektur vorgesehen. Damit bleibt das StandAG auch hinter der Definition der OECD/NEA zurück. Die sehr weitgehende Empfehlung der Kommission zur Möglichkeit des Umstiegs auf andere Entsorgungspfade (Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016: 235) hat ebenfalls keinen Eingang ins Gesetz gefunden.

*Tabelle 1: Der Begriff der Reversibilität in relevanten Regelwerken und Dokumenten*

Sicherheitsanforderungen BMU 2010	(nicht enthalten)
Abschlussbericht Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfall- „stoffe 2016: 235	»Reversibilität von Entscheidungen bedeutet, einmal getroffene Entscheidungen rückgängig machen und auf gegebenenfalls andere Entsorgungspfade umsteigen zu können, [...] auch die Möglichkeiten von Rücksprüngen im Verfahren«
StandAG2017: § 2	Reversibilität bezeichnet »die Möglichkeit der Umsteuerung im laufenden Verfahren zur Ermöglichung von Fehlerkorrekturen«

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Rückholbarkeit beginnt mit der Einlagerung der Abfälle und soll bis zum Beginn der Stilllegung sichergestellt sein, so wie im Referentenentwurf der Endlagersicherheitsanforderungen von 2019 in § 13 festgehalten (EndlSiAnfV 2019).

Der Vergleich der verschiedenen Dokumente bezüglich des Begriffs Rückholbarkeit (siehe Tab. 2) zeigt, dass das StandAG (2017: § 2) den Begriff durch den Zusatz »während der Betriebsphase« gegenüber den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) einschränkt. Die Definition im Abschlussbericht der Kommission (2016) ist präziser formuliert. Sie

weist den Begriff der Rückholung einem spezifischen Zeitpunkt zu: wenn Einlagerungsstrecken oder -bohrlöcher bereits verschlossen sind.

*Tabelle 2: Der Begriff der Rückholbarkeit/Rückholung in Regelwerken und Dokumenten*

Sicherheitsanforderungen BMU 2010: 7	»geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk«
Abschlussbericht Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: 235f.	»Rückholbarkeit ist die Fähigkeit, hochradioaktiven Abfall aus einem Endlager wieder zurückzuholen, wenn dieser bereits in einem Endlager eingelagert ist und die Einlagerungsstrecken beziehungsweise die Einlagerungsbohrlöcher teilweise endgültig verfüllt beziehungsweise technisch verschlossen sind. Rückholung ist die konkrete Handlung, mit der die Abfallbehälter aus dem Endlager zurückgeholt werden. Rückholbarkeit setzt voraus, dass Vorkehrungen getroffen worden sind, die – ohne Beeinträchtigung der Sicherheit – eine Rückholung der Abfallbehälter erleichtern beziehungsweise gewährleisten, dass also entsprechende Technologien von der Infrastruktur bis hin zu den Behältern verfügbar sind.«
StandAG 2017: § 2	Rückholbarkeit bezeichnet »die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase«

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Bergbarkeit schließt daran an, d.h. mit dem geplanten Verschluss des Endlagers sollen die Endlagergebinde bis 500 Jahre danach geborgen werden können.

Bezüglich des Begriffs der Bergung (siehe Tab. 3) zeigt ein Vergleich zwischen Sicherheitsanforderungen und StandAG, dass im StandAG der Terminus »Notfallmaßnahme« weggefallen ist und stattdessen die Formulierung »ungeplantes Herausholen« gewählt wurde. Der Abschlussbericht der Kommission (2016: 235f.) definiert Bergbarkeit, nicht Bergung, und benennt, analog zur Definition von Rückholbarkeit, Voraussetzungen. Durch die Definition der Bergbarkeit als »Möglichkeit der Rückholung« ist der Kommissionsbericht an einer Stelle schlüssig, an der im StandAG ein Widerspruch konstatiert werden könnte: Nach §1 Abs. 4 ist die Möglichkeit einer Bergung vorzusehen; gleichzeitig wird Bergung in § 2 als »ungeplant« definiert.

