

Robuste Langzeit-Governance und Notwendigkeiten neuer Navigation

Zur Qualität soziotechnischer Gestaltungsprozesse

Peter Hocke, Sophie Kuppler, Stefanie Enderle

Zusammenfassung

Große technische Infrastrukturen, wie die eines Endlagers für Atommüll, stellen mit Blick auf soziotechnische Gestaltungsprozesse eine große Herausforderung dar. Ein Grund ist, dass es sich um Technologien handelt, die eine besondere Form von Sicherheit erfordern, verbunden mit großer Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen über die langen Zeiträume, über welche diese Infrastrukturen fehlerfrei funktionieren müssen. Es bedarf daher einer Fehler- und Sicherheitskultur, die vorrausschauend mögliche zukünftige Entwicklungen antizipiert. Um unter den bestehenden Ungewissheiten über lange Zeiträume Handlungsfähigkeit angesichts möglicher Fehlentwicklungen zu gewährleisten, ist eine zukunftsgerichtete long-term Governance notwendig, welche flexibles und gleichzeitig zielorientiertes Navigieren und kollektiv verbindliches Entscheiden ermöglicht. In diesem Beitrag werden bestehende große technische Infrastrukturen empirisch untersucht, die ein vergleichbar hohes Maß an Sicherheit wie ein Endlager sowie eine Governance über lange Zeiträume erfordern. Empirisch untersucht wurden in dem SOTEC-radio-Projekt (1) Talsperren, (2) Verkehrsüberwachung am Beispiel des Eisenbahnverkehrs sowie (3) Climate Engineering. Ziel der Analyse war, Governanceprozesse zu erkennen, welche das Aufdecken von Fehlern begünstigen. Gleichzeitig geht es darum, institutionelle Lernprozesse zu identifizieren und deren Übertragbarkeit auf den Fall der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu reflektieren.

Einleitung

Es gibt technische Infrastrukturen und Anlagen für die von der interessierten Öffentlichkeit besondere Sicherheitserwartungen formuliert werden.¹ Die Infrastrukturen

1 Dieser Text ist am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des Projektes »Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle – SOTEC-radio« entstanden, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) von 2017 bis 2020 gefördert wurde (Förderkennzeichen 02E11547B). Bei den empirischen Arbeiten und der Erstel-

der zivilen Flugsicherung gehören ebenso dazu, wie die nukleare Entsorgung (Sträter 2005; Sträter i.E.). Die technische Infrastruktur mit all ihren Wissenskomponenten und Einflussgrößen muss heute und über Zeit beobachtet und gewartet werden. Dies hat in einer Weise zu geschehen, die Schadensereignisse möglichst ausschließt und Fehler durch vorausschauende Reflexion und entsprechende Maßnahmen vermeidet. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass klassische Sicherheitsstrukturen fehleranfällig sind und teilweise auch sehr große Unfälle nicht verhindern können.²

Um Fehler- und Sicherheitskulturen im Kontext von großen Infrastrukturprojekten³ zu betrachten, wurde in diesem Projekt eine Perspektive eingenommen, die nicht nur technische Sicherheitsaspekte ins Zentrum rückt, sondern auch soziokulturelle Faktoren einschließt. Der Begriff Sicherheit im Sinne der Arbeits- und Organisationssoziologie erklärt, was über die Zeit nicht geschehen darf, und welche Organisationsstrukturen und Managementansätze zu einer Verhinderung dieser unerwünschten Entwicklungen beitragen können. Daher zielt der Ansatz primär auf das kurz- und langfristige Vermeiden von Schadensereignissen ab.⁴ Er weist damit auf die Notwendigkeit hin, mögliche zukünftige Entwicklungen zu antizipieren und zu vermeiden sowie den Umgang mit trotzdem zukünftig auftretenden sicherheitsrelevanten Problemen zu ermöglichen. Die Auswirkungen der Technologien, aber auch Fehlentwicklungen verändern gesellschaftliche Zustände in der Gegenwart auf eine Weise, die es unmöglich macht, nach ihrer Einführung wieder zum Ausgangspunkt, also dem Zustand der Gesellschaft vor ihrer Einführung zurückzukehren (Czada 2016; zu Reversibilität siehe auch den Beitrag von Mbah /Brohmann/Chaudry/Seidl »Reversibilität im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle« in diesem Band). Diese Technologien lösen also verändernde Impulse aus, die weit in die Zukunft hineinwirken.

Interdisziplinäre Technikfolgenabschätzung, die technische Entwicklungslinien, die Aufsichts- und Fehlerkultur und die Governance⁵ wichtiger großtechnischer Systeme im Hinblick auf deren Funktionsweise, ihre wissenspolitische Bedeutung und ihre soziotechnische Entwicklung erforscht, kann einen Beitrag zu einer solchen »reflexiven« Technikentwicklung leisten (vgl. Beck et al. 1996).

Auf Basis des aktuellen Forschungsstandes zu den bestehenden Ansätzen, die längere Zeiträume in den Blick nehmen, scheinen Governance-Bemühungen notwendig, also kooperative und koordinierende Handlungs- und Aufmerksamkeitsroutinen im Feld großer technischer Infrastrukturen. In diesen sollten zukünftige Entwicklungen

lung des Textes haben uns Elske Bechthold, Lea Winter und Nina Frölich unterstützt, denen wir an dieser Stelle ebenso danken wie den Kolleg*innen aus dem SOTEC-radio-Team.

- 2 Analysen zu Nuklearunfällen in Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima sowie zu Endlagern für chemotoxische Abfälle liefern dafür einschlägige Hinweise (Liebert et al. 2016; Czada 2013; Buser 2017).
- 3 Zu dieser Art großtechnischer Systeme gehören beispielsweise das der Energieerzeugung und Mobilität, aber auch der (nuklearen und nicht-nuklearen) Abfallentsorgung (zur Abfallentsorgung siehe Grunwald 2016, S. 311-329 und Grunwald 2010, S. 254-257).
- 4 Siehe dazu zum Beispiel Oliver Sträter beim Kick-off-Meeting des BMWi-Vorhabens TRANSENS im Januar 2020 (Mitschrift ITAS).
- 5 Zum hier verwendeten Governance-Begriff, der zentral auf Maßnahmen der Koordination und Kooperation eines breiten Akteursspektrums abstellt siehe Hocke 2015: 188f.

so vorgeplant werden, dass auch unter ungünstigen Bedingungen Handlungsfähigkeit erhalten bleibt. Da Ungewissheiten systemimmanent in das Management und in die Governance einzubinden sind, verwenden die Autor*innen hier nicht den Begriff der Steuerung, sondern unterstreichen die Vorstellung, dass ein spezifischer zukunftsgerichteter Blick erweiterte Reflexionsmöglichkeiten anbietet. Im Hinblick auf das Fällen kollektiv verbindlicher Entscheidungen mit Zukunftsbezug verwenden wir den Begriff der *long-term Governance* (Kuppler/Hocke 2019). Im Kontext der Innovationsforschung lässt sich der Begriff der Navigation als proaktives Element stark machen (Scheer/Grunwald 2017; Scheer et al. 2020: 25f.).⁶ Navigation wird hier als Entscheidungsmodus verstanden, der sich in besonderer Weise unter Bedingungen der Ungewissheit durch Flexibilität und gleichzeitig zielorientiertes kollektives Handeln auszeichnet und sich anhand aktueller Herausforderungen immer wieder neu ausrichtet.⁷ Navigation könnte somit Bestandteil von *long-term Governance* sein, welches Navigieren unter Ungewissheit mit Routinen und Managementstrukturen zu verbinden sucht, welche zukünftiges Handeln ermöglichen sollen.

Routinen und Managementstrukturen allein sind kein Garant, dass ausreichende Sensibilität für das Aufdecken von Fehlern vorhanden ist (Sträter i.E.). Gerade Routinen verhindern sicherheitstechnisch relevante »Aufmerksamkeiten« und kollektives Problembewusstsein bezüglich der Notwendigkeit, in der Kontrolle und Wartung großer technischer Infrastrukturen alternative Entscheidungspfade oder technische Alternativen mit einzubeziehen. Eine schwache Selbstreflexion und das blinde Vertrauen auf bekannte Phänomene kann einen negativen Einfluss auf großtechnische Ereignisabläufe ausüben.

Weiterhin zeigen die Arbeiten von Perrow (1988) und Sträter (i.E.), dass die kritische und reflexive Auseinandersetzung mit Sicherheitsaspekten häufig von zentralen Stellen des Sicherheitsmanagements nicht unterstützt oder sogar aktiv verhindert wird. Großtechnische Unfälle wie die Challenger-Katastrophe oder Fukushima sind davon ein beredtes Beispiel. Soziale Mechanismen positiver Anerkennung für das Melden möglicher Fehler oder Vorahnungen werden von den eingebundenen Institutionen und Mitarbeiter*innen nicht geschaffen und/oder – so unsere These – nicht ausreichend beachtet. Für die Lücke sind drei Aspekte in besonderer Weise ausschlaggebend: kurzfristige wirtschaftliche Interessen, zurückhaltendes Behördenhandeln und die Zeiträume. Auch Aufsichtsbehörden als administrativ angelegte Groseinheiten mit stark reguliertem Handlungsrahmen sind nicht per se durch Offenheit und Prinzipien plural strukturierter Wissenspolitik angetrieben (Hill 2020). Infrastrukturkritische Stakeholder werden daher auch von ihnen häufig als Störenfriede etablierter Prüfverfahren betrachtet. Diese Einstufung hat zur Folge, dass ihre Handlungen sowie die damit verknüpften

6 Steuerung dagegen ist konzeptionell auf bestehende Sicherheitsrichtlinien ausgerichtet und nimmt eine proaktive gehandhabte Fehlerkultur nicht in den Blick.

