



Herausragende Masterarbeiten

Autor*in

—
Katharina Schalk

Studiengang

Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit, M.A.

Masterarbeitstitel

**Lithium aus lokalen Geothermiequellen – neues
Extraktionsverfahren auf dem
Nachhaltigkeitsprüfstand**

**R
P TU**

Distance and Independent
Studies Center
DISC

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract	II
2. Verzeichnisse	III
<i>Glossar</i>	<i>III</i>
<i>Literaturverzeichnis (s. Kapitel 12)</i>	<i>VI</i>
<i>Abbildungverzeichnis</i>	<i>VI</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>VII</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>VII</i>
3. Einführung	1
4. Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zur Lithiumgewinnung aus lokalen Geothermiequellen	3
4.1 <i>Oberflächennahe Geothermie</i>	5
4.2 <i>Tiefe Geothermie</i>	5
4.3 <i>Verfahren der Lithiumextraktion aus Geothermiequellen am Beispiel des Oberrheingrabens (Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven)</i>	7
4.4 <i>Herkunft von Lithium und bislang gängige Extraktionsverfahren</i>	11
4.4.1 <i>Länder mit Lithiumvorkommen</i>	12
4.4.2 <i>Lithiumförderung in Bergwerken</i>	13
4.4.3 <i>Lithiumförderung in Salzseen</i>	14
4.5 <i>Exkurs: Lithiumaufbereitung und Recycling von Lithiumbatterien</i>	15
5. Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung der Lithiumgewinnung durch heimische Geothermie - Stand der Forschung	16
5.1 <i>Aktueller Stand der Forschung zur Lithiumextraktion aus Geothermiequellen am Oberrheingraben</i>	16
5.2 <i>Weitere Studien zur Lithiumextraktion aus Geothermiequellen</i>	16
5.3 <i>Ökologische Nachhaltigkeit – Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	19
5.4 <i>Ökonomische Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	23
5.5 <i>Soziale Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	29
6. Empirische Untersuchung: Experteninterviews zur Evaluierung nachhaltigkeitsbezogener Chancen und Risiken der Lithiumgewinnung durch heimische Geothermie	37
6.1 <i>Auswahl und Beschreibung der Methode Experteninterview</i>	37
6.2 <i>Erläuterung der Expertenauswahl</i>	38
6.3 <i>Leitfaden (modular je nach Relevanz für Stakeholder) und Durchführung</i>	38
6.4 <i>Auswertungsmethode – Qualitative Inhaltsanalyse</i>	39
6.4.1 <i>Erläuterung Analysegrundlage Kategoriensystem: Deduktives Kategoriensystem nach Mayring</i>	41
7. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	44

7.1	<i>Ökologische Nachhaltigkeit – Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	44
7.2	<i>Ökonomische Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	48
7.3	<i>Soziale Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion</i>	55
8.	Vergleich der Ergebnisse der Experteninterviews mit vorliegenden Studien	60
9.	Limitationen	67
10.	Handlungsempfehlung	68
11.	Schlussbetrachtung und Ausblick	71
12.	Literatur	73
13.	Anhang	i
14.	Eigenständigkeitserklärung	x

1. Abstract

Lithium ist ein essentieller Bestandteil unseres Alltags. Wir nutzen es u.a. in Form von wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien in Smartphones, Laptops, Elektro- und Hybridfahrzeugen. Forscher des Karlsruhe Institute of Technology prognostizieren, dass bis zu 19 Prozent des für die Produktion in Deutschland benötigten Lithiums aus dem Oberrheingraben kommen könnte. Das Besondere daran wäre, dass es ohne CO₂-Emissionen als „Nebenprodukt“ von Geothermie gewonnen werden könnte. Das könnte die deutsche Wirtschaft unabhängiger von volatilen Rohstoffmärkten machen. Doch es gibt auch Kritik und Ungewissheiten. Die Technologie ist noch nicht ausgereift und eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nicht garantiert. In der Nähe mancher Geothermiewerke gab es Schäden durch Erdbeben. Skeptiker befürchten eine Verunreinigung des Trinkwassers. Im Rahmen dieser Arbeit soll anhand der aktuellen wissenschaftlichen Fakten und mithilfe von Experteninterviews die Frage beantwortet werden, ob nach aktuellem Stand die Risiken oder die Chancen des Verfahrens überwiegen.

2. Verzeichnisse

Glossar

Abteufen: Abteufen ist ein Begriff aus dem Bergbau. Beim Abteufen gelangt man durch ein Bohrloch oder einen Schacht senkrecht in die Tiefe (Teufe).

Bergbehörde: Die Bergbehörde beaufsichtigt und genehmigt alle Arbeiten, die in der Erde liegen. Diese umfasst die Untersuchung der Geologie und die Bohrungen sowie die Gewinnung von Erdwärme.

Bergfreie Bodenschätze: Bergfreie Bodenschätze unterliegen anders als alle anderen Bodenschätze und Wasser nicht dem Grundeigentum, sondern dem Staatsvorbehalt. Bergfreie Bodenschätze sind meist wirtschaftlich relevante Rohstoffe. Erdwärme und Lithium sind nach §3 des Bundesberggesetzes (BbergG) Bergfreie Bodenschätze.

Bergschadensvermutung: Im deutschen Bergrecht (BbergG) gilt weitgehend die Bergschadensvermutung, die quasi eine Beweislastumkehr bei Gerichtsverfahren ermöglicht. Wenn im Einwirkungsbereich eines Bergbaubetriebes durch Zerrungen, Pressungen und Senkungen der Oberfläche oder durch Erdrisse ein Schaden entsteht, der ein Bergschaden sein kann, wird vermutet, dass der Schaden durch den Bergbaubetrieb verursacht wurde. Ausnahmen sind: Baumängel, natürliche Schadensauswirkungen, Schadensverursachung durch Dritte.

Beweislast: Im Bergrecht gilt die Umkehr der Beweislast. Das bedeutet, dass der Bergbauunternehmer (nicht der Geschädigte) nachweisen muss, dass der Schaden nicht auf seine Aktivitäten entstanden ist.

Bundesberggesetz: Das Bundesberggesetz (BBergG), kurz Bergrecht, regelt die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Bergbau, darunter die Gewinnung von Bodenschätzen sowie damit verbundene Tätigkeiten wie Exploration, Sicherheit und Umweltschutz. Die wichtigsten Ziele des Gesetzes sind eine nachhaltige Nutzung der Bodenschätze, Umwelt- und Naturschutz sowie die Gewährleistung von Sicherheit und Gesundheitsschutz für Beschäftigte.

Critical Raw Materials Act: Die Ziele des europäischen Critical Raw Material Acts bestehen unter anderem darin, die Produktionskapazitäten und den Abbau von kritischen Rohstoffen in der Europäischen Union zu steigern. Beschleunigte

Genehmigungsverfahren sollen die Erweiterung des Bergbaus ermöglichen, um eine größere Import-Unabhängigkeit zu gewährleisten und bis 2030 etwa zehn Prozent der europäischen Versorgung zu sichern. Der Act ist ein umfassender Rahmen, der verschiedene Maßnahmen und Ziele umfasst, um die Versorgungsketten für kritische Rohstoffe in der EU widerstandsfähiger und nachhaltiger zu gestalten. Dazu gehören auch die Förderung von Recycling, die Verringerung von administrativen Hürden und die Schaffung von Partnerschaften mit Drittländern.

Direct Lithium Extraction (DLE): Bei der direkten Lithiumextraktion (DLE) wird das Lithium direkt aus dem Thermalwasser extrahiert. Im Gegensatz zur Lithiumgewinnung aus Salzseen muss das Wasser nicht zuerst verdunsten. Es fließt nach der Extraktion wieder zurück in die Ursprungsumgebung.

Enhanced oder Engineered Geothermal Systems: Bei EGS-Verfahren in der tiefen Geothermie werden natürlich vorhandene Klüfte aufgeweitet, manchmal auch neu geschaffen. EGS-Anlagen nutzen das geweitete Tunnelnetz des heißen Gesteins als Wärmetauscher. EGS löst durch das Weiten und Klüften und die Wasser-Injektion seismische Ereignisse in der Tiefe aus und steht daher häufig in der Kritik.

Environmental Justice: Unter **Environmental Justice (EJ)** versteht man die gerechte Verteilung aller umweltbezogenen Nutzen und Belastungen. Dabei beinhaltet EJ drei Konzepte: **Distributive** und **Procedural Justice** sowie **Justice of Recognition**. Distributive Justice (Verteilungsgerechtigkeit) bezieht sich auf die Verteilung von Gütern (Ressourcen) und Nachteilen (Schaden und Risiko). Procedural Justice meint die Art und Weise, wie Entscheidungen getroffen werden, wer daran beteiligt ist und Einfluss hat und Justice of recognition bezieht sich darauf, wer respektiert wird, wer wertgeschätzt wird und wer nicht.

Erdwärme: Erdwärme gilt aufgrund des Bundesberggesetzes (BBergG) als bergfreier Bodenschatz. Wer Erdwärme aufsuchen will, benötigt die Erlaubnis nach dem Bundesberggesetz, weil Bergfreie Bodenschätze dem Staatsvorbehalt unterliegen.

Erdwärmesonde: Erdwärmesonden sind Rohre, die durch senkrechte Bohrungen in die Tiefe eingeführt werden. In ihnen zirkuliert ein flüssiges Wärmeträgermedium, das dem Untergrund Wärmeenergie entzieht. Diese Wärmeenergie wird durch die Trägerflüssigkeit nach oben transportiert.

Geothermie: Geothermie, auch Erdwärme genannt, gehört zu den erneuerbaren Energien. Sie kann zum Heizen, Kühlen und zur Stromerzeugung genutzt werden. Auch eine kombinierte Nutzung von Strom und Wärme ist im Rahmen der kombinierten Kraft-Wärme-Kopplung möglich.

Geothermische Dublette: Eine geothermische Dublette ist ein geschlossenes System zwischen zwei Bohrlöchern zur Förderung und Reinjektion von heißem Wasser oder Dampf mit dem Ziel der geothermischen Wärme- und / oder Stromerzeugung.

Lithium: Lithium ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 3 im Periodensystem und dem Symbol Li. Es ist ein essentieller Bestandteil von Lithium-Ionen Akkus. Vor allem die Automobilindustrie benötigt den kritischen Rohstoff Lithium im Rahmen der Energiewende für Elektrofahrzeuge.

Mitigationstechnologien: Mitigationstechnologien sind innovative Ansätze zur Reduzierung umweltschädlicher Emissionen und Effekte. Dazu gehören beispielsweise Technologien zur Verbesserung der Energieeffizienz und erneuerbare Energien.

Natürliche Kluftsysteme: Natürliche Kluftsysteme sind Netzwerke aus Gesteinsspalten, aus denen Wasser, Gas und andere Rohstoffe gewonnen werden können.

Oberflächennahe Geothermie: Geothermiequellen liegen in unterschiedlichen Tiefenlagen. Die Grenzziehung liegt bei etwa 400 Metern Tiefe, wobei man bis 400 Metern von Oberflächennaher Geothermie spricht und danach von Tiefer Geothermie.

Sole: Salz-Wasser-Lösung, die meist aus Salinen, Salzbergwerken oder dem Meer stammt. Im Zusammenhang mit dem Prozess der Lithiumgewinnung steht Sole für Lithiumhaltige Grundwässer. Diese kommen in drei verschiedenen Umgebungen vor: Salzseen (Salare), kontinentalen Tiefenwässern (bspw. Thermalwässer) und Ölfeldwässern. Sole gilt genau wie Erdwärme laut Bundesberggesetz als Bergfreier Bodenschatz.

Störungssysteme: Ein Störungssystem ist ein Geflecht aus tektonischen Brüchen, dessen Interaktion die Landschaft prägt und das Erdbebenrisiko einer Gegend bestimmt.

Tiefe Geothermie: Geothermiequellen liegen in unterschiedlichen Tiefenlagen. „Die Grenzziehung liegt bei etwa 400 Metern Tiefe, wobei man bis 400 Metern von Oberflächennaher Geothermie spricht und danach von Tiefer Geothermie.

Wärmepumpe: Bei Oberflächennaher Geothermie ist in der Regel 25 Grad Celsius die maximale geförderte Temperatur. Mit einer Wärmepumpe lässt sich die Temperatur auf die benötigte Temperatur nivellieren – zum Betrieb einer Heizung oder Klimaanlage, je nach Jahreszeit.

Kritische Rohstoffe: Kritische Rohstoffe sind für die Wirtschaft und Industrie von strategischer Bedeutung. Im Falle eines Mangels können Versorgungsengpässe für wichtige Branchen entstehen. Aus diesem Grund werden sie als kritische Rohstoffe bezeichnet.

Literaturverzeichnis (s. Kapitel 12)

Abbildungverzeichnis

Abb. 1:	Turbine in einem Geothermiekraftwerk	6
Abb. 2:	Kaskadennutzung von Wärmeenergie bei Tiefengeothermie	6
Abb. 3:	Projektliste Tiefe Geothermie	i
Abb. 4:	Region Südpfalz, Gebiet Phase Eins der Firma Vulcan Energy	9
Abb. 5:	Das A-DLE-Verfahren in zwei Schritten: Sorption und Elution	10
Abb. 6:	Veranschaulichung Herkunft Globale Lithiumaufkommen	12
Abb. 7:	Verfahren der Lithiumextraktion und Herstellung von Lithiumkarbonat aus Spodumen	13
Abb. 8:	Verfahren zur Produktion von Lithiumkarbonat aus Sole	14
Abb. 9:	Qualitative Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Investitions- / Risikoentwicklung bei Projekten	25
Abb. 10:	Übersicht Expertenauswahl	i
Abb. 11:	Kategoriensystem nach Mayring	42
Abb. 12:	Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (NTA)	61

Abb. 13:	Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (Interviews)	61
Abb. 14:	Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (Mittelwert NTA & Interviews)	62
Abb. 15:	Bewertung ökonomische Nachhaltigkeit in Prozent (NTA)	63
Abb. 16:	Bewertung ökonomische Nachhaltigkeit in Prozent (Interviews)	63
Abb. 17:	Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (Mittelwert NTA & Interviews)	64
Abb. 18:	Bewertung soziale Nachhaltigkeit in Prozent (NTA)	65
Abb. 19:	Bewertung soziale Nachhaltigkeit in Prozent (Interviews)	65
Abb. 20:	Bewertung soziale Nachhaltigkeit in Prozent (Mittelwert NTA & Interviews)	66
Abb. 21	Gesamtbewertung Nachhaltigkeit in Prozent (NTA & Interviews)	67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Verfahren zur Kategorienbildung nach Mayring (Auszug)	43
Tab. 1a	Verfahren zur Kategorienbildung nach Mayring (komplett)	ii

Abkürzungsverzeichnis

A-DLE – Adsorption-Type Direct Lithium Extraction

BbergG – Bundesberggesetz, kurz: Bergrecht

BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

CLP – Zentrale Lithiumanlage

CEC – California Energy Commission

EE – Erneuerbare Energien

EEG – Erneuerbare-Energien-Gesetz

EGS – Enhanced oder Engineered Geothermal Systems

EIB – Europäische Investitionsbank

EJ – Environmental Justice

ERoEI – Energy Return on Energy Invested

DERA – Deutsche Rohstoffagentur

DLE – Direct Lithium Extraction

HDR – Hot-Dry-Rock Verfahren

HFR – Hot-fractured Rock Verfahren

G-LEP – Geothermie- und Lithiumextraktionsanlage

LEP – Lithiumextraktionsanlage

LEOP – Lithiumextraktionsoptimierungsanlage

Li - Lithium

Li²CO³ – Lithiumkarbonat

LIB – Lithium-Ionen-Batterien

LHM – Lithiumhydromonohydrat

LCE – Der Lithiumgehalt wird in wissenschaftlichen Publikationen, Unternehmensberichten und Präsentationen meist als LCE-Einheit bzw. Lithiumkarbonat-Äquivalent oder als Li²O-Gehalt angegeben.

NTA – Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung

KIT – Karlsruhe Institute of Technology

Gendererklärung

Die in dieser Masterarbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf weibliche und männliche Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

3. Einführung

Lithium ist ein essentieller Bestandteil unseres Alltags. Wir nutzen es in Form von wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien in Smartphones, Laptops, Tablets, Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie E-Bikes. Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird Europa zunehmend mehr Lithium benötigen, vor allem hinsichtlich des Ziels, ab 2035 nur noch emissionsfreie Neuwagen zuzulassen. Prognosen sagen einen Anstieg des globalen Lithiumbedarfs bis 2030 um das Fünffache zu 2021 voraus. Als einziger europäischer Lithiumproduzent hat Portugal derzeit ein Prozent Anteil am Weltmarkt. Das macht die Wirtschaft Europas stark abhängig von Zulieferländern und geopolitischen Spannungen.

Forscher des KIT prognostizieren, dass künftig zwei bis zwölf Prozent des in Deutschland benötigten Lithiums aus Geothermiequellen aus dem Oberrheingraben, der sich von Basel bis nach Frankfurt am Main erstreckt, kommen könnte. Ein fortgeschritten öffentlich kommuniziertes Projekte zur geothermischen Lithiumextraktion befindet sich momentan im deutschen Oberrheingraben, ein weiteres in der kalifornischen Salton Sea Region. Derzeit sind die größten Förderländer allerdings Australien, Chile und China, wo der Rohstoff vor allem in Festgestein und Sole vorkommt. Das besondere an Lithium aus dem deutschen Oberrheingraben wäre, dass es laut neusten Erkenntnissen ohne große Umweltschäden und mit reduzierten oder sogar null CO₂-Emissionen quasi als „Nebenprodukt“ von Geothermie gewonnen werden könnte. Als erneuerbare Energie kann Geothermie permanent Energie liefern und ist somit zuverlässiger verfügbar als Solar- und Windenergie.

Lithiumextraktion durch Geothermie könnte zudem eine wassersparende Methode sein im Vergleich zu den wasserintensiven Extraktionsverfahren in der chilenischen Atacama-Wüste oder dem Abbau aus Mienen in Australien. Denn das geförderte Thermalwasser kann nach der geothermischen Nutzung und der Lithiumextraktion in den Untergrund reinjiziert werden, wo es sich mit der Zeit wieder erwärmen kann.

Wenn das lokal gewonnene Lithium zudem noch lokal aufbereitet werden könnte, würden weitere Emissionen durch lange Transportwege wegfallen. Langfristig könnten sowohl die Umwelt als auch die Gesundheit der Anwohner an den bisherigen Abbau- und Veredelungsstätten durch weniger CO₂-Emissionen und andere Umweltschäden profitieren. Deutschland könnte seine Externalitäten reduzieren.

Auch aus ökonomischer Sicht wären die Förderung und Veredelung von Lithium in Deutschland lukrativ. Unter anderem könnten neue Arbeitsplätze entstehen und Kosten für den Rohstoffimport entfallen. Zudem würde die lokale Förderung von nachhaltig verfügbaren Rohstoffen zur Preisstabilität beitragen und die heimische Industrie weniger anfällig für Volatilität machen. Dies wird auch von der Politik gefördert. Der von der EU geplante Critical Raw Materials Act soll die Erschließung von Rohstoffen innerhalb Europas fördern, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Auch im Sinne der sozialen Gerechtigkeit hätte eine lokale Lithiumproduktion viele Vorteile. Neue Produktionsstätten und Arbeitsplätze können regional zu einem höheren Wohlstand führen. Städte und Regionen werden in Folge attraktiver für andere Unternehmen, was zu einem lokalen Aufschwung führen kann.

Zu den Vorteilen der lokalen Lithiumgewinnung aus Geothermie reihen sich auch Ungewissheiten und Risiken. So gab es beispielsweise in Basel, Landau (Pfalz) und an anderen Orten Schäden durch Erdbeben. Wissenschaftler gehen davon aus, dass starke Seismizität durch nicht fachgerechte Bohrungen ausgelöst wird und bei korrekter Durchführung vermeidbar ist. Manche Anwohner in der Umgebung von bestehenden und geplanten Geothermieranlagen bleiben skeptisch. Auch weil Thermalwasser unter anderem Schwefelwasserstoff, Arsen, Quecksilber und radioaktive Substanzen enthalten kann. Manche fühlen sich aus dem Entscheidungsprozess ausgeschlossen.

Auch das Verfahren der Lithiumgewinnung durch Geothermie selbst birgt Herausforderungen. Geothermiebohrungen sind teuer und lohnen sich nur bei langfristiger Nutzung. Zwar ergab eine im September 2023 veröffentlichte Studie des KIT, dass ein einziges Geothermiekraftwerk im Oberrheingraben nicht nur langfristig eine grundlastfähige, erneuerbare Energiequelle sein kann, sondern darüber hinaus auch drei Prozent des jährlichen Lithiumbedarfs in Deutschland decken kann. Doch die Technologie steckt noch in den Kinderschuhen. Sie muss auf einen industriellen Maßstab skaliert werden, um wirtschaftlich zu sein. Noch ist nicht bekannt, ob Lithium nachhaltig und langfristig aus geothermischen Quellen gefördert werden kann. Ein frühzeitiges Versiegen der Lithiumquellen würde erhebliche wirtschaftliche Einbußen bedeuten. Zur weiteren Untersuchung sind Langzeitextraktionsversuche und Pilotprojekte notwendig.

Diese Arbeit befasst sich aufgrund der Fortschrittlichkeit des Projekts und der räumlichen Nähe zur Rheinland-Pfälzisch Technischen Universität Kaiserslautern-Landau, an der diese Arbeit entsteht, vorrangig mit dem Projekt im Oberrheingraben.

Da die Technologie der Lithiumextraktion durch Geothermie noch neu ist und fundierte Erfahrungswerte und Literatur rar sind, wird der im Theorieteil erläuterte aktuelle Stand der ökologischen, ökonomischen und sozialen Chancen und Herausforderungen durch sieben Experteninterviews aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft ergänzt. Die Experteninterviews sollen das Forschungsvorhaben dieser Arbeit stützen und der Beantwortung der Frage dienen, ob es sich bei der Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen um ein nachhaltiges Verfahren handelt.

4. Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zur Lithiumgewinnung aus lokalen Geothermiequellen

Geothermie, auch Geothermische Energie oder schlichtweg Erdwärme, ist Energie aus dem Erdinneren, die zur Gewinnung von Wärme und Strom genutzt wird. Sie

„bietet eine nahezu unerschöpfliche Quelle zur Wärmebereitstellung und zur Erzeugung von Strom. Geothermie ist klimaschonend und grundlastfähig. Sie ist unabhängig vom Wetter rund um die Uhr verfügbar. Geothermie trägt zur regionalen Wertschöpfung bei und macht unabhängig von fossilen Brennstoffen“, (Stober, Bucher 2020 : V).

Erdwärme kann zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung beitragen. Dies bestätigen auch die Fraunhofer-Gesellschaft und die Helmholtz-Gemeinschaft in einem gemeinsamen Strategiepapier. Denn:

„ein Viertel des deutschen Wärmebedarfs [,] könnten theoretisch über tiefe geothermische Energiesysteme [...] abgedeckt werden. Hinzu kommen die Systeme der Oberflächennahen Geothermie zum Heizen und Kühlen im Neubaubereich“, (Fraunhofer-Gesellschaft / Helmholtz-Gemeinschaft 2022 : 8).

Laut Umweltbundesamt fällt ungefähr die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland auf den Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte zurück. Zwar lieferten 2023 Solar-, Geothermie und Umweltwärme gemeinsam lediglich 16,9 Prozent der erneuerbaren Energie zur Wärme- und Kälteerzeugung (Umweltbundesamt 2024) und laut dem Erneuerbare Energien-Gesetz 2023 sollen vor allem Solar- und Windenergie zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung vorangetrieben werden (EEG 2023). Die Bundesregierung sieht Geothermie dennoch als wichtigen Pfeiler für die Energiewende und möchte bis 2030 „soviel Erdwärme wie möglich erschließen. Zudem

soll zehnmal so viel Erdwärme ins Wärmenetz eingespeist werden wie heute,“ (Bundesregierung 2023).

Geothermiequellen liegen in unterschiedlichen Tiefenlagen. *„Die Grenzziehung liegt bei etwa 400 Metern Tiefe...“*, (Stober, Bucher 2020 : 36) wobei man bis 400 Metern von Oberflächennaher Geothermie spricht und danach von Tiefer Geothermie.

Lithium ist ein essentieller Bestandteil von Lithium-Ionen Akkus. Manche bezeichnen es als das wichtigste Metall des 21. Jahrhunderts (vgl. Liu, Ma, Lü, Wang, Chen 2023 : 209). Zwar beträgt der Anteil des Leichtmetalls nur 1,5 – 11 Prozent pro Lithium-Ionen Akku (vgl. Sankar, Abhilash, Meshram 2023 : 5), dennoch gibt es nach aktuellem Stand der Technik keinen Ersatz für Lithium zur Herstellung von vergleichbar effizienten Batterien (vgl. Slattery et al. 2023 : 1). Zwar sind im Januar 2024 in China die ersten Elektrofahrzeuge mit Natrium-Ionen-Batterien vom Band gelaufen. Ein deutsches Fahrzeug mit Natrium-Ionen-Akku wird aber voraussichtlich vorerst nicht auf den Markt kommen. Das liegt unter anderem an anderen Ansprüchen in punkto Reichweite und an schnelleren Prozessen in China (SWR 2024). Vor allem die Automobilindustrie benötigt daher den kritischen Rohstoff Lithium im Rahmen der Energiewende für Elektrofahrzeuge. Die Weltbank schätzt, dass die Lithiumproduktion bis 2050 auf fast 500 Prozent im Vergleich zu 2018 steigen muss, um saubere Energietechnologien voranzubringen und die Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius zu begrenzen (vgl. Hund et al. 2020 : 12).

Bereits in den 1970er Jahren gab es in Kalifornien Studien zur Extraktion von Lithium aus Thermalwasser aus dem Salton Sea. Trotz Überlegungen, das dortige Thermalwasser als Lithiumquelle zu nutzen, fiel damals die Entscheidung auf die Extraktion anderer Bestandteile wie Kalzium und Eisen (vgl. Goldberg, Kluge, Nitsche 2022 : 251).