*Tabelle 3: Der Begriff der Bergbarkeit/Bergung in relevanten Regelwerken und Dokumenten*

Sicherheitsanforderungen BMU 2010: 5	»Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet.«
Abschlussbericht Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: 236	»Bergbarkeit wird als die Möglichkeit der Rückholung von Behältern mit hoch radioaktivem Abfall verstanden, wenn das Endlagerbergwerk bereits vollständig verschlossen ist. [...] Voraussetzungen dafür sind die Wiederauffindbarkeit, das heißt die genaue Kenntnis der Lage der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung, sowie der intakte Zustand der Behälter.«
Standortauswahlgesetz 2017: § 2	Bergung bezeichnet ein »ungeplantes Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager«

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Sowohl Rückholbarkeit als auch Bergbarkeit sind im Abschlussbericht der Kommission (2016) explizit auf hochradioaktive Abfälle bezogen, in den Sicherheitsanforderungen und im StandAG hingegen nicht. Letztere Regelwerke ziehen die Möglichkeit einer Einlagerung nicht wärmeentwickelnder Abfälle am gleichen Standort jeweils in Betracht, während der Auftrag der Kommission sich ausschließlich auf hochradioaktive Abfälle bezog.

Reversibilität ist in den deutschen Regelwerken bisher eher eng definiert und bleibt hinter internationalen Definitionen zurück, insbesondere, da nicht Rücksprünge, sondern nur ein Umsteuern vorgesehen sind. Es fehlen jedoch Konkretisierungen, die mit einem Konzept von Reversibilität gegeben werden könnten. Die Autoren sehen es als essenziell an, Reversibilität auch vor dem Hintergrund der Möglichkeit von Haltepunkten und Rücksprüngen zu verstehen. Im Folgenden werden erste Hinweise gegeben, wie Reversibilität im deutschen Entsorgungssystem sichergestellt werden könnte.

## **Sicherstellung von Reversibilität im gesamten Entsorgungssystem**

Der Fokus liegt auf der Frage, wie das Verfahren zur Standortauswahl auszustalten ist, damit Entscheidungen reversibel sein können und Rücksprünge auf frühere Verfahrensschritte möglich sind sowie darauf, welche Vorkehrungen getroffen werden müssen, um auch in späteren Etappen des Entsorgungssystems Reversibilität sicherzustellen. Dies gilt insbesondere im Sinne des oben genannten Verständnisses von Reversibilität: Je früher in Planungs- und Entscheidungsprozessen umgesteuert wird, desto geringer sind die Kosten (hinsichtlich Zeit, ökonomischen Investitionen, sozialen Nebenfolgen, Veränderungen der bebauten und natürlichen Umwelt und deren Wirkungen). Gerade in der Etappe des Standortauswahlprozesses, in der bspw. Entscheidungen über das Wirtsgestein auf Basis von Forschungserkenntnissen oder über eine geeignete Behältertechnik gefällt werden, werden zentrale Entscheidungen vorgenommen, die die Reversibilität schrittweise einschränken.

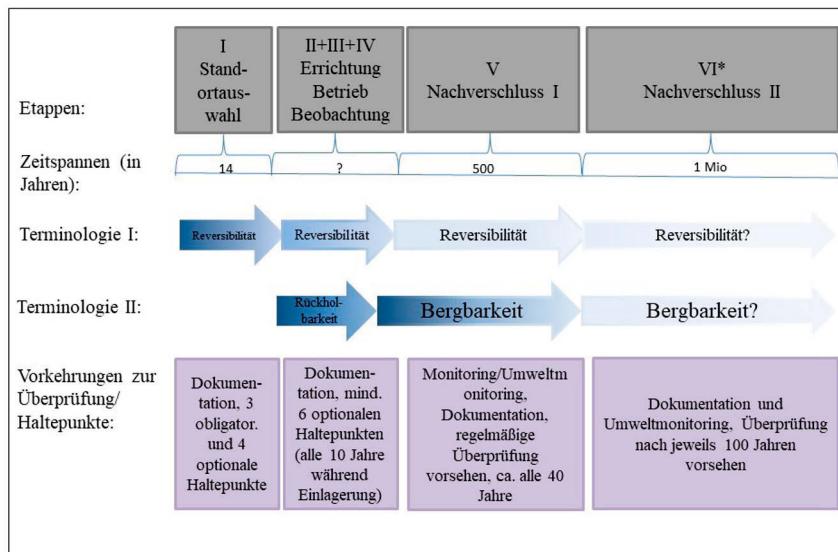
Reversibilität wird insbesondere durch Reflexion und Evaluation vorbereitet. Hierzu braucht es einerseits Haltepunkte und andererseits Vorstellungen und Planungsan-