7 Vergleiche dazu die konzeptionelle Ausrichtung der Standortsuche für Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle, die seit 2017 stattfindet und sich auf ein selbstlernendes stufenweises Verfahren ausrichtet, das Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur und Reversibilität von Entscheidungen grundsätzlich vorsieht (siehe dazu den Beitrag von Smeddinck »Reversibilität in Entscheidungsprozessen« in diesem Band).

inhaltlichen Positionen nicht als Impulse, die zur Überprüfung eigener Gewissheiten dienen können, anerkannt werden. Der Aspekt »Zeitraum« betrifft die immer wieder sehr lange Zeitspanne, über die technischen Infrastrukturen oder großtechnische Abläufe wie das Entsorgen gefährlicher Abfälle betrieben werden.

Großtechnische Infrastrukturen oder eingespielte technische Abläufe werden häufig insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen und kurzfristigen Gewinnerwartungen über lange Zeiträume betrieben: Konventionelle Kraftwerke haben Lebenszeiten von drei oder vier Jahrzehnten, Tunnelbauwerke werden immer wieder länger als 100 Jahre genutzt und Talsperren werden ebenso häufig über 60 oder 80 Jahre betrieben. Der Betrieb dieser technischen Infrastrukturen geht also immer wieder über die »nahe Zukunft« von ein oder zwei Legislaturperioden oder über eine Generation von Spezialisten hinaus. Er erreicht mit mehreren Jahrzehnten eine »mittlere Zukunft«. Folgen heutigen Handelns werden teilweise erst in der mittleren Zukunft sichtbar, wenn heutige Verantwortliche nicht mehr zuständig sein werden. Dies kann dazu führen, dass Verantwortung delegiert und der Fokus auf kurzfristigen »Erfolg«, das heißt insbesondere kurzfristigen ökonomischen Gewinn, wie auf spätere technische Fortschritte gelegt wird. Dass dieser Fortschritt gerade unter Bedingungen knapper Ressourcen nicht immer eintritt, scheint kaum berücksichtigt zu werden.

Das Aufdecken von möglichen Fehlentwicklungen zu fördern, welche in der mittleren Zukunft auftreten könnten, wird dadurch erschwert, dass wir die technischen Möglichkeiten, Ressourcen und gesellschaftliche Randbedingungen der mittleren Zukunft nicht kennen. Grunwald, aber auch die Science and Technology Studies (STS) verweisen an verschiedenen Stellen darauf, dass diese Zukünfte offen sind und gerade angesichts erwartbarer Nebenfolgen der Technologien, die beim Einsatz von Technologie in diesen großen Infrastrukturen sicherheitstechnisch zum Tragen kommen, nicht prognostiziert werden können (Grunwald 2020).

In der Regel wird bei einer Auseinandersetzung mit der Zukunft davon ausgegangen, dass Ideen von der Zukunft von einem Akteur entwickelt werden und die Zukunft dadurch gestaltet wird, dass diese Ideen umgesetzt werden. Dabei handelt es sich um eine sehr vereinfachte Vorstellung, die in der Technikforschung zunehmend in Frage gestellt wird. Bei der Kerntechnik und der nuklearen Entsorgung, aber auch bei Technologie allgemein werden in der Debatte und den Analysen der soziotechnischen Zukünfte, diese Zukünfte als antizipierende Denkmuster immer wieder auf ihre Plausibilität und ihre Legitimität geprüft. Bei dieser Prüfung werden sowohl die technische wie auch die soziale Seite in den Blick genommen und die Zukünfte entsprechend angepasst.⁸ Auch hier findet sich also ein Argument dafür, dass einschlägiges Management- oder Systemwissen nicht als stabil und selbstverständlich abgesichert vorausgesetzt werden kann.

Wenn soziale Prozesse und Entwicklungen nicht vorhersehbar sind, dann besteht heute, bei auf längere Zeit ausgelegten Technologien, keine Notwendigkeit, vorausschauend zu planen und Vorkehrungen zu treffen. Dies wäre eine mögliche Position, die in diesen großtechnischen Feldern wegen der eingeschränkten Prognostizierbarkeit als Argument angeführt werden könnte. Die hier durchgeführte empirische Forschung zu

8 Ausführlich zu diesem Zusammenhang siehe Lösch/Grunwald/Meister/Schulz-Schaefer 2019.

Climate Engineering (CE) oder Talsperren und vergleichbaren Bauwerken weist jedoch in eine andere Richtung.

Wenn heute mittlere Zukünfte in den Blick genommen werden, wird zunehmend analysiert, wie soziotechnische Zukunftsbilder die Gegenwart beeinflussen. Die Analyse dieser Zukunftsbilder soll dazu beitragen zu erkennen, wie diese Zukunftsbilder Prozesse fachpolitischen Handelns, öffentlicher Debatten und aktueller Technologieentwicklung prägen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Zukunftsbilder dies in den genannten drei Kontexten in gleicher Weise tun (Lösch/Grunwald/Meister/Schulz-Schaefer 2019: 1; Grunwald 2019: 17).

Fehlentwicklungen bei einzelnen Großtechnologien verändern gesellschaftliche Zustände in der Gegenwart auf eine Weise, die es unmöglich macht, nach ihrer Einführung wieder zum Ausgangspunkt, also dem Zustand der Gesellschaft vor ihrer Einführung zurückzukehren (Czada 2016). Diese Technologien lösen verändernde Impulse aus, die weit in die Zukunft hineinwirken. Wenn dem so ist, bedarf es heute interdisziplinärer Technikfolgenabschätzung, die sowohl technische Entwicklungslinien, die Aufsichts- und Fehlerkultur und die Governance wichtiger großtechnischer Systeme wie das der Energieerzeugung und Mobilität, aber auch der (nuklearen und nicht-nuklearen) Abfallentsorgung wissenschaftlich und soziotechnisch im Auge behält. Zudem bedarf es einer Governance, also kooperativer und koordinierender Handlungs- und Aufmerksamkeitsroutinen im Feld großer technischer Infrastrukturen, die in die Zukunft hinein andenkt oder mindestens so vorplant, dass auch unter ungünstigen Bedingungen Handlungsfähigkeit vorbereitet wird.

Die Forschung zu soziotechnischen Zukünften weist darauf hin, dass eine solche vorausschauende Planung in gewisser Weise ohnehin vonstattengeht, wenn auch implizit. Dies gilt auch für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Die handelnden Akteure in einem Technologiefeld haben bei ihrem täglichen Handeln und ihren Entscheidungen immer ein bestimmtes Bild der Zukunft als Grundlage – beispielsweise davon, wie ein Endlager ausgestaltet werden soll. Für die vorausschauende Planung und das Treffen von Vorkehrungen bedeutet dies, dass diese impliziten Annahmen die Offenheit für Planänderungen sowie für das Entdecken und Bearbeiten von Fehlern beeinflussen.

In diesem Beitrag werden bestehende große technische Infrastrukturen empirisch untersucht, um Governanceprozesse zu analysieren, welche das Aufdecken von Fehlern begünstigen. Weiterhin geht es darum, institutionelle Lernprozesse zu identifizieren und deren Übertragbarkeit auf den Fall der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu prüfen.

Tiefenlager und große Infrastrukturprojekte im Vergleich. Zu Konzept und Methode

Konzeptionell und methodisch sind in der Techniksoziologie ebenso wie in der Technikfolgenabschätzung nur wenige Studien zu identifizieren, die sich detailliert mit der Fehler- und Sicherheitskultur großer Infrastrukturen oder technischer Systeme auseinandersetzen. Ausnahmen sind die Untersuchungen zur Technikgenese (z.B. Bijker 1997) oder der Flugsicherheit und ähnlichen Phänomenen (Weyer 2008). Sicher erscheint,

dass staatliche Akteure und Regierungsorganisation (z.B. Kontrollbehörden wie das Bundesamt für Strahlenschutz oder die Bauaufsicht) bei langen Zeiträumen eine nicht zu vernachlässigende Rolle im notwendigen Kulturwandel spielen. Nicht erwünschte Ereignisse wie das Versagen von Steuerungseinrichtungen oder menschliches Versagen zeigen, dass Vorausschau und Prävention in der technischen Umsetzung, aber auch im soziokulturellen Kontext (Aufsichts- und Fehlerkultur) die Fehleranfälligkeit eines Systems stark prägen. Um ein zuverlässiges Erkennen, Bearbeiten und Verhindern von Fehlern zu gewährleisten müssen sich die Institutionen flexibel an sich ändernde Rahmenbedingungen anpassen können oder von begleitenden Institutionen unterstützt werden. Dabei ist eine funktionale Differenzierung für die Fortentwicklung begleitender Institutionen allerdings nicht ausreichend. Flexibilität meint auch, dass Institutionen – ob staatlich, halbstaatlich, privat oder gemeinwirtschaftlich ausgelegt – außerdem »lernfähig« sein müssen (siehe zu lernfähigen Institutionen auch den Beitrag von Mbah/Brohm »Das Lernen in Organisationen« in diesem Band). In der Literatur werden die im günstigen Fall entstehenden Governance-Strukturen, die unterschiedlichste Institutionen und Stakeholder je nach Herausforderung auch früh einbinden, als dynamisch und entwicklungsfähig beschrieben. Dazu – so die hier vertretene konzeptionelle Grundidee – gehört es, dass Governance-Strukturen Gelegenheiten zur Innovation nutzen, aber auch Eigenwilligkeiten einzelner Akteure ernstnehmen und auf das erwartbare Auftreten nicht intendierter Folgen reagieren können.⁹

Um Fragen der Governance über lange Zeiträume nachzugehen, wurden für das SOTEC-radio-Teilprojekt »Planungs- und Langzeitprozesse« Vergleichsfälle ausgewählt, deren technisches Infrastrukturvorhaben ein vergleichbar hohes Maß an Sicherheit erfordert, wie die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, und die gleichzeitig einer *long-term* Governance bedürfen. Mit Czada (2016) erfordern Technologien, welche vier Merkmale erfüllen, einer *long-term* Governance: (1) Die Implementierung verursacht irreversible Veränderungen von Gesellschaft und Umwelt. (2) Ein Abbruch der Kontrolle des technischen Vorhabens würde zu Nachteilen und Schäden für Gesellschaft und Umwelt führen. (3) Die Möglichkeit, die Technologie zum aktuellen Zeitpunkt abschließend zu regulieren, ist insofern beschränkt, als unsicher ist, wie sich das soziotechnische Gesamtsystem durch die Implementierung und den Betrieb der technischen Anlage mit ihren Infrastrukturelementen über die längeren Zeiträume verändern wird. (4) Ziel der institutionalisierten Kontrolle durch ein Governance-Netzwerk ist der Erhalt des Gemeinwohls gerade über längere Zeiträume hinweg. Wie sich in einer Vorstudie zeigen ließ, erfüllt die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem Tiefenlager diese Voraussetzungen (Kuppler 2019: 5).