Der wachsende globale Bedarf an Lithium, vor allem für die Elektromobilität, hat nun die Aufmerksamkeit wieder auf Thermalwasserquellen gelenkt. Hinzu kommen zwei weitere wichtige Argumente, die für einen möglichst hohen Anteil an lokaler Lithiumextraktion sprechen: Zum einen wird Industrienationen wie den USA oder Deutschland durch die geopolitischen Verwerfungen unserer Zeit zunehmend bewusst, dass nur eine größere Unabhängigkeit von globalen Lieferketten künftig eine sichere Versorgung mit kritischen Rohstoffen garantieren kann. Zum anderen kristallisiert sich immer mehr die Gewissheit

heraus, dass der wachsende globale Bedarf in naher Zukunft zu einem erheblichen Lithiumdefizit führen wird (vgl. Schmidt 2022 : 11). Dem könnte eine heimische Förderung und Produktion entgegenwirken.

In Regionen mit Geothermiequellen wie dem deutschen Oberrheingraben und der Salton Sea Region in Kalifornien sind daher erste Anlagen zur Lithiumextraktion aus Geothermiequellen in Betrieb oder in der Entstehung.

4.1 Oberflächennahe Geothermie

Oberflächennahe Geothermie ist beinahe überall auf der Welt verfügbar. Sie kommt in der Regel durch Erdwärmesonden an die Oberfläche. Erdwärmesonden sind Rohre, die durch senkrechte Bohrungen in die Tiefe eingeführt werden. In ihnen zirkuliert ein flüssiges Wärmeträgermedium, das dem Untergrund Wärmeenergie entzieht. Diese Wärmeenergie fließt durch das Wärmeträgermedium nach oben. In der Regel sind 25 Grad Celsius die maximale geförderte Temperatur Oberflächennaher Geothermie. Für eine energetische Nutzung ist daher meist eine Wärmeanhebung notwendig, zum Beispiel durch eine Wärmepumpe (vgl. Stober, Bucher 2020 : 41). Die Wärmepumpe nivelliert die Temperatur auf die entsprechend benötigte Temperatur zum Betrieb einer Heizung oder Klimaanlage, je nach Jahreszeit (vgl. Stober, Bucher 2020 : 76 & 77). Global führend in der Nutzung von Oberflächennaher Geothermie zu Heizzwecken sind die USA, Schweden, Deutschland und Frankreich (vgl. Stober, Bucher 2020 : 33). Die Wärme aus Oberflächennaher Geothermie wird meist für Einzelgebäude wie Wohnhäuser, technische Anlagen oder kleinere Gebäudeeinheiten genutzt.

Laut Bundesverband Geothermie gibt es in Deutschland aktuell über 470.000 Anlagen für Oberflächennahe Geothermie mit insgesamt ca. 4700 Megawatt Leistung (Bundesverband Geothermie 2024).

4.2 Tiefe Geothermie

Bei der Tiefen Geothermie gibt es zwei Erschließungsarten: Petrothermale Systeme und Hydrothermale Systeme. Hydrothermale Systeme nutzen natürlich vorhandenes heißes Thermalwasser zwischen zwei oder drei Bohrlöchern als Wärmetauscher zur Wärme- oder Stromerzeugung. Petrothermale Systeme nutzen das heiße Gestein als Wärmetauscher, wobei von der Oberfläche injiziertes Wasser als Wärmeträger fungiert.

Bei beiden Verfahren kann das aus der Tiefe geförderte heiße Wasser zur Wärmeversorgung oder zur Energie- / Stromgewinnung genutzt werden.

Bei der Wärmeversorgung wird das heiße Wasser direkt genutzt. Bei der Stromerzeugung produzieren Dampfturbinen den Strom. Sie wandeln die geothermische Energie des heißen Wasserdampfs in mechanische Energie um und ein Generator konvertiert die mechanische Energie zu Strom (vgl. Abb. 1).

Der Vorteil der Tiefen Geothermie ist die mögliche parallele Versorgung von Wärme und Strom, die sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung und die nachgeschaltete, Mehrfachnutzung der Wärmeenergie, das sogenannte Kaskadenprinzip. Es ermöglicht eine maximal ökonomisch und ökologisch effiziente Nutzung geothermischer Energie. Mit den nachgeschalteten Wärmepumpen können beispielsweise Gewächshäuser oder Fischzuchten betrieben werden (vgl. Stober, Bucher 2020 : 179 & Abb. 2).



Abb. 1: Turbine in einem Geothermiekraftwerk (Stober, Bucher 2020 : 229)

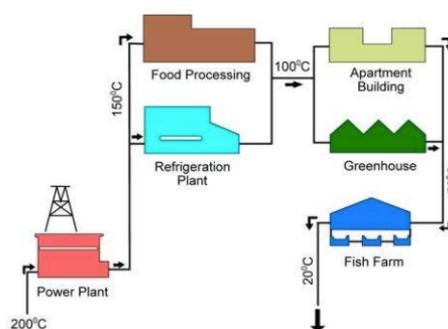


Abb. 2: Kaskadennutzung von Wärmeenergie bei Tiefengeothermie (Dickson, Fanelli 2004 : 50)

Die durchschnittliche Tiefe der Anlagen für Tiefe Geothermie liegt bei 2.500 Metern (Bundesverband Geothermie 2024). Das aktuell tiefste Projekt in Deutschland befindet sich in Holzkirchen in Bayern in knapp 5.100 Metern Tiefe (vgl. Abb. 3). Die technische Grenze für Bohrungen liegt derzeit bei 7.000 Metern (vgl. Hennicke, Bodach, Samadi 2020).

Laut dem Bundesverband Geothermie befinden sich in Deutschland aktuell 42 Anlagen für Tiefe Geothermie mit insgesamt 417 Megawatt installierter Wärmeleistung und 46 Megawatt installierter elektrischer Leistung (Bundesverband Geothermie 2024).

Hydrothermale Geothermie kann in Schichten über einem Kilometer Tiefe durch das kalte injizierte Wasser oder eine Druckänderung Erdbeben mit erhöhten Magnituden auslösen. Dies gilt vor allem für einige tiefe Hydrothermie-Anlagen, die heißes Wasser

aus Störungssystemen (Geflechte aus tektonischen Brüchen) statt natürlichen Kluftsystemen fördern oder reinjizieren (vgl. Stober, Bucher 2020: 244 & 246). Meist sind durch hydrothermale Geothermie ausgelöste Erdbeben schwach und können sogar unbemerkt bleiben (vgl. Stober, Bucher 2020 : 261). Bei einer geothermischen Dublette besteht der Vorteil, dass die permanente Reinjektion das natürliche Kluftsystem stabil hält. Aber auch hier sind seismische Ereignisse möglich (vgl. Stober, Bucher 2020 : 262). Eine geothermische Dublette ist ein geschlossenes System zwischen zwei Bohrlöchern zur Förderung und Reinjektion von heißem Wasser oder Dampf mit dem Ziel der Wärme- und / oder Stromerzeugung.

Petrothermale Systeme bezeichnet man synonym auch als Enhanced oder Engineered Geothermal Systems (EGS) (vgl. Bracke 2014 : 248). Anstelle der Bezeichnung EGS waren früher auch die Begriffe Hot-Dry-Rock- (HDR) oder Hot-fractured Rock-Verfahren (HFR) gebräuchlich. Vor allem die Bezeichnung Hot-fractured Rock lässt einen Rückschluss über die Fördermethode zu, die dem Fracking (Hydraulic Fracturing) begrifflich und technisch ähnelt. Beim Fracking wird eine Flüssigkeit durch hohen hydraulischen Druck in dichtes Gestein gepresst, um das Gestein aufzubrechen und Erdgas an die Oberfläche zu fördern (vgl. Stober, Bucher : 271).

Bei EGS-Verfahren in der Tiefen Geothermie werden „*von Natur aus vorhandene Klüfte [...] aufgeweitet. Seltener werden neue Klüfte geschaffen.*“ (Stober, Bucher : 201). EGS-Anlagen nutzen das geweitete Tunnelnetz des heißen Gesteins als Wärmetauscher, indem kühles Wasser von der Erdoberfläche die Wärme im Untergrund aufnimmt und als warmes Wasser wieder an die Oberfläche kommt. Hierfür sind zwei Bohrungen nötig – die Injektionsbohrung zum Einleiten des kalten Oberflächenwassers und die Produktionsbohrung zur Förderung des aufgewärmten Tiefenwassers. Auch bei hydrothermalen Systemen unterscheidet man zwischen Injektions- und Produktionsbohrung. EGS löst durch das Weiten und Klüften sowie die Wasser-Injektion seismische Ereignisse in der Tiefe aus und steht daher häufig in der Kritik (vgl. Kap. 5.4).

4.3 Verfahren der Lithiumextraktion aus Geothermiequellen am Beispiel des Oberrheingrabens (Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven)

Thematische Einordnung

Für 2030 zeichnet sich eine Lithium-Knappheit ab. Bislang sind Deutschland und Europa abhängig von volatilen globalen Lieferketten, denn nur ein Prozent des weltweit

genutzten Lithiums stammt aus Europa (vgl. Goldberg et al. 2023 : 1). Seit einiger Zeit richtet sich daher in Deutschland die Aufmerksamkeit auf lithiumreiche geothermale Solen bzw. Thermalwasservorkommen im Oberrheingraben. Diese Solen weisen eine hohe Lithium-Konzentration und Durchflussrate auf, was auf eine rentable Förderung des Leichtmetalls hindeutet. Es gibt allerdings noch keinen etablierten Prozess zur Lithium-Gewinnung aus Geothermiequellen, der nachweist, dass sich die Vorkommen langfristig bei regelmäßiger Förderung erneuern.

In Europa gibt es zusätzlich zum Oberrheingraben und dem Norddeutschen Becken Lithiumvorkommen in anderen Gebieten, z.B. im nordenglischen Cornwall, in Frankreich und in Italien (vgl. Goldberg, Kluge, Nitsche 2022 : 242).

Im Oberrheingraben hat die Firma Vulcan Energy im November 2023 nach eigenen Angaben die *„weltweit erste Anlage zur klimaneutralen Lithiumproduktion im Tonnenmaßstab bei gleichzeitiger Erzeugung Erneuerbarer Energie in Betrieb“* (Vulcan Energy 2023) genommen. In Kalifornien wollen die drei Firmen Berkshire Hathaway Renewables, Energy Source Minerals und Controlled Thermal Resources Lithium aus teils bestehenden Geothermiekraftwerken am Salton Sea fördern. Im Januar 2024 feierte Controlled Thermal Resources die Grundsteinlegung für die erste Lithiumextraktions- und Geothermieanlage im Süden des Salton Seas (US Department of Energy 2024) . Diese Arbeit soll sich aufgrund der Fortschrittlichkeit des Projekts und der räumlichen Nähe zur Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau, an der diese Arbeit entsteht, vorrangig mit dem Projekt im Oberrheingraben befassen. Dennoch wird auch das Salton Sea Projekt wiederholt Erwähnung finden.

Stand der Technik

Die Firma Vulcan Energy befindet sich nach eigenen Angaben in Phase Eins des „Zero Carbon Lithium Projekts“ (Vulcan Energy) mit einer Laufzeit von 30 Jahren.

Folgende vier Schritte sind in der ersten Phase geplant (vgl. Abb. 4):

1. Erhöhung der Anzahl der Produktions-und Förderbohrungen von zwei auf sieben.
2. Bau einer neuen und größeren Geothermieanlage nahe der bestehenden Anlage.
3. Aufbau einer neuen Lithiumextraktionsanlage.
4. Aufbau einer zentralen Lithiumanlage zur Lithiumveredelung auf Batteriequalität .

Die im November 2023 eröffnete Anlage bezeichnet Vulcan Energy als Lithiumextraktionsoptimierungsanlage (LEOP) (Vulcan Energy 2023). Dort möchte das Unternehmen seine Mitarbeiter schulen und die ersten Tonnen Lithium fördern. Vor der Inbetriebnahme der Anlage hat das

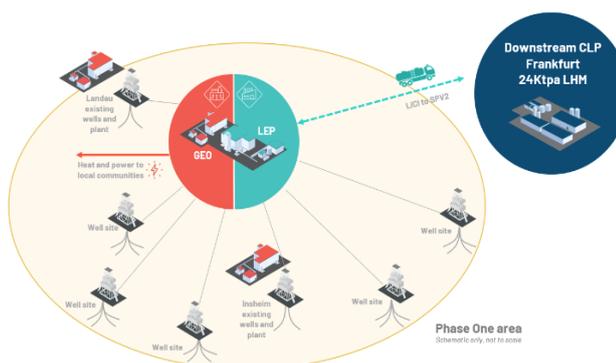


Abb. 4: Region Südpfalz, Gebiet Phase Eins der Firma Vulcan Energy (Vulcan Energy)

Unternehmen die Lithiumextraktion aus Thermalwasser drei Jahre lang in Landau und Insheim (vgl. Abb. 4 und Vulcan Energy 2023) getestet. Anfang April 2024 startete in Landau die Produktion von Lithiumchlorid (vgl. Vulcan Energy 2024). Durch das Verfahren der „Direkten Lithiumextraktion durch Adsorption (A-DLE)“ (Vulcan Energy 2023) konnte das Unternehmen eine Effizienz von 90 Prozent Lithium aus der geothermischen Sole erzielen (vgl. Vulcan Energy 2024). Das A-DLE-Verfahren findet bereits Anwendung bei zehn Prozent der globalen Lithiumherstellung (vgl. Vulcan Energy 2024). Bei der direkten Lithiumextraktion (DLE bzw. Direct Lithium Extraction) wird das Lithium direkt aus dem Thermalwasser extrahiert. Im Gegensatz zur Lithiumgewinnung aus Salzseen muss das Wasser nicht zuerst verdunsten. Es fließt nach der Extraktion wieder zurück in die Ursprungsumgebung.

Extraktionsverfahren A-DLE:

Die Abkürzung **A-DLE** steht für Adsorption-Type Direct Lithium Extraction mittels eines Aluminiumhydroxid-Sorbens. Die Adsorption durch Metalloxide und -hydroxide ist laut Stringfellow und Dobson das derzeit fortschrittlichste Extraktionsverfahren (Stringfellow, Dobson 2021 : 60). Die Vorteile sind laut Vulcan Energy eine garantierte Erfolgsbilanz, niedrige Betriebskosten, eine geringere Umweltbelastung und eine hohe Produktqualität (Vulcan Energy):

Erfolgsbilanz	Gängiges Verfahren seit den 1970er Jahren: rund 50 Jahre Erfahrung.
	Lithiumgewinnung aus dem Sorptionsmittel mithilfe von Wasser statt Säure.
Niedrige Betriebskosten	Arbeitet mit Hitze → Energieeinsparung durch heißes Thermalwasser.
	Extrahiert Lithium mit über 90-prozentiger Effizienz, keine Verdunstungsteiche nötig.
Reduzierte Umweltbelastung	Reduzierung/Wegfall von chemischen Reagenzien im Vergleich zu herkömmlichen Prozessen.
Produktqualität	Höhere Produktqualität im Vergleich zu Lithium aus Bergbau und Salzseen.

Auch Goldberg, Kluge und Nitsche nennen bei der Lithiumgewinnung mittels Aluminiumhydroxiden den Vorteil, dass keine Säure für den Prozess nötig ist. Sie erwähnen auch einen erhöhten Wasserverbrauch im Verhältnis 100:1 zum Sorbens. Sie bestätigen die hohe Effizienz von bis zu 90 Prozent des extrahierten Lithiums in Laborversuchen (Goldberg, Kluge, Nitsche 2022 : 247). Slattery et al. weisen darauf hin, dass das Verfahren der direkten Lithiumextraktion (DLE) neu ist und die meisten Informationen über das Verfahren und seine Auswirkungen aus der Industrie und nicht aus der Fachliteratur oder unabhängigen Quellen stammen (Slattery et al. 2023 : 2).

Den Sorptionsprozess beschreibt die Firma in zwei Schritten – **Sorption** und **Elution**: Im ersten Schritt löst sich bei der **Sorption** Lithiumchlorid aus der Sole heraus und bindet sich an das Sorptionsmittel (vgl. Abb.5).

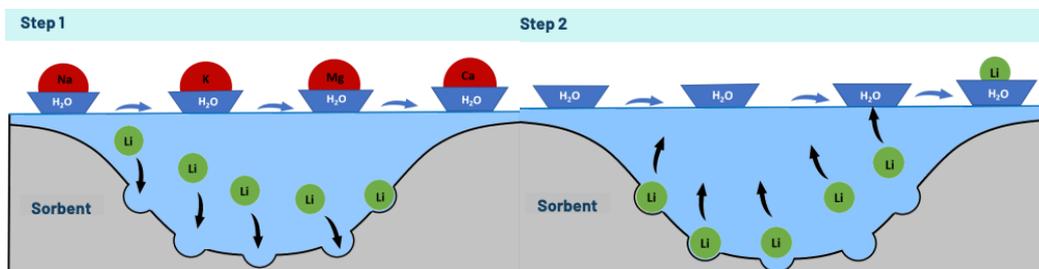


Abb. 5: Das A-DLE-Verfahren in zwei Schritten: Sorption und Elution (Vulcan Energy)

Im zweiten Schritt, der **Elution** (vgl. Abb.5), löst sich das Lithiumchlorid beim Waschen mit Wasser vom Sorbens. Im aufgefangenen Waschwasser, dem **Eluat**, befindet sich das hochkonzentrierte Lithiumchlorid, das zu Lithiumhydroxid für die Batterieproduktion weiterverarbeitet werden kann.

Entwicklungsperspektiven:

In der ersten Phase des „Zero Carbon Lithium Projekts“ möchte Vulcan Energy jährlich 24.000 Tonnen Lithiumhydroxid für den Batteriebedarf von einer halben Millionen Elektroautos produzieren. Gleichzeitig möchte das Unternehmen die Umgebung mit Wärmeenergie versorgen.

Im Dezember 2023 stimmte der Landauer Stadtrat nach einem Genehmigungsverfahren unter Einbeziehung der Öffentlichkeit der Errichtung einer Geothermie- und Lithiumextraktionsanlage (G-LEP) in einem Gewerbegebiet in Landau zu – unter Vorbehalt zu. Voraussetzung für den Baubeginn ist die Erfüllung der Bedingungen der

Stadt und der Bürger (vgl. Kap. 5.5 und 7.3). Der Bau der G-LEP entspricht Schritt zwei und drei der Projektphase Eins (vgl. Abb. 4).

Die G-LEP soll künftig in ihrem GEO-Teil (vgl. Abb. 4) mit dem Thermalwasser klimaneutral Strom und Wärme erzeugen. Der LEP-Teil der Anlage soll das Lithiumchlorid aus dem Thermalwasser extrahieren und es danach in den Untergrund zurückinjizieren. In der firmenzugehörigen Zentralen Lithiumelektrolyse-Optimierungsanlage (CLP / CLEOP) in Frankfurt-Höchst soll das Lithiumchlorid ab Sommer 2024 zu Lithiumhydroxidmonohydrat (LHM) in Batteriequalität verarbeitet werden (Vulcan Energy 2024).

Vor dem Hintergrund des European Green Deal und nachdem die Europäische Union sich eine Woche vor der Eröffnung der Anlage in Landau im November 2023 zum Critical Raw Materials Act geeinigt hat, in dem Lithium die Liste der kritischen Rohstoffe anführt, trifft das Unternehmen mit seinem Projekt den politischen Zeitgeist. Auch die USA investieren unter anderem in eine nationale Lithiumlieferkette, um unabhängiger von globalen Lieferketten zu werden. Ein Beispiel hierfür ist die „American Battery Materials Initiative“ der Biden-Regierung, die im Rahmen des US Bipartisan Infrastructure Law ins Leben gerufen wurde (The White House 2022).

4.4 Herkunft von Lithium und bislang gängige Extraktionsverfahren

2020 stammten über 90 Prozent des Lithiums aus nur drei Ländern (vgl. Abb. 6): Australien, Chile und China. Die momentan wirtschaftlichsten Lithiumvorräte finden sich in Festgesteinsvorkommen (60 %) und Solevorkommen (40 %) (vgl. Schmidt 2023 : 13 & 27). Ein Großteil der Festgesteinsvorkommen, auch Pegmatitvorkommen genannt, befindet sich in Australien, Kanada und Afrika. Bis 2030 könnten sich diese Zahlen ändern, da auch Argentinien, Kanada, die USA, Brasilien und Deutschland an Projekten zur Lithiumgewinnung arbeiten. Am Anteil der Förderung aus Festgestein wird sich laut der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) allerdings zunächst wenig ändern. Er wird voraussichtlich bei 50 bis 60 Prozent bleiben (vgl. Schmidt 2023 : 11 & 12).

4.4.1 Länder mit Lithiumvorkommen

Das wichtigste Förderland für Lithium war 2020 Australien vor Chile und China (Abb. 6). Nur ein Prozent kam aus Portugal bzw. Europa (vgl. Goldberg et al. 2023 : 2).

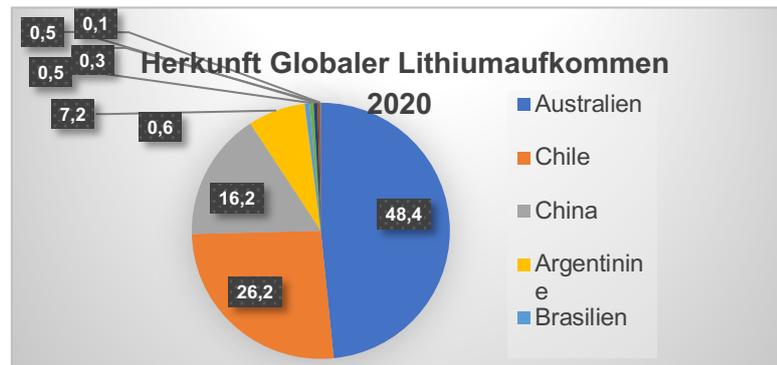


Abb. 6: Veranschaulichung Herkunft Globale Lithiumaufkommen laut der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) (Schmidt 2023 : 28)

Im Hinblick auf volatile Lieferketten, die globale Bestrebung zur Senkung von CO₂-Emissionen und die sich ankündigende Lithiumknappheit benötigt der globale Lithiummarkt eine Diversifizierung. Vor allem, weil laut Deutscher Rohstoffagentur (DERA) die globale Lithiumförderung in den kommenden Jahren um den Faktor vier bis sieben ansteigen muss, um den wachsenden Bedarf zu decken. Auch die Kapazitäten zur Lithium-Weiterverarbeitung (vgl. Kap. 4.5) müssen steigen (vgl. Schmidt 2023 :11). Zur Sicherung der lokalen Rohstoffversorgung und Senkung von Emissionen gibt es einen Trend hin zu lokalen Wertschöpfungsketten (vgl. Schmidt 2023 : 18). Das zeigen auch die Projekte im Oberrheingraben und in der Salton Sea Region.

Das geförderte Lithium kann in seiner Reinform nicht direkt für die Batterieproduktion verwendet werden. Lithiumkarbonat, das hauptsächlich aus Argentinien und Chile stammt, wird meist in asiatischen Ländern aufgearbeitet. In Australien gefördertes Spodumen-Konzentrat aus dem lithiumreichen Mineral Spodumen geht zur Weiterverarbeitung zu Lithiumhydroxid nach China. Das Land produziert derzeit 76 der globalen Batteriekapazität und führt 60 Prozent der globalen Raffination von Lithium in Batteriequalität durch (vgl. Goldberg et al. 2023 : 2). Neben der lokalen Förderung wäre folglich auch eine größere Diversität in der Lithiumveredelungsindustrie ein logischer Schritt zur Reduzierung der Abhängigkeit von globalen Lieferketten und zur Senkung von transportbedingten CO₂-Emissionen. Ganzheitlich gedachte Produktionsketten wie die von Vulcan Energy, wo das Lithium in Frankfurt-Höchst veredelt wird, sind ein Schritt in diese Richtung. Eine lokale Recyclingindustrie könnte den Kreislauf schließen (vgl. Kap. 4.5).

4.4.2 Lithiumförderung in Bergwerken

Da es sich bei einem Großteil des Lithiummaterials aus Festgesteinsvorkommen um Spodumen aus Australien handelt (vgl. Kapitel 4.4 und 4.4.1) behandelt dieses Unterkapitel die Gewinnung von Lithiumkarbonat aus Spodumen. Zunächst wird das Festgestein fein gemahlen. Im Anschluss werden Spodumen und Lithiumkarbonat in einem mechanischen Prozess voneinander getrennt. Im nächsten Schritt erhitzt ein Drehrohrofen das Lithiumkarbonat auf bis zu 1100 Grad Celsius. Danach findet eine Auslaugung mit konzentrierten Säuren statt und darauf folgt die Ausfällung von Aluminium und Schwermetallen, bevor das Lithiumkarbonat im letzten Schritt mit Soda kristallisiert wird.

Der beschriebene Prozess ist im Vergleich zur Lithiumgewinnung aus Salzseen sehr energie-, wasser- und abfallintensiv (vgl. Voigt 2014 : 81). Für ein Kilogramm Lithiumkarbonat benötigt man 23.000 Kilogramm Wasser (vgl. Jiang et al. 2020, nach Sankar, Abhilash, Meshram 2023 : 5). Vor allem in dicht besiedelten Gebieten kann die Flächeninanspruchnahme problematisch

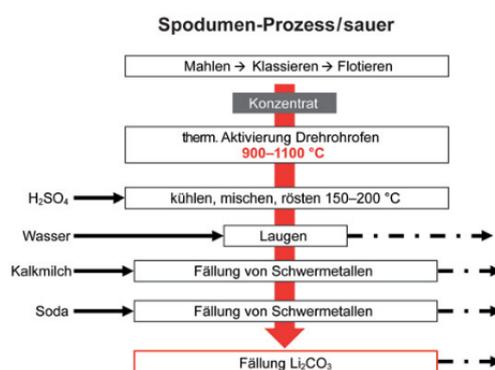


Abb. 7: Verfahren der Lithiumextraktion und Herstellung von Lithiumkarbonat aus Spodumen (Voigt 2014 : 81)

werden, auch wenn das im kaum besiedelten Norden Australiens bislang kein Problem darstellt. Da im Gegensatz zum Metallbergbau bei Lithium keine sulfidische Mineralisation stattfindet ist eine Versauerung des Grund- und Oberflächenwassers unwahrscheinlich (vgl. Schmidt 2023: 19). Durch den Transport der gewonnenen Lithiumkonzentrate zur Weiterverarbeitung – überwiegend nach China – schlagen weitere Treibhausgase auf der Klimabilanz zu Buche. Bei einem maximalen Anteil von sechs Prozent Lithiumoxid pro gefördertem Konzentrat fallen bis zu 10 Tonnen Abfall für eine Tonne Endprodukt an (vgl. Schmidt 2023 : 19). Diese Abfälle sind derzeit ungenutzt, es gibt aber bereits Untersuchungsprojekte zu deren Nutzungspotenzialen. Im Mittelpunkt stehen dabei

„die CO₂-neutrale Produktion, der Aufbau einer integrierten Lithiumwirtschaft inkl. der Nutzung der Nebenprodukte, der Aufbau einer europäischen Lithiumkreislaufwirtschaft [...] und die internationale Normung entsprechender ESG-Kriterien“, (Schmidt 2023 : 19).