sätze. Fortlaufend sind daher auch partizipative Elemente sowie vertrauensaufbauende Maßnahmen mitzudenken, um die Empfehlung der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe aufzugreifen, die da lautet (2016: 31):

»Bevor unumkehrbare oder nur unter großem Aufwand revidierbare Entscheidungen getroffen werden, muss eine transparente und wissenschaftlich gestützte Evaluation unter Beteiligung der Öffentlichkeit und der vorgesehenen Gremien durchgeführt werden.«

Das heißt, durch deliberative Prozesse muss u.a. auch die Öffentlichkeit in das Verfahren einbezogen werden, um einem reversiblen und lernenden Charakter Rechnung zu tragen (Stirling 2007; Blum 2014). Die folgende Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Etappen und möglichen Haltepunkte für eine entsprechende Reflexion und Evaluation im Entsorgungssystem in Deutschland.

*Abbildung 2: Reversibilität im Entsorgungssystem hochradioaktiver Abfälle in Deutschland*



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016), StandAG (2017), Verordnung SiAnf und SiUnt (Stand Okt. 2019), NaPro Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015), Appel et al. (2015), Smeddinck (2016).

Auf Basis des Vorschlags der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016: 252ff.) können weitere Hinweise zu möglichen Haltepunkten in den 6 Etappen<sup>14</sup> des deutschen Entsorgungssystems (siehe Abb. 2) formuliert werden:

In der Etappe I des Entsorgungssystems, dem Standortauswahlverfahren, ist eine umfassende Dokumentation erforderlich, die folgendes umfassen sollte:

- a) Die Anwendung von Kriterien im Zuge der Auswahl von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten.
- b) Die Durchführung und Niederschrift der Ergebnisse von Partizipationsformaten inklusive deren Einwendungen, um die Nachvollziehbarkeit umfänglich zu gewährleisten und um eine Wissensbasis für ggf. erforderlich werdende Entscheidungen an Haltepunkten auch in der Frage nach dem Erfordernis eines Rücksprungs bereitzustellen.

Obligatorische Haltepunkte der Etappe I des Entsorgungssystems sind die an den Phasenübergängen des Standortauswahlverfahrens jeweils erforderlichen Bundestagsentscheide, bevor mit der darauffolgenden Phase begonnen werden darf (BfE 2019). Um diese Haltepunkte im Sinne des Reversibilitätsanspruchs zur Evaluation und Reflexion zu nutzen, braucht es jedoch eine weitergehende Konkretisierung, wie eine Evaluation inklusive einer umfassenden Reflexion erfolgen kann und welche möglichen Konsequenzen sich daraus ergeben können (bspw. in Bezug auf Rücksprünge innerhalb der noch laufenden Phase oder aber auf eine vorhergehende Phase). Wichtig ist hierbei, dass gesellschaftliche Erwartungen über partizipative Elemente – auch bei der Evaluation und Reflexion – berücksichtigt werden, um zu einer sogenannten Verfahrensakzeptabilität beizutragen (siehe Grunwald 2005). Im Standortauswahlverfahren müssen zweifellos Entscheidungen getroffen werden, die auf absehbare Zeit das Verfahren beeinflussen werden, etwa bei der Frage nach dem Wirtsgestein am ausgewählten Standort und dem daran angepassten technologischen Einlagerungskonzept sowie bezüglich der erforderlichen Oberflächenanlagen. Hierbei werden bestimmte Optionen zunächst weiterverfolgt und harte Fakten<sup>15</sup> geschaffen, andere (zunächst) nicht. Es muss die Frage gestellt werden, inwiefern im Laufe des Verfahrens Entscheidungen die Wiederaufnahme zunächst verworfener Optionen im Falle eines Rücksprungs (faktisch oder implizit) unmöglich machen.