Basierend auf diesen Charakteristika sowie einer Kurzanalyse der bestehenden Literatur wurden folgende Infrastrukturprojekte zur vergleichenden Analyse ausgewählt: (1) Talsperren, (2) Verkehrsüberwachung am Beispiel des Eisenbahnverkehrs, (3) Climate Engineering. Bewusst wurden methodisch keine ähnlichen Fälle mit radioaktivem oder chemotoxischem Zusammenhang gewählt. Entscheidend für die Auswahl war viel-

9 Siehe dazu Haus 2010 und den Beitrag von Lösch »Welche Unterscheidung braucht die Endlagerforschung?« in diesem Band.

mehr die Größe und die Eingriffstiefe der Infrastruktur.¹⁰ Wie in der Tabelle am Ende des Beitrages zu sehen ist, erfüllen die gewählten Fälle die oben genannten Merkmale, gleichwohl auf unterschiedliche Weise. So scheinen die Regulierungsmöglichkeiten bei Talsperren auf den ersten Blick relativ gut, jedoch treten bei Neubauten unerwartete Veränderungen von Gesellschaft und Natur auf. Bestehende Anlagen erhalten unter Umständen durch eine Einbettung in neue Kontexte, wie die Energiewende, eine veränderte Bedeutung und werden dadurch Teil eines nur bedingt regulierbaren dezentralen Energiesystems. Offen ist weiterhin, wie sich die Wartungssituation verändern wird, sollte eine Talsperre einmal nicht mehr wirtschaftlich genutzt werden können und somit das Erhaltungsinteresse sinken.¹¹ Auch bei der Verkehrsüberwachung im Schienenverkehr handelt es sich um eine große technische Infrastruktur bei der mit dem Transport von zahlreichen Passagieren, erheblichen Mengen an Waren und Gefahrgut sowie hohen Geschwindigkeiten, Gefährdungslagen nach Möglichkeit auszuschließen sind. Bei Climate Engineering sind es die nicht auszuschließenden globalen irreversiblen Veränderungen, die bereits einen Feldversuch zu einem schwer abzuschätzenden Risiko machen (Hiller/Renn 2013: 35-37). Die ausführliche Darstellung der Differenzen, die die Notwendigkeit von *long-term* Governance verdeutlichen, erfolgt in einer Tabelle am Ende dieses Beitrags.

Es geht folglich um die Gestaltung und Fortentwicklung von Infrastrukturprojekten, bei denen Betriebszeiten über lange Zeiträume die Regel sind und damit um Vorhaben, bei denen der Abbruch von professioneller Kontrolle Schadensereignisse mit erheblicher Eingriffstiefe zur Folge haben kann. Institutionelle Stabilität bei Betreibern dieser Infrastrukturen kann aufgrund der langen Zeiträume nur bis zu einem gewissen Grad vorausgesetzt werden. Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen wird anhand unterschiedlicher Vergleichsfälle untersucht, wie bei bestehenden Infrastrukturen Stabilität und Sicherheit hergestellt werden, um in einem zweiten Schritt Hinweise zu bekommen, welche Elemente der professionellen und sicherheitstechnischen Ausgestaltung Stabilität und Sicherheit auch bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle absichern können. Methodisch wurde auf ein mehrstufiges, konzeptionell untermauertes Verfahren gesetzt. In diesem wurden Konzepte aus der qualitativen Sozialforschung mit einschlägigen Methoden aus der Technikfolgenabschätzung kombiniert und an die problemorientierte Fragestellung angebunden. Mittels Literaturanalyse, qualitativer leitfadengestützter Interviews sowie einem Fachgespräch wurden die drei Fälle Talsperre, Verkehrsüberwachung am Beispiel des Eisenbahnverkehrs sowie Climate Engineering untersucht.

10 Bei der Anlage von Vergleichsstudien besteht die Möglichkeit zwischen *most similar* und *most different cases* zu entscheiden. Die Autor*innen haben sich für *most similar cases* entschieden. Ihnen ist gemeinsam, dass die Sicherheit über längere Zeiträume nicht technologisch inhärent abgesichert werden kann, fehlerhafte Routinen und Unaufmerksamkeit zu erwarten sind und die Technologien eine große Eingriffstiefe besitzen (zum Begriff der Eingriffstiefe siehe Gleich 1988).

11 Zu Wasserkraftprojekten siehe Böttcher 2014, Heimerl 2013 und Heimerl 2015 sowie zu ihrer historischen Vorgeschichte Linse et al. 1988.

In den qualitativen leitfadengestützten Interviews wurden ausgewählte Personen¹² zu ihrer Perspektive auf die verschiedenen Fälle befragt: Aufgrund ihrer Tätigkeit, Position oder aktiven Partizipation verfügten die Interviewteilnehmer*innen über fall-spezifische Expertise – eine Art »besonderes Wissen«, welches sie zu Expert*innen für die ausgewählten Vergleichsfälle mit ihren soziotechnischen Herausforderungen macht (Meuser/Nagel 2009). Dieses Wissen befähigt sie, Ursachen von Problemen zu erkennen, und ermöglicht ihnen, prinzipielle Lösungen für diese anzubieten (Pfadenhauer 2009). Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse – einem etablierten Verfahren der empirischen Sozialforschung (Kuckartz 2018). Zur Ergänzung und Validierung der Interviewergebnisse wurde zusätzlich ein Fachgespräch mit weiteren Expert*innen durchgeführt. Es wurden insbesondere am Beispiel von Talsperren sowie der Verkehrsüberwachung im Schienenverkehr die Aspekte, die sich bei der Interviewauswertung als zentral herausstellten, vertiefend besprochen.

Merkmale der institutionellen Ansätze zur Überwachung und Regulierung der untersuchten Infrastrukturprojekte. Empirische Ergebnisse

Im Folgenden werden Merkmale dreier Großtechnologien betrachtet, die für die vergleichende Analyse mit der Langzeit-Governance der nuklearen Entsorgung und dabei insbesondere der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle soziotechnisch von Bedeutung sind. Die zentralen Ergebnisse werden hierzu fallspezifisch vorgestellt. Die Darstellung der Empirie zentriert dabei insbesondere auf die soziotechnischen Bruchstellen, die mit der Governance über längere Zeiträume zusammenhängen um die komplementären Herausforderungen zu benennen.¹³ Zur Erläuterung werden exemplarisch anonymisierte Interviewaussagen angeführt.¹⁴

Talsperren

Fragen institutioneller Regulierung und Überwachung von Talsperren nehmen nur einen kleinen Teil der wissenschaftlichen Fachdiskussion zu anlagenbezogenen Sicherheitsfragen ein.¹⁵ Sicherheit wird hauptsächlich auf der Ebene der konkreten Instandhaltung und praktischen Erfahrungen diskutiert, das heißt die unmittelbar anstehenden praktischen Vorgehensweisen bei der Umsetzung von Sicherheit stehen im Mit-

12 Die Auswahl der Personen erfolgte nach Akteursklassen und persönlichen Einschätzungen, ob die anzufragenden Personen möglicherweise über soziotechnische Zusammenhänge sprechen können. Die Interviews dauerten zwischen 60 und 90 Minuten. Sie wurden anonymisiert, transkribiert und mithilfe einer Analysesoftware ausgewertet.

13 Bei der Interviewauswertung war nur selten zu erkennen, wie genau die Langzeitherausforderungen systematisch bearbeitet werden. Die Analyse konzentrierte sich daher auf die erkannten Herausforderungen (siehe Fazit).

14 Eine ausführlichere Darstellung der Interviewergebnisse ist hier ebenso wie in den Kapiteln zu Schienenverkehr und Climate Engineering aufgrund des begrenzten Umfangs des Buchbeitrages nicht möglich.

15 Die Darstellung konzentriert sich hier auf Talsperren in Deutschland.

telpunkt. Talsperren sind Bauwerke, die eine gesamte Talsohle absperren, in welcher ein Fließgewässer verläuft, und dadurch die Bildung eines Stausees verursachen. Sie können als Staumauern oder aus Erdbaustoffen (Staudamm) gefertigt sein (Nisipeanu 2010). Ihr Hauptzweck liegt in der Wasserversorgung und Energieerzeugung. Auch für den Hochwasserschutz und die Schiffbarmachung von Flussläufen spielen sie eine wichtige Rolle. Dabei ist zu beachten, dass Talsperren in den meisten Fällen keine standardisierten Bauwerke sind, sondern spezielle Anlagen, die den örtlichen Bedingungen angepasst werden (Detering 2014).

Betont wird in der Literatur, dass es sich bei Talsperren um Infrastrukturanlagen mit besonders hohem Risikopotential handelt¹⁶, welche besondere Sicherheitsvorkehrungen und Maßnahmen in Betrieb, Überwachung, Instandhaltung und Modernisierung erfordern (Aufleger 2018). Dazu gehört beispielsweise, dass relevante Werte redundant erhoben werden, die für die Beurteilung der Betriebssicherheit benötigt werden (Scheuer 1999). Bei den folgenden empirischen Ergebnissen zeigte sich, dass mehrere zentrale Aussagen aus der Literatur in den Experten*innen-Interviews bestätigt und präzisiert wurden.