4.4.3 Lithiumförderung in Salzseen

Das in Salzseen vorkommende Lithium liegt zwar bereits in löslicher Sole vor, es muss aber von Boraten und Salzen getrennt werden. Das geschieht durch die Konzentration der salzhaltigen Sole in Verdunstungsbecken mithilfe von Sonne und Wind. Dabei lösen sich die Salze. Die konzentrierte Lösung mit einem Lithiumgehalt von maximal sechs Prozent muss in einer Fabrik chemisch gereinigt werden.

Der erste Schritt ist die Borat-Extraktion mittels Schwefelsäure und Kerosin. Darauf folgt die Entfernung von Magnesium- und Kalziumionen sowie Sulfat mittels Kalk und Natriumkarbonat. Der letzte Schritt ist die Fällung von Lithiumkarbonat mit Soda.

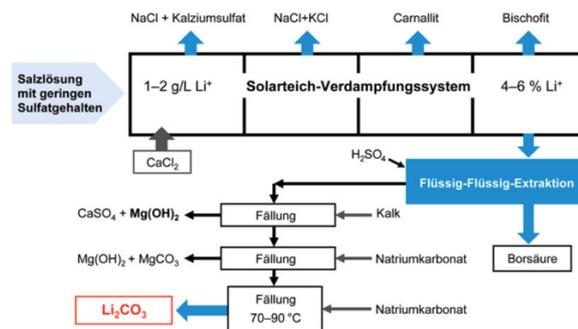


Abb. 8: Verfahren zur Produktion von Lithiumkarbonat aus Sole (vgl. Voigt 2014 : 78)

Zwar ist auch hier die Menge an CO₂-Emissionen, Schwefeldioxid und verbrauchtem Wasser nicht unerheblich, sie ist aber deutlich geringer als bei der Extraktion aus Festgestein. Denn die Lithium-Ionen-Batterie-Einheit aus Festgestein basierten Lithiumressourcen weist ein um 16 bis 33 Prozent höheres Treibhauspotenzial und eine höhere Versauerung im Vergleich zu derjenigen aus salzbasiertem Lithium auf (vgl. Sankar, Abhilash, Meshram 2023 : 5).

Der Prozess ist wassersparender als die Lithiumgewinnung aus Spodumen. Für ein Kilogramm Lithiumkarbonat aus Sole fallen 773 Kilogramm Wasser an (vgl. Sankar, Abhilash, Meshram 2023 : 5). Bei der Gewinnung aus Spodumen sind es 23.000 Kilogramm (vgl. Kap. 4.4.2). Abbildung 8 zeigt das erläuterte Verfahren zur Produktion von Lithiumkarbonat aus Sole.

Da Chile einen besonders hohen Anteil am globalen Lithiummarkt hat, fällt das Augenmerk auf die Extraktion aus dem Salar de Atacama. Im Salar de Atacama ist die Menge der zu entnehmenden Sole streng reguliert und wird von staatlichen Behörden sowie den Unternehmen überwacht. Trotz dieser Maßnahmen stehen einige Kritikpunkte im Raum. Dazu gehören der große Frischwasserverbrauch, der bei genauerer Betrachtung für die Lithiumindustrie aber relativ gering ausfällt und zudem staatlich reguliert ist (vgl. Schmidt 2023 : 19).

Ein weiterer Kritikpunkt ist der Flächenverbrauch der Verdunstungsbecken. Von der Gesamtfläche des kaum besiedelten Salars beanspruchen sie allerdings weniger als ein Prozent (vgl. Schmidt 2023 : 19).

Auch der Weitertransport des Lithiumkarbonats zur Veredelung nach China steht in der Kritik, da CO₂-Emissionen anfallen und die Veredelung energie- und wasserintensiv ist.

Trotz der genannten Kritikpunkte ist die Klimabilanz der Lithiumgewinnung aus Sole geringer als die der Lithiumgewinnung aus Festgestein.

4.5 Exkurs: Lithiumaufbereitung und Recycling von Lithiumbatterien

Das Recycling wiederaufladbarer Lithium-Ionen-Batterien (LIB) könnte künftig die Abhängigkeit von globalen Lieferketten weiter reduzieren. Aktuell ist das LIB-Recycling wirtschaftlich noch nicht darstellbar. Ein Grund hierfür ist die langsame Rücklaufrate von genutzten Batterien (vgl. Riofrancos et al. 2023 : 37). Der europäische Markt zum Recycling von LIB wächst aber schnell und die Politik hat entsprechende Weichen gestellt. Die im Juli 2023 in Kraft getretene neue Europäische Batterieverordnung 2023/1542 sieht vor, dass ab 31. Dezember 2030 70 Prozent des Gewichts von Lithium-Ionen-Batterien recycelt werden sollen. Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) schätzt, „dass das Recycling ca. 3 – 9 % des globalen Bedarfs im Jahr 2030 decken könnte.“ (Schmidt 2023 : 12). Dunn et al. prognostizieren für 2040 in Europa einen Recycling-Anteil von 48 Prozent am gesamten Lithiumbedarf (Dunn et al. 2021 : 5194).

Ob die von der Europäischen Batterieverordnung für Europa angepeilten 70 Prozent erreicht werden können, wird sich zeigen. Fest steht, dass lokales Recycling den Lithiummarkt stärken kann. Für eine verlässliche Unabhängigkeit von globalen Lieferketten wäre eine wachsende Lithium-Kreislaufwirtschaft mit lokalen Lithiumextraktionsprojekten inklusive der lokalen Weiterverarbeitung und lokalen Anlagen zum LIB-Recycling von Vorteil.

5. Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung der Lithiumgewinnung durch heimische Geothermie - Stand der Forschung

5.1 Aktueller Stand der Forschung zur Lithiumextraktion aus Geothermiequellen am Oberrheingraben

Zum aktuellen Zeitpunkt existieren nur Prognosen zur verfügbaren Lithiummenge im Oberrheingraben und ihrer langfristigen Rentabilität. Vulcan Energy ist von der Wirtschaftlichkeit überzeugt. Auch das KIT veröffentlichte 2023 erste positive Zahlen.

Es hat ein generisches Modell auf Basis der geothermischen Gegebenheiten des Oberrheingrabens mit einer Simulationszeit von 30 Jahren erstellt. Die Simulation ergab, dass die Wärmeproduktion mit der Zeit konstant bleiben, der Lithiumvorrat aber abnehmen wird. Dennoch zeigte die Simulation eine mittlere Lithiumproduktion von 234 Tonnen pro Jahr. Das könnte für 17.000 – 24.000 Elektrofahrzeuge – bei einem Verbrauch von zehn bis 14 Kilogramm Lithium pro Batterie reichen (vgl. Goldberg et al. 2023 : 17). Dies ist eine positive Nachricht für die Wirtschaftlichkeit der gekoppelten Förderung von geothermischer Energie und Lithium. Das Ergebnis zeigt auch, dass eine Reduzierung der Abhängigkeit von globalen Rohstoffmärkten inklusive des Imports von Energierohstoffen möglich ist. Für eine komplett unabhängige Versorgung des deutschen Lithiummarktes wären allerdings laut den Berechnungen des KIT 30 – 220 geothermische Dubletten mit der gleichen Leistung wie im Referenzszenario notwendig (vgl. Goldberg et al. 2023 : 17).

Die Zahlen des KIT unterscheiden sich deutlich zu den von Vulcan Energy angestrebten 24.000 Tonnen Lithiumhydroxid für 500.000 Elektrofahrzeuge pro Jahr ab 2024.

Der Unterschied der Prognose des KIT-Modells und dem geplanten Produktionsvolumen von Vulcan Energy unterstreicht, wie wichtig *„engmaschige Langzeitversuche an großen Volumenströmen in Geothermiekraftwerken“* mit kombinierter Lithiumextraktion sind (Goldberg et al. 2023 : 17). Letztlich wird die Zeit zeigen, ob das Verfahren rentabel ist.

5.2. Weitere Studien zur Lithiumextraktion aus Geothermiequellen

Zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit sind neben den bereits zitierten KIT-Artikeln „Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Quellen in Deutschland“ Teil 1 - 3 kaum mehr als eine Hand voll weiterer wissenschaftlicher Studien bekannt, die sich ausschließlich mit Lithiumextraktion aus Geothermiequellen

befassen. Teil 1 der KIT-Artikel befasst sich mit dem Vergleich bestehender Extraktionsverfahren. Teil 2 diskutiert Potenziale und Produktionsszenarien und Teil 3 behandelt die Beständigkeit des Lithiums über die Zeit.

Die folgenden Studien befassen sich entweder mit der Salton Sea Region in den USA oder dem Oberrheingraben und dem Norddeutschen Becken in Deutschland.

Eine davon ist eine Analyse des Lawrence Berkeley National Laboratory von Dobson et al. im Auftrag des US-Energieministeriums. Sie gibt einen Überblick über die Chancen und Herausforderungen im Zusammenhang mit der Erschließung der Lithiumressourcen im Salton Sea Geothermalreservoir sowie über die möglichen ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen auf die Region. Die Analyse unterstreicht die Bedeutung von lokal gewonnenem Lithium für die Energie- und Verkehrswende in den USA und hebt das Potenzial der Salton Sea Region und ihrer Geothermievorkommen hervor. Die Studie nutzt Computermodelle zur Prognose von Lithiumgewinnungsraten. Umweltauswirkungen wie Wasserverbrauch, Luftemissionen und seismische Risiken werden bewertet.

Eine Analyse von Slattery et al. entwickelte eine Forschungsagenda zu lokalen Auswirkungen der Lithiumextraktion aus Geothermiequellen im Salton Sea. Die Analyse wurde ergänzt durch eine Literaturrecherche von Industriepublikationen wie Nachhaltigkeitsberichten und Fachartikeln über die Auswirkungen der geothermalen Lithiumgewinnung. Slattery et al. identifizierten die wichtigsten Anliegen und Prioritäten der Interessengruppen inklusive Anwohner und indigener Stämme durch teilnehmende Beobachtung von Gemeindeversammlungen und die Inhaltsanalyse von Protokollen öffentlicher Sitzungen. Die Protokolle sind auf der Website der California Energy Commission (CEC) einsehbar.

Die Protokolle sind Teil einer weiteren Studie, dem Bericht der Expertenkommission „Blue Ribbon Commission on Lithium Extraction in California“, auch „Lithium Valley Commission“ genannt zur Erforschung der Chancen und Herausforderungen der Lithiumgewinnung aus Geothermiequellen in der Salton Sea Region. Durch die Arbeit der Blue Ribbon Commission mit lokalen Stakeholdern entstand eine Roadmap mit Handlungsempfehlungen zum Schutz lokaler Interessen bei gleichzeitiger Priorisierung und Maximierung der Nutzen des neuen Industriezweigs.

2021 untersuchten Stringfellow und Dobson Technologien zur Gewinnung von Lithium aus Geothermiequellen. Wie Goldberg et al. kommen sie zu dem Schluss, dass Metalloxid und -hydroxid-Sorbenzien vielversprechende Extraktionsmethoden sind. Sie weisen aber ebenso wie Goldberg et al. auf die Notwendigkeit weiterer Feldstudien zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit des Prozesses hin (Stringfellow, Dobson 2021 : 61).

Vera et al. untersuchten die Umweltauswirkungen der Lithiumextraktion aus kontinentalen Solen, wobei sie auch die Herausforderungen des Verfahrens der Extraktion aus Geothermiequellen bewerten. Wie Goldberg et al. und Stringfellow und Dobson kommen sie zum Ergebnis, dass weitere Labortests erforderlich sind. Zudem müssten die Fragen der langfristigen Skalierbarkeit, logistische Herausforderungen und Umweltaspekte wie Wasserverbrauch und Auswirkungen auf das Ökosystem sorgfältig berücksichtigt werden. Schlussendlich seien kontinuierliche Überwachung und unabhängige Aufsicht entscheidend für die Bewertung und Abmilderung langfristiger Umweltauswirkungen und die Gewährleistung nachhaltiger Lithiumgewinnungspraktiken (Vera et al. 2023 : 149 – 165).

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanzierte und derzeit noch laufende Forschungsprojekt Li+Fluids hat die Erstellung einer umfassenden Potenzialstudie zur Lithiumextraktion aus hydrothermalen Fluiden zum Ziel. Die Studie *„soll zur Entwicklung einer (Sekundär-)Rohstoffstrategie beitragen und eine Entscheidungshilfe bei der Planung von Geothermie-Standorten mit Wärme- und zusätzlicher Rohstoffgewinnung darstellen.“*, (Schmidt 2023 : 17).

Das ebenfalls vom BMWK geförderte Projekt UnLimited untersucht die Lithiumextraktion aus heißen Tiefenwässern in Deutschland. Gemeinsam entwickeln die Projektpartner, darunter auch das KIT und der Energieversorger Energie Baden-Württemberg (EnBW), ein Verfahren der Lithiumextraktion in Kombination mit Geothermie (vgl. Schmidt 2023 : 17). Die Ergebnisse des Projekts stehen voraussichtlich ab Herbst 2024 zur Verfügung.

Der bislang primäre Forschungsfokus auf den Oberrheingraben und die Salton Sea Region begründet sich wahrscheinlich darin, dass diese Regionen nach aktuellem Stand der Recherchen dieser Arbeit die höchsten Vorkommen von Lithium in Geothermiequellen haben. Laut KIT könnten allein die Vorkommen in Deutschland (inkl. dem französischen Teil des Oberrheingrabens) aus aktuellen Bohrungen 5 – 19 Prozent

des Bedarfs für die jährliche lokale Batteriezellenproduktion stellen (vgl. Goldberg, Nitsche, Kluge 2022 : 261). Eine vom US-Energieministerium (DOE) beauftragte Analyse geht für die Salton Sea Region mit einer Menge von 3.400 Tonnen Lithium aus. Das DOE rechnet mit Lithium für 375 Millionen Elektrofahrzeug-Batterien (vgl. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2023).

Diese Arbeit untersucht die nachhaltigkeitsbezogenen Chancen und Risiken der Lithiumextraktion in Kombination mit den Chancen und Risiken der Geothermie im Hinblick auf die folgenden strukturleitende Begriffe:

Nachhaltigkeitsdimension Strukturleitende Begriffe

Ökologisch	Wasser, Emissionen und Luftqualität, Abfälle
Ökonomisch	Grundlastfähigkeit und CO2-Neutralität, Standortattraktivität, Skalierbarkeit, Unabhängigkeit von globalen Lieferketten, Rentabilität, Förderung weiterer Rohstoffe, Energy Return on Energy Invested – Theorie, Ausnutzung monetärer Anreize, Preisvolatilität, BIP anderer Länder, Seismizität
Sozial	Seismizität, Partizipation, Bergrecht / Haftung, Verschmutzung von Trinkwasser, Luft und Boden, Infrastruktur, Arbeitsplätze

5.3 Ökologische Nachhaltigkeit – Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Wasser:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: Ökologische Dimension – Wasser	
Chancen	Risiken
Reinjektion durch DLE /A-DLE	Hoher Frischwasserverbrauch bei DLE
Thermalwasser benötigt bei A-DLE keine Energie zur Erhitzung	Minimale Abwasservorkommen, müssen korrekt entsorgt werden
Wasser-/ Grundwasserverunreinigung unwahrscheinlich	

Chancen:

Beim DLE-Verfahren bzw. dem von Vulcan Energy angewandten A-DLE-Verfahren, wird das Thermalwasser nach der geothermischen Nutzung und der Lithiumextraktion wieder reinjiziert (vgl. Kap. 4.3). Der Rohstoffträger, in diesem Fall das Wasser, fließt zurück in seine ursprüngliche Umgebung. Das macht das Verfahren im Abbauprozess ökologischer als die bisher gängigen Abbaumethoden durch Bergbau und aus Sole.

Das reguläre DLE-Verfahren benötigt laut Vulcan Energy warme Sole bzw. warmes Wasser, das mit künstlich zugeführter Energie erhitzt werden muss. Beim A-DLE-Verfahren ist das Thermalwasser bereits natürlich erwärmt.

Der Salton Sea besteht größtenteils aus Abwässern der Landwirtschaft und ist daher bereits stark verschmutzt. Eine weitere Verunreinigung durch die Geothermie-Industrie ist nicht wahrscheinlich. Zudem ist das Wasser des Sees aufgrund der Verunreinigung nicht in die Wasserressourcenplanung integriert. Das gleiche gilt für die tieferen Grundwasserschichten vor Ort (vgl. Dobson et al. 2023 : 82 & 88). Ein indirekt durch die Wasserverschmutzung ausgelöstes Problem stellt allerdings die Luftverschmutzung dar. Je mehr der Salton Sea durch Sonneneinstrahlung austrocknet, desto schlechter wird die Luftqualität in der Umgebung, da die Gegend sehr windig und dadurch entsprechend staubbelastet ist.

Auch im Oberrheingraben ist keine Wasserverunreinigung zu befürchten. Zwar könnten geothermische Tiefengrundwässer aufgrund ihres hohen Salzgehaltes trinkwassergefährdend sein. Da das Wasser aber in einem geschlossenen Kreislauf wieder zurückfließt, entsteht kein zu entsorgendes Lagerstättenwasser wie bei der Gas- oder Erdölproduktion (vgl. Deutscher Naturschutzring 2016 : 5). Durch den Einsatz von *„hochwertigen Baumaterialien und einer sehr ausgereiften Technik mit zahlreichen Sicherheitsmaßnahmen“* sind *„schädliche Umwelteinflüsse von technischer Seite nahezu ausgeschlossen“*. Im Falle *„einer möglichen Leckage wird der Durchfluss gestoppt, und der undichte Bereich abgesperrt.“*, um dem Risiko einer Verunreinigung von Boden und Grundwasser entgegenzuwirken (Stober, Bucher 2020 : 244).

Risiken:

Der hohe Frischwasserverbrauch des DLE-Verfahrens – vor allem im extrem trockenen Salton Sea Gebiet – könnte eine Herausforderung darstellen. Das Frischwasser in der Region stammt aus dem knappen Vorrat des Colorado Rivers. Zwar fließen laut Dobson et al. nur ein Prozent des gesamten Frischwasserbedarfs aus dem Colorado River in die kommerzielle und industrielle Nutzung, 1,5 Prozent in die Trinkwassernutzung und über 97 Prozent in die landwirtschaftliche Bewässerung (vgl. Dobson et al 2023 : 82). Trotzdem sollte in der Region die Nutzung aller Frischwasseranteile durchdacht sein und im Kontext regionaler Verfügbarkeit bewertet werden (vgl. Slattery et al. 2023 : 1). Auch in Deutschland ist Wasser knapp. Dort führten u.a. die *„extremen Trockenperioden der vergangenen Jahre bereits zu hohen Ernteausfällen...“*. Da bei Trockenheit

„Ackerkulturen [...] nur untergeordnet bewässert“ werden, ist „im Oberrheingraben der Anbau von Saat- und Körnermais“ betroffen (Lehmann 2022 : 11).

Der Report der Blue Ribbon Commission weist darauf hin, dass bei der geothermischen Lithiumextraktion minimale Abwasservorkommen entstehen, die entweder vor Ort oder durch die städtischen Systeme entsorgt werden müssten. Dabei solle darauf geachtet werden, dass lokale oder staatliche Behörden die Entsorgung überwachen (vgl. Paz et al. 2022 : 65). Slattery et al. gehen davon aus, dass Abwässern aus dem DLE-Prozesse, sofern sie korrekt entsorgt werden, keine Gefahr darstellen werden. Sie empfehlen eine Einbeziehung von Abfallströmen in Nachhaltigkeitsanalysen (vgl. Slattery et al. 2023 :1).

Emissionen und Luftqualität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: Ökologische Dimension – Emissionen und Luftqualität	
Chancen	Risiken
Reduzierte CO ₂ -Emissionen bei Geothermie	Mögliche lokale Emissionssteigerung durch mehr Verkehr
Weniger Feinstaub	Freisetzung von Ammoniak und Benzol
Weitere Emissionsminderung durch „Co- Locating“	Wärmeemissionen
Reduzierung externalisierter Kosten	

Chancen

Dobson et al. erwähnen die deutlich reduzierten CO₂-Emissionen bei der lokalen geothermischen Stromerzeugung im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen – ein Argument, das auch für den Oberrheingraben gilt: *„Die Umwandlung [von Thermalwasser, Anm. d. Verf.] in Strom oder Nutzwärme ist frei von CO₂- und Rauchgasemissionen wie Rußpartikeln, Schwefel- und Stickoxiden.“*, (Stober, Bucher 2020 : 244). Ebenso sinken lokal die Feinstaub-Partikel in der Luft laut Dobson et al. um das 80- bis 400-fache im Vergleich zu anderen regionalen Quellen und es entsteht 15-mal weniger Schwefelwasserstoff (vgl. Dobson et al. 2023 : 100).

Die lokale Strom- und Wärmeerzeugung von Vulcan Energy im Oberrheingraben mit einer Lithiumaufbereitungsanlage im rund zwei Stunden entfernten Frankfurt-Höchst würde Emissionen reduzieren. Kommt noch eine lokale Batterieproduktion und / oder - ein lokales Batterierecycling hinzu, sinken die Emissionen noch weiter. Denn der Transport in den asiatischen Raum zur Veredelung würde entfallen. Das gilt auch für die Salton Sea Region:

„Co-locating production enables a lower environmental footprint for the resulting product through reduced transportation, which represents an estimated 10 % of the energy and GHG burden of LIB production”, (Slattery et al. 2023 : 7).

Wenn die Emissionen direkt vor Ort anfallen, reduzieren sich zudem Externalitäten im Ausland.

Risiken:

Trotz der Emissionsminderung wird es, zumindest lokal, auch an manchen Stellen zu mehr Emissionen kommen, beispielsweise aufgrund eines erhöhten Verkehrsaufkommens für An- und Abtransporte.

Im Salton Sea Gebiet wurde nachgewiesen, dass geothermische Elektrizität Ammoniak und krebserregendes Benzol freisetzt. Ammoniak trägt zur Feinstaubbelastung bei. Allerdings haben Dobson et al. die Ammoniak- und Benzolemissionen in den Kontext zu anderen Kraftwerken gesetzt. Dabei fallen die Ammoniakemissionen im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken niedrig aus und die Benzolemissionen sind ungefähr gleich hoch. Wichtig ist, dass nicht Kraftwerke die Hauptquelle von Benzolemissionen sind, sondern die Verbrennung von Kohle und Öl sowie Fahrzeugabgase und die Verdunstung durch Tankstellen (Dobson et al. 2023 : 114). Slattery et al. empfehlen die Untersuchung von lokalen Emissionen im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen (vgl. Slattery et al. 2023 :1).

Bei Anlagen ohne Kraft-Wärme-Kopplung oder ohne die Anwendung des Kaskadenprinzips entstehen bei der Kühlung des Arbeitsmittels Wärmeemissionen. Sie sind *„in ihrer Größenordnung jedoch in der Regel nicht vergleichbar mit den Kühlungsanforderungen von thermischen Großkraftwerken der Kohle-, Gas- und Atomindustrie“*, (Stober, Bucher 2020 : 244).

Abfälle:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: Ökologische Dimension – Abfälle
Risiken
Freisetzung von Radioaktivität bei Li-Extraktion, Rohre müssen korrekt recycelt werden
Abfälle aus Geothermie und Lithium-Extraktion sind teilweise Sondermüll, Abfallstrategie nötig

Risiken

Geothermie kann Radioaktivität freisetzen. Bei einem unfallfreien geschlossenen Kreislaufprozess besteht laut Eggeling keine Gefahr eines direkten Kontakts für Mensch

und Umwelt. Dennoch können sich die Ausfällungen an Filtern oder Rohrwänden ablagern, weswegen diese nach der Nutzung als Sondermüll deklariert werden müssen. Es ist möglich, die Rohre durch Einschmelzen von den Radionukleiden zu reinigen und sie anschließend komplett zu recyceln (vgl. Eggeling 2018 : 135).

2023 entstanden in den Geothermieranlagen in der Salton Sea Region 80.000 Tonnen Abfälle aus Feststoffen. Diese bestanden hauptsächlich aus Filterrückständen, Feststoffen aus dem Soleteich und Wartungsabfällen. Die Sole-Abfälle fallen unter die Kategorie Sondermüll. Laut Dobson et al. werden sie entsprechend entsorgt. Mit der geplanten Lithiumextraktion und weiteren Geothermieprojekten werden sich die Abfälle voraussichtlich verdoppeln (vgl. Dobson et al. 2023 : 126), eine entsprechende Entsorgungsstrategie muss mitgedacht werden. Dies gilt auch für den Oberrheingraben.

5.4 Ökonomische Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Grundlastfähigkeit und EEG-Förderung:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: Ökonomische Dimension – Grundlastfähigkeit und EEG-Förderung
Chancen
Geothermie ist 24 Stunden, sieben Tage die Woche, das ganze Jahr über verfügbar
Förderung von Geothermie nach EEG

Chancen

Ein großer Vorteil der Geothermie ist ihre Grundlastfähigkeit (vgl. Kap. 4). Sie kann 24 Stunden, sieben Tage die Woche das ganze Jahr über Strom und Wärme liefern. Zudem ist Geothermie CO₂-neutral, sofern das Geothermiekraftwerk mit Strom aus erneuerbaren Energien läuft. Geothermiekraftwerke haben dadurch den wirtschaftlichen Vorteil, dass sie in Deutschland durch das Erneuerbare Energien-Gesetz Fördergelder erhalten (EEG 2023).

Standortattraktivität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Standortattraktivität
Chancen
Bei „Co-Locating“ wirtschaftlicher Aufschwung der Region

Chancen

Die Erschließung weiterer Geothermiekraftwerke mit kombinierter Lithiumextraktion oder die Ergänzung bestehender Kraftwerke mit Lithiumextraktionsanlagen, wie es im Oberrheingraben und am Salton Sea geplant ist (vgl. Dobson et al 2023 : 80), bringt ökonomische Chancen, denn „*building out a world-class battery manufacturing ecosystem in tandem with lithium production and processing [...] would increase economic opportunity and deliver quality jobs and community benefits to the region.*“, (Büro des kalifornischen Gouverneurs Gavin Newsom 2022).