14 Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (2016: 252ff.) hat 5 Etappen der Entsorgung vorgeschlagen: (1) Standortauswahlverfahren, (2) Bergtechnische Erschließung des Standortes, (3) Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk, (4) Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks, (5) Verschlossenes Endlagerbergwerk. Auf Basis der nach StandAG erforderlichen 500 Jahre Bergbarkeit der Behälter (§ 1 Abs. 4 S. 2) und der Gewährleistung eines sicheren Einschlusses der Abfälle über einen Zeitraum von 1 Million Jahre (§ 23 Abs. 4 S. 1) ist hier eine Etappe 6 aufgenommen.

15 Unter harten Fakten ist hier zu verstehen, dass Kosten, Umweltwirkungen und soziale Folgen aufgrund von übertägigen Untersuchungen entstehen, sowie in Folge von konzeptionellen Entwicklungen und je nach Fortschritt des Prozesses sogar durch technologische Artefakte. Letzteres trifft insbesondere nach der Standortauswahl zu, wenn nach den eingeholten Genehmigungen mit dem Bau eines Endlagers begonnen wurde.

In den Etappen der Errichtung, des Betriebs (also der Einlagerung der Abfälle) und der Beobachtung ist ebenfalls eine Dokumentation obligatorisch und auch hier sollten optionale Haltepunkte angedacht werden, um während der Errichtung und der Einlagerung regelmäßig das Vorgehen und das Konzept zu überprüfen und während der Beobachtung vor dem endgültigen Verschluss ggf. Kriterien für Maßnahmen anwenden zu können. In § 20 der Endlagersicherheitsanforderungen (EndlSiAnfV und EndlSiUntV 04.07.2019) ist ein zehnjähriger Überprüfungsturnus im Sinne einer Überwachung und eines Monitorings des Endlagers und seiner Umgebung festgelegt. Die Dauer dieser drei Etappen ist hierbei am schwierigsten abzuschätzen, da das Entsorgungsbergwerk zunächst genehmigt und errichtet werden muss, bevor Endlagergebinde eingelagert werden können<sup>16</sup> und auch die Etappe der Beobachtung noch keinen definierten Zeitraum umfasst (siehe Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: 269ff.). Es kommt hinzu, dass der Zeitraum auch durch die Menge der einzulagernden Abfälle sowie durch das Endlagerkonzept beeinflusst wird<sup>17</sup> (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2015: 14). Des Weiteren kommt es darauf an, ob weitere Haltepunkte und Überprüfungszeiten hinzukommen. So fordert die Endlagerkommission zur Gewährleistung der Reversibilität und der Möglichkeit der Fehlerkorrektur beispielsweise, dass

»die Einlagerung jederzeit unterbrochen und später fortgesetzt oder auch endgültig aufgegeben werden [kann]. Es ist auch möglich, zunächst einen Teil einzulagern und zum Beispiel eine Strecke zu befüllen und zu verschließen, dann einige Zeit zu warten und zu beobachten, wie sich die Konstellation aus Wirtsgestein, Verfüllmaterial und Endlagerbehälter entwickelt und abhängig vom Ergebnis dieser Untersuchung über das weitere Vorgehen zu entscheiden. Bereits eingelagerte Gebinde können je nach Ergebnis dort verbleiben oder rückgeholt werden.« (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: 269).

Würde dieser Formulierung gefolgt werden, so könnte dies weitreichende Konsequenzen haben, die auch einen oder mehrere Rücksprünge implizieren würden.