Talsperren sind – so die Expert*innen – etablierte Technologien, die zwar immer wieder optimiert werden, in ihrer technischen Grundstruktur aber seit über 100 Jahren bestehen – es ist »eine etablierte Technologie, die man beherrscht« (I5)¹⁷. Geplant werden die Bauwerke in der Regel für ca. 80 Jahre. Nach Ablauf dieser Zeit wird intensiv geprüft, in welchem Zustand sich die Talsperre befindet und es werden gegebenenfalls entsprechende Sanierungsmaßnahmen vorgenommen. Auch in der Literatur wird auf ähnliches verwiesen. Hier wird erläutert, dass im Schnitt Betriebszeiträume von 50 Jahren geplant werden, in Wirklichkeit aber deutlich längere Betriebszeiten der Fall sind. Besitzerwechsel, die insbesondere während der Betriebsdauer einer Talsperre stattfinden, müssen gut organisiert sein (Aufleger 2018). Der Rückbau einer Talsperre sei prinzipiell möglich, werde in der Praxis jedoch nur selten umgesetzt, da dies einen aufwendigen (Rückbau-)Prozess mit sich bringt. Weiterhin könne gerade für Wasserbauwerke zur Trinkwasserversorgung nicht auf bestehende Anlagen verzichtet werden (I5).

Da die Betriebsdauer in der Regel den geplanten Zeitraum übersteige, müsse schon beim Design des Bauwerkes und bei der Auswahl der Baustoffe bedacht werden, dass in späteren Betriebsphasen Nachbesserungen nicht auszuschließen seien. Die Planungen und Bauentscheidungen stehen insgesamt allerdings unter wirtschaftlichen Sachzwängen (I4). Der Druck, die Investitionen beim Bau möglichst niedrig zu halten, stehe dem Anspruch entgegen, ein Bauwerk für die Ewigkeit zu schaffen (I5). Investitionsentscheidungen würden eher für einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren getroffen. Das Langzeitverhalten, das darüber hinausgehe, spiele in der Planungsphase insgesamt eine untergeordnete Rolle.

Talsperren, die zum Zweck der Energieerzeugung gebaut werden, – so ein weiteres Ergebnis der Interviews – seien häufig in der Hand von Energieversorgungsun-

16 Zu den hier wichtigen Risikoaspekten siehe Schulz/Adams 2019, Fischer 2018 und Kornijów 2009.

17 Die älteste Talsperre Deutschlands ist die 1891 eröffnete Eschbachtalsperre (<https://de.wikipedia.org/wiki/Eschbachtalsperre>).

ternehmen. Hochwasserschutz und Wasserversorgung dagegen liegen oft in der Hand von kommunalen Verbänden oder öffentlichen Einrichtungen (I4). Privatwirtschaftliche Unternehmen wie Energieversorger, die zwar einem öffentlichen Versorgungsauftrag nachkommen, zentrieren aus wirtschaftlicher Perspektive aber meist auf etablierte Kosten-Nutzen-Abwägungen. Die längeren Zeiträume der Betriebszeit spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Nach einer gewissen Betriebsdauer gingen ein Großteil dieser Talsperren oftmals an den Staat über, was die Unternehmen von der Notwendigkeit, eine Langzeitplanung zu betreiben, praktisch entbindet und diese somit konterkariert. Weiterhin zeige sich, dass nach Inbetriebnahme Anlagen dieser Art oftmals anderen Einflüssen ausgesetzt sind, als bei der Planung betrachtet wurden. Hierbei handelt es sich beispielsweise um extreme Wetterereignisse (wie Starkregen), die sich im Zuge des Klimawandels voraussichtlich verstärken werden. Inwiefern diese veränderten Umweltbedingungen bei der Planung berücksichtigt werden sollen und wie schon bestehende Anlagen gegebenenfalls auf diese Bedingungen hin angepasst werden müssen, werde – so die Interviews – aktuell von Betreibern und Behörden diskutiert. Die soziotechnische Herausforderung in dieser Diskussion liegt, so die Beobachtung der Autor*innen, in der Ausbalancierung der Fragen, was technisch machbar ist, was wirtschaftlich möglich und was ethisch gefordert wird. Eine Antwort auf diese Frage zu finden und umzusetzen, stellt bei Talsperren eine zentrale soziotechnische Herausforderung dar.

Der Bau von Talsperren ist mitunter stark umstritten. Die Eingriffstiefe in die Umwelt sei gerade bei großen Bauten extrem hoch (I4, I5). Die Auswirkungen, die ein solches Bauwerk auf das umgebende Ökosystem hat, führen immer wieder dazu, dass sich Naturschutzverbände und NGOs gegen Talsperren positionieren. Dies treibt zwar einerseits die Suche nach nachhaltigen Lösungen voran, gleichzeitig wird aber das Finden einer soziotechnischen Lösung, die die Talsperre über lange Zeit sicher in das Energienetz einbinden nicht in jedem Fall erleichtert. Da Talsperren in der Energieversorgung als Speichertechnologie eingesetzt werden, kommt ihnen mit Blick auf die Energiewende eine wichtige Funktion zu. So steht der Naturschutz hier mitunter mit Klimaschutz im direkten Konflikt, so ein weiteres Ergebnis der Expert*innen-Interviews (I4, I5).

Die sicherheitstechnische Überwachung und Überprüfung der Talsperren findet in Deutschland in erster Linie durch den Betreiber statt (Schrenk 2013: 407). In den Interviews wurde uns von folgenden weiteren Sicherheitsüberprüfungen berichtet: Fachpersonal, welches mit der Anlage vertraut ist, führe regelmäßig »visuelle Kontrollen« durch; daran schließen sich auch Messungen an, um etwaige Schäden möglichst früh zu entdecken und beheben zu können (I4). Auch die Behörden – in Deutschland sind dafür die Behörden auf Landesebene zuständig – führen regelmäßige Kontrollen durch.¹⁸ Ein Großteil der Sicherheitsüberprüfung erfolgt über in DIN-Normen festgelegte Kriterien.

18 In Deutschland sind Genehmigung und Überwachung von Talsperren Ländersache. Im Wasserhaushaltsgesetz, welches das relevante Gesetz auf Bundesebene ist, sind keine gesonderten Vorschriften für diese Arten von Anlagen zu finden (Nisipeanu 2010). Allgemein gelten nach Länderrecht Anlagen als Talsperren, die eine Staumauer oder einen Staudamm von über fünf Meter Höhe sowie ein Rückhaltevolumen von mindestens 100.000m³ besitzen. Die Definition und die damit verbundene Regulierung finden somit über das Risikopotential und nicht über die technische Ausführung der Anlage statt (ebd.).

Nicht alle potenziellen Gefährdungslagen könnten mit Hilfe technischer Mittel erkannt werden (Scheuer 1999). Daher ist das Aufrechterhalten visueller Kontrollen einerseits überraschend, andererseits zeigt der Fall auch, dass sie Vorteile haben. In der Literatur zu Talsperren sind keine Ansätze zu finden, wie in dieser Konstellation (Überwachung in der Hand des Betreibers) eine hochwertige Ausführung derselben dauerhaft sichergestellt werden kann. Aufleger empfiehlt dahingehend nur, dass bei größeren Anlagen mit entsprechend größerem Gefährdungspotential die Behörden eine wichtigere Rolle in der Überwachung spielen sollten, als bei kleineren Anlagen (Aufleger 2018: 381).

Maßnahmen, die bei Sicherheitsproblemen durchgeführt werden müssen, haben mitunter großen Einfluss auf den Betriebsablauf. Wird ein Problem beobachtet, werden hierzu unmittelbar Daten erhoben und möglichst schnell ausgewertet. Wenn das Problem als gravierend eingeschätzt wird, ist es zuweilen nötig, dass das Wasser der Talsperre abgelassen wird, um das Problem zu beheben. Dies wird aber versucht möglichst zu verhindern, da es den Betriebsablauf grundlegend beeinträchtigt und hohe Kosten verursacht. Im Hinblick auf die Frage der Governance sicherheitsrelevanter Betriebsabläufe ist dies als Spannungsfeld zu werten. Auf internationaler Ebene werden Sicherheitsfragen in Kommissionen wie der »International Commission on Large Dams (ICOLD)« diskutiert, deren Ergebnisse auch für Deutschland relevant sind. Nach Meinung der Expert*innen tragen Publikationen dazu bei, Standards auf internationaler Ebene zu etablieren (I4): »Erstmal haben wir aktuell den Eindruck, dass es da einen guten Austausch gibt, was Sicherheitsfragen betrifft, weil keiner hat Interesse, dass da irgendwas passiert, sondern wir sitzen alle im gleichen Boot.« (I4)

Auch wenn es – vor allem auf internationaler Ebene – zu Katastrophen kommt, bei denen Talsperren schwer beschädigt werden und erhebliche Folgeschäden entstehen, würden sie – nach Ansicht der Expert*innen – in der öffentlichen Wahrnehmung als durchaus sicher betrachtet. Werden sie zum Hochwasserschutz erbaut, tragen sie durch ihre Funktion zu mehr Sicherheit bei (I5). Die gesetzlichen Vorgaben zu Überprüfungen und die regelmäßige Berichterstattung erzeugen einen gewissen Druck, der dazu führe, dass der Sicherheitsaspekt auch über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werde. »Das aller, allerwichtigste ist die Verantwortung des Betreibers. (...) die Betreiberverantwortung steht (...) wie philosophisch (...) auch immer, über allem.« (I4)

Schienenverkehr

Die Verkehrsüberwachung beim Schienenverkehr steht insbesondere durch die erhöhte Mobilität in allen Verkehrsnetzen vor erheblichen Herausforderungen und dies nicht nur in wirtschaftlicher Hinsicht. Insbesondere der öffentliche Sektor kann mit den chronisch unterfinanzierten Kassen auch in wohlhabenden Staaten öffentliche Verkehrsnetze wie den Schienenverkehr meist nicht synchron zur Veränderung des Bedarfs und der dynamischen technologischen Entwicklung anpassen. Modernisierungslücken und die schiere Größe der Anlagen machen ein professionelles Sicherheitsmanagement auch angesichts der ansteigenden Verkehrsdichte, der zunehmenden Vernetzung und der Beschleunigung der verschiedenen Verkehrsformen zu einer dauerhaften Innovationslücke (z.B. europäisches Schienennetz im Personenverkehr). Gleichmaßen sind größere Unfälle als Gefahr (u.a. wegen der bewegten Masse eines Eisenbahnzuges)

ebenso ernst zu nehmen wie Gefahrensituationen, die wegen der Nebenfolgen größerer und kleinerer Unfälle im Schienennetz nach Möglichkeit nicht stattfinden sollen. Die Verhinderung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmenden ist seit mehr als 150 Jahren daher im Schienenverkehr ein ausgesprochen wichtiger Gesichtspunkt.