Skalierbarkeit:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Skalierbarkeit	
Chancen	Risiken
Aktuelle Geothermiewerke könnten min.13 % des dt. Li-Bedarfs decken	Vorliegen reiner Prognosen als größtes ökonomisches Risiko der Extraktionsmethode

Chancen

Vulcan Energy prognostiziert eine Lithiumproduktion von 24.000 Tonnen Lithiumhydroxid für eine halbe Million Elektrofahrzeuge pro Jahr (vgl. Kap. 5.1). Das KIT geht von einer mittleren Lithium-Produktion von 231 Tonnen pro Jahr für 30 Jahre aus. Ein Szenario der KIT-Studie geht davon aus, dass allein die bereits vorhandenen Geothermieanlagen in Deutschland bereits 13 Prozent des Lithiumbedarfs für eine lokale Batterieproduktion decken könnten (Goldberg et al. 2023 : 2).

Risiken

Goldberg et al. weisen darauf hin, dass es sich bei den oben genannten Zahlen um eine Prognose handelt und noch keine Projektergebnisse vorliegen. Die schwierig zu prognostizierende Skalierbarkeit stellt eins der großen ökonomische Risiken der Extraktionsmethode dar.

Unabhängigkeit von globalen Lieferketten:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Unabhängigkeit von globalen Lieferketten
Chancen
Reduzierte Unabhängigkeit von globalen Lieferketten mit jeder weiteren Dublette

Chancen

Die lokale Extraktion würde die Abhängigkeit von globalen Lieferketten reduzieren, vor allem bei der Entstehung weiterer kombinierter Extraktionsanlagen. Jede weitere

geothermale Dublette könnte zwischen 0,5 bis 3 Prozent des lokalen Marktbedarfs decken (vgl. Goldberg et al. 2023 :17).

Rentabilität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Rentabilität	
Chancen	Risiken
Lithium hat hohen ökonomischen Wert, es ist in DE und den USA mind. 30 Jahre extrahierbar	Fündigkeitsrisiko
DLE: hohe Effizienz von bis zu 90 Prozent des extrahierten Lithiums in Laborversuchen	Bohrungen sehr teuer
	Restrisiko langfristiges Verhalten der Geothermiequelle

Chancen

Goldberg et al. berechnen, dass das geförderte Lithium selbst im ungünstigsten Preisszenario über einen Zeitraum von 30 Jahren einen Wert von einer Milliarde US Dollar erzielt (vgl. Goldberg et al. 2023 :17). Der hohe wirtschaftliche Wert von Lithium in Kombination mit Geothermie bietet ein großes Potenzial für den heimischen Rohstoffmarkt. Für mehr Klarheit ist laut Goldberg et al. eine detaillierte Exploration und Erschließung einer Lagerstätte im Voraus nötig.

Dobson et al. gehen für die Salton Sea Region mit einer Fördermenge von 115.000 Tonnen LCE pro Jahr über einen Zeitraum von 36 Jahren aus. Das würde die Region zu einer wichtigen nationalen Lithiumquelle der USA machen (vgl. Dobson et al 2023 : 17).

Risiken

Das größte Risiko bei Geothermieprojekten stellt die Fündigkeit dar. Darunter versteht man das eigentliche Erreichen der prognostizierten Fließraten und Temperaturen.

Die Bohrungen sind teuer und bis nach den ersten Bohrungen abschließend Klarheit über die Fündigkeit herrscht, „sind in der Regel schon 60-70 % der Investitionsmittel erforderlich.“ (Bracke 2014 : 533).

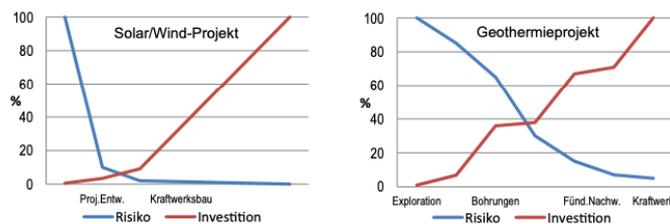


Abb. 9: Qualitative Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Investitions- /Risikoentwicklung bei Projekten (Bauer, Freeden, Jacobi, Neu 2014 : 533)

Durch die hohen Bohrkosten könnte die Lithiumgewinnung aus Geothermie teurer sein als die Gewinnung aus Bergbau (4500 US Dollar pro Tonne) oder Salzseen (2500 –

3000 US-Dollar pro Tonne), wenn die Lithiumquelle frühzeitig versiegt (vgl. Schmidt 2017 : 48). Bei bereits vorhandenen Geothermiekraftwerken, die nicht durch eine teure Bohrung neu erschlossen werden müssen, kommen lediglich die Kosten für die kombinierte Lithiumextraktion hinzu.

Auch bei einer nachgewiesenen Fündigkeit besteht laut Bracke ein gewisses Restrisiko in Bezug auf das Verhalten der Geothermiequelle über die Zeit. Das bestätigen auch Dobson et al.. Sie haben in einem Modell berechnet, dass die Lithiumgewinnung bei einer Förderung von 95 Prozent das Lithium im Salton Sea ab 2024 über einen Zeitraum von 30 Jahren um mehr als die Hälfte zurückgeht (Dobson et al. 2023 : i). Sie gehen auch davon aus, dass eine Kombination der Nutzung geothermischer Energie und Lithiumextraktion die Förderraten von Lithium stabiler halten könnte. In einem zweiten Modellversuch berechneten Dobson et al., dass das Lithium im Thermalwasser sich zwar regeneriert. Die Berechnungen ergaben aber auch, dass dies nicht schnell genug passiert und sich somit negativ auf den dauerhaften Erhalt der Quelle auswirken könnte (vgl. Dobson et al. 2023 : ii). Sie weisen darauf hin, dass weitere Untersuchungen zur Verifizierung der Aussage notwendig sind.

Förderung weiterer Rohstoffe:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Förderung weiterer Rohstoffe
Chancen
Rentable, kombinierte Förderung weiterer Rohstoffe

Chancen

Vera et al. weisen darauf hin, dass eine kombinierte Förderung von Lithium und anderen Rohstoffen aus dem Thermalwasser rentabel sein kann und auch im Sinne der Kreislaufwirtschaft durchaus sinnvoll ist. Denn die Thermalwässer enthalten auch Borate, Magnesium-, Kalium-, und Natriumsalze. Die gleichzeitige Gewinnung könnte zudem Abfälle reduzieren, da die Abfälle nur einmal anfallen würden (vgl. Vera et al. 2023 : 150).

Energy Return on Energy Invested – Theorie / Ausnutzung monetärer Anreize:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Energy Return on Energy Invested-Theorie / Ausnutzung monetärer Anreize
Risiken
Geothermieanlage könnte trotz negativer Energiebilanz rentabel sein durch EEG-Förderung

Risiken

Die Förderung von Thermalwasser erfordert konstante elektrische Energie. Rein theoretisch wäre es laut Kunze und Pfeiffer möglich, eine Geothermieanlage trotz einer negativen Energiebilanz wirtschaftlich zu betreiben. Das wäre der Fall, wenn das Verhältnis der elektrischen Energie, die zum Betrieb des Kraftwerks notwendig ist, die gewonnene Energiemenge übersteigen würde. Dann spräche man von einem negativen Energy Return on Energy Invested (ERoEI). Die Geothermieanlage könnte laut Kunze und Pfeiffer trotz negativem ERoEI gewinnbringend sein, weil Großkunden – dazu gehören auch Kraftwerksbetreiber – Strom zu einem niedrigeren Preis als dem ihres durch Geothermie erzeugten Stroms einkaufen können.

Kunze und Pfeiffer erwähnen im gleichen Zusammenhang ein weiteres Risiko. Die Betreiber könnten sich an den Klimazielen vorbeischieben.

„Hiernach könnte eine Geothermieanlage zwar gewinnbringend [sein, Anm. d. Verf.], aufgrund der Nutzung von Grundlaststrom, der nicht zwingend grün sein muss, aber trotzdem nicht klimaneutral sein.“, (Kunze, Pfeiffer 2018 : 673).

Preisvolatilität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Preisvolatilität	
Chancen	Risiken
Lokale Produktion könnte Preis- und Versorgungstabilität bringen	Niedriger Li-Preis könnte Rentabilität der deutschen Li-Industrie gefährden

Chancen

Die Preise auf dem Lithiummarkt sind volatil und eine lokale Produktion könnte mehr Preis- und Versorgungstabilität bringen. 2020 lagen die Preise aufgrund der gesteigerten Nachfrage für Batterien von Elektrofahrzeugen bei bis zu 87.000 US Dollar pro Tonne (vgl. Goldberg et al. 2023 : 3).

Risiken

Im April 2024 lagen die Preise bei knapp über 15.000 US-Dollar pro Tonne (Daily Metal Prices). Ein niedriger Preis könnte die Rentabilität der lokalen Industrie aufgrund der hohen Investitionen in Frage stellen.

Würde Deutschland sich aufgrund der Preisvolatilität ausschließlich auf externe Lieferketten konzentrieren, wäre zwar die Rentabilitätsfrage geklärt, aber die deutsche Wirtschaft könnte im Falle eines globalen Lieferkettenengpasses schlimmstenfalls

stillstehen. Eine geringere Rentabilität muss politisch gegen eine höhere Resilienz der Lieferketten abgewogen werden.

BIP anderer Länder:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension - BIP anderer Länder	
Risiken	
Mögliche negative Auswirkungen auf bisherige Li-Märkte bei Abwanderung der Li-Industrie	

Risiken

Ein Punkt, der in der Literatur nicht auftaucht, sind die Auswirkungen für die heutigen Produktionsländer bei einer Verlagerung der Produktion vom Ausland ins Inland. Zwar würde Deutschland seine externen Kosten der Lithiumproduktion in anderen Ländern reduzieren und den CO₂-Abdruck dadurch voraussichtlich deutlich senken. Eine lokale Lithiumproduktion ginge aber möglicherweise auch mit einem wirtschaftlichen Verlust in den Exportländern einher, da Einnahmen aus Deutschland wegfallen würden. Wie hoch diese Kosten, beispielsweise durch den Wegfall von Arbeitsplätzen, wären, kann derzeit nicht evaluiert werden, da keine Studien bekannt sind.

Seismizität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: ökonomische Dimension – Seismizität	
Chancen	Risiken
Seit geothermischer Energie Erzeugung (1982) Rückgang von Seismizität in der Salton Sea Region (Zusammenhang nicht geklärt)	Geothermie ist Risikotechnologie: ökonomischer Verlust bei Projekteinstellung aufgrund v. Seismizität v.a. petrothermale Geothermie verursacht induzierte Erdbeben

Chancen

Erdbeben können zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen. Die Seismizität nahm in der Salton Sea Region laut Dobson et al. zu Beginn der geothermischen Stromerzeugung im Jahre 1982 zwar zu. Im Zeitraum von 1982 – 2022 ist die seismische Gefährdung im Vergleich zur Zeit davor aber eher zurückgegangen (vgl. Dobson et al. 2023 : 159). Ob ein Zusammenhang zwischen dem Rückgang von Seismizität und der regelmäßigen Nutzung von Geothermie besteht, ist nicht geklärt. Insgesamt sei die Seismizität vor Ort nicht höher als in der umliegenden Erdbebenzone, die den San-Andreas-Graben mit einschließt.

Risiken

Wenn durch die Lithiumextraktion künftig mehr Geothermieranlagen entstehen, könnte das Risiko für seismische Ereignisse steigen. In der Vergangenheit haben seismische Ereignisse zur Beendigung von Geothermieprojekten, beispielsweise in Basel, oder zum Stillstand von Anlagen, zum Beispiel in Landau, geführt (vgl. Deutscher Naturschutzring 2016 : 7).

„In der Schweiz kommen zwei größere Erdbeben (Basel 2006 und St. Gallen 2013) auf neun laufende Tiefengeothermieranlagen; in Deutschland sind es drei Erdbeben (Unterhaching und Landau 2009, Insheim 2013) und 28 laufende Anlagen.“, (Kunze, Pfeiffer 2018 : 671).

Kunze und Pfeiffer bezeichnen die Geothermie aus diesem Grund als Risikotechnologie, denn nach einer Projekteinstellung sind die hohen Investitionskosten (vgl. Rentabilität) nicht zurückzubekommen.

Durch Geothermie induzierte Seismizität hat vor allem ökonomische und soziale Auswirkungen. Unter induzierter Seismizität versteht man Erdbeben, die durch menschliche Einflüsse ausgelöst werden.

Bei der Abwägung des Erdbebenrisikos muss zwischen den Fördermethoden Petrothermalen Geothermie (EGS) und Hydrothermalen Geothermie (vgl. Kap. 4.2) differenziert werden. Das Projekt in Basel war ein Hot-Dry-Rock- bzw. EGS-Projekt. Die in Landau geplanten Projekte sind hydrothermale Geothermieprojekte. Beim Versuch, nach der Bohrung wasserdurchlässige Risse im Gestein zu bilden, gab es in Basel ein Beben mit der Stärke 3,4. Das Projekt wurde eingestellt. Die auf rund 40 Millionen Schweizer Franken geschätzten Sachschäden stellten zudem ein Rentabilitätsrisiko dar (vgl. Baisch et al. 2009 : 5). Man kam zu dem Ergebnis, dass die Region Basel für Geothermieprojekte nicht geeignet ist.

5.5 Soziale Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Seismizität:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension - Seismizität	
Chancen	Risiken
Von der Nicht-Einbeziehung der Bevölkerung zu partizipativen Mediationsverfahren	Ablehnung v. Geothermieprojekten bei schlechten Erfahrungen durch Seismizität, intransparenten Prozessen, schlechter Kommunikation

Risiken

Auf die Bevölkerung und die soziale Nachhaltigkeit wirken sich wirtschaftliche Projekte wie der Bau eines Geothermiekraftwerkes vor allem dann negativ aus, wenn die Bevölkerung nicht von Anfang an in ein Projekt eingebunden ist (vgl. Kap. 5.3) und dann, beispielsweise durch Erdbeben, Schaden nimmt.

Bürger und Bürgerinitiativen in Landau und Umgebung sind besorgt, dass die Lithiumförderung aus Geothermiequellen Erdbeben auslöst. Aufgrund eines gescheiterten Geothermieprojekts in Landau, das Anfang der 2000er Jahre startete, sind die Bewohner vor Ort dem Thema gegenüber besonders sensibilisiert. Damals ging das bergrechtliche Verfahren schnell und unter Ausschluss der Öffentlichkeit vonstatten. Weder eine Umweltverträglichkeitsprüfung noch seismische Untersuchungen fanden statt. Nur wenn von Beginn an – Handlungsschritt für Handlungsschritt – Transparenz für die Bevölkerung vorherrscht, entstehen Akzeptanz und Glaubwürdigkeit (vgl. Stober, Bucher 2020 : 246 & 247).

Als es 2009 in Landau zu mehreren Erdbeben kam, wobei das größte eine Stärke von 2,7 hatte (vgl. Deutscher Naturschutzring 2016 : 7), wuchs der Unmut in der Bevölkerung. Eine Expertenkommission bestätigte einen direkten Zusammenhang zwischen Geothermie und den Erdbeben. Obwohl das Kraftwerk anschließend noch eine Weile weiter lief, gab es seitdem immer wieder Produktionsstillstände (vgl. Deutscher Naturschutzring 2016 : 7). Laut dem Deutschen Naturschutzring waren die Ereignisse in Landau der Auslöser zur Gründung verschiedener Bürgerinitiativen gegen Geothermie.

Auch bei der Bevölkerung der Salton Sea Region ist das Thema Seismizität präsent. Anwohner gaben bei öffentlichen Treffen an, dass sie sich nicht ausreichend über die potenziellen Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit, das Wasser, die Luft und den Boden, einschließlich möglicher Erdbeben, informiert fühlten (Paz et al. 2022 : 40).

Chancen

Die Landesregierung Rheinland-Pfalz hat aus den lokalen Erfahrungen mit Seismizität Anfang der 2000er Jahre gelernt und das Mediationsverfahren Tiefe Geothermie Vorderpfalz ins Leben gerufen. Die Beteiligung der Bevölkerung und der Zivilgesellschaft ist ein wichtiger Schritt hin zu Transparenz und Akzeptanz. Dabei sollte laut Kersting und Roth ein ergebnisoffener Austausch im Mittelpunkt stehen. So könnten *„schnellere, bessere und breit akzeptierte Ergebnisse, Proteste und langwierige Gerichtsverfahren*

[...] eingeschränkt werden.“, (Kersting, Roth 2018 :1157). Kersting und Roth fordern eine „Bürgerdemokratie“ mit aufwertenden Partizipationsprozessen, die die repräsentative Demokratie nicht abschwächen, sondern stärken soll.

Partizipation:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension – Partizipation	
Chancen	Risiken
Partizipation kann Akzeptanz fördern: Mediationsverfahren Vorderpfalz und Blue Ribbon Commission erzielten weitestgehend Akzeptanz	Partizipationsverfahren kann scheitern Bürgerinitiativen weiterhin skeptisch

Begriffsklärung Partizipation:

Partizipation ist kein starr festgelegter Begriff. Sarah White unterscheidet vier Formen der Partizipation: nominale, instrumentelle, repräsentative und transformative. Bei der **nominalen Partizipation** können Bürger zum Beispiel an Veranstaltungen zu Entscheidungsprozessen teilnehmen. Ihre Standpunkte werden aber nicht wirklich berücksichtigt. Die **instrumentelle Partizipation** sieht die Einbeziehung von Bürgern vor, allerdings mit der Absicht, von den Entscheidungsträgern vorgesteckte Ziele zu erreichen. **Repräsentative Partizipation** sieht vor, dass Vertreter von verschiedenen Interessengruppen an Entscheidungsprozessen teilhaben und eine Stimme bekommen. Bei der **transformativen Partizipation** arbeiten Stakeholder und Entscheidungsträger Hand in Hand. Auf diese Weise kann ein echter gemeinsamer Entscheidungsprozess entstehen (vgl. White 1996 :8). Bei den ersten beiden Formen handelt es sich um klassische Top-Down-Ansätze. Die repräsentative Partizipation kann sowohl Top-Down- als auch Bottom-Up-Elemente aufweisen. Und die Transformative Partizipation entspricht dem Bottom-Up-Ansatz, da die Stakeholder echten Einfluss nehmen können. White betont, dass ihr Rahmenwerk dynamisch ist.

Chancen

Sowohl im Oberrheingraben bzw. in Rheinland-Pfalz als auch in der kalifornischen Salton Sea Region erhielt die Bevölkerung die Möglichkeit, an Partizipationsverfahren teilzunehmen. Im Rahmen der Partizipationsverfahren wurden die Bedenken der Anwohner berücksichtigt und gemeinsame Empfehlungen für die lokale Lithiumindustrie erarbeitet. Dazu gehörten unter anderem Schutzmechanismen bei Schadensfällen und die Überwachung ihrer regelkonformen Durchführung.

Partizipation im Rahmen des „Mediationsverfahrens Tiefe Geothermie Vorderpfalz“

In der Vorderpfalz initiierte die Landesregierung Rheinland-Pfalz 2011 das Mediationsverfahren Tiefe Geothermie Vorderpfalz (vgl. Landesregierung Rheinland-Pfalz). Das Mediationsverfahren hatte das Ziel eines ergebnisoffenen Austauschs über Geothermie-Projekt in der Umgebung, darunter auch das Geothermie-Werk in Landau, das 2009 das Erdbeben mit der Stärke 2,7 auslöste. Zwischen 2011 und 2012 fanden acht Sitzungen statt, an denen Akteure von Geothermie-Unternehmen und Bürgerinitiativen zusammen an einen Tisch kamen. Zur Diskussion kamen alle Themen, die die Anwohner beschäftigten: Beteiligung, Wasserverschmutzung, Seismizität, Bauschäden, Störfälle, Gefahrstoffe, Lärm und Emissionen. 2013 wurde das Mediationsverfahren in das Geothermie-Forum Vorderpfalz überführt.

Der Ergebnisbericht des Mediationsverfahrens enthält die Ergebnisse in Bezug auf die aufgeführten Themen und darüber hinaus und bildet die Basis für deren Umsetzung durch das Geothermie-Forum. Er gibt klare Empfehlungen, unter anderem im Hinblick auf seismisches Monitoring, Haftung und Versicherbarkeit, Bürgerbeteiligung und Schadstoffe. Bürgervertrauensleute sollen in die *„Genehmigungsverfahren und die Überwachung des laufenden Betriebs“* (Landesregierung Rheinland-Pfalz 2013 :10) miteinbezogen werden. Das Forum sollte die offengebliebenen Fragen des Mediationsverfahrens weiter behandeln und den Dialog zur Tiefen Geothermie aufrechterhalten.

„Die Bürgerinnen und Bürger sollen mitreden können. Vertrauensleute werden in Genehmigung und Überwachung der Anlagen einbezogen. Sie werden vom Ortsgemeinderat gewählt. Gibt es eine Bürgerinitiative, sollen deren Vorschläge berücksichtigt werden. Zur Herstellung von „Waffengleichheit“ unterstützen die Behörden die Bürgervertrauensleute bei ihrer Arbeit.“ (Ewen 2014 : 7).

Sowohl die Protokolle der Treffen des Mediationsverfahrens als auch die des Geothermie-Forums und eine Broschüre sind auf der Homepage der Landesregierung Rheinland-Pfalz einsehbar (vgl. Landesregierung Rheinland-Pfalz).

Im Laufe der Forumssitzungen wurde eine Anpassung des Artikels zur Beweislastumkehr und Bergschadensvermutung vorgeschlagen, wonach Unternehmen für Schäden haften müssen, die durch Geothermie ausgelöst wurden (vgl. Mediation Geothermie-Forum 2014 : 2). Das letzte Protokoll als Beleg zur Fortführung des Geothermie-Forums auf der Homepage ist vom Mai 2016. Danach hat die Landesregierung Rheinland-Pfalz die aktive Teilnahme am Geothermie- Forum beendet, weil, ab diesem Zeitpunkt nur noch organisatorische statt fachlicher Fragen zu klären waren. Für fachliche Fragen stehen seitens der Landesregierung weiterhin ein

Geothermie-Lotse und die für Geothermie-Themen zuständigen Referenten betreud zur Verfügung. Dies wird aus einer auf der Homepage des Landtags zugänglichen Antwort auf eine Kleine Anfrage ersichtlich (vgl. Landtag Rheinland-Pfalz 2016 : 3). Beitrittserklärungen verschiedener Energieversorger aus den Jahren 2017, 2022 und 2023, darunter eine Beitrittserklärung von Vulcan Energy weisen darauf hin, dass die Ergebnisse des Mediationsverfahrens und das Dialog-Vorhaben weiterhin gelten. Hier ein Auszug aus dem unterschriebenen Dokument von Vulcan Energy:

„Die Dokumente tragen dem Umstand Rechnung, dass noch nicht alle Fragen im Konsens beantwortet werden konnten und eine Fortschreibung des erreichten Standes [des Ergebnisberichts, Anm. d. Verf.] im zusammenwirken der Beteiligten erreicht werden soll.“ (Landesregierung Rheinland-Pfalz 2022)

Partizipation im Rahmen der kalifornischen Blue Ribbon Commission

Im Rahmen der Erstellung des Berichts der Blue Ribbon Commission fanden über 23 öffentliche Sitzungen statt, die Protokolle sind auf der Seite der California Energy Commission (CEC) öffentlich zugänglich (vgl. Kap. 5.2 und 7.3). Ein Großteil der Bewohner der Region spricht Englisch nicht als Muttersprache, 85 Prozent der Anwohner sind Hispanics oder Latinos (vgl. Slattery et al. 2023 : 2). Zur Überwindung von Sprachbarrieren wurden Kommunikationsmedien übersetzt, bei Veranstaltungen gab es Dolmetscher. Eine weitere wichtige Gruppe sind die lokal ansässigen indigenen Stämme. Sie leben seit über 3000 Jahren.

In der Salton Sea Region bekamen lokale Stakeholder im Rahmen der Mitgliedschaft der 14-köpfigen Blue Ribbon Commission eine Stimme, darunter zwei Vertreter Indigener Stämme, eine lokale Umweltorganisation und ein Vertreter der benachteiligten und einkommensschwachen Bevölkerung (Paz et al. 2022). Die abschließenden Ergebnisse und Empfehlungen der Kommission lassen ebenso wie die Ergebnisse des Mediationsverfahrens Tiefe Geothermie Vorderpfalz auf ein transformatives Partizipationsverfahren schließen.

Ergebnisse der Partizipationsverfahren

Die Landauer Stadtverwaltung führte im Rahmen der Genehmigung für Vulcan Energy eine eigenständige Bürgerbeteiligung vor. Sie weist nicht nur auf die Vorteile der Geothermie und der Lithiumextraktion vor Ort hin, sie macht auch auf die Risiken und Probleme der Vergangenheit aufmerksam mit Bezug auf die „*Bodenhebungen, spürbaren seismischen Ereignisse[n] und ... Grundwasserschäden*“ durch Geothermie in der Vergangenheit (Stadt Landau in der Pfalz 2023).

Die Stadtverwaltung forderte in einer Sitzung im Juni 2023, die auch über den stadteigenen YouTube-Kanal übertragen wurde, laut Sitzungsvorlage von den Unternehmen Vulcan Energy und IKAV Group die Erfüllung der folgenden vier Punkte vor dem endgültigen Grundstücksverkauf (vgl. Stadt Landau in der Pfalz 2023):

1. Wärmeversorgung zu günstigeren Preisen als von fossilen Energieträgern.
2. Preisorientierung am allgemeinen Preisindex, nicht an dem fossiler Brennstoffe.
3. Garantie zur technischen Sicherheit potenzieller neuer Bohrungen.
4. Abschluss von Versicherungen mit Beweislastumkehr bei potentiellen Schäden durch Geothermie.

In der Salton Sea Region sind die Gemeinden laut Dobson et al. engagiert, wenn sich Möglichkeiten bieten. Dobson et al. schlagen folgende Punkte zur weiteren Stärkung der Partizipation in der Salton Sea Region vor (Dobson et al. 2023 : 179):

- Einrichtung eines Gemeindebeirats zur Erhaltung des Dialogs.
- Einstellung lokaler Projektpraktikanten und Teammitglieder.
- Formelle Partnerschaften zwischen Gemeindeorganisationen und Forschungsteams mit geteilter Entscheidungsbefugnis und klar definierten Rollen und Zuständigkeiten.