In den anschließenden Etappen V und VI (Verschluss mit Bergbarkeit und »nachsorgefreier« Verschluss), die hier als Nachverschluss I und II bezeichnet werden, sind weiterhin eine umfassende Dokumentation sowie ein Umweltmonitoring erforderlich, um Entscheidungsgrundlagen für die nachkommenden Generationen zu schaffen bzw. zu erhalten. Hier sollte ebenfalls eine Planung erfolgen, die eine regelmäßige Überprüfung vorsieht. Reversibilität nimmt in diesen nachfolgenden Etappen einen anderen Charakter an (z.B. Reversibilität von Teilsystemen) und ist hinsichtlich der Revidierbarkeit von Entscheidungen in Bezug auf das gesamte Entsorgungssystem abnehmend,

---

16 Im NaPro (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2015) wird vom Jahr 2050 ausgegangen, das könnte aber durchaus auch erst später sein, je nachdem, ob die Entscheidung in 2031 tatsächlich fällt und wie schnell danach die Genehmigung für die Errichtung erteilt wird.

17 Z.B. steht bisher noch nicht fest, ob die Transportbehälter in das Endlager direkt eingelagert werden können oder ein Umverpacken in Endlagerbehälter nötig sein wird und welches Monitoringkonzept gewählt werden wird (nur Übertage oder auch Untertage) etc.

d.h. sie bezieht sich nur noch auf Teilsysteme und mündet letztlich in eine faktische Irreversibilität, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dies zeigt sich auch an der Terminologie II, der Bergbarkeit, die hier Reversibilität erlauben soll. Doch auch die Bergbarkeit nimmt mit zunehmender Dauer der Einlagerung nach dem Verschluss des Endlagers ab.

Bergen (2016) argumentiert aus ethischer Perspektive sogar, dass das Konzept der tiefengeologischen Entsorgung gar nicht reversibel sei, da es erstens aufgrund der Pfad-abhängigkeiten des Konzepts zu einem sogenannten *lock-in*<sup>18</sup> gekommen sei (Siehe Losada »Pfadabhängigkeit in der Endlagerpolitik« in diesem Band). Zweitens werde die Reversibilität von Entscheidungen, bezogen auf deren Folgen, immer nur im Zusammenhang mit dem sicheren Einschluss radiotoxischer Stoffe gesehen, nicht jedoch mit einer möglichen Eliminierung der Gefahr, die von den radioaktiven Abfällen ausgeht. Diesem zweiten Argument liegt der Gedanke zugrunde, dass nur dann von Reversibilität gesprochen werden könne, wenn die unerwünschten Folgen, die von den Abfällen ausgehen, vollständig umkehrbar seien. Demzufolge könne die tiefengeologische Lagerung nicht reversibel sein, solange die Abfälle an sich weiterhin gefährlich sind. Das erste Argument der Pfadabhängigkeit, nach der es durch das Konzept der tiefengeologischen Entsorgung zu einem *lock-in* gekommen sei, begründet (Bergen 2016) damit, dass das Entsorgungskonzept der tiefengeologischen Entsorgung nicht mehr grundsätzlich hinterfragt werden könne und damit grundsätzlich die Option nicht reversibel sei, da die Nulloption, also ein anderes Entsorgungskonzept zu wählen, aufgrund der historischen Fokussierung auf die tiefengeologische Entsorgung und der damit einhergehenden politischen Entscheidungen (am Beispiel der USA), nicht mehr in Frage kommen könne.

Der Argumentation von (Bergen 2016) kann hier nur teilweise gefolgt werden, als dass auch in Deutschland die tiefengeologische Entsorgung das dominierende Entsorgungskonzept ist und mit dem (StandAG 2017) nun auch rechtlich festgelegt wurde. Nach einem engen Verständnis von Reversibilität – wie dem von Bergen (2016) – könnte die Option der tiefengeologischen Entsorgung als nicht reversibel angesehen werden, da diese Option trotz postulierter Rückholbarkeit mit zunehmendem Voranschreiten der einzelnen Phasen irreversibler wird. Das bedeutet, dass auch die Option der tiefengeologischen Entsorgung mit Rückholbarkeit durch das Schaffen technologischer Artefakte und soziotechnischer Implikationen (rechtlich verbindliche Entscheidungen, Kapitalinvestitionen) und des damit immer größer werdenden Aufwands einer Umkehr, letztlich in eine quasi irreversible Option mündet. Nach dem Verständnis von Reversibilität der Autoren dieses Beitrags ist jedoch die Option der tiefengeologischen Entsorgung mit Rückholbarkeit insgesamt dann als reversibel zu betrachten, wenn die Reversibilität von Entscheidungen insbesondere in den frühen Phasen eines Entsorgungssystems in einem gewissen Rahmen vorgesehen ist und entsprechende Prozesse der Refle-