Beim Schienenverkehr handelt es sich um eine bauliche Infrastruktur, welche sich in ihren Randmerkmalen zunächst stark von einem Endlager unterscheidet. Ebenso wie ein Endlager ist es aber eine Infrastruktur, die weit in Räume hineingreift.¹⁹ Bei ersterem handelt es sich um ein Netzwerk aus vielen verschiedenen Einzelbauwerken, welche einen großen geographischen Raum umfassen und in ihrem Zusammenspiel dafür sorgen sollen, dass Unfälle weitgehend ausgeschlossen werden können. Bei einem Endlager handelt es sich im Kern um ein zentrales Bauwerk, welches die Abschirmung des Abfalls von der Umwelt garantieren soll und welches weitere Infrastrukturelemente für den Bau und Betrieb benötigt (Zubringerverkehr, technische Versuchsanlagen etc.). Trotzdem sind die Erfahrungen in der Umsetzung von Sicherheitsaspekten im Schienenverkehr für die *long-term* Governance der Endlagerung von Interesse. Zum einen trägt im Schienenverkehr, wie bei der Endlagerung auch, eine zentrale Institution die Letztverantwortung für die Sicherheit (Eisenbahnbundesamt). Diese Institution hat es im Fall des Schienenverkehrs geschafft, sehr komplexe Strukturen über lange Zeiträume an sich stark verändernde Kontextstrukturen anzupassen (z.B. Europäisierung, Privatisierung, Elektrifizierung). Mit diesen Anpassungen gingen zum anderen häufig auch Veränderungen einher, wie Entscheidungsprozesse stattfinden (z.B. dezentral vom Weichensteller an jeder Weiche, hin zu zentral in der Leitzentrale). Manche dieser Entscheidungen führten zu Sicherheitsproblemen, welche wiederum Lernprozesse auslösten, andere zu eingeschränkter Dienstleistung (z.B. Brücken, über die man nur noch mit 50km/h fahren darf statt mit Vollgeschwindigkeit). Aus dem Umgang mit den positiv wie negativ verlaufenen Anpassungsprozessen kann für die Endlagerung gelernt werden.

Bezüglich des Literaturbestands gilt hier das gleiche wie für Talsperren. Er ist nicht sehr umfangreich und Sicherheit wird hauptsächlich auf der Ebene der Arbeitspraktiken diskutiert. Dazu gehören beispielsweise technische Aspekte der Infrastrukturplanung und -instandhaltung sowie Methoden der Verkehrsplanung und der Risikokalkulation (siehe z.B. Pachl 2016; Fendrich/Fengler 2013; Fenner et al. 2011). Auch bei der Eisenbahninfrastruktur gilt dabei, dass bei Sicherheitsberechnungen nicht immer auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden kann, da viele Infrastrukturelemente einzigartig sind (beispielsweise Brücken) und Sicherheitsanforderungen teilweise Erfahrungszeiträume übersteigen. So besteht zum Beispiel die Anforderung: »ein Ausfall in 100.000 Betriebsjahren«, das heißt statistisch gesehen darf es nur einen Unfall im genannten Zeitraum geben (Braband 2013).

19 Die Raumwirkungen von Schienennetzen und die Unterbrechung von Landschaften durch Bahndämme etc. hat ebenso Raumwirkungen, die weit in die Fläche hineingehen, wie Raumwirkungen von Infrastrukturen der nuklearen Entsorgung. Zu einem Tiefenlager gehören ebenso Wartungseinrichtungen, Transportrouten und Konditionierungsanlagen, die ebenso wie ein Tiefenlager nicht risikofrei sind.

Da eine Institution die zentrale Verantwortung für die Sicherheit hat, wird auch zentral festgelegt, wann welches Fahrzeug an welcher Stelle des Gleisnetzes fahren darf. Busch (2011) weist darauf hin, dass dadurch Sicherheit und Effizienz gewährleistet werden. Er argumentiert aber auch, dass der Schienenverkehr durchaus davon profitieren könnte, einige Elemente der Selbststeuerung zu übernehmen, um flexibler auf Störungen reagieren zu können (ebd.). Dies könnte beispielsweise durch eine Einführung von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation geschehen, mit erhöhter Entscheidungskompetenz der Fahrer. Auf institutioneller Ebene kann dieser Vorschlag als eine Forderung nach teilweiser Dezentralisierung von Entscheidungsmacht interpretiert werden.

Der Schienenverkehr musste sich im Laufe der Zeit an eine Reihe von veränderten Kontextbedingungen anpassen, die aus Sicht der Autor*innen immer mit soziotechnischen Herausforderungen einhergingen. Zu diesen Veränderungen gehörten beispielsweise die Europäisierung und Privatisierung im Schienenverkehr. Aktuell stellen die Zentralisierung und Digitalisierung der Sicherheitssysteme eine Herausforderung in der Weiterentwicklung dieser Infrastruktur dar (I3). Neue Anlagen wie beispielsweise Metrosysteme sind bereits vollständig automatisiert, dezentrale Stellwerke werden zu Gunsten zentral organisierter Sicherheitszentren abgebaut. Die Zentralisierung führt dazu, dass weniger Personen benötigt werden, um das System zu überwachen. Die zuständigen Personen kennen zwar die Gegebenheiten vor Ort nicht mehr, haben aber mitunter mehr Kompetenzen (I3).

Die Rolle des Menschen im Sicherheitsablauf ist eine am Beispiel des Schienenverkehrs gut zu verdeutlichende Thematik. Ein Großteil der alltäglichen Aufgaben erfolgt automatisch, das Personal ist immer weniger handelnder Akteur, was zu verminderter Aufmerksamkeit führen kann und in der Folge zu möglichen Fehlentscheidungen. Auch wenn der Schienenverkehr grundlegend als eine überaus sichere Technologie gilt, gebe es doch »Systemunfälle«, so eine*r der Interviewten. Zu denen komme es trotz vorausschauender Planung: »Es gibt zertifizierte Komponenten, die entsprechen ihrer Spezifikation, (...) alle Bausteine sind irgendwie abgenommen, zertifiziert, zugelassen.« (I3) Trotzdem ereigne sich der Unfall, »weil wir die Komplexität und auch Interaktionen des kompletten Systems nicht ausreichend vorhergesehen haben.« (Ebd.)

Das Thema Sicherheit ist im Schienenverkehr von herausgehobener Bedeutung, sowohl für die beteiligten Akteure als auch in der öffentlichen Wahrnehmung. Die Überprüfungen sicherheitsrelevanter Bereiche fänden in der Regel durch den Betreiber selbst oder durch die Behörden – in Deutschland das Eisenbahnbundesamt – statt. Die European Railway Agency (ERA) ist dafür zuständig, das Thema Sicherheit integrativ auf europäischer Ebene umzusetzen und für die regionalen Systeme entsprechend kompatibel zu machen. Die Einführung einer Institution auf europäischer Ebene hat, laut Expert*innen auch dazu geführt, dass sicherheitsrelevante Aspekte systematischer und transparenter erfasst werden (I3). Eine große Herausforderung stellen hierbei die unterschiedlichen nationalen Eigenheiten – sowohl in technischer als auch kultureller Sicht – dar. Durch Selbstverpflichtungserklärungen wie der »European Railway Safety

Culture Declaration«²⁰ werden Themen wie Sicherheitskultur an die nationalen Agenturen herangetragen, um Aufmerksamkeit und Bewusstsein zu schaffen.

Generell bestätigen die Interviews, dass das Sicherheitslevel im Schienenverkehr als ausreichend betrachtet wird. Überprüfungen und Bewertungen beziehen sich daher – im Sinne eines risikobasierten Ansatzes – vor allem auf die Einführung neuer Technologien oder Veränderungen des bestehenden Systems. Kleinere Anpassungen werden von beauftragten Gutachtern überprüft, bei signifikanten Änderungen muss ein europäisch vorgeschriebener Risikomanagementprozess durchgeführt werden. Das Nachweislevel richtet sich danach, wie innovativ und komplex die jeweilige Änderung ist. »Sicherheit ist der Ast, auf dem wir sitzen. Wenn wir zwei oder drei Unfälle hätten (...) würde der Kunde das Vertrauen in uns verlieren. Sicherheit ist bei uns kein Wettbewerbsvorteil, es ist ein K.O.-Kriterium.« (I3)

Climate Engineering

Während es sich bei Staudämmen und Sicherheitsüberwachung im Schienenverkehr um großtechnische Infrastrukturen handelt, die seit mehr als 100 Jahren in Betrieb sind, befindet sich das Climate Engineering (CE) noch in einer frühen Phase der Entwicklung und wird – Stand heute – nicht eingesetzt. Erste Anläufe zur Entwicklung konkreter CE-Technologien, die größere Beachtung fanden, gehen auf die Jahre 2008/2010 zurück (Lauder/Thompson 2010). Als Technologie setzt sie über verschiedene Strategien daran, das Wetter und damit die global ansteigenden Temperaturen durch ingenieurtechnische Maßnahmen (wie das Ausbringen von Aerosolen) erheblich zu beeinflussen. Zu den Merkmalen gehört insbesondere, dass sich Climate Engineering nur sehr eingeschränkt im Labor testen lässt, da sich Klimaverhältnisse durch besondere Komplexität und Entstehungsbedingungen auszeichnen. Dies bedingt, dass bereits in dieser frühen Phase in der Fachliteratur Überlegungen angestellt werden, wie deren Einsatz international reguliert werden könnte. Das impliziert wiederum die Frage, durch welche Art von Institutionen diese Regulierung über längere Zeiträume gewährleistet werden kann. Konkrete Beispiele für CE-Technologien sind Ozeandüngung, Aufforstung, oder die Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Erdoberfläche²¹.