Zwar beruhen die Punkte zur Absicherung vor dem Grundstücksverkauf in Landau durch Vulcan Energy nach Angaben der Landauer Stadtverwaltung nicht auf dem Mediationsverfahren Geothermie (vgl. Anlage x). Dennoch zeigen sowohl das Mediationsverfahren Tiefe Geothermie Vorderpfalz als auch das Partizipationsverfahren in Kalifornien, dass bei erfolgreicher Umsetzung der gemeinsam erarbeiteten Punkte Potenzial zu einem transformativen Partizipationsprozess nach White gegeben ist. Sollten die Dialoge nicht weiter fortgesetzt werden, würde es sich mindestens um repräsentative Partizipation handeln.

Risiken

Partizipationsverfahren können scheitern, zum Beispiel an mangelnder Transparenz und Kommunikation, weil sie abgebrochen werden oder weil sie nur eine Alibifunktion haben bzw. es sich um Top-Down-Verfahren handelt und / oder die Anwohner sich nicht ernst genommen fühlen. Die Bürgerinitiativen im Oberrheingraben sind weiterhin kritisch gegenüber dem Thema Geothermie und sehen auch die geothermische Lithiumextraktion kritisch (Bürgerinitiative Geothermie Landau e.V.). Das gleiche gilt für manche Gruppen in der Salton Sea Region (vgl. Earthworks 2023).

Bergrecht / Haftung:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension – Bergrecht / Haftung
Risiken
Bergrecht sieht Partizipation nicht grundsätzlich vor Haftungsregeln (Beweislast) sind kompliziert

Risiken

Geothermie und Lithium gelten in Deutschland laut Bundesberggesetz (BergG) bzw. Bergrecht als Bergfreie Bodenschätze. Das Berechtigungsverfahren für Bergfreie Bodenschätze funktioniert nach dem "Windhundprinzip", bei dem Unternehmen bereits mit der Antragstellung einen Anspruch auf Bergbaurechte haben. Ein Ermessen der Behörde oder eine Öffentlichkeitsbeteiligung ist nicht zwingend vorgesehen (vgl. Umweltbundesamt 2022).

Die Rechtslage zur Haftung bei bergbaubedingten Schäden ist kompliziert. Zwar gilt laut Bundesbergrecht offiziell die Bergschadensvermutung, wonach die Haftung beim Bergbaubetrieb liegt. Dennoch liegt die Beweislast oft bei den Geschädigten, die beweisen müssen, dass die Schäden durch Geothermie entstanden sind und auf Schadenersatz klagen müssen (vgl. Kunze, Pfeiffer 2018 : 672 / Umweltbundesamt 2022). Aus diesem Grund sind die Themen Versicherbarkeit und Haftung auch im Mediationsverfahren Tiefe Geothermie Vorderpfalz präsent.

Verschmutzung von Trinkwasser, Luft und Boden:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension – Verschmutzung von Trinkwasser, Luft und Boden
Risiken
Ängste um Gesundheits- und Umweltgefährdung durch Bohrflüssigkeiten und Gase Studien über potentielle Gesundheits- und Umweltgefährdung liegen noch nicht vor, Monitoring empfohlen

Risiken

Neben Erdbeben beunruhigt in Landau eine Verunreinigung des Grund- und Trinkwassers im Falle von Produktionsunfällen die Bevölkerung (vgl. Bürgerinitiative Geothermie Landau e.V.). Eine damit verbundene Freisetzung von Bohrflüssigkeiten oder Gasen, darunter Schwermetalle, Schwefelverbindungen oder Radioaktivität (vgl. Kunze, Pfeiffer 2018 : 670) könnte sowohl der Gesundheit als auch der Umwelt schaden. Dies könnte zudem, genau wie Seismizität, den Wert von privaten Eigenheimen reduzieren und den Privathaushalten wirtschaftlich schaden (vgl. Kap. 5.3 und 5.4).

Auch in der Salton Sea Region sorgten sich die Bewohner laut dem Bericht der Blue Ribbon Commission um sogenannte Worst-Case-Szenarien im Zusammenhang mit Unfällen (vgl. Dobson et al. 2023 : 7).

Es liegen keine Informationen über potenzielle gesundheitliche Auswirkungen von DLE in der Region vor, da die Quantifizierung von Umweltauswirkungen und deren gesundheitlichen Folgen noch aussteht. Slattery et al. empfehlen eine regelmäßige Überwachung in der Nähe von neuen Anlagen bereits vor Baubeginn, um sicherzustellen, dass DLE keine zusätzliche Belastung darstellt und um zu verhindern, dass Luftqualitätsprobleme aus anderen Quellen wie dem toxischem Staub, der durch die Austrocknung des Sees entsteht, und Verkehr dem Lithiumabbau zugeschrieben werden (vgl. Slattery et al 2023 : 6).

Dobson et al. kommen mit Blick auf den Bericht der Blue Ribbon Commission zu dem Schluss, dass die Lithiumextraktion im Salton Sea bei ordnungsgemäßer Durchführung keine nennenswerten negativen Umweltauswirkungen haben dürfte. Dabei beziehen sie sich auf Wasser- und Luftqualität, Chemikaliennutzung, Abfälle und das Erdbebenrisiko (Dobson et al. 2023 : ii). Zur Sicherstellung der ordnungsgemäßen Durchführung seien gute Monitoring- und Überprüfungssysteme sowie angemessene Mitigationstechnologien und weitere Forschung zur Minimierung von Abfall notwendig.

Eine soziale Lebenszyklusanalyse (S-LCA) könnte laut Slattery et al. die Auswirkungen der Extraktionsmethode auf die verschiedenen Interessengruppen und Wirkungskategorien bewerten. Die Analyse könnte die Produktion von geothermischer Energie und Lithium einschließlich der verschiedenen Wirkungskategorien und Prioritäten der Interessengruppen wie Gesundheit, Arbeitsplätze, Seismizität etc. analysieren. Dies könnte zu mehr Verantwortlichkeit in der globalen Lithium-Lieferkette führen und Unternehmen dazu bewegen, Verhaltensweisen anzunehmen, die zwar höhere Kosten verursachen, aber mehr Nutzen für die umliegende Gemeinschaft bringen, z. B. die Zahlung eines existenzsichernden Lohns (vgl. Slattery et al. 2023 : 7).

Infrastruktur:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension – Infrastruktur
Risiken
Verbesserung lokaler Verkehrs- und Telekommunikationsinfrastruktur in der Salton Sea Region erwartet

Chancen

Das Lithium Valley Consortium identifizierte sowohl für die Gemeinde als auch für die Industrie Vorteile für die regionale Mobilität (vgl. Slattery et al. 2023 : 7). Dobson et al. rechnen sowohl mit einer Verbesserung der Verkehrs- als auch Telekommunikationsinfrastruktur (Dobson et al. 2023 : 8). In Landau kam das Thema Infrastruktur nicht zur Sprache.

Arbeitsplätze:

Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung: soziale Dimension – Arbeitsplätze
Chancen
Entstehung von Arbeitsplätzen für lokale Kräfte in der Salton Sea Region, Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, Monitoring zur Einhaltung empfohlen

Chancen

Sowohl die Anwohner als auch die Lithium Valley Commission sahen bei der Entstehung von Arbeitsplätzen eine Priorität. Dazu gehören neue Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, insbesondere zur Qualifikation lokaler Arbeitskräfte (vgl. Slattery et al. 2023 : 6). Wie bei den Themen Wasserverbrauch, Emissionen und Abfälle empfehlen Slattery et al. eine regelmäßige Überwachung, um sicherzustellen, dass die gemachten Versprechen den Gemeinden zugutekommen.

6. Empirische Untersuchung: Experteninterviews zur Evaluierung nachhaltigkeitsbezogener Chancen und Risiken der Lithiumgewinnung durch heimische Geothermie

6.1 Auswahl und Beschreibung der Methode Experteninterview

Lithiumextraktion aus Geothermiequellen ist, wie in den vorangehenden Kapiteln erläutert, eine neue Fördermethode. Aus diesem Grund liegt zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch wenig wissenschaftliche Literatur vor. Deshalb wurden zur weiteren Untersuchung der Forschungsfrage Experteninterviews im Kontext der in Kapitel 4 und 5 erläuterten Erkenntnisse und Theorien durchgeführt. Die Ergebnisse werden anhand eines vorab erstellten deduktiven Kategoriensystems nach Mayring ausgewertet.

„Eine deduktive Kategoriendefinition bestimmt das Auswertungsinstrument durch theoretische Überlegungen. Aus Voruntersuchungen, aus dem bisherigen

Forschungsstand, aus neu entwickelten Theorien oder Theoriekonzepten werden die Kategorien in einem Operationalisierungsprozess auf das Material hin entwickelt.“ (Mayring 2022 : 84)

6.2 Erläuterung der Expertenauswahl

Aktuell gibt es nur wenige Firmen, die die Technologie testen oder wie Vulcan Energy und Controlled Thermal Resources Firmen in die Projektumsetzung gestartet sind. Aus diesem Grund ist auch die Expertenauswahl (vgl. Abb. 10) zu diesem Thema limitiert. Ein Teil der Experten, die im Rahmen dieser Arbeit interviewt wurden, haben deshalb auch an den zitierten Veröffentlichungen mitgewirkt. Dies führt aber keineswegs zu Redundanzen, da durch die Interviews neue Aspekte beleuchtet werden konnten.

6.3 Leitfaden (modular je nach Relevanz für Stakeholder) und Durchführung

Halbstrukturierte Form:

Für die Interviews fiel die Wahl auf die halbstrukturierte Interviewform mit einem im Voraus angefertigten Leitfaden zur Strukturierung der Interviews. Halbstrukturiert bedeutet in diesem Fall, dass die konkrete Formulierung und Reihenfolge modular variierten. Die Fragenformulierung war offen, damit die Interviewpartner frei zu ihren Erkenntnissen und Erfahrungen antworten konnten (vgl. Mayring 2022, S. 55). Die Interviews fanden im Rahmen von Videocalls (Teams, Google und WebEx) statt und wurden mit der App Dictate aufgenommen und anschließend mit Hilfe der Transkriptionssoftware Sonix transkribiert. Bei qualitativen Interviews müssen nicht immer alle Fragen identisch sein, es geht vor allem darum, die Interviewpartner zum Reden zu motivieren. Die Formulierungen der Fragen variierten je nach Interviewpartner und Situation (vgl. Bogner, Littig, Menz 2014 : 28).

Leitfadenkonstruktion:

Der Leitfaden besteht aus vier Themenblöcken. Der erste Block enthält die Einstiegsfragen und Fragen zur allgemeinen Nachhaltigkeit, der zweite Block beinhaltet Fragen zur ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit, der dritte behandelt die ökonomische Nachhaltigkeitsdimension und der vierte und letzte Block beschäftigt sich mit der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit. Jeder Themenblock hat zwei Hauptfragen „die als zentrale Gesprächsanreize zum jeweiligen Themenabschnitt dienen. Ergänzend kommen verschiedene abhängige Fragen hinzu, die der jeweiligen

Detallierung dienen“; (Bogner, Littig Menz 2014 : 28). Während die Hauptfragen jedem Interviewpartner gestellt wurden, kamen die ergänzenden Fragen nur „zur Anwendung, wenn sie durch die Hauptfragen nicht bereits erschöpfend beantwortet“ waren (ebd. : 29). Zudem gab es auch spontane Nachfragen, die nicht auf dem Leitfaden standen, die sich aber aus dem Gespräch ergaben.

Vor dem Interview wurden die Experten um Erlaubnis zur Aufzeichnung gebeten. Schriftliche Einverständniserklärungen zur Teilnahme der Interviews und der Verwendung der Inhalte liegen vor. Statt der Angabe der vollen Namen erhielten die Experteninterviews bzw. die Experten eine Fall-/Expertennummer. Bei Angaben im Transkript, die trotz Anonymisierung direkt auf die Personen schließen lassen, wurden Textstellen entsprechend anonymisiert. Ein Anonymisierungsprotokoll für jedes Interview und ein Dokument zur Entschlüsselung der Anonymisierungen liegen vor. Beide Dokumente können für eine potenzielle Nachverfolgung herangezogen werden.

Es kam mehrfach die Bitte um eine erneute Autorisierung seitens der Experten auf, sollte die Arbeit nach der Bewertung veröffentlicht werden.

6.4 Auswertungsmethode – Qualitative Inhaltsanalyse

Das Experteninterview fällt unter die qualitativen Methoden der Analyse, da keine „Zahlbegriffe und deren In-Beziehung-Setzen durch mathematische Operationen bei der Erhebung oder Auswertung verwendet werden“ (Mayring 2022 : 17 - 18).

Mayring erklärt den Unterschied zwischen der quantitativen und der qualitativen Analyse damit, dass die quantitative Analyse eine erklärende Analyse im Sinne der Naturwissenschaften sei. Die qualitative Analyse hingegen folge einem verstehenden Ansatz, der Zusammenhänge, Gegenstände oder Prozesse nicht nur analysieren möchte, sondern sie auch verstehen bzw. nacherleben oder sie „nacherlebend sich vor[zu]stellen“ können möchte (Mayring 2022 : 19).

Die qualitative Inhaltsanalyse eignet sich für verschiedene Forschungsbereiche wie Hypothesenfindung und Theorienbildung bzw. -prüfung, Pilotstudien, Vertiefungen, Einzelfallstudien und Prozessanalysen. Im Rahmen dieser Arbeit findet die qualitative Inhaltsanalyse unter dem Aspekt der Theorie- und Hypothesenprüfung statt. Denn meist liegt beim Verfahren der Lithiumextraktion aus Geothermie das Augenmerk vor allem auf dem Vorteil der Grundlastfähigkeit sowie der günstigen CO₂ Bilanz. Im Falle der

Lithiumextraktion wird die Unabhängigkeit von globalen und stark CO₂ emittierenden Lieferketten betont. Dies lässt die Bildung der Theorie bzw. Hypothese zu, dass die Extraktionsmethode vor allem wirtschaftlich und ökologisch nachhaltig ist, was im Rahmen der Arbeit durch die qualitative Analyse untersucht wird.

Gütekriterien der Inhaltsanalyse:

Bei der Bewertung einer Inhaltsanalyse spielen die Reliabilität (Zuverlässigkeit) und die Validität (Gültigkeit) eine entscheidende Rolle. Mayring gibt jedoch zu bedenken, dass es bislang kaum Angaben zu erzielten Ergebnissen von qualitativen Inhaltsanalysen gibt (vgl. Mayring 2022 : 118). Das kann laut Mayring auch daran liegen, dass Inhaltsanalytiker die klassischen Überprüfungskriterien oft kritisch sehen. Eine übliche und akzeptierte Vorgehensweise sei aber die sogenannte „Intercoderreliabilität“, bei der mehrere Personen die gesamte Analyse oder Ausschnitte gesondert durchführen und die Ergebnisse dann vergleichen. Es besteht auch die Möglichkeit der "Intracoderreliabilität", wobei derselbe Coder die Texte ganz oder teilweise ein zweites Mal analysiert. Für beide Reliabilitätsverfahren gibt es Kritik. Mayring hält sie für unangemessen und bezieht sich dabei auf Projekte, bei denen eine große Bandbreite an Kodierern mit unterschiedlichen Perspektiven zum Einsatz kommen, die die Kodierungen miteinander diskutieren (vgl. Mayring 2022 : 119 & 120).

Inzwischen diskutiert die Forschung laut Mayring weitere Gütekriterien für die qualitative Forschung, unter anderem zum Beispiel die Verfahrensdokumentation und die kommunikative Validierung. Da es aber bei der qualitativen Inhaltsanalyse nicht nur um die Anwendung der Kategorien geht, sondern auch um deren Bildung sind eigene inhaltsanalytische Gütekriterien entstanden. Mayring nennt hier unter anderem (vgl. Mayring 2022 : 120 – 124) die semantische Gültigkeit (Angemessenheit der Kategoriendefinition mit Definition, Ankerbeispielen und Kodierregeln), die Stichprobengültigkeit und die korrelative Gültigkeit beispielsweise durch Vergleiche mit Ergebnissen aus anderen Methoden.

Zuletzt zählt Mayring noch drei Einschränkungen der qualitativen Inhaltsanalyse auf:

1. Sie muss durch Datenerhebungstechniken und Datenaufbereitung ergänzt und in einen „übergeordneten Untersuchungsplan“ integriert werden.
2. Die systematische und regelgeleitete Analyse muss auf das Material anwendbar sein, sonst muss ein anderes Verfahren gewählt werden.
3. Die Analyse darf nicht zu unflexibel oder zu starr sein.

All diese Kriterien wurden im Rahmen dieser Arbeit bestmöglich beachtet und angewandt.

6.4.1 Erläuterung Analysegrundlage Kategoriensystem: Deduktives Kategoriensystem nach Mayring

Das Herzstück des deduktiven Kategoriensystems ist der Kodierleitfaden. Er erschließt sich aus vorab gebildeten Kategorien. Zur Interpretation der Ergebnisse wurden jeweils die vollständigen Interviewtranskripte (s. Hinweise zur Interviewtranskription) genutzt.

Die Ergebnisse der Experteninterviews wurden anhand der Ordinalskala gemessen, wobei „nicht nachhaltig“ die kleinstmögliche Messeinheit / Kategorie ist und „nachhaltig“ die größtmögliche (vgl. Mayring 2022 : 18).

Im ersten Schritt wurden die jeweiligen Interviews als einzelne Auswertungs-/Analyseeinheiten definiert. Bei der Bestimmung der Analyseneinheit „*geht es darum, wann und wie oft im Material die Einschätzung [...] vorgenommen werden soll.*“ (Mayring 2022 : 99). Wenn also beispielsweise eine Antwort innerhalb des Interviews mit Experte 1 darauf hindeutet, dass die Extraktionsmethode nicht nachhaltig ist, kann der Textabschnitt entsprechend kodiert werden. Eine Definition, wie es zu diesem Rückschluss kommen kann, folgt in einem späteren Schritt.

Im zweiten Schritt wurde das Kategoriensystem festgelegt. Es leitet sich von der Forschungsfrage ab, ob Lithiumgewinnung aus Geothermiequellen ein nachhaltiges Extraktionsverfahren ist. Nachhaltigkeit ist die Maßeinheit bzw. die „*Einschätzungsdimension*“ (vgl. Mayring 2022 : 99) der vorliegenden Arbeit. Wenn die Methode sich auf Basis der Aussagen der Experten und der vorliegenden schriftlichen Quellen als nachhaltig oder nicht nachhaltig erweist, kann am Ende der Arbeit die entsprechende Antwort auf die Forschungsfrage stehen. Ein Rückschluss auf die Bewertung lässt sich über verschiedene Komponenten innerhalb einer Aussage ziehen. Es gibt eine Handlungskomponente, eine soziale Komponente und eine kognitive Komponente (vgl. Mayring 2022 . 100), die das generelle Bewusstsein des Experten über die Chancen und Risiken erfasst. Die emotionale Komponente spiegelt das subjektive Gefühl der Experten wider. Die Handlungskomponente steht für den eigenen Beitrag zur Erhöhung der Chancen oder der Verminderung der Risiken.

Das Kategoriensystem hat drei Kategorien – nachhaltig (K1), evtl. nachhaltig (K2) und nicht nachhaltig (K3) – mit jeweils drei Unterkategorien für die drei Dimensionen der

Nachhaltigkeit: ökologisch nachhaltig (K1a), ökologisch evtl. nachhaltig (K2b), ökologisch nicht nachhaltig (K3c), sozial nachhaltig (K1b), sozial evtl. nachhaltig (K2b), sozial nicht nachhaltig (K3c), ökonomisch nachhaltig (K1c), ökonomisch evtl. nachhaltig (K2c), ökonomisch nicht nachhaltig (K3c).

Kategorien nach Mayring: K1 – K3, jeweils a – c		
a – nachhaltig		
b – eventuell nachhaltig		
c – nicht nachhaltig		
K1a (ökol. n.)	K2a (ökol. evtl. n.)	K3a (ökol. n.n.)
K1b (soz. n.)	K2b (soz. evtl. n.)	K3b (soz. n.n.)
K1c (ökon. n.)	K2c (ökon. evtl. n.)	K3c (ökon. n.n.)

Abb. 11: Kategoriensystem nach Mayring (vgl. Mayring 2022 : 96)

Schritt drei und vier beinhalten die Erstellung und das Ausfüllen des Kodierleitfadens, der festlegt, wann eine Textpassage unter eine Kategorie fällt. Laut Mayring stellt der Kodierleitfaden „das Kernstück der Auswertungsarbeit“ dar und hebt sie so von reiner Textinterpretation ab. (vgl. Mayring 2022 : 96). Bei der Erstellung des Kodierleitfadens eignet sich ein Verfahren in drei Schritten (vgl. Mayring 2022 : 96):

1. Definition der Kategorien (Welche Textbestandteile fallen unter eine Kategorie?)
2. Ankerbeispiele (Welche Textstellen / Zitate stehen beispielhaft für die Kategorie?)
3. Kodierregeln (Welche Regeln helfen bei Abgrenzungsproblemen zwischen den Kategorien?)

Veranschaulichung des Verfahrens zur Kategorienbildung von nicht nachhaltig bis sehr nachhaltig (vgl. Mayring 2022, S. 101)

Herleitung der Frage (Studie, Artikel etc.)	Kategorie	Definition der Kategorie	Ankerbeispiel (Zitat) Seitenangabe s. Anhang	Kodierregeln
Goldberg, Nitsche, Kluge 2022 : 272	K1a: Ökologisch nachhaltig	Ausdruck von Gewissheit und Überzeugung, dass die Fördermethode ökologisch nachhaltig ist.	„Grundwasserspiegelabsenkung halte ich für unwahrscheinlich. ... Zumal das Wasser ja auch wieder in das Reservoir zurückgeführt werden soll.“, (Experte 1 : xviii)	Die Aussagen lassen klar auf ökologische Nachhaltigkeit schließen
Paz et al : 26	K2a: Ökologisch evtl. nachhaltig	Ausdruck, dass die Methode ökologisch nachhaltig sein kann / evtl. nachhaltig ist.	„...in terms of the environmental impacts, if the lithium is extracted more gradually, obviously it will last longer and have a more minimal impact on the water	Die Aussagen lassen auf eine mögliche ökologische Nachhaltigkeit schließen

			use and waste generation.” (Experte 3 : xli)	
Dobson et al : 81	K3a: Ökologisch nicht nachhaltig	Keine oder keine klare Aussage, dass die Methode ökologisch nachhaltig ist.	„Die Geothermie wird immer so positiv dargestellt und die CO ₂ -Bilanz ist eben nicht so positiv oder sie ist wesentlich schlechter als sie dargestellt wird“ (Experte 4 : lix)	Die Aussagen lassen auf mangelnde ökologische Nachhaltigkeit schließen

Tab. 1: Verfahren zur Kategorienbildung nach Mayring (Auszug, komplette Tabelle im Anhang).

Die erste Spalte „Herleitung der Frage“ stammt nicht aus der Literatur von Mayring. Sie dient der Erläuterung der Herkunft der Frage und wurde nach Absprache mit dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann, am 25.9.2023 hinzugefügt.

Der Kodierleitfaden wurde vorab erstellt. Nach dem ersten Interview wurde ein erster Textteil kodiert, um die Zuverlässigkeit des Kodierleitfadens zu prüfen. Es mussten keine Änderungen vorgenommen werden. Darauf folgte die Zuordnung aller Textpassagen zu den finalen Kategorien.

Der fünfte Schritt beinhaltete die Einschätzung und Zuweisung der einzelnen Aussagen anhand der festgelegten Kodierung – von nicht nachhaltig bis nachhaltig. Hierzu kam die Open Access Software QCMap zum Einsatz. QCMap ist eine von der Klagenfurter Firma „coUnity Software Development“ und dem Zentrum für Evaluation und Forschungsberatung der Universität Klagenfurt unter Philipp Mayring und Thomas Fenzl gemeinsam entwickelte Software (vgl. Mayring 2022 : 111).

Der sechste Schritt war die Fundstellenbezeichnung. Hier wurden die Stellen einer Auswertungseinheit fortlaufend nummeriert, die eine Aussage zu Auswirkungen der Lithiumextraktion aus Geothermiequellen enthalten.

Im siebten Schritt erfolgte die Überarbeitung des Kategoriensystems und der Definitionen. Der achte Schritt umfasst die Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse, gefolgt von deren Überführung in Kapitel 7. Die Ergebnisvalidierung erfolgte durch die Intracoderreliabilitätsprüfung, wobei ausgewählte Interviewpassagen einer erneuten Prüfung unter Verwendung derselben Kategorien unterzogen wurden. Für eine bessere Vergleichbarkeit von Kapitel 5 und Kapitel 7 fand ebenfalls eine qualitative Inhaltsanalyse von Kapitel 5 statt auf dieselbe Weise statt. Dies ermöglichte die

Erstellung von Vergleichsgrafiken anhand von Häufigkeiten über die Nachhaltigkeit der Extraktionsmethode (vgl. Kap. 8).

7. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Dieses Kapitel unterstützt ergänzend zu den theoriegeleiteten Ansätzen aus Kapitel 5 die Beantwortung der Forschungsfrage.

Die Präsentation der Ergebnisse der Experteninterviews orientiert sich an der Reihenfolge und Gliederung der Nachhaltigkeitsbezogenen Technikfolgenabschätzung und -bewertung (siehe Kapitel 5). Zur adäquaten Darstellung der Erkenntnisse finden Interviewaussagen als direkte Zitate Einzug in die Interpretation der Ergebnisse.

7.1 Ökologische Nachhaltigkeit – Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Wasser:

Übersicht Experteninterviews ökologische Dimension – Wasser	
Chancen	Risiken
Reinjektion könnte eine nachhaltigere Methode sein	Restrisiko von menschlichem oder Materialversagen für Grundwasserverunreinigung
Geschlossener Kreislauf	Minimale Abwasservorkommen, müssen korrekt entsorgt werden
Grundwasserabsenkung unwahrscheinlich	evtl. Grundwasserverunreinigung im ORG
24/7 water monitoring tools, in case of alarm system shuts down	hoher Frischwasserverbrauch bei DLE / A-DLE, besonders kritische für Salton Sea Region

Chancen:

Da diese Extraktionsmethode noch kein etablierter Prozess ist, fehlen Langzeiterfahrungen zur Klärung aller eventuellen Chancen und Risiken. Die Betonung liegt deshalb, wie bei den meisten der folgenden nachhaltigkeitsbezogenen Aspekte auf, „wenn es wie geplant funktioniert“. Denn

„wenn der Prozess funktioniert, ... dass Sole an die Oberfläche gepumpt wird, das Lithium selektiv extrahiert wird und die Sole dann wieder verpresst wird, was bedeuten würde, dass dem Reservoir als Systemgrenze kein Wasser entzogen wird, was man ja als großen Nachteil beispielsweise in Lateinamerika der Industrie vorwirft, das wäre eben auch ein positiver Effekt. Man könnte sagen vorn fördern, dann selektiv extrahieren und hinten wieder injizieren. Bei entsprechender Systemgrenze könnte man von einer nachhaltigeren Produktion reden.“, (Experte 1 : xiii).