18 Mit dem Begriff des *lock-in* ist gemeint, dass ein Wechsel des bzw. eine Anpassung eines Systems nur mit außerordentlich hohem Aufwand und hohen Kosten (bezogen auf alle notwendigen Ressourcen) zu erreichen ist. Der Begriff stammt ursprünglich aus den Wirtschaftswissenschaften, ist aber auch in der Geografie üblich, um die Behäbigkeit von Unternehmen/Systemen, rechtzeitig auf veränderte Kontextbedingungen zu reagieren, zu beschreiben.

xion und der Evaluation stattfinden sowie Vorkehrungen für potenzielle Rücksprünge oder Anpassungen getroffen sind. Damit können (Neben-)Folgen zwar nicht vermieden werden – diese werden auch in einem reversibel ausgestalteten Entsorgungssystem auftreten. Jedoch können durch die Ausgestaltung eines reversiblen Prozesses einerseits ein frühzeitiges Erkennen von (Neben-)Folgen unterstützt und andererseits die (Neben-)Folgen selbst durch das Ausgestalten von Maßnahmen abgemildert werden. Das frühzeitige Erkennen von (Neben-)Folgen kann dazu beitragen, Abbruchskriterien oder Kriterien für einen Rücksprung festzulegen, die die Basis für Entscheidungen darstellen sollten.

## Fazit

Die Ausführungen zu Reversibilität zeigen, dass sowohl der Begriff wie auch das Konzept im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle nicht leicht zu fassen sind, da einerseits unterschiedliche Definitionen und Verständnisse international bestehen und andererseits noch kein ausgearbeitetes Konzept für eine reversible Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens und des gesamten Entsorgungssystems vorhanden ist – weder in Deutschland, noch international. Basis für Reversibilität ist ein schrittweises, reflexives Vorgehen, mit definierten Haltepunkten, an denen eine Überprüfung des bisherigen Standes stattfindet und ggf. alternative Optionen oder die Notwendigkeit eines Rücksprungs geprüft werden. Ein wichtiger Aspekt von Reversibilität ist hierbei das Treffen von entsprechenden Vorkehrungen, um einen Rücksprung politisch/regulatorisch überhaupt zu ermöglichen. Hierbei ist zu beachten, dass für einen Rücksprung die Entscheidung erforderlich ist, diesen tatsächlich zu vollziehen. Für eine solche Entscheidung braucht es mehrere Grundlagen: Zunächst müssen entsprechende Mechanismen im Verfahren angelegt sein, die eine Überprüfung auslösen bzw. zulassen. Außerdem müssen Indikatoren vorliegen, anhand derer geprüft werden kann, ob eine Situation eingetreten ist, die einen Rücksprung nahelegt. Anhand von Kriterien muss dann abgewogen werden, welche Ausprägungsform eines entweder im Verfahren schon berücksichtigten möglichen Rücksprungs oder eines im Verfahren nicht vorab bedachten Rücksprungs erforderlich ist.

Als wichtige Voraussetzungen für ein reflexives, selbst hinterfragendes und lernendes Vorgehen sind zudem eine kritische Prüfung durch externe Akteure – hier kann Partizipation ein wichtiges Element sein (siehe Beitrag Mbah/Kuppler »Raumsensible Long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben« in diesem Band) – sowie die Bereitschaft und auch Fähigkeit aller Akteure, reflexiv, selbst hinterfragend und lernend zu handeln. Hier ist nicht nur das Lernen im Gesamtsystem zu betrachten, sondern spezifisch auch in den beteiligten Organisationen, d.h.: wie werden dort Mechanismen des Lernens ausgestaltet, implementiert und sichergestellt (siehe Beitrag Mbah/Brohmann »Das Lernen in Organisationen« in diesem Band)?