Bisher gibt es keine Institutionen, die bei Climate Engineering explizit mit der Regulierung und Überwachung betraut sind. In der Literatur lässt sich allerdings eine breite Debatte darüber finden, welche Kriterien ein solches Institutionengefüge erfüllen müsste, um die besonderen Randbedingungen des zu bearbeitenden Problems und seiner Zeitläufe adäquat betreuen zu können. Auch bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle können Ergebnisse aus Laboruntersuchungen nur bedingt auf den realen Fall übertragen werden, weshalb die Überlegungen zu Institutionengefügen auch für die Endlagerung relevant sein können.

20 Siehe https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/safety_culture_declaration_ec_era_de.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

21 Zum Beispiel durch das Aufstellen von Reflektoren in der Wüste.

Für Fragen des institutionalisierten Monitorings und Überwachens²² ist jedoch die Kategorisierung der Problemlage selbst zu beachten: Es gibt sehr unterschiedliche Arten von CE-Technologien, von denen manche einfach und verhältnismäßig kostengünstig und damit ohne lange Vorbereitungsphasen einzusetzen wären. Letzteres könnte folglich auch von kleinen Staaten oder Privatunternehmen im Alleingang implementiert werden. Gleichzeitig hätten diese vergleichsweise einfach und relativ kostengünstig einführbaren Technologien jedoch Folgen, die wahrscheinlich schnell über Ländergrenzen hinausreichen und in ihrer Wirkungsintensität nicht einfach kalkulierbar sind. Sie sind also kostengünstig, aber im Spektrum der bekannten CE-Technologien als besonders konfliktträchtig einzustufen (Zürn/Schäfer 2013: 271).

Es ist jedoch zu erwarten, dass der Einsatz von CE-Konzepten vorbereitet wird, auch wenn dies aufgrund des international zunehmenden Einflusses semi-autoritärer Politikstile nicht unbedingt auf transparente Art und Weise geschieht. Daher wären, unter Hinweis auf das Vorsorgeprinzip, bereits jetzt Planungen für Regulierung und Überwachung zu entwickeln. Mit diesen Planungen wären verschiedene Aufgaben verbunden, welche für eine zuständige Institution oder ein reflektiertes Institutionengefüge strukturiert werden müssten. Nach Lin (2009) und Thompson (2006) sollten die zuständigen Institutionen Lernprozesse anstoßen – Lernprozesse sowohl über die Technologien selbst als auch über politische Ansätze der Regulierung (Policies) und damit Grundzüge einer *adaptive governance* vorweisen.²³

Zürn und Schäfer schlagen drei zentrale Prinzipien vor, welche die zuständigen Institutionen erfüllen müssten: Erstens, Transparenz in der Forschung und im Einsatz der Technologien, zweitens, institutionelle Integration statt Fragmentierung, und drittens, eine klare Trennung zwischen Forschung über die Technologien und der Entscheidung über ihren Einsatz (Zürn/Schäfer 2013: 272f.). Alle Forschungsvorhaben sollten ihrem Vorschlag nach bei einer Institution registriert und von einer anderen – hier zum Beispiel durch die Klimakonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) – evaluiert werden.²⁴ Die Mitgliedsstaaten der UNFCCC sollten dann über die Regeln für den Einsatz entscheiden. Diese Art von Checks und Balances sei insbesondere wichtig, um das Problem zu vermeiden, dass Technologien nur deshalb eingesetzt werden, weil sie tiefgreifend erforscht wurden. Auch die folgenden dargestellten empirischen Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der sowohl technisch wie auch sozial anspruchsvollen Voraussetzungen (im Hinblick auf Deliberation und multilateraler Entscheidungsfindung) in diesen internationalen Zusammenhängen.

Bei der Umsetzung von CE-Technologien ist die größte Herausforderung, dass die erwartbaren unmittelbaren Folgen und deren Folgeeffekte nicht kalkulierbar sind, so

22 Hier wird sowohl von Monitoring als auch zusätzlich von Überwachung gesprochen. Monitoring wird häufig als Datenerhebung verstanden, während Überwachen gleichzeitig Governance und unterschiedliche Grade der Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Interpretation und Bewertung der erhobenen Daten einschließt.

23 Siehe dazu das Merkmal des selbstlernenden Verfahrens im StandAG sowie den Beitrag von Mbah/Brohmann »Das Lernen in Organisationen« in diesem Band.

24 UNFCCC steht für »United Nations Framework Convention on Climate Change«.

ein zusammenfassendes Ergebnis der Expert*innen-Interviews. Die Umsetzung könnte in unilateralen Kontexten erfolgen, hätte jedoch – je nach Technologie – unter Umständen weitreichende globale Auswirkungen. Die Eingriffstiefe von CE-Technologien, die zum Beispiel beim Solar Radiation Management erfolgen, ist sehr hoch; die Handlungsfähigkeit und Kontrolle über die Nebenfolgen sei dagegen stark eingeschränkt (I1). Welcher Akteur (international oder global) noch Steuerungsmöglichkeiten haben könnte, sei ebenso nicht einzuschätzen. Die Forschung und der Diskurs über Climate Engineering sind zurzeit noch stark wissenschaftszentriert (ebd.). Speziell in den USA, so die Interviewauswertung, sind jedoch auch privatwirtschaftliche Unternehmen an verschiedenen Technologieentwicklungen beteiligt. »... dann stellen sich genau diese Fragen: Wenn es globale Effekte hat, wer wäre überhaupt (... und) was wären legitime Akteure überhaupt, (um) sowas einzusetzen, falls es jemals kommt und falls es technisch überhaupt möglich ist.« (I1) Fragen wie die der Legitimität eines solchen Einsatzes müssten international nicht nur diskutiert, sondern im Sinne einer globalen Governance auch geplant und entschieden werden (ebd.).

Konzepte zur Institutionalisierung eines sicherheitszentrierten Begleitprozesses und einer entsprechend legitimierten Governance, die Beratung steuert und im Zweifelsfall Entscheidungen vorprägt, beschränken sich aktuell auf rein theoretische Überlegungen. Erste Ideen, fokussiert auf Expertenhandeln, finden sich im *planetary-stewardship*-Modell. Auch das *long-term stewardship* des Department of Energy/USA könnte hier herangezogen werden.²⁵ Die auf dieser Grundlage zu schaffenden Institutionen sollten an der Schnittstelle von Forschung und Politik agieren, um einerseits politischen Konsens herstellen zu können und andererseits technische Entscheidungen treffen zu können, damit im Konfliktfall Handlungsfähigkeit gewährleistet ist.

Erste Initiativen, meist nicht staatlicher Art²⁶, nehmen sich bereits dem Thema an: »und was ich hochinteressant finde ist, diese Initiativen sagen alle: ›Wir sind politisch neutral‹, schon mal ein sehr interessantes Statement. ›Wir sind weder für noch gegen Climate Engineering, wir wollen nur, dass ihr, liebe Öffentlichkeit, liebe Zivilgesellschaft, liebe Policymaker, dass ihr eine Debatte über Governance [auch wirklich] führt‹. Also, sie betrachten sich selbst als Katalysatoren (...) einer Debatte, wo sie beanspruchen, selber nicht pro oder contra vorzugeben oder (eine) Agenda, sondern nur (eine) Governancediskussion anzustoßen. Und das ist eine hochinteressante Entwicklung«. (I1) Ein wichtiger Akteur in diesem Zusammenhang seien die NGOs. Sie seien häufig hoch professionalisiert, publizieren selbst, verstehen wissenschaftliche Zusammenhänge und bringen ethische sowie gesellschaftliche Faktoren in die Diskussion mit ein (I1). In den Expert*innen-Interviews zeigte sich also, dass Nicht-Regierungsorganisationen eine herausragende Rolle zugewiesen wird. Wie realistisch diese Entwicklung und Umsetzung in der Governance-Praxis sein kann, wird im Fazit wieder aufgegriffen.

25 Zu Planetary Stewardship siehe Steffen et al. 2011, zu Long-term Stewardship siehe ENTRIA 2019, S. 208–210 und 360–363.

26 Beispiele hierfür seien die »C2G2« (Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative; www.c2g2.net) und die »SRMGI« (Solar Radiation Management Governance Initiative; www.srmgi.org), zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Vergleichende Betrachtung

Die Zusammenfassung der drei Fälle erfolgt hier in geraffter Form. Zahlreiche Einzelbeobachtungen, die uns bei Talsperren, Verkehrsüberwachung und Climate Engineering auf neue Recherche-Aufgaben verwiesen, wie auch Beobachtungen, die aus unserer Sicht angesichts der Forschungslage zu Analoga auffielen, konnten auf Basis des erreichten Arbeitsstandes nur in Ansätzen systematisiert werden. Um die Systematisierung der Beobachtung voranzutreiben, müssten aus unserer Sicht sowohl für »Zukunfts- und Ewigkeitsprojekte« wie die der Endlagerung²⁷ und des Climate Engineerings, aber auch für großtechnische Projekte wie die der Talsperren und des Schienenverkehrs vertiefende, empirisch ausgelegte Untersuchungen durchgeführt werden. Damit würde sich die Möglichkeit eröffnen, vergleichbare oder unterschiedliche Verhältnisse als »eindeutig« darstellen zu können. Als erste Ansatzpunkte werden hier wenige Beobachtungen pointiert herausgehoben, da sie in ihrer Deutlichkeit angesichts der Literaturlage instruktiv waren.