Auch der Vorteil des geschlossenen Systems und der geringere Flächenverbrauch im Vergleich zu den gängigen Gewinnungsmethoden kamen zur Sprache.

„...this does hold the promise of being one of the most sustainable ways to get it...I think the fact that it's a closed loop system and most of the brine is reinjected, ... is one of the main ecological opportunities because you don't have to have such a big footprint, and the impact on the surface is a lot more minor than in Chile or for hard rock mining.“ (Experte 3 : xlii).

Eine Absenkung des Grundwasserspiegels scheint unwahrscheinlich:

„Eine Grundwasserspiegel-Absenkung halte ich für unwahrscheinlich, denn wir reden von zweieinhalb, 3000 Metern Teufe¹. Trinkwasserleiter liegen deutlich darüber. Zumal das Wasser ja auch wieder in das Reservoir zurückgeführt werden soll.“, (Experte 1 : xviii).

Das gleiche gilt für eine Verunreinigung des Grundwassers, wobei ein Restrisiko bestehen bleibt:

„Ich meine, der Fakt, dass es passiert ist [Arsenfunde in einem Brunnen nahe Landau, Anm. d. Verf.], zeigt ja schon mal, dass es da ein gewisses Risiko gibt. Aber ... hier muss man das mal so ein bisschen in den Kontext setzen, weil gerade in Landau haben wir das älteste kontinuierlich betriebene Ölfeld Deutschlands im Stadtgebiet Landau, über 700 Tiefbohrungen im größeren Gebiet von Landau, das heißt das Abteufen oder das Bohren von Tiefbohrungen durch die Oberfläche und die Grundwasserschicht ist State of the Art, das hat man in Landau schon hundertfach gemacht. Das hat man in ganz Deutschland zehntausendfach gemacht. Und wie man eben eine Bohrung im Grundwasserleiter abdichtet, das ist eigentlich technologisch bekannt. Aber natürlich bleibt, wie bei allem halt immer, ein Restrisiko von Materialversagen, von menschlichem Versagen.“ (Experte 5 : lxxii)

Vulcan Energy räumt das Risiko ein und weist auf ein engmaschiges Monitoringsystem hin, bei dem die Produktion im Falle eines Zwischenfalls sofort stoppen würde:

„So yes, there are risks. Yes, there are some potential contamination, potential hazardous spills. But ... the processes around them are so watertight and the monitoring and the level of the amounts of these things we're using is very, very low. So, I would say yes, risks. But they wouldn't be high risks... Yeah. So, we have 24/7 water monitoring tools ...which basically set off an alarm. And as soon as the alarm sets off, it's I do think it's a manual process where someone does have to shut it down.“ (Experte 6 : lxxxviii)

Risiken:

Wissenschaft und Wirtschaft sind sich folglich der Risiken für das Grundwasser und das Frischwasser bewusst. Obwohl diese Risiken sehr gering sind, sind sie nicht zu 100 Prozent auszuschließen. Dies zeigt sich auch am Frischwasserverbrauch in der Salton Sea Region. Der Frischwasserverbrauch für die Lithiumförderung ist mit einem Prozent des gesamten Frischwassers aus dem Colorado River zwar verhältnismäßig niedrig.

¹ Teufe ist ein Ausdruck aus der Bergbau, der angibt, wie tief ein Schacht oder eine Bohrung unter der Erde liegt.

Dennoch bleibt der hohe Frischwasserverbrauch des DLE-Verfahrens gerade in der Salton Sea Region eine Herausforderung im Sinne der Nachhaltigkeit, nicht nur auf der ökologischen, sondern auch auf der sozialen Ebene durch Ängste der Bevölkerung:

„But in the case of, say, Salton Sea, you have an arid region where you're going to have freshwater demanded. And that's always going to be a challenge for sustainability. I think that there is fear that geothermal reservoirs will somehow interact with ... water tables and water resources.“ (Experte 2 : xxxii).

Die Ängste sind auch im Oberrheingraben präsent. In Bezug auf eine Grundwasserverunreinigung im Oberrheingraben gibt es laut der Bürgerinitiative gegen Geothermie Karlsruhe neue Hinweise darauf, „dass man befürchtet, dass das Grundwasser verunreinigt wurde.“, (Experte 4: lx).

Es besteht das Risiko eines verhältnismäßig hohen Frischwasserverbrauchs durch das DLE-Verfahren mittels Aluminiumhydroxiden.

„Also die Aluminiumhydroxide, die brauchen keine Säure für die Lithiumrücklösung, was natürlich ein Vorteil ist, weil man weniger Chemikalien hat. Chemikalien kosten auch Energie, um hergestellt zu werden. Dafür brauchen sie viel Wasser zum Spülen, also haben sie tendenziell eher einen höheren Wasserverbrauch.“ (Experte 5 : lxxi)

Emissionen und Luftqualität:

Übersicht Experteninterviews ökologische Dimension – Emissionen und Luftqualität	
Chancen	Risiken
Könnte Verfahren mit geringstem CO ₂ -Abdruck sein	Wärmeemissionen
Geringer CO ₂ -Abdruck als Bonus	höhere Emissionen durch mehr Verkehr
kurze Lieferketten: Vulcan plant weitere CO ₂ -Einsparungen durch Produktion in Frankfurt-Höchst und emissionsfreie Trucks	kein Monitoringplan in der Salton Sea Region
	Entsorgungsstrategie muss mitgedacht werden

Chancen

Die Experten erwähnten auch die in Kapitel 5.3 erläuterten positiven Auswirkungen auf den CO₂-Abdruck bei erfolgreicher Etablierung des Extraktionsverfahrens:

„...wenn das validiert werden kann [dass der CO₂-Abdruck von Vulcan Energy negativ ist, Anm. d.Verf.] dann wäre das ein Produkt, was von allen Prozessrouten das mit dem geringsten CO₂ Abdruck wäre.“ (Experte 1 : xv.)

„...das Thema CO₂-Abdruck durch Transport und Produktion. Das könnte beim Thema Umweltverträglichkeit natürlich ein großes Plus bzw. ein Bonus sein.“ (Experte 1 : xvi)

„...starting with the advantages, obviously talking about the very low footprint as far as water, land and CO₂ emissions go. So that's a real advantage when you are looking at

the fact that the whole world is trying to pivot transport into electric, and therefore the world is going to need a significant amount of lithium. (Experte 6 : lxxxvi)

Slattery et al. erwähnten in Kapitel 5.3 die Vorteile der geplanten Zusammenlegung von Produktionsschritten im Salton Sea Gebiet im Blick auf reduzierte CO₂ Emissionen. Diese Vorteile könnten künftig auch im Oberrheingraben genutzt werden. Vulcan Energy peilt laut eigenen Angaben eine möglichst CO₂-arme Wertschöpfungskette durch den Transport des Materials mit elektrisch betriebenen LKWs und kurzen Lieferketten.

“So, at the moment, we have factored in CO₂ emissions for usual trucks to transport it from Karlsruhe and some up to Frankfurt. But as technology advances, our thoughts were that we would just upgrade our fleet in time to be EV trucks and then that would also decrease that. And then, again conscious of our CO₂ footprint, all of our, downstream, well, our off takers are people that are going to take our lithium hydroxide are in Europe, so very close.” (Experte 6 : lxxxvii)

Lokale Produktion, emissionsfreier Transport und kurze Lieferketten würden externalisierte Kosten erheblich reduzieren.

Risiken:

Kapitel 5.3 kam zu dem Ergebnis, dass die Wärmeemissionen, die bei der Kühlung des Wassers entstehen, relativ gering sind. Nicht alle stimmen mit den Erkenntnissen aus Wissenschaft und Wirtschaft überein. Die Bürgerinitiative gegen Geothermie weist darauf hin,

„dass die Werke, die jetzt hier [in Karlsruhe, Anm. d. Verf.] geplant sind oder das Werk der Deutschen Erdwärme, das hier geplant ist, dass es im Umkreis von 800 Metern zu einem Temperaturanstieg bis zu 0,8 Grad kommen kann. Jetzt 0,8, klingt nicht so viel. Ja, aber ob ich im Sommer dann 35 oder 36 habe?“ (Experte 4 : lxxvii).

Auch vermehrte Emissionen durch mehr LKW-Verkehr können anfallen:

„...for a local community, it means you have increased truck traffic because they have to move the waste to a waste facility. And obviously, whoever the, whatever community has a waste facility site there, has a, you know, will be receiving those trucks.“ (Experte 2 : xxxii).

In der Salton Sea Region gab es zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit keinen Monitoringplan für die Auswirkungen des Extraktionsverfahrens auf die Umwelt und die Gesundheit der Anwohner. Ein solcher Plan, den die Blue Ribbon Commission fordert (vgl. Kap. 5.3) könnte Risiken langfristig minimieren.

“We don't have that much information about what the impacts actually are of direct lithium extraction only because it hasn't been developed. So even if there's no reason to be alarmed about it, I think if we can't answer for sure that it will be safe and will not impact people's health or environment negatively, I think it's just really important to have a

monitoring plan, ... measuring the air quality around the facilities now and proactively know what the baseline is and whether this activity is significantly impacting it and having a plan for addressing that." (Experte 3 : xlili).

Abfälle:

Übersicht Experteninterviews ökologische Dimension – Abfälle
Risiken
Freisetzung von Radioaktivität möglich – Rohre müssen korrekt recycelt werden, Entsorgungsstrategie nötig
Monitoring des Wassers wie bei Vulcan sollte auch für Abfälle weitergedacht werden

Risiken

Bedenken, dass die Filter-Abfälle oder potenzielle radioaktive Ablagerungen in den Rohren Schäden anrichten können, bestehen bei fachgerechter Handhabung laut den meisten Experten nicht. Es herrscht aber Einigkeit über die Forderung nach einer Entsorgungsstrategie von Dobson et al. (vgl. Kap. 5.3.). Diese Forderung leuchtet ein, vor allem im Hinblick auf die prognostizierte Verdoppelung der Abfallmenge durch die Lithiumextraktion (vgl. Kap. 5.3).

„Natürlich, da braucht man eine Entsorgungsstrategie für, weil es halt einfach metallische Abfälle sind. Und ich habe mal eine Studie gelesen, die... es gab zum Beispiel mal solche Ablagerungen aus einem Geothermiekraftwerk. Die wurden klassifiziert nach Abfallschutzrichtlinie, als Metallabfälle, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind und konnten aber in entsprechend normalen Industrieverfahren eingeschmolzen und dann auch gereinigt, also recycelt werden.“ (Experte 5, Google Meet-Interview : lxxxiii)

Ein Monitoring, wie es die Blue Ribbon Commission empfiehlt. (vgl. Kap. 5.3) erfüllt Vulcan Energy nach eigenen Angaben mit firmeneigenen Prozessen. Der im Zusammenhang mit den Risiken für die Wasserqualität erwähnte Monitoringplan könnte auch für das Thema Abfälle weitergedacht werden. Auf diese Weise könnte aus einem Risiko eine Chance werden, wenn noch weitere Inhaltsstoffe aus dem Thermalwasser extrahiert werden:

„it's known that there is arsenic and lead in the geothermal brine. ...so the waste could, some of the waste could be hazardous. ... and if, even if it's not, it will take landfill capacity and trucks and everything. So I think identifying ways to use that material and extract more usable materials out of that could be one way to mitigate the external.“ (Experte 3 : xlili)

7.2 Ökonomische Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Grundlastfähigkeit und CO₂-Neutralität:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Grundlastfähigkeit und CO₂-Neutralität
Chancen
Vulcan muss für Li-Extraktion keinen Strom dazu kaufen, überbleibender Strom wird ins Netz gespeist

Chancen

Die Grundlastfähigkeit der Geothermie bietet für die Stadt Landau und ihre Bewohner ökonomische Vorteile:

„Wir haben vor allem eine grundlastfähige erneuerbare Energie. Das ist auch ökonomisch wichtig für uns. Es gibt keine Schwankungen, sondern das ist gewährleistet.“ (Experte 7 : ci).

Laut Vulcan Energy erzeugt das Unternehmen mehr Strom als es verbraucht:

„we produce more electricity than we require for the process. So... it's the, the surplus that we sell back into the grid...but we do use our own steam and electricity within our process.“ (Experte 6, 21 : lxxxv).

Somit wäre die reine Produktion auf Basis der Angaben von Vulcan Energy mindestens CO₂ neutral.

Standortattraktivität:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Standortattraktivität
Chancen
Planungssichere Energieversorgung als Standortfaktor
Aufbau lokaler Li-Industrie inklusive weiterer Li-Industriezweige durch Co-Locating
Positiver Beitrag zum BIP

Chancen

Die lokale Absicherung mit grundlastfähiger erneuerbarer Energie ist zwar kein zwingendes Argument für eine kombinierte Lithiumextraktion in der Umgebung. Sie spricht aber grundsätzlich für lokale Geothermiequellen und den damit einhergehenden Standortfaktor.

„Das heißt, man hat eine sehr, sehr planungssichere Energie. Also die Leute, die bei uns die Fernwärme bezogen haben, also gerade im Großraum München, die das aus Geothermie beziehen, das ist natürlich deutlich entspannter, wenn da jetzt mal wieder eine Öl- oder Gaskrise ist und man weiß, man bekommt es eh aus grundlastfähiger Geothermie. Das ist natürlich ein enormer Standortfaktor aus meiner Sicht.“ (Experte 5 : lxxix)

Auch die in Kapitel 5.4. diskutierte Standortaufwertung ist eine wirtschaftliche Chance für beide Regionen. Denn Selbstversorgung mit lokalem Lithium ist nicht nur

„ein stabilisierender Faktor für unsere deutsche Automobilindustrie. Also das sehe ich als enorme, enorme Chance und genauso natürlich auch den Aufbau von einer lokalen Industrie, wo diverse Arbeitsplätze dranhängen, von geologischen Planungsbüros, Bohrfirmen und dann Weiterverarbeitung und Transport.“ (Experte 5 : lxxvi)

“So, co-locating, other, say refining and battery manufacturing things would actually probably provide greater economic development for the region.” (Experte 2 : xxxiv).

„Dann könnte man sagen, wenn das lokal gemacht wird, dann kann [man, And. d. Verf.] lokal auch was zum BIP beitragen. Dann kann eine wertschöpfende Industrie entstehen. Ich glaube, die Firma will in den Frankfurt-Höchst-Industriepark. Das kann also Industrie anziehen, das kann eine nachgelagerte Produktion bzw. Synergien bedingen.“ (Experte 1 : xiv)

Skalierbarkeit:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Skalierbarkeit	
Chancen	Risiken
Die Stadt Landau ist in punkto Skalierbarkeit zuversichtlich wegen € 500.000 Investment der Europäischen Investitionsbank (EIB)	Skalierbarkeit schwierig zu prognostizieren

Chancen

Die Skalierbarkeit der lokalen Lithiumprojektion hängt vor allem davon ab,

„wie attraktiv der Markt, sprich das Preisniveau ist, wie sich der Bedarf darstellt, wer das Geld für Investitionen in die Hand nimmt, um beispielsweise Bohrungen/Dubletten zu setzen. Also Bohrungen kosten viel Geld.“ (Experte 1 : xxi).

Die Stadt Landau ist in punkto Skalierbarkeit und Investitionen zuversichtlich. Grund für die positive Stimmung ist die Ende Februar von der Europäischen Investmentbank bestandene vorläufige Prüfung für eine Fremdfinanzierung von einer halben Millionen Euro. Eine finale Finanzierungszusage steht bis zum Ende der Prüfungen aus (EIB 2024).

„Und natürlich ist es dieses Risiko, das wir eingehen. Aber da die jetzt schon so viele extreme Investitionen getätigt haben und jetzt auch noch von der Europäischen Investitionsbank letzte Woche dreistellige Millionenkredite bekommen haben, die haben das, dieses Lithiumcarbonat Projekt als ein Outstanding Projekt klassifiziert, sodass ich eigentlich guten Mutes bin, dass wir das über die Bühne kriegen.“ (Experte 7 : xcvi)

Die Chancen scheinen gut zu stehen, dass das Projekt nicht an einer mangelnden Investitionslage scheitern wird.

Risiken

Ob die von Vulcan Energy prognostizierten 24.000 Tonnen Lithiumhydroxid oder die vom KIT kalkulierten 231 Tonnen pro Jahr gefördert werden können, bleibt offen (vgl. Fündigkeitsrisiko, Kap. 5.4), da noch keine Projektergebnisse vorliegen. Die schwierig zu prognostizierende Skalierbarkeit trotz guter Investitionslage ist eins der großen ökonomischen Risiken der Extraktionsmethode.

Unabhängigkeit von globalen Lieferketten:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Unabhängigkeit von globalen Lieferketten
Chancen
Beitrag Unabhängigkeit Versorgung EU und USA
Stabilisierender Faktor für die deutsche Automobilindustrie

Chancen

Im Laufe der Interviews kam zur Sprache, dass nicht nur Deutschland, sondern ganz Europa und die USA sich durch lokale Projekte unabhängig von globalen Lithium-Lieferketten machen könnten.

„Es wäre ein Beitrag zur Unabhängigkeit einer europäischen Versorgung. Das wäre ein weiterer Vorteil, der natürlich sich nicht nur auf das Projekt bezieht, sondern auch auf alle anderen Projekte in Europa. Das wäre ein Vorteil.“ (Experte 1 :xiv)

Auch im Falle von globalen Lieferengpässen wäre eine lokale Produktion von Vorteil:

„...einige Prognosen deuten darauf hin, dass es zu Lieferengpässen kommen kann bei Lithium weltweit. Und wenn wir da uns zumindest mit einem partiellen Anteil selbst versorgen können, ist das, würde ich auch sagen, ein stabilisierender Faktor für unsere deutsche Automobilindustrie. Also das sehe ich als enorme, enorme Chance.“ (Experte 5 : lxxvi)

Rentabilität:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Rentabilität
Risiken
Hohes deutsches Preisniveau als Rentabilitätsrisiko für die deutsche Wirtschaft
Fündigkeitsrisiko
Restrisiko: DLE langfristig für Geothermie nutzbar?

Risiken

Neben der Unsicherheit, ob die Produktion skalierbar ist, muss für den Standort Deutschland laut der Institution für Rohstoffforschung ein gewisses Preisniveau grundsätzlich gegeben sein, da die Kosten lokal insgesamt höher sind als beispielsweise in China:

„Wir werden immer über den Kosten der anderen liegen. Das hängt einfach mit beispielsweise unseren Energiepreisen und Löhnen zusammen.“ (Experte 1 : xx).

Auch das Fündigkeitsrisiko (vgl. Kap. 5.4) ist gegeben. Selbst Vulcan Energy schlägt ein Restrisiko nicht aus:

“...there's multiple risks for us in the current stage we're at because no one's ever come to commercial production scale of geothermal lithium yet. So that is a risk because it hasn't been done before on that level.” (Experte 6 : xci.)

Ein weiteres Risiko bleibt im Hinblick auf die DLE-Extraktion, da sie als Technologie noch nicht final etabliert ist.

„Die Technologie der Direct Extraction, die wurde ja schon umgesetzt für Wässer aus Salzseen, aber sie wurde eben noch nicht industriell umgesetzt für geothermische Wässer. Und das muss jetzt halt einfach erstmal noch gemacht und bewiesen werden.“ (Experte 5 : lxxi)

Förderung weiterer Rohstoffe:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Förderung weiterer Rohstoffe
Chancen
Rentable, kombinierte Förderung weiterer Rohstoffe
Auch ökologisch sinnvoll wg. reduzierter Emissionen
Mögliche Reduktion von Abfällen und Kosten zur Entsorgung

Chancen

Thermalwasser enthält neben Lithium weitere Rohstoffe, die wirtschaftlich genutzt werden können. Im Salton Sea hat man sich in den 1970er Jahren für die Förderung anderer Stoffe und gegen die Lithiumextraktion entschieden. Eine kombinierte Förderung mehrerer Rohstoffe wäre aus ökonomischer Sicht interessant und könnte Abfälle und eine eventuell teure Entsorgung reduzieren (vgl. Kap. 5.4).

Auch aus dem Blickwinkel der ökologischen Nachhaltigkeit könnte die kombinierte Förderung den globalen Fußabdruck reduzieren:

„...but you still have to be shipping in the manganese and cobalt and copper and graphite material or anode material.“ (Experte 3 : xlii)

„Having just one mineral sourced locally doesn't necessarily get you very much environmentally, you know, because you're going to be getting all these other materials from other places. (Experte 2 : xxxi).

Ausnutzung monetärer Anreize:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Ausnutzung monetärer Anreize
Chancen
Lt. Vulcan Nutzung von Eigenstrom für Li-Extraktion, nur übriger Strom wird eingespeist

Chancen

Laut Vulcan Energy kommt eigener Strom bei der Lithiumextraktion zum Einsatz und nur die Überproduktion wird ins Netz eingespeist. Die in Kapitel 5.4 rein theoretisch mögliche Ausnutzung monetäre Anreize trifft laut Firmenangabe nicht zu.

“...we funnel the electricity that we require to our lithium extraction plant, and then the excess gets sold. And ... there's a lot of steam that drives the process as well... my understanding is we ... produce more electricity and heat than we require for the process.”
(Experte 6 : lxxxv)

Preisvolatilität:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Preisvolatilität	
Chancen	Risiken
Kein Kauf von Strom oder Gas mit schwankenden Preisen auf dem Spotmarkt nötig	Schwankender Lithiumpreis, zu niedrige Preise sind ökonomisches Risiko

Chancen

Die Grundlastfähigkeit der Geothermie bedeutet für die Stadt Landau und ihre Bewohner Unabhängigkeit vom konventionellen Strommarkt:

„Ökonomisch ist es insofern nicht nur für die Firma, sondern auch für uns sinnvoll ..., dass wir nicht mehr auf dem Spotmarkt oder auf dem Terminmarkt volatil Gas oder Erdöl kaufen müssen. Das ist bei uns immer das große Problem.“ (Experte 7: ci).

Risiken

Der schwankende Lithiumpreis ist ein ökonomisches Risiko für eine lokale Lithiumindustrie. Das gilt sowohl für den deutschen als auch für den US Markt.

„Natürlich bleibt auch ein ökonomisches Risiko mit dem Lithiumpreis. Wenn er jetzt noch weiter fallen würde, dann ist natürlich auch die Frage, ob dann eine Wirtschaftlichkeit quasi noch bleibt bei den dann entstehenden Kosten.“ (Experte 5 : lxxviii)

„But if we look at the history of lithium prices just over the past 3 or 4 years, you can see a lot of volatility. Um, so that's one I think one economic risk.“ (Experte 2 : xxxvi)

Anfang März 2024 lag der Lithiumpreis bei 15.000 US Dollar (Daily Metal Price) – das könnte auf Dauer zu wenig sein, um nachhaltig wirtschaften zu können.

„Das bedeutet, wir brauchen irgendwo einen Preismechanismus, wo die Produzenten gut mit leben können, wo sie auch Geld investieren können, um ökologisch besser arbeiten zu können, also Geld für Nachhaltigkeit ausgeben können. Und die Nachfrageseite braucht Preise, mit der sie ein attraktives, nachhaltiges Produkt anbieten kann. Die aktuell niedrigen Preise bilden das im Moment leider nicht ab. Da müssen wir aber wieder hin...ansonsten haben wir ein ganz großes Problem.“ (Experte 1 : xx).

Seismizität:

Übersicht Experteninterviews ökonomische Dimension – Seismizität	
Chancen	Risiken
Absicherungssystem für Vorbereitungs- und Betriebsphase Haftungskonzept seitens Vulcan Energy in Arbeit	Restrisiko bleibt trotz technischem Fortschritt und Monitoring

Durch hydrothermale Geothermie ausgelöste Seismizität löst potenziell keine schweren Schäden an Häusern und Gebäuden aus	
Geothermie könnte Risiko für Seismizität reduziert haben	

Risiken

Da die Lithiumförderung die Nutzung von hydrothermalen Systemen voraussetzt ist das Risiko induzierter seismischer Events deutlich reduziert. Ein gewisses Restrisiko wird voraussichtlich immer bleiben, darüber sind sich alle Experten einig (s.u).

Chancen

Bei hydrothormaler Geothermie ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten seismischer Ereignisse geringer. Aufgrund der Vorkommnisse in der Vergangenheit sind ausführliche seismische Analysen vorab inzwischen Pflicht.

„Dazu muss man sagen, viele Fehler wurden in der Vergangenheit gemacht. Gerade rund um dieses Thema petrothermale Geothermie und hydraulische Stimulation, um Gänge und Fließfähigkeit im Untergrund zu schaffen. Das Auftreten von Seismizität im Kontext von der hydrothermalen Geothermie ist da deutlich geringer,...weil man eben eine durchlässige Form anbohrt und eben nicht erst selber im Untergrund schaffen möchte. Trotzdem bleibt dort ein Restrisiko für Seismizität ...Aber die Risiken sind minimierbar. Also mittlerweile braucht man für jedes Projekt ein sehr, sehr ausführliches seismisches Gutachten, das quasi genau analysiert und modelliert, ob Seismizität auftreten kann. (Experte 5 : lxxv).

Für eine potenzielle Schadensphase arbeitet Vulcan Energy an einem Haftungskonzept, um sich selbst und die Anwohner wirtschaftlich abzusichern (vgl. Kap. 7.3).