Die von der (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) empfohlene Option, Endlagerung mit Reversibilität zu verbinden, ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass Rücksprünge technischer Art nicht unmöglich werden sollen. Das ist ein Punkt, der zwar so nicht im StandAG (2017) übernommen wurde, im Entsorgungssys-

tem für die Reversibilität aber eine wichtige Bedeutung innehat und daher hier in die Betrachtung einbezogen wurde.

Reversibilität im deutschen Standortauswahlverfahren sowie bezüglich des Entsorgungskonzepts mit den einzelnen Phasen der tiefengeologischen Entsorgung kann daher in seiner Aufgliederung wie in Abbildung 2 dargestellt werden. Hier ist Reversibilität insbesondere der Vorbetriebsphase zugeordnet, indem das Standortauswahlverfahren wichtige Festlegungen vornimmt, gleichzeitig aber noch die größte Offenheit für alternative Vorgehensweisen besteht. Wegen des im StandAG ausformulierten Anspruchs, ein lernendes und selbstinterfragendes Verfahren auszugestalten, kann hier am ehesten Reversibilität nach dem ursprünglichen Verständnis realisiert werden. Gleichzeitig sind im Standortauswahlverfahren die Kosten einer Anpassung oder gar eines Rücksprungs im Vergleich zu einem späteren Zeitpunkt noch geringer. Eine Reversibilität im Sinne einer Umkehr ist noch eher möglich, da noch keine größeren technologischen Artefakte geschaffen werden, wie beispielsweise die Errichtung eines Endlagerbergwerkes. Die Reversibilität ist zu Beginn des Verfahrens am größten und nimmt sukzessive ab. Im Standortauswahlverfahren können die Entscheidungen des Bundestages vor dem Übergang in die jeweils nächste Phase als Haltepunkte identifiziert werden, an denen eine Prüfung, Reflexion und Abwägung erfolgt bzw. erfolgen sollte. In Vorbereitung darauf braucht es eine Evaluation und Reflexion, die auch die gesellschaftlichen Erwartungen an den Prozess tatsächlich berücksichtigt. Reflexion sollte jedoch grundsätzlich kontinuierlich erfolgen, um Anpassungen frühzeitig vorbereiten zu können und potenziell erforderliche Rücksprünge ohne zu großen Zeitverlust und Verlust von investierten Ressourcen möglich zu machen.

## Literatur

- Althaus, Egon (1992): Was ist Reversibilität? In: ICOMOS–Hefte des Deutschen Nationalkomitees 8: 49-54.
- Andrae, Jannis (2017): Rationalität, Demokratie und Reversibilität. Eine pragmatistische Perspektive. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos.
- Aparicio, Luis (2010): Making nuclear waste governable. Deep underground disposal and the challenge of reversibility. Wiesbaden: Springer.
- Appel, Detlef/Kreusch, Jürgen/Neumann, Wolfgang (2015): Darstellung von Entsorgungsoptionen. Hannover: ENTRIA-Arbeitsbericht 1. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>, zuletzt geprüft am 31.07.2020.
- Bergen, Jan Peter (2016): Reversible Experiments: Putting Geological Disposal to the Test. In: Science and Engineering Ethics 22: 707-733.
- Blum, Dennis-Sebastian (2014): Die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Auswahl eines Atommüllendlagers unter Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Bornemann, Basil/Saretzki, Thomas (2018): Konfliktfeldanalyse – das Beispiel »Fracking« in Deutschland. In: Holstenkamp, Lars/Radtke, Jörg (Hg.): Handbuch Energiewende und Partizipation. Wiesbaden: Springer, 563-581.