Der untersuchte Fall der Talsperren zeigt, dass kontinuierliches Beobachten und systematisches Monitoren der Anlage durch Mitarbeiter des Infrastrukturbetreibers deutlich von Vorteil sind gegenüber einem rein technisch automatisierten Monitoringansatzes. Sensoren und Drohnen können – so unsere Auswertung des empirischen Materials – menschliche Aufmerksamkeit und Intuition nicht ersetzen, sondern im günstigen Fall ergänzen. Voraussetzung ist allerdings, dass beim Betreiber eine offene und selbstreflexive Fehlerkultur vorhanden ist. Da durch Betreiberwechsel der Anlage, die nicht so selten sind wie erwartet werden könnte (Buser 2017), der Zugriff auf notwendiges Erfahrungswissen vor Ort abreißen kann, sind selbstreflexives Langzeit-Monitoring durch trainiertes Personal und komplementäre Governance dieser Infrastrukturvorhaben für begleitende Langzeitprozesse wie Talsperren deutlich von Vorteil. Bei der Verkehrsüberwachung im Schienenverkehr wurde von den Expert*innen betont, dass das Anwachsen der Entscheidungsmacht in dezentralen Strukturen an Bedeutung gewinnt und zunächst positive Effekte zu haben scheint. Ob dies so bleibt, ist ausgesprochen schwer einzuschätzen. Unabhängig davon bleibt eine Beobachtung für das Wissenssystem festzuhalten. Als Wissenssystem entstehen durch diese Dezentralisierung Reflexionsmuster, die ohne Kenntnis der spezifischen Verhältnisse vor Ort auskommen. Die Automatisierung und Digitalisierung von Abläufen werden dabei ebenso zu zentralen Momenten wie die Europäisierung. Letztere sichert grenzüberschreitend hohe Standards neben den weiterhin bestehenden nationalen Fehler- und Sicherheitskulturen ab. Bei Climate Engineering wird in besonderer Weise auf die hohe Bedeutung des Zusammenspiels von Wissenschaft und Fachpolitik verwiesen. Dass fachpolitische Prozesse häufig von anderen Logiken als denen der transparenten wissenschaftlichen Absicherung geprägt werden, ist kein Geheimnis. Insofern ist verständlich, dass unabhängige internationale Gremien wichtige Mitspieler im Vorfeld von Entscheidungen der Politik sein können. Gleichzeitig sind NGOs an Schnittstellen zwischen Wissenschaft und Fachpolitik kollektive Akteure, die als Frühwarnsystem ebenso eine wichtige

27 Zu den Ewigkeitsprojekten siehe Brunnengräber 2019.

Rolle spielen können, wie auch als Expert*innen, die bei Beratungen hinzugezogen werden sollten, um unterschiedliche Interessenlagen aufzuhellen und je nach Möglichkeit auszubalancieren. Demokratisch ausgerichteten Gesellschaften steht diese Form von Checks and Balances trotz aller bekannten Schwierigkeiten gut zu Gesicht (argumentativ dazu Roth 2011). In demokratischen Beratungen dieser Art wird das Bewusstsein von der eingeschränkten Vorhersagbarkeit von Folgen und Nebenfolgen des Einsatzes einer Technologie tendenziell nicht unter den Tisch fallen.

Fazit

Warum bei großen technischen Infrastrukturprojekten in die Zukunft denken? Geht das überhaupt? Diese beiden grundsätzlichen Fragen sind zuerst zu beantworten, bevor nach möglichen Lehren aus großen technischen Infrastrukturvorhaben wie den Talsperren, dem Schienenverkehr und Climate Engineering unter dem Blickwinkel von *long-term* Governance gefragt werden kann. Die Antwort, ob bei Infrastrukturen dieser Art in die Zukunft zu denken ist, ergibt sich allein aus deren Betriebszeiten, die aus sozioökonomischen Erwägungen ebenso ein Fakt sind wie die Betriebszeiträume, die bei technischen Anlagen nicht selten über die ursprüngliche Betriebszeit hinaus ausgedehnt werden. Bei Kraftwerken sind es 40 bis 60 Jahre, bei Eisenbahntrassen oder -tunneln ein Jahrhundert. Bei erwünschten Klimaeffekten und der angestrebten nachhaltigen Entsorgung in technischen Infrastrukturen sind es deutlich längere Zeiträume. Heute keine Anläufe zu unternehmen und die Abschätzung erwartbarer und nicht auszuschließender Nebenfolgen bei diesen Betriebszeiten mit ihren Risiken auszublenden, erscheint nicht nur aus ethischer Perspektive problematisch.

Auch wenn Ungewissheiten ökonomischer, sozialer und ökologischer Art nicht auszuschließen sind, ist die Betrachtung erwartbarer oder nicht auszuschließender Effekte in mittleren Zukünften, also ein Vorausdenken für die nächsten Jahrzehnte, auch aus Ressourcengründen funktional. Die Ansammlung kontaminierten Schlicks im Becken hinter der Mauer einer Talsperre, der irgendwann als Umweltbelastung ernst zu nehmen ist und auf den in einem der Expert*innen-Interviews nachdrücklich hingewiesen wurde, liefert ein aussagekräftiges Beispiel. Ohne Absicherungen über Stiftungen oder vergleichbare Rückstellungen sind Problemlösungen in Fällen dieser Art nur schwer zu verwirklichen. Das Vorsorgeprinzip fordert kollektive Akteure in Industriegesellschaften, so unsere These, dazu auf, systematisch Anstrengungen für die Folgenreflexion zu übernehmen. Wenn keine eindeutige Steuerung zu erwarten ist, wäre aktive Navigation unter Bedingungen von Ungewissheit für die soziotechnische Gestaltung technischer Großvorhaben und Infrastrukturen eine erste Zielmarke, die inter- und transdisziplinäre Reflexion und darauf aufbauende Handlungsfähigkeit vorbereiten kann.

Die hier vorgestellten ersten empirischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass für weitere Überlegungen zu einer *long-term* Governance im Bereich der nuklearen Entsorgung insbesondere drei Aspekte in Zukunft vertieft betrachtet werden sollten: Erstens, der Umgang mit wirtschaftlichen Zwängen insbesondere bei Fehlentwicklungen, die eine hohe Eingriffstiefe nach sich ziehen würden (wie die Rückholung der Abfälle nach Verschluss). Hierzu könnte am Beispiel der Talsperren vertieft untersucht werden,

wie sichergestellt wird, dass solche Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden und gegengesteuert werden kann. Zweitens, die Arbeitsteilung zwischen zentraler und dezentraler Entscheidungsmacht. Diese wird dann relevant, wenn es um kleinere sicherheitsrelevante Entscheidungen vor Ort geht und die Frage im Raum steht, welche Entscheidungskompetenzen das zuständige Personal an der Entsorgungsanlage hat und in welchen Fällen eine zentrale Behörde eingeschaltet werden muss. Aus dem Beispiel des Schienenverkehrs können hier Lehren gezogen werden, wie Transportwege verkürzt werden können, welche Formen von Zentralisierung und welche Formen von Flächenverbrauch ähnlich negative Folgen reduzieren könnten. Drittens wäre die Notwendigkeit einer deutlicheren Trennung von Forschung und Entscheidung zu bedenken, wie sie im Fall des Climate Engineering diskutiert wird.

Die unterschiedlichen Anwendungsfälle genauer zu kennen und systematisch auf ihre Stärken zu analysieren, könnte bei der nuklearen Entsorgung ein Grundgerüst für begleitende Planung und eine auf Dauerhaftigkeit ausgerichtete Fachpolitik darstellen, die robustes und kollektiv verbindliches Entscheiden im Umgang mit gefährlichen Abfällen möglicherweise befördert.

Literatur

- Aufleger, Markus (2018): Talsperrensicherheit – eine Aufgabe für Generationen. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70(7): 377–387.
- Braband, Jens (2013): Funktionale Sicherheit. In: Fendrich, Lothar/Fengler, Wolfgang (Hg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2., neu bearb. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 553–606.
- Beck, Ulrich/Giddens, Anthony/Lash, Scott (1996): *Das Zeitalter der Nebenfolgen und die Politisierung der Moderne. Reflexive Modernisierung. Eine Kontroverse*, Frankfurt a.M.: edition suhrkamp, 19–112.
- Bijker, Wiebe E. (1997): *Of Bicycles, Bakelites and Bulbs. Toward a Theory of Sociotechnical Change*, Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Böttcher, Jörg (Hg.) (2014): *Wasserkraftprojekte: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte*, Berlin: Gabler.
- Brunnengräber, Achim (2019): *Ewigkeitslasten. Die »Endlagerung« radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt*. 2. übera. Auflage, Baden-Baden: Nomos.
- Busch, Fritz (2011): Leitzentrale oder Selbstorganisation – Was kann der Schienenverkehr vom Straßenverkehr lernen und umgekehrt? In: Dorbritz, Robert/Hürliemann, Gisela/Scherler, Fabian/Weidmann, Ulrich/Wili, Urs B. (Hg.): *Stabil mobil – Komplexe Verkehrssysteme als Herausforderung unserer Gesellschaft*. Zürich: IVT (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Bd. 154), 77–80.
- Buser, Marcos (2017): *Short-term und Long-term Governance als Spannungsfeld bei der Entsorgung chemotoxischer Abfälle. Vergleichende Fallstudie zu Entsorgungsprojekten in der Schweiz und Frankreich: DMS St.Ursanne und das Bergwerk*