Bei korrekt durchgeführter Bohrung und einwandfreiem Kraftwerksbetrieb ist das prognostizierte Risiko für induzierte seismische Aktivitäten auch aus kalifornischer Sicht minimal:

„...the level of seismic activity induced by... these processes is unlikely to cause extensive damage to, for example, homes and buildings.“ (Experte 2 xxxvi)

In der seismisch sehr aktiven Salton Sea Region, die sich in der Nähe des San-Andreas-Grabens befindet, scheint die Seismizität trotz Geothermie, oder möglicherweise sogar aufgrund dessen, zurückgegangen zu sein:

“...they found that there was an increase in seismicity and the frequency of seismic events that was correlated with the onset of geothermal production for a bit. And then in the early 2000, they decoupled, and the seismicity rates ... leveled out and are basically the same as other places in this whole seismic area. Even though the geothermal kept expanding.” (Experte 3 : xlix)

“...one researcher on the team has said that it's possible that it actually lowers the risk of a really high magnitude seismic event because it's triggering smaller, little earthquakes. So it's kind of relieving some of the pressure and making it less likely that there will be a huge... earthquake, which, I don't know, maybe that's true.” (Experte 3 : I)

7.3 Soziale Nachhaltigkeit - Chancen und Risiken der lokalen Lithiumextraktion

Seismizität:

Übersicht Experteninterviews soziale Dimension – Seismizität
Risiken
Vergangene Erfahrungen & Nähe der Geothermieanlagen zu Wohnsiedlungen schürt Angst
NIMBY-Phänomen
Politische Instrumentalisierung
Erdbeben könnten Wasserleitungen in Kalifornien beschädigen

Risiken

Die Ereignisse der Vergangenheit und die Tatsachen, dass die Geothermie-Anlagen oft nur wenige 100 Meter von Wohnsiedlungen entfernt sind, erklärt, warum die Ängste der Anwohner buchstäblich zum Greifen nahe sind:

„...es ist eine große Frage, wie man dort die Zivilgesellschaft nicht ignoriert und vernünftig mitnimmt, dass sie das akzeptiert. Und da ist in der Vergangenheit auch vieles falsch gelaufen. Das ist für mich einer der ganz großen Nachteile, dass hier tatsächlich schon Vertrauen verloren gegangen ist und verlorenes Vertrauen wiederzugewinnen, das ist ein sehr langwieriger Prozess und das darf man auch nicht unterschätzen. Immer, wenn so ein Thema emotional auf- oder beladen wird. Dann sind Sachargumente häufig nebensächlich bzw. sogar irrelevant. Wenn die Emotionalität Oberhand gewinnt, dann wird es echt schwierig.“, (Experte 1 : xiv).

In diesem Zusammenhang spricht man auch vom sogenannten NIMBY-Phänomen, wobei NIMBY für „Not in my backyard“ steht (vgl. Mai 2018 : 234). Das Phänomen beschreibt eine Situation, in der eine Neuerung, in diesem Fall die Energiewende, zwar willkommen ist, aber eben nicht im direkt sicht- und spürbaren Umfeld.

In Karlsruhe gibt es Zeichen für eine politische Instrumentalisierung des Themas.

„Als man hier erfahren hat im Neubaugebiet, dass also gerade ein paar 100 Meter nebendran das Geothermiewerk gebaut werden soll. Ich habe gehört, Grün wählen, nie wieder...Und es gibt nur eine Partei, die im Moment von den Geothermieproblemen profitiert, das ist die AfD. Die lehnen es ab. Und die, die benutzen das natürlich auch, das Thema.“ (Experte 4 : lviii).

In Kalifornien steht man seismischen Aktivitäten etwas gelassener gegenüber, Risiken, unter anderem für die Wasserversorgung, sind aber nicht komplett ausgeschlossen.

„...the kind of seismicity events triggered by fracking and other kinds of underground activities seem to be much smaller than ... the potentially naturally very large earthquakes that can happen in California...most things like homes ...are unlikely to be significantly damaged. But I think our water delivery network is potentially a bit more sensitive and delicate, and that that presents a risk” (Experte 2 : xxxvi.)

Partizipation:

Übersicht Experteninterviews soziale Dimension – Partizipation	
Chancen	Risiken
Veranstaltung zu Bürgerbeteiligung in Landau mit Live-Streaming	Bürgerinitiativen weiterhin misstrauisch, u.a. bzgl. Haftung
Vertragsabschluss für Grundstück in Landau erst nach Erfüllung der Bedingungen	Risk of broken promises: Fehlendes Monitoring zur Rechenschaftspflicht in Kalifornien macht Erfolgsmessung eines Monitorings schwierig
SB 125 (Gesetz): Finanzielle Mittel für die Region aus Steuergeldern in Kalifornien	
In Kalifornien Überwachung der Einhaltung der Ergebnisse empfohlen	

Chancen

Nachdem das rheinland-pfälzische Forum Geothermie laut den online verfügbaren Protokollen keinen Bürgerentscheid über das erste Geothermie-Projekt initiieren konnte (vgl. Kap. 5.5), folgt das Genehmigungsverfahren des Landauer Projekts von Vulcan Energy einem neuen partizipativen Ansatz. Die Abhaltung öffentlicher Informationsveranstaltungen und die Abstimmung im Stadtrat als von den Bürgern demokratisch gewähltem Organ lässt einen Schluss auf eine mindestens repräsentative Partizipation zu – vorausgesetzt der Stadtrat bezieht Bürgermeinungen in die Entscheidungsprozesse mit ein. Die in Kapitel 5.5 gelisteten Forderungen, ohne deren Erfüllung das Projekt nach Angaben der Stadt nicht beginnen darf, lassen einen Schluss auf einbezogene Bürgermeinungen auf Basis des fortlaufenden Mediationsverfahrens Tiefe Geothermie Vorderpfalz zu. Detaillierte Inhalte zu Informationsveranstaltungen kamen im Rahmen des Interviews mit dem Vertreter der Stadt Landau nicht zur Sprache, da das Interview auf eine halbe Stunde gekürzt werden musste.

„Ich habe eine ganz große Bürgerbeteiligung bei uns im zweitgrößten Veranstaltungssaal gehabt. Da waren mehrere 100 Menschen drin über zwei Stunden inklusive Moderation mit allen Beteiligten, mit Spezialisten für Geothermie, Ingenieuren, mit Mitgliedern des Vorstands von Vulkan. ... Und dann wurde dieses Vorhaben minutiös mit allen Fragen, die da aufkamen, erläutert. Und dann haben wir auch mit den Bürgern diskutiert und das wurde auch live gestreamt und insofern war das eine vollumfängliche Berichterstattung auch hinterher.“ (Experte 7 : xcvi).

Zum Zeitpunkt des Interviews gab es einen Vertrag zur Reservierung eines Grundstücks im Landauer Gewerbegebiet. Der Vertragsabschluss soll nur erfolgen, wenn die Bedingungen (vgl. Kap. 5.5) der Stadt Landau seitens Vulcan Energy erfüllt sind.

„Es herrscht Einvernehmen über die Beweislastumkehr, eine Versicherung über die stabile Wärmelieferung. Gleichzeitig muss mein Energieversorger einen sogenannten Wärmelieferungsvertrag mit der Vulcan schließen, damit er auch weiß, ich kriege aus allen Injektionsbohrlöchern die Wärme, die ich will und brauche, also diese, die Vorabzusagen bei all diesen Punkten, die habe ich schon, das ist klar. Und ohne die geht auch nichts. Erst wenn der Vertrag geschlossen ist, komplett hieb- und stichfest, dann geht es los.“ (Experte 7 : xcvi).

Mit Blick auf die Zukunft in Kalifornien wird empfohlen, dass die Einhaltung der Ergebnisse und Empfehlungen überwacht wird, um die angestrebten positiven Effekte zu garantieren.

“...it would be great if, if there were continuous monitoring of actual conditions... like, does air quality get worse in this region with terrible air quality, but also on the economic side, who has actually been hired by the companies to work at these facilities. Are they local or non-local? How is the money coming in from an excise tax. But like royalties, how is that money actually getting back to the community and how is it being spent? I think all of that would be great to monitor over time to make sure that the community is actually getting those benefits.” (Experte 2 : xxxvi)

Hier ist die Verwendung der Mittel aus Lizenzgebühren, Steuern und Servicegebühren gemeint, die den staatlichen und lokalen Behörden, den Landbesitzern und dem lokalen Bewässerungsbezirk zugute kommen (vgl. Paz et al. 2022 : 65).

In Kalifornien trat am 1. Januar 2023 der Salton Sea Restoration Act, ein Gesetz für eine Lithiumförderungssteuer, in Kraft (SB 125). Danach sollen die durch den SB 125 eingenommenen Steuern in einen Fonds fließen. 80 Prozent des Fonds gehen an die Bezirke, in denen die Förderung stattfindet. Die restlichen 20 Prozent fließen in die Restoration des Salton Seas. Dieser Mechanismus soll lokale Investitionen und wirtschaftliche Entwicklung sicherstellen.

„So there will be revenue that is invested, insofar as the county makes good decisions about how to invest it.“ (Experte 3 : xlvii)

“... I'd make sure that technical innovation is not only spent on more efficient ways to extract lithium from brines, but ...also ...to invest in technologies that could really change this situation [schlechte Luftqualität und Austrocknung des Salton Sea, Anm. d. Verf.]“ (Experte 2 : xxxviii)

Die Blue Ribbon Commission empfiehlt auch ein Monitoring zur Einhaltung der Steuer.

Risiken

Trotz der aktuellen Entwicklungen im Hinblick auf Partizipation konnte das aus den Erfahrungen der Vergangenheit begründete Misstrauen bislang nicht vollständig ausgeräumt werden.

“Also da können wir nur bitter lachen. Also es gab schon alle möglichen Versprechungen [u.a. zum Thema Beweislastumkehr, Anm. d. Verf.] ... in den letzten, also zehn, 20 Jahren. Ja und nie wurde das eingehalten...Also, da geben wir gar nichts drauf.”, (Experte 4 : lxx).

Fehlendes Monitoring bzw. fehlende Mechanismen zur Rechenschaftspflicht lassen in Kalifornien die Frage aufkommen, wie ein Erfolg der Empfehlungen der Blue Ribbon Commission garantiert werden kann, die ein Monitoring für alle empfohlenen Maßnahmen empfiehlt. Dies bezieht sich auch auf die Verwendung der Steuer zur Restoration des Salton Sea Gebiets und die Umweltrisiken.

“I don't see mechanisms for accountability about the promises of hiring locally and making community beneficial infrastructure... so I think there's the risk of broken promises...between community and industry and government. So I think if this ends up not benefiting the community like they say it will, that would be really harmful. But it's kind of like the environmental impacts... it's just sort of the risk that it won't be as good as they say it's going to be, and that there won't be a way to make sure. (Experte 3, xli)

Das “Risk of broken promises” gilt auch für die Bereiche Arbeitsplätze und Infrastruktur und wird aus diesem Grund zu späterem Zeitpunkt nicht mehr gesondert aufgeführt.

Bergrecht / Haftung:

Übersicht Experteninterviews soziale Dimension – Bergrecht / Haftung	
Chancen	
Vulcan arbeitet nach eigenen Angaben an einem Haftungskonzept zur unbürokratischen Schadensbegleichung und Bergschadensvermutung – bei Realisierung Fairness gegenüber Anwohnern	

Chancen:

Vulcan Energy arbeitet nach eigenen Angaben an einem Haftungskonzept, das sich noch in der Finalisierung befindet. Es sieht eine unbürokratische und sofortige Entschädigung bei geringeren Schadensfällen vor. Das Konzept beinhaltet zudem die sogenannte Bergschadensvermutung, die die Durchsetzung von Schadensansprüchen erleichtern soll. Geschädigte müssten demnach nicht beweisen, dass ein seismisches Ereignis einen Schaden ausgelöst hat. Vielmehr müsste das Bergbauunternehmen nur dann nicht haften, wenn der Schaden von einem natürlichen seismischen Ereignis oder durch Dritte ausgelöst wurde (vgl. Vulcan Energy Haftpflichtkonzept 2023 : 3).

Wenn dieses Konzept realisiert wird, stehen die Chancen gut, dass finanzielle Schäden durch induzierte Seismizität nicht auf die Anwohner externalisiert werden.

Verschmutzung von Trinkwasser, Luft und Boden

Übersicht Experteninterviews soziale Dimension – Trinkwasser, Luft und Boden	
Chancen	Risiken
Bei reiner Geothermie voraussichtlich keine zusätzlichen Fahrzeugtransportemissionen	Bedenken bezüglich Radioaktivität und Kühlmittelaustritten seitens Bürgerinitiative

Mehr zu Emissionen vgl. Kap. 7.1 Chancen Wasser, Chancen Emissionen und Luftqualität	Kalifornien: Mehr Verkehr, z.B. bei Abfallentsorgung erzeugt mehr Emissionen in entspr. Gemeinden
--	---

Risiken

Risiken für ökologische Auswirkungen auf Wasser- und Luftqualität bzw. CO₂-Emissionen sind aus Expertensicht gering, aber möglich (vgl. Kap. 7.1). Ein gewisses Restrisiko bleibt vorhanden und hat demnach auch Auswirkungen auf die soziale Nachhaltigkeit. Die Bürgerinitiativen weisen auf Radioaktivität und Kühlmittelaustritte hin.

„Es gibt auch Bedenken wegen Radioaktivität...In Landau ist es auch bekannt, dass es erhöhte Werte gibt. Finden Sie auch in den Grafiken der BI [Bürgerinitiative, Anm. d. Verf.]. Und es gibt auch noch das Risiko...in Insheim hat es auch schon einen Austritt von Isopentan gegeben während eines Störfalls.“, (Experte 4 : lxxviii).

Environmental Justice

Übersicht Experteninterviews soziale Dimension – Environmental Justice	
Chancen	Risiken
Environmental Justice: Reduzierung der Externalitäten in den aktuellen Förderländern; Länder der bisherigen Rohstoffförderstätten würden von weniger Emissionen, Abfällen, Wassermangel etc. profitieren	Restrisiko von menschlichem oder Materialversagen hinsichtlich Grundwasserverunreinigung minimale Abwasservorkommen, müssen korrekt entsorgt werden evtl. neue Grundwasserverunreinigung im Oberrheingraben hoher Frischwasserverbrauch bei DLE / A-DLE, besonders kritisch für Salton Sea Region

Chancen

Eine lokale Produktion würde im Sinne der Umweltgerechtigkeit (Environmental Justice) Externalitäten reduzieren, da Emissionen, Abfälle, Wassernutzung etc. an der Förderstätte anfallen würden und nicht in andere Länder mit geringen Umwelt- und Sozialstandards ausgelagert würden. Unter Environmental Justice (EJ) versteht man die gerechte Verteilung aller umweltbezogenen Nutzen und Belastungen. Dabei beinhaltet EJ drei Konzepte: Distributive und Procedural Justice sowie Justice of Recognition. Distributive Justice (Verteilungsgerechtigkeit) bezieht sich auf die Verteilung von Gütern (Ressourcen) und Nachteilen (Schaden und Risiko). Procedural Justice meint die Art und Weise, wie Entscheidungen getroffen werden, wer daran beteiligt ist und Einfluss hat. Justice of recognition bezieht sich darauf, wer Respekt und Wertschätzung erhält und wer nicht (vgl. Walker 2012 : 10).

Man würde im Sinne von Environmental Justice nicht nur dort von den emissionsfreien Elektrofahrzeugen mit Li-Batterien profitieren, wo sie auf den Straßen fahren und wo die

Bevölkerung sie sich leisten kann. Auch die Länder der bisherigen Rohstoffförderstätten würden von weniger Emissionen, Abfällen, Wassermangel etc. profitieren.

“... zooming out, thinking about environmental justice. It's just really complicated with the battery supply chain of having this technology that, you know, climate change mitigation is important for environmental justice globally because poorer countries are more exposed and vulnerable to natural disasters from climate change and have less capacity to respond. So globally, that's really important. But then you look at EVs. EVs are essentially a luxury good at this point, and they are improving air quality around people who can drive them. They are creating these sort of specific environmental justice burdens near mineral extraction sites.” (Experte 3 : li)

Deshalb sollte auch das Wohlergehen der lokalen Bevölkerung eine Priorität bleiben:

„... I think for people in this community, that's not fair to them, especially having experienced so much oppression and environmental burdens throughout their lifetimes to say... maybe this will be harmful for you, but it's less bad than somewhere else. And we need the EVs to clean up this mess that we created ... that's something about environmental justice that I think about.” (Experte 3 : li)

„Aber ansonsten hat man natürlich, finde ich, einfach eine generelle Chance in Bezug auf soziale Nachhaltigkeit mit einem unabhängigen Rohstoffabbau, mit dem eigenverantwortlichen Rohstoffabbau. Man hat einfach diese Wertschöpfungskette, dass man einfach die Sachen, die man vor Ort verbraucht, einfach lokal produziert, anstatt einfach in diesem quasi besten postkolonialen Gedanken sagt: Wir importieren die Rohstoffe und exportieren schön den ganzen Umweltschaden ins Ausland.“ (Experte 5 : lxxix).

8. Vergleich der Ergebnisse der Experteninterviews mit vorliegenden Studien

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalysen der Experteninterviews und der für die Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung untersuchten Studien zusammen und bewertet sie abschließend bezüglich der Kategorien K1a – K3c (vgl. Abb. 11, Kap. 6.4.1). Die Diagramme veranschaulichen die jeweilige Ausprägung der Nachhaltigkeit und unterstützen die Abschlussbewertung. Hierfür wurden sowohl die Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung als auch die Experteninterviews qualitativ mithilfe des deduktiven Kategoriensystems nach Mayring analysiert, um einen adäquaten Analysevergleich darstellen zu können.

Ergebnisse qualitative Inhaltsanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung (NTA) & Experteninterviews

Ökologische Dimension (K1a – K3a)

Qualitative Textanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung

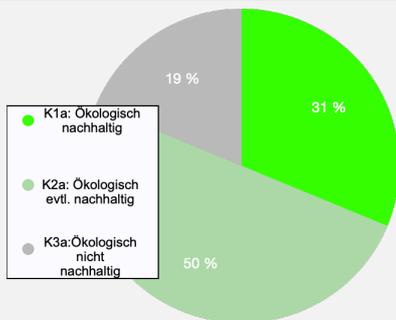


Abb. 12: Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (NTA)

50 Prozent der Textpassagen des Kapitels 5.3 deuten darauf hin, dass die Extraktionsmethode eventuell ökologisch nachhaltig ist. **31 Prozent** lassen darauf schließen, dass die Methode **ökologisch nachhaltig** ist und **19 Prozent** der Aussagen sprechen dafür, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen nicht **ökologisch nachhaltig** ist.

Qualitative Textanalyse Experteninterviews

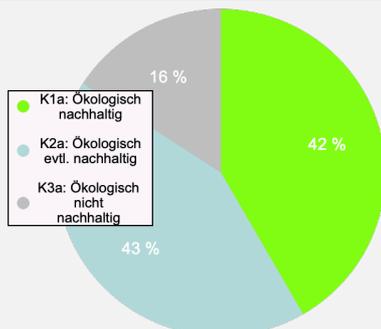


Abb. 13: Bewertung ökologische Nachhaltigkeit in Prozent (Interviews)

43 Prozent der Textpassagen des Kapitels 7.1 deuten darauf hin, dass die Extraktionsmethode eventuell ökologisch nachhaltig ist. **42 Prozent** lassen auf eine **ökologisch nachhaltige Methode** schließen und **16 Prozent** deuten darauf hin, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen **nicht ökologisch nachhaltig** ist.

Zusammenfassung & Bewertung Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung & Experteninterviews

Ökologische Dimension

Wasser

Chancen für Nachhaltigkeit sind gegeben. Der hohe Frischwasserverbrauch des A-DLE/DLE-Verfahrens ist bei Trockenheit kritisch. Eine Wasserverunreinigung ist unwahrscheinlich. Ein Restrisiko von menschlichem Versagen oder Materialversagen bleibt bestehen. Ein 24/7 Wassermonitoring, wie Vulcan Energy es nach eigenen Angaben durchführt, ist ein Schritt in die richtige Richtung.

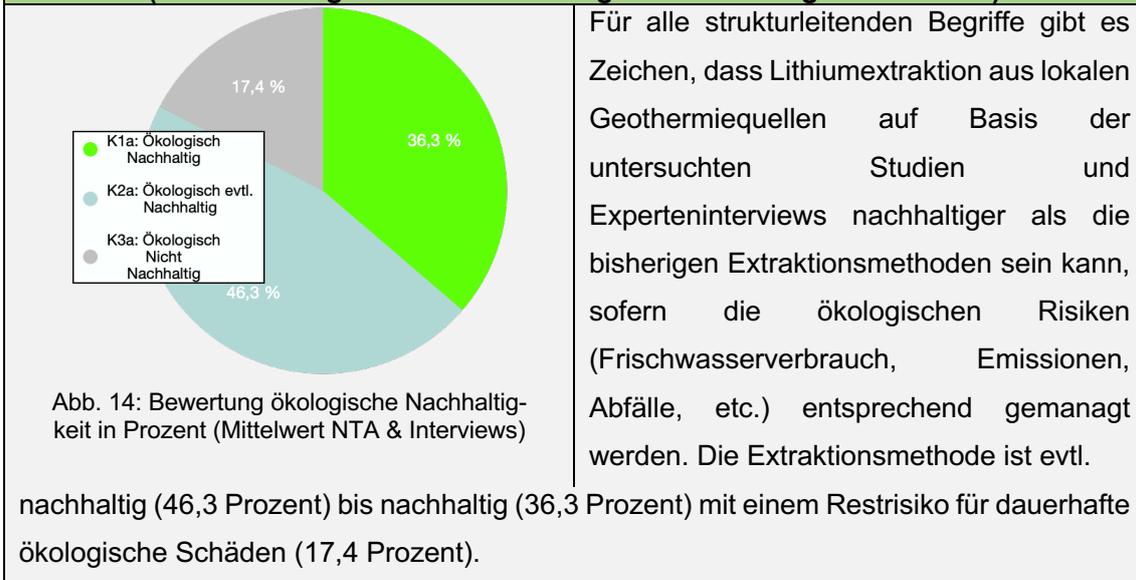
Emissionen und Luftqualität

Trotz potenzieller lokaler Emissionssteigerungen und der Freisetzung von Benzol und Ammoniak scheinen die Chancen für eine bessere Luftqualität inklusive Externalitätenreduzierung gut, wenn geeignete Technologien, Entsorgungsstrategien und Überwachungsmechanismen zum Einsatz kommen. Unter optimalen Bedingungen könnte das Li-Extraktion aus Geothermiequellen das Verfahren mit dem geringsten CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu Bergbau und der Li-Extraktion aus Salzseen sein.

Abfälle

Geothermale Fluide können Radioaktivität freisetzen. Sondermüll, der bei geothermalen Prozessen und bei der Lithiumextraktion entsteht, ist bei korrekter Entsorgung voraussichtlich nicht gefährlich. Die korrekte Entsorgung und das Recycling von Abfällen müssen mitgedacht werden, um Kontaminationsrisiken zu vermeiden. Eine entsprechende Monitoringstrategie für die Abfallentsorgung, wie sie nach Angaben von Vulcan Energy durchgeführt wird, kann zur Nachhaltigkeit beitragen.

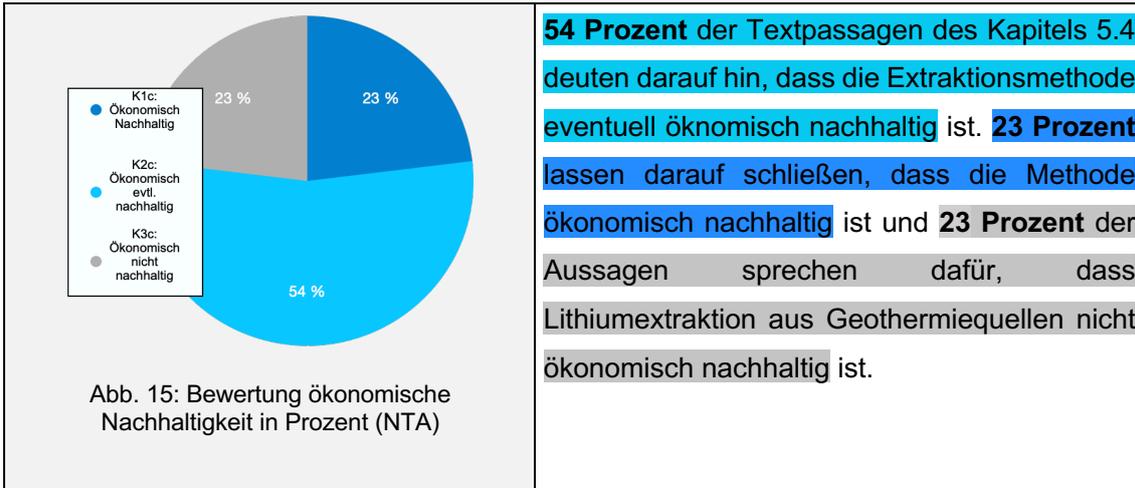
**Gesamtbewertung ökologische Dimension
(Mittelwert Ergebnisse Technikfolgenabschätzung & Interviews)**



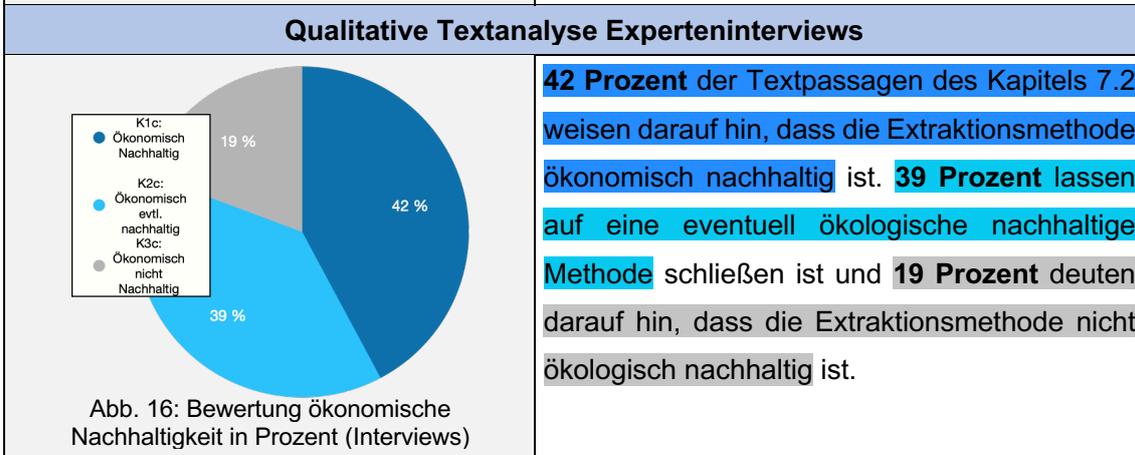
Ergebnisse qualitative Inhaltsanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung & Experteninterviews

Ökonomische Dimension (K1c – K3c)

Qualitative Textanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung



54 Prozent der Textpassagen des Kapitels 5.4 deuten darauf hin, dass die Extraktionsmethode eventuell ökonomisch nachhaltig ist. **23 Prozent** lassen darauf schließen, dass die Methode ökonomisch nachhaltig ist und **23 Prozent** der Aussagen sprechen dafür, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen nicht ökonomisch nachhaltig ist.