- Bundesamt für Energie (2018): Konzept regionale Partizipation in Etappe 3. Bern: Bundesamt für Energie.
- BfE (2019): Information, Dialog, Mitgestaltung – Öffentlichkeitsbeteiligung in der Startphase der Endlagersuche. Berlin: Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (NaPro). Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Chryssochoidis, George/Strada, Anna/Krystallis, Athanasios (2009): Public trust in institutions and information sources regarding risk management and communication. Towards integrating extant knowledge. In: *Journal of Risk Research* 12 (2): 137-185.
- David, Paul A. (2007): Path dependence. A foundational concept for historical social science. In: *Cliometrica* 1 (2): 91-114.
- Dörner, Dietrich (2011): Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek: Rowohlt.
- Dumont, Jean-Noel/Horelbeke, Jean-Michel/Ousounian, Gerald (2009): Reversibility and retrievability, a proposal for an international scale. In: WM2009 Conference Phönix.
- EndlSiAnfV und EndlSiUntV (04.07.2019): Referentenentwurf Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung) und Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung). Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Falcone, Rino/Castelfranchi, Cristiano (2001): The Socio-cognitive Dynamics of Trust. Does Trust Create Trust? In: Falcone, Rino/Singh, Munindar P./Tan, Yao-Hua (Hg.): Trust in cyber-societies. Integrating the human and artificial perspectives. Berlin, London: Springer, 55-72.
- Franck, Georg/Wegener, Michael (2002): Die Dynamik räumlicher Prozesse. In: Henckel, Dietrich/Eberling, Matthias (Hg.): Raumzeitpolitik. Opladen: Leske + Budrich, 145-162.
- Grunwald, Armin (2005): Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. In: TATuP 14 (3): 54-60.
- Guggenberger, Bernd/Offe, Claus (1984): An den Grenzen der Mehrheitsdemokratie. Politik und Soziologie der Mehrheitsregel. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Habermas, Jürgen (1998): Faktizität und Geltung: Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Herold, Jörg/Ahrens, Bernd (2011): Reversibilität und Irreversibilität: Mathematische Untersuchungen zum Zeitverhalten des Produktlebenszyklus. In: Jenaer Beiträge zur Wirtschaftsforschung (5). <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/57838/1/679527451.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2020.

- Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (2016): Abschlussbericht: Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache 18/9100. Berlin.
- Kroll, Bernhard (1996): Anpassungspotential und Irreversibilität im ökonomischen Evolutionsprozeß. Ilmenau: Technische Universität. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/28004/1/502416084.PDF>, zuletzt geprüft am 30.07.2020.
- Kuppler, Sophie/Hocke, Peter (2019): The role of long-term planning in nuclear waste governance. In: *Journal of Risk Research* 21 (3): 1-14.
- Mbah, Melanie (2016): Bergwerk als technologisches Artefakt. Ein Beitrag zur untertägigen Entsorgung radioaktiver Abfälle aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung. Hannover, Karlsruhe: ENTRIA-Arbeitsbericht 6. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>, zuletzt geprüft am 31.07.2020.
- Mbah, Melanie (April 2019a): Reversibilität. Interview mit Vertreter\*in der kanadischen Nuclear Waste Management Organisation. Wien.
- Mbah, Melanie (April 2019b): Reversibility. Interview mit Vertreter\*in der Swedish Radiation Authority. Wien.
- NWMO (2005): Choosing a Way Forward. The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel. Ottawa: Nuclear Waste Management Organization.
- NWMO (2019): Moving towards partnership. Annual Report 2018. Ottawa: Nuclear Waste Management Organization.
- OECD/NEA (2001): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste. Reflections at the International Level. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004): Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management. Experience, Issues and Guiding Principles. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2012): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste. Considerations for National Geological Disposal Programmes. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2013): The Nature and purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Safety Case Brochure 2012. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- Palm, Jenny (2020): Knowledge about the Final Disposal of Nuclear Fuel in Sweden: Surveys to Members of Parliament and Citizens. In: *Energies* 13 (374): 1-12.
- Pickel, Gert (2010): Politische Kultur und Demokratieforschung. In: Analyse demokratischer Regierungssysteme: Springer, 611-626.
- Ropohl, Günter (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Smeddinck, Ulrich (2017): StandAG. Standortauswahlgesetz Kommentar. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag.
- StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist. StandAG, vom Deutschen Bundestag.
- Stirling, Andy (2007): »Opening Up« and »Closing Down«. In: *Science, Technology, & Human Values* 33 (2): 262-294.
- Weyer, Johannes (2008): Techniksoziologie. Genese, Gestaltung und Steuerung soziotechnischer Systeme. Weinheim: Juventa.