- Felsenau (beide Schweiz) und Stocamine (Frankreich), Karlsruhe: ITAS-ENTRIA-Arbeitsbericht 2017-02.
- Czada, Roland (2013): Reaktorkatastrophen und Anti-Atom Bewegung. Die Auswirkungen von Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima. In: Széll, György/Czada, Roland (Hg.): Fukushima. Die Katastrophe und ihre Folgen. Frankfurt a.M.: PL Academic Research, 263-280.
- Czada, Roland (2016): Planen und Entscheiden als Steuerungsaufgabe und Interaktionsproblem. In: Kamp, Georg (Hg.): Langfristiges Planen: Zur Bedeutung sozialer und kognitiver Ressourcen für nachhaltiges Handeln. Berlin: Springer, 215-249.
- Detering, Michael (2014): Betrieb u. Instandhaltung eines Wasserkraftwerks. In: Böttcher, Jörg (Hg.): Wasserkraftprojekte. Berlin: Gabler, 171-192.
- ENTRIA (2019): Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA, 2013-2018): Abschlussbericht des BMBF-Projektes, Röhlig, Klaus-Jürgen et al. (Hg.), Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal.
- Fendrich, Lothar/Fengler, Wolfgang (Hg.) (2013): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. 2. neu bearbeitete Auflage, Berlin: Springer Vieweg.
- Fenner, Wolfgang/Naumann, Peter/Trinckauf, Jochen (2011): Bahnsicherungstechnik, Hoboken: John Wiley & Sons.
- Fischer, Lars (2018): Warum Staudämme gefährlich sind. In: [spektrum.de/SciLogs. https://scilogs.spektrum.de/fischblog/staudaemme-gefaehrlich/](https://scilogs.spektrum.de/fischblog/staudaemme-gefaehrlich/), zuletzt geprüft am 05.10.2020.
- Gleich, Arnim von (1988): Werkzeugcharakter, Eingriffstiefe und Mitproduktivität als zentrale Kriterien der Technikbewertung und Technikwahl. In: Rauner, Felix (Hg.) Gestalten – eine neue gesellschaftliche Praxis. Bonn: Verlag Neue Gesellschaft, 115-147.
- Grunwald, Armin (2010): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung, Berlin, 2. übera. Auflage: edition sigma.
- Grunwald, Armin (2016): Nachhaltigkeit verstehen. Arbeiten an der Bedeutung nachhaltiger Entwicklung, München: oekom.
- Grunwald, Armin (2019): Shaping the Present by Creating and Reflecting Futures. In: Lösch, Andreas/Grunwald, Armin/Meister, Martin/Schulz-Schaeffer, Ingo (Hg.): Socio-technical Futures Shaping the Present. Empirical Examples and Analytical Challenges in Social Studies of Science and Technology and Technology Assessment. Wiesbaden: Springer VS, 17-36.
- Grunwald, Armin (2020): The Objects of Technology Assessment. Hermeneutic Extension of Consequentialist Reasoning. In: *Journal of Responsible Innovation* 7(1): 96-112.
- Haus, Michael (2010): Governance-Theorien und Governance-Probleme. Diesseits und jenseits des Steuerungsparadigmas. In: *Politische Vierteljahresschrift* 51 (3): 457-479.
- Heimerl, Stephan (Hg.) (2013): Wasserkraftprojekte: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Heimerl, Stephan (Hg.) (2015): Wasserkraftprojekte, Band 2: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hill, Hermann (Hg.) (2020): Bleib innovativ, Verwaltung! Speyer: Speyerer Arbeitshefte, Nr. 236.

- Hiller, Sylvia/Renn, Ortwin (2013): Climate Engineering: gesellschaftliches Konfliktpotenzial und öffentliche Partizipationsmöglichkeiten. In: *Zeitschrift für Zukunftsfor-*
schung 2 (1): 34-51.
- Hocke, Peter (2015): Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. In: Bogner, Alexander/Decker, Michael/Sotoudeh, Mahshid (Hg.): *Responsible Innovation. Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung*. Berlin: edition sigma, 185-195.
- Kornijów, Ryszard (2009): Controversies around Dam Reservoirs: Benefits, Costs and Future. In: *Ecohydrology & Hydrobiology* 9 (2-4): 141-148.
- Kuckartz, Udo (2018): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 4. Auflage, Weinheim: Beltz Juventa.
- Kuppler, Sophie (2019): Literaturbericht AP4 »Planen und Gestalten«, Karlsruhe: internes ITAS-Dokument aus dem Projekt SOTEC-radio.
- Kuppler, Sophie/Hocke, Peter (2019): The Role of Long-term Planning in Nuclear Waste Governance. In: *Journal of Risk Research* 22 (11): 1343-1356.
- Launder, Brian Edward/Thompson, John M. T. (Hg.) (2010): *Geo-engineering Climate Change. Environmental Necessity or Pandora's Box?* Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Liebert, Wolfgang/Gepp, Christian/Reinberger, David (Hg.) (2016): *Nukleare Katastrophen und ihre Folgen. 30 Jahre nach Tschernobyl/5 Jahre nach Fukushima*, Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag.
- Lin, Albert C. (2009): Geoengineering Governance. In: *Issues in Legal Scholarship* 8 (3): Article 2.
- Linse, Ulrich/Falter, Reinhard/Rucht, Dieter/Kretschmer, Winfried (1988): *Von der Bittschrift zur Platzbesetzung. Konflikte um technische Grossprojekte: Laufenburg, Walchensee, Wyhl, Wackersdorf*, Berlin: Dietz.
- Lösch, Andreas/Grunwald, Armin/Meister, Martin/Schulz-Schaeffer, Ingo (2019): Introduction: Socio-Technical Futures Shaping the Present. In: dies. (Hg.): *Socio-technical Futures Shaping the Present. Empirical Examples and Analytical Challenges*. Wiesbaden: Springer VS, 1-14.
- Meuser, Michael/Nagel, Ulrike. (2009): Das Experteninterview – konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In: Pickel, Susanne/Pickel, Gert/Lauth, Hans-Joachim/Jahn, Detlef (Hg.): *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft*. Wiesbaden: VS, 465-479.
- Nisipeanu, Peter (2010): Wasserrechtliche Anforderungen an Bau, Betrieb und Unterhaltung von Talsperren. In: *Natur und Recht* 32(3): 162-171.
- Pachl, Jörn (2016): *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 8., übera. und erw. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Perrow, Charles (1988): *Normale Katastrophen. Die unvermeidbaren Risiken der Grosstechnik*, Frankfurt a.M.: Campus.
- Pfadenhauer, Michaela (2009): Auf gleicher Augenhöhe. Das Experteninterview – ein Gespräch zwischen Experte und Quasi-Experte. In: Bogner, Alexander (Hg.): *Experteninterviews. Theorie, Methoden, Anwendungsfelder*. Wiesbaden: VS, 99-116.
- Roth, Roland (2011): *Bürgermacht. Eine Streitschrift für mehr Partizipation*, Hamburg: edition Körber-Stiftung.

- Scheer, Dirk/Grunwald, Armin (2017): Orientierungswissen für die Energiewende: Der Roadmap-und-Navigation-Ansatz. In: *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2): 155.
- Scheer, Dirk/Grunwald, Armin/Bangert, Armin et al. (2020): Energiewende-Navigationssystem zur Erfassung, Analyse und Simulation der systemischen Vernetzungen. Karlsruhe: ITAS-Abschlussbericht Kopernikus-Projekt.
- Scheuer, Lothar (1999): Personalbedarf an Talsperren. In: Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von Wasserbauwerken. Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik der TU Dresden. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik, 33-42.
- Schrenk, Georg J. A. (2013): Anforderungen an die Qualifikation und Organisation von Stauanlagenbetreibern (TSM Stauanlagen). In: Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik der TU Dresden (Hg.): Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle. Dresden: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 48, 405-415.
- Schulz, Christopher/Adams, William M. (2019): Debating Dams: The World Commission on Dams 20 years on. In: *WIREs Water* 6 (5).
- Steffen, Will/Persson, Åsa/Deutsch, Lisa/Zalasiewicz, Jan/Williams, Mark/Richardson, Katherine/Crumley, Carole/Crutzen, Paul/Folke, Carl/Gordon, Line/Molina, Mario/Ramanathan, Veerabhadran/Rockström, Johan/Scheffer, Marten/Schellnhuber, Hans Joachim/Svedin, Uno (2011): The Anthropocene. From Global Change to Planetary Stewardship. In: *AMBIO* 40(7): 739-761.
- Sträter, Oliver (2005): Cognition and Safety. An Integrated Approach to Systems Design and Assessment, Aldershot: Ashgate.
- Sträter, Oliver (i.E.): Bedeutung von Mensch und Organisation für eine dauerhafte Sicherheit von Entsorgungsoptionen. Governance. Baden-Baden: Nomos. In: Hocke, Peter/Kuppler, Sophie/Hassel, Thomas/Smeddinck, Ulrich (Hg.): Technisches Monitoring und Long-term Governance. Baden-Baden: Nomos.
- Thompson, Alexander (2006): Management under Anarchy: The International Politics of Climate Change. In: *Climatic Change* 78(1): 7-29.
- Weyer, Johannes (2008): Mixed Governance. Das Zusammenspiel von menschlichen Entscheidern und autonomer Technik im Luftverkehr der Zukunft. In: Matuschek, Ingo (Hg.): Luft-Schichten. Arbeit, Organisation und Technik im Luftverkehr. Baden-Baden: Nomos, 205-226.
- Zürn, Michael/Schäfer, Stefan (2013): The Paradox of Climate Engineering. *Global Policy* 4(3): 266-277.

Anhang

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht für die Auswahl der Vergleichsfälle

Kriterien nach Czada (2016)	Talsperren	Verkehrsüberwachung	Climate Engineering
Irreversible Veränderungen	z.B. Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft flussab; Talsperren als Teil von Trinkwasser- und Energieversorgung	Erhöhte Mobilität durch öffentliches Verkehrsnetz; Veränderungen der Wirtschaft	Weitreichende Veränderungen des Klimas; extreme Wetterereignisse wahrscheinlich
Abbruch der Kontrolle gefährlich	Gefahr des Dammbruchs	Gefahr von Unfällen und Zuliegenkommen der Mobilität	Gefahr der plötzlichen, heftigen Erwärmung des Klimas
Beschränkte Regulierungsmöglichkeiten	Insbesondere in Bezug auf Energieversorgung	Veränderung der Kontextbedingungen, z.B. Bedeutung des Schienenverkehrs in der Gesellschaft; evtl. Abstimmungsprobleme durch Fragmentierung	Unvorhersehbare Klimaveränderungen mit ihren sozialen und evtl. politischen Folgen
Gemeinwohlorientierung	Verhinderung einer Gefährdung der flussabwärts lebenden Menschen	Verhinderung einer Gefährdung von Verkehrsteilnehmern	Verhinderung einer umfassenden Veränderung des Klimas mit ihren negativen Konsequenzen

Quelle: ITAS in SOTEC-radio (Dez. 2018)