42 Prozent der Textpassagen des Kapitels 7.2 weisen darauf hin, dass die Extraktionsmethode ökonomisch nachhaltig ist. **39 Prozent** lassen auf eine eventuell ökologische nachhaltige Methode schließen ist und **19 Prozent** deuten darauf hin, dass die Extraktionsmethode nicht ökologisch nachhaltig ist.

Zusammenfassung & Bewertung Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung & Experteninterviews
Ökonomische Dimension
Grundlastfähigkeit und CO₂-Neutralität
Die Grundlastfähigkeit und CO ₂ -Neutralität sind Zeichen dafür, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen wirtschaftlich sein kann.
Standortattraktivität
Eine planungssichere Energieversorgung und der Aufbau weiterer Industriezweige können den Standort attraktiv machen und einen positiven Beitrag zum BIP leisten.
Skalierbarkeit
Das Potenzial des Extraktionsverfahrens bei erfolgreicher Skalierbarkeit ist vielversprechend. Politik und Wirtschaft vertrauen in das Verfahren, die Europäische Investitionsbank wird voraussichtlich eine halbe Million Euro in das Projekt im Oberrheingraben investieren. Das Vorliegen reiner Prognosen anstelle von Erfahrungswerten machen zuverlässige Aussagen zur Skalierbarkeit allerdings nicht möglich und stellen somit das größte Risiko der neuen Extraktionsmethode dar.
Unabhängigkeit von globalen Lieferketten

Die Unabhängigkeit von globalen Lieferketten wäre sowohl für die USA als auch für Deutschland eine große wirtschaftliche Chance und könnte sich bei Lieferkettenengpässen stabilisierend auf die Wirtschaft auswirken.

Rentabilität

Die Extraktionsmethode kann hoch rentabel sein, vorausgesetzt das DLE-/A-DLE-Verfahren ist so effizient wie in den Laborversuchen, die Fündigkeit ist gegeben, die Lithiumquelle versiegt nicht, die Geothermiequelle liefert die erwarteten Lithiummengen und das Preisniveau bleibt stabil genug.

Förderung weiterer Rohstoffe

Die kombinierte Förderung weiterer Rohstoffe aus dem Thermalwasser könnte Rentabilität und Ressourceneffizienz verbessern und gleichzeitig ökologische Chancen durch Emissions- und Abfallreduktion mit sich bringen.

ERoEI-Theorie / Ausnutzung monetärer Anreize

Die Nutzung von EEG-geförderten grünen Eigenstrom in der Lithiumextraktionsanlage im Oberrheingraben verspricht ökonomische Chancen. Rein theoretisch könnten monetäre Anreize durch ERoEI ausgenutzt werden.

Preisvolatilität

Eine lokale Produktion kann einen Beitrag zur Preisstabilität und Stromversorgungssicherheit leisten. Der volatile Lithiumpreis bleibt ein Risikofaktor.

BIP anderer Länder

Während eine lokale Produktion wirtschaftliche Chancen bietet, könnten sie das BIP anderer Länder durch die fehlende Lithiumindustrie negativ beeinflussen.

Seismizität

Seismische Absicherungssysteme sind in Deutschland inzwischen Pflicht. Es gibt Hinweise aus der Salton Sea Region, dass Geothermie Seismizität insgesamt reduzieren könnte. Haftungskonzepte seitens des Anlagenbetreiber können ökonomische Schäden minimieren. Trotz Absicherungssystemen und potenziellen Haftungsgarantien bleibt ein Restrisiko für seismische Ereignisse und Schäden.

**Gesamtbewertung ökonomische Dimension
(Mittelwert Ergebnisse Technikfolgenabschätzung & Interviews)**

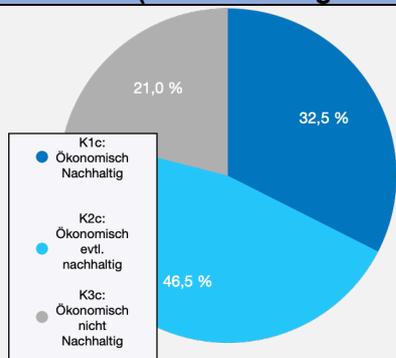


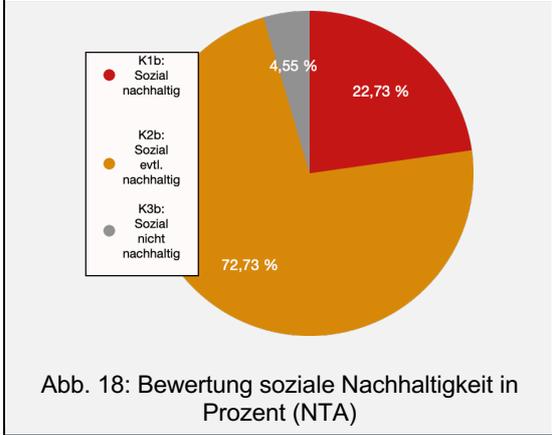
Abb. 17: Bewertung ökonomische Nachhaltigkeit in Prozent (Mittelwert NTA & Interviews)

Für alle strukturleitenden Begriffe gibt es Zeichen, dass Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen auf Basis der untersuchten Studien und Experteninterviews ökonomisch nachhaltig sein kann. Da es an Erfahrungswerten mangelt und vor allem für Fündigkeit, Skalierbarkeit und Rentabilität nur Prognosen vorhanden sind, ist die Extraktionsmethode in der Gesamtbewertung eventuell ökonomisch nachhaltig (46,5 Prozent) mit Tendenz zu ökonomisch nachhaltig (32,5 Prozent).

Ergebnisse qualitative Inhaltsanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung & Experteninterviews

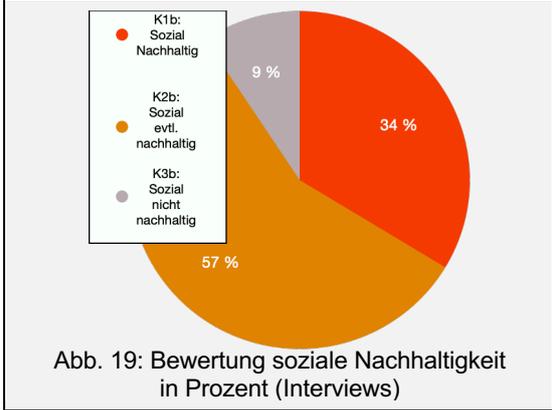
Soziale Dimension (K1b – K3b)

Qualitative Textanalyse Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung



73,73 Prozent der Textpassagen des Kapitels 5.5 weisen darauf hin, dass die Extraktionsmethode eventuell sozial nachhaltig ist. **23,73 Prozent** lassen darauf schließen, dass die Methode sozial nachhaltig ist und **4,55 Prozent** sprechen dafür, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen nicht sozial nachhaltig ist.

Qualitative Textanalyse Experteninterviews



57 Prozent der Textpassagen des Kapitels 7.3 deuten darauf hin, dass die Extraktionsmethode eventuell sozial nachhaltig ist. **34 Prozent** lassen auf eine sozial nachhaltige Methode schließen und **19 Prozent** deuten darauf hin, dass Lithiumextraktion aus Geothermiequellen nicht sozial nachhaltig ist.

Zusammenfassung Übersicht Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung / Experteninterviews

Soziale Dimension

Seismizität

In Landau haben vergangene Erfahrungen und potenzielle räumliche Nähe zu Geothermieanlagen die Bürger verunsichert (NIMBY-Phänomen). Die Angst der Bürger wird politisch instrumentalisiert.

Partizipation

Sowohl in Landau als auch in Kalifornien sind Partizipationsmaßnahmen durch Bürgerbeteiligung und gesetzliche Schutz-/Unterstützungsmaßnahme gegeben. Jedoch sind noch nicht alle Stakeholder überzeugt. Ein Monitoring zur Erfolgsmessung der Maßnahmen kann dem „Risk of broken promises“ entgegenwirken. Dies gilt nicht nur für den Bereich Partizipation, sondern auch für Bereiche wie die Entstehung von Arbeitsplätzen und Infrastruktur.

Bergrecht / Haftung

Bei Etablierung angemessener Kompensationsmechanismen bietet sich die Chance, das Schadensrisiko für Anwohner zu begrenzen bzw. die Unternehmen haftbar zu machen.

Verschmutzung von Trinkwasser, Luft und Boden

Die Risiken sind minimal, sie sollten trotzdem durch Monitoring und weitere Studien gemanagt werden, um die ökologischen Chancen der Extraktionsmethode auch auf der sozialen Dimension zu sichern und Bedenken auszuräumen.

Infrastruktur

Die Regionen, vor allem die Salton Sea Region, können von der Infrastrukturentwicklung profitieren. Die Entwicklungen bedürfen einer unabhängigen Überwachung, um dem „Risk of broken promises“ entgegenzuwirken.

Arbeitsplätze

Die Entstehung von Arbeitsplätzen für Anwohner sowie Möglichkeiten zur Aus- und Weiterbildung ist vor allem für die Salton Sea Region eine große Chance. Ein Monitoring zur Einhaltung der Vorhaben würde dem „Risk of broken promises“ entgegenwirken.

Environmental Justice

Eine lokale Lithiumindustrie würde Umwelteinflüsse und damit zusammenhängende soziale Auswirkungen und Risiken, bspw. durch kritische Abfälle oder Grundwasserverunreinigung, direkt vor Ort spürbar machen. Die Verteilung der Nutzen und Lasten der Li-Produktion wären ausgeglichener. Die Salton Sea Region beheimatet strukturell weniger begünstigte Personengruppen. Umweltgerechtigkeit ist nur dann voll gegeben, wenn die Anwohner transparent an den Entscheidungen für oder gegen die lokale Produktion beteiligt werden und vor Ort keine Ungerechtigkeiten entstehen. Der nach SB 125 festgelegte finanzielle Rückfluss der Steuermittel muss überwacht werden.

**Gesamtbewertung soziale Dimension
(Mittelwert Ergebnisse Technikfolgenabschätzung & Interviews)**

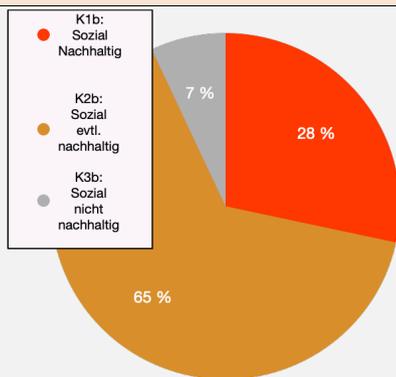
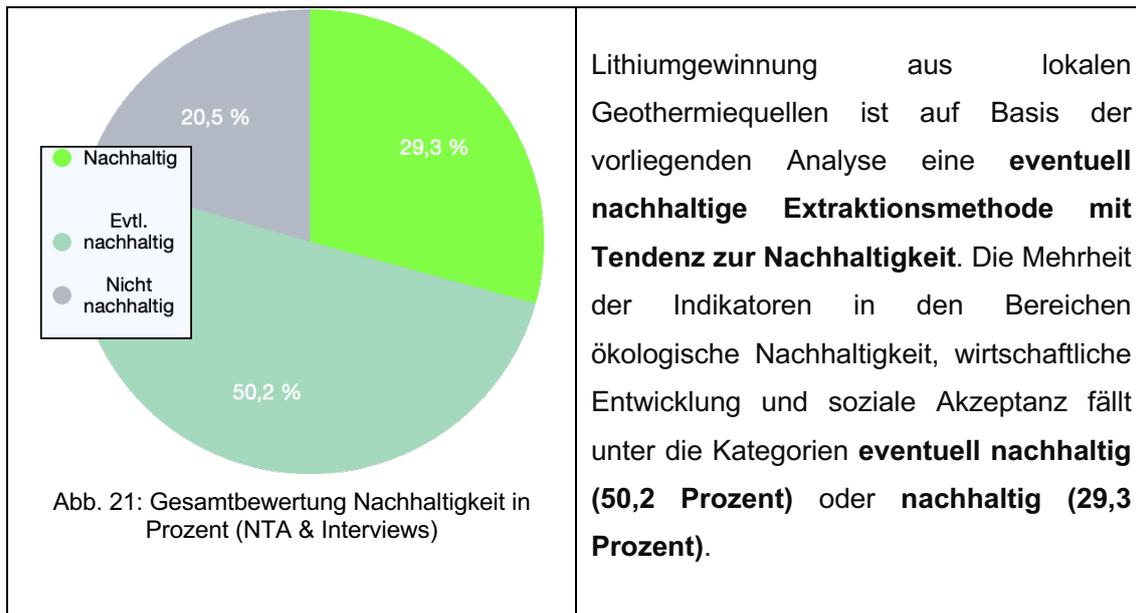


Abb. 20: Bewertung soziale Nachhaltigkeit in Prozent (Mittelwert NTA & Interviews)

Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen kann auf Basis der untersuchten Studien und Experteninterviews sozial nachhaltig sein. Zeichen für starke Partizipation sind vorhanden, es bestehen aber noch immer Zweifel seitens der Zivilgesellschaft und ein flächendeckendes Monitoring der Durchführung sozialer Maßnahmen ist noch nicht vorhanden. Die Methode ist eventuell sozial (65 Prozent) nachhaltig mit Tendenz zu sozial nachhaltig (28 Prozent).

Gesamtbewertung Nachhaltigkeit der Lithiumextraktion aus Geothermiequellen



Die Chancen der Reduktion von Treibhausgasen und lokaler Wertschöpfung sind signifikant, müssen jedoch gegen potenzielle Risiken wie Seismizität, Fündigkeit, mangelnde Skalierbarkeit, Umweltverschmutzung und Widerstand aus der Zivilbevölkerung abgewogen werden.

Die aktuell größte Herausforderung ist der geringe Erfahrungswert, da es noch keine Langzeitstudien gibt. Erst mit der Zeit wird sich zeigen, ob sich die Prognosen aus Wissenschaft und Wirtschaft zur Fündigkeit, Skalierbarkeit und zum Langzeitverhalten der Quellen bewahrheiten und ob die Zivilgesellschaft dem Verfahren gegenüber mehr Vertrauen aufbaut.

9. Limitationen

Die wohl größte Limitation dieser Arbeit ergibt sich daraus, dass das Forschungsfeld noch neu ist. Die Kombination der vorhandenen Studien aus Deutschland und den USA mit Experteninterviews aus Deutschland, den USA und Australien (Triangulation) soll die Erkenntnisdichte erhöhen (vgl. Stockmann, Meyer 2017 : 84). Aufgrund der limitierten Anzahl an Studien und Experten ergeben sich allerdings weitere Limitationen:

Einige der Experten haben an den untersuchten Studien mitgewirkt. Dies brachte auch Vorteile: Durch entsprechende Nachfragen war es möglich, „*einzelne, besonders*

interessierende Themenschwerpunkte zu vertiefen und hierzu wertvolle Detailkenntnisse zu erlangen.“, (Stockmann, Meyer 2017 : 84).

Die Durchführung und vor allem die Auswertung von Interviews beanspruchen viel Zeit. Deshalb war die Anzahl der Experten von Beginn an auf zehn Personen limitiert, wovon am Ende sieben einem Interview zugestimmt haben. Die geringe Anzahl von sieben Experten ist nur eine Stichprobe und kann das Risiko der Darstellung selektiver, subjektiver Einzelmeinungen erhöhen und das Ergebnis vereinfachen oder verzerren. Dem wurde durch die Anwendung eines semistrukturierten Interviewleitfadens und der Befragung unterschiedlicher Akteursgruppen (Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, Zivilgesellschaft) bestmöglich entgegengewirkt.

Eine weitere Limitation ergab sich durch die limitierte Länge der Arbeit von maximal 70 Seiten. Eine detaillierte Beleuchtung aller Themen war aus diesem Grund nicht, bzw. oft nur vereinfacht, möglich. Zudem sind die Entwicklungen, beispielsweise in den Bereichen Partizipation oder Gesetzgebung, schnelllebig und nicht immer komplett einsehbar.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nur eine Momentaufnahme in einem sich dynamisch entwickelnden Forschungsfeld. Sie können daher nur ein Beitrag zum fortlaufenden Diskurs sein. Zwar stärkt die Triangulation das Forschungsergebnis. Aufgrund der Limitationen bedarf es aber einer kontinuierlichen Forschung, um die Nachhaltigkeit der Extraktionsmethode langfristig zu bewerten.

10. Handlungsempfehlung

Da es sich bei Lithiumextraktion aus Geothermiequellen auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit um eine eventuell nachhaltige Extraktionsmethode mit der Tendenz zu nachhaltig handelt, sollten vor allem die Bereiche der ökonomischen und der ökologischen Nachhaltigkeit, in denen die Methode zu jeweils über 6 Prozent als nicht nachhaltig gilt, gestärkt werden. Das würde sich letztlich auch positiv auf die soziale Dimension auswirken. Hieraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen für die jeweiligen Akteursgruppen. Diese können auch für die Gewinnung anderer Rohstoffe Anwendung finden:

Politik:

Die Politik sollte (weiterhin) aktiv transparente Partizipationsverfahren wie die Blue Ribbon Commission und das Mediationsverfahren Tiefe Geothermie Vorderpfalz und deren Weiterführung fördern. Das langfristige Ziel ist die Einbindung aller Akteure in den Planungs- und Entscheidungsprozess, um die teilweise verhärteten Fronten, wie sie beispielsweise zwischen den Bürgerinitiativen und der Wirtschaft bestehen, aufzubrechen. Wichtig hierfür sind ein kontinuierliches Monitoring sowie die Evaluation der Umsetzung von Maßnahmen durch eine unabhängige Institution und die offene Kommunikation der Ergebnisse, um dem „Risk of broken promises“ entgegenzuwirken.

Eine Anpassung von Gesetzgebungen zur Optimierung von Partizipation und Umweltschutz sowie zum Rückfluss von Steuergeldern als Investitionen in die abbauende Region könnte Umweltgerechtigkeit / Environmental Justice stärken.

Der nationale und internationale wissenschaftliche Diskurs sollte weiterhin gefördert werden, um stets die neusten Erkenntnisse im Bereich der nachhaltigen Rohstoffextraktion widerzuspiegeln.

Die zuverlässige Implementierung von Haftungskonzepten würde die Anwohner im Schadensfall fair entschädigen und auch Schäden für die Umwelt abdecken. Das würde das Vertrauen der Öffentlichkeit in Unternehmen als zuverlässige Corporate Citizens stärken.

Wirtschaft:

Ein kontinuierliches Engagement der Unternehmen zur Prozess- und Technologieoptimierung, unter anderem in den Bereichen Wasserverbrauch, Abfallmanagement, der Reduzierung von Emissionen und Minimierung des Erdbebenrisikos kann die Nachhaltigkeit in allen drei Dimensionen verbessern. Eine Social Life Cycle Analyse (S-LCA) zur Bewertung der sozioökonomischen und sozialen Auswirkungen der Extraktionsmethode könnte zur internen Nachhaltigkeitsbewertung und Prozessoptimierung beitragen. Zur weiteren Stärkung des Vertrauens könnten Unternehmen in Eigeninitiative mit lokalen Interessengruppen und Organisationen zusammenarbeiten, um die Belange der Gemeinschaft in die Firmenpolitik zu integrieren.

Wissenschaft:

Die Durchführung und Weiterführung umfassender und interdisziplinärer Studien zur Nachhaltigkeit des Extraktionsverfahrens und anderer Rohstoffgewinnungsverfahren können und werden künftig mehr Aufschluss über deren Nachhaltigkeit liefern. Die Wissenschaft hat auf Basis regelmäßig neu erlangter Kenntnisse die Möglichkeit, derzeitige Extraktionsverfahren zu optimieren und nachhaltigere Gewinnungsstrategien zu entwickeln. Sie kann zudem auch neue Technologien wie die Natrium-Ionen-Batterie entwickeln, die künftig ohne Lithium oder andere kritische Rohstoffe auskommen.

Zivilgesellschaft:

Die Zivilgesellschaft kann durch kontinuierliche Beteiligung an öffentlichen Versammlungen und Bürgerbeteiligungsveranstaltungen auf die eigenen Bedürfnisse und die der Gemeinschaft aufmerksam machen. Ein offener und nüchterner Austausch mit Stakeholdern aus der Politik, der Wissenschaft und der Wirtschaft kann dabei helfen, mehr Verständnis für die eigenen Bedenken zu erhalten und umgekehrt ein breiteres Verständnis für die anderen Stakeholder zu erzielen. Auf diese Weise könnten Lösungen und Kompromisse gefunden werden.

Fazit:

Wenn es um den privaten Besitz und Wohnraum sowie die eigene Gesundheit und die Gesundheit der Familie geht, können sich Diskussionen emotional aufladen und Fronten verhärten. Um dem entgegenzuwirken sind alle Akteursgruppen gleichermaßen gefragt, sich immer wieder aufs Neue mit Respekt, gegenseitigem Verständnis, Geduld und Nüchternheit zu begegnen, um am Ende die bestmögliche Lösung für alle zu finden.

Es ist schwierig, aber nicht unmöglich, verlorenes Vertrauen wieder zu gewinnen. Rational betrachtet ist eine Ablehnung einer Geothermieanlage in unmittelbarer Nähe des Eigenheims nicht unverständlich, bedenkt man potenziellen Lärm, Schäden durch Seismizität oder Schäden an der Umwelt, selbst wenn die Wahrscheinlichkeit dafür noch so klein ist. Rational betrachtet ist aber auch das wirtschaftliche Bestreben verständlich, eine potenziell zugleich rentable und nachhaltige Technologie zu etablieren und dabei mehr Wohlstand durch die Ansiedlung weiterer Industriezweige zu schaffen. Vor allem die Politik und die Wissenschaft können hier eine Brücke bauen. Die Wissenschaft kann die geeigneten Argumente für oder gegen eine neue Technologie liefern. Die Politik kann die Rahmenbedingungen für eine Förderung der nachhaltigsten neuen Technologien schaffen, Subventionen kürzen, Strafzahlungen im Falle von Umweltschäden fordern

oder schlichtweg Projekte stoppen, falls Bedingungen nicht erfüllt sind. Sie kann zudem den Dialog vorantreiben und so bestmögliche Rahmenbedingungen für alle Akteursgruppen schaffen.

11. Schlussbetrachtung und Ausblick

Eine abschließende Feststellung, ob es sich bei der Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen um eine nachhaltige Gewinnungsmethode handelt, ist nicht möglich, da noch nicht ausreichend wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungswerte vorliegen. Es sprechen viele Argumente für die Nachhaltigkeit der Methode:

„...wenn sie die CO2 Emissionen reduzieren, wenn das Thema Wasserverbrauch dort im Vergleich zu den beiden etablierten Prozessen deutlich niedriger ist, wenn dieser DLE-Prozess langzeitstabil funktioniert und das Produkt, was produziert wird, eine Qualität hat, die Sie in der Batterieindustrie verwenden können, Sie eine lokale Wertschöpfung in der Region haben, das Produkt also nicht einfach exportieren und die Zivilgesellschaft mitnehmen können und keine induzierte Seismik haben, dann wäre das eine nachhaltigere Gewinnung.“, (Experte 1, Teams-Interview am 19. Februar 2024).

Trotzdem handelt es sich um einen Extraktionsprozess, der sich nicht rückgängig machen lässt.

„I think it's more sustainable than alternatives under most criteria that we might measure sustainability by. But obviously it's still an irreversible process of removing a resource from the underground.“, (Experte 2, Teams-Interview am 14. Februar 2024).

Vulcan Energy plant nach eigenen Angaben 2025 den Beginn der kommerziellen Produktion in der Lithiumanlage in Landau. Spätestens dann kann im Oberrheingraben eine Bilanz zum Erfolg und der Nachhaltigkeit der Extraktionsmethode gezogen werden.

Das Projekt UnLimited, an dem unter anderem die EnBW und das KIT beteiligt sind, wird erste Ergebnisse voraussichtlich im Herbst 2024 veröffentlichen

Nachdem Controlled Thermal Resources im Januar 2024 die Grundsteinlegung der Lithiumextraktionsanlage in der Salton Sea Region feierte, wird es hier noch eine Weile dauern, bis verlässliche Zahlen vorliegen. Dasselbe gilt für Berkshire Hathaway. Der Bau der Anlage des Unternehmens startet voraussichtlich auch 2024. Die NGOs Comité Civico del Valle und Earthworks haben im März 2024 eine Petition gegen das Projekt von Controlled Therma Resources eingelegt. Sie kritisieren eine unzulängliche

Umweltverträglichkeitsprüfung und mangelnde Konsultation der indigenen Stämme (vgl. Earthworks 2023).

Langzeiterfahrungen anderer Firmen und Projekte sind derzeit nicht bekannt.

Bis die ersten Ergebnisse aus der Wirtschaft vorliegen können nur die aktuellen Projekte und Prozesse weiterhin beobachtet und im laufenden Prozess auf ihre Nachhaltigkeit hin evaluiert werden.

12. Literatur

- Bogner, S.; Littig, B.; Menz, W. (2014): Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung. Wiesbaden: Springer VS.
- Bauer, M; Freeden, W., Jacobi, H.; Neu, T. (2014): Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Bracke, R (2014): Entwicklung der petrothermalen Nutzungen. In: Bauer, M; Freeden, W; Jacobi, H; Neu, T (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung, Heidelberg: Springer Spektrum, 245 – 278.
- Eggeling, L., Herr, K., Goldberg, V., Siefert, D., Köhler, J., Kölbel, T., Reith, S.: Schlussbericht zum Verbundprojekt ANEMONA. Anlagenmonitoring als Schlüsseltechnologie für den erfolgreichen Betrieb von Geothermiekraftwerken in Deutschland. Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover (2018)
- Hennicke, Peter; Bodach, Susanne; Samadi, Sascha (2020): Nachhaltige Energieversorgung. Studienbrief EZ0810 des Studiengangs Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit der RPTU. 3. Auflage, Kaiserslautern.
- Hennicke, Peter.; Fishedick, Manfred. (2007): Erneuerbare Energien. München: Beck.
- Kersting, Norbert; Roth, Roland (2018): Tiefe Geothermie – Proteste statt Beteiligung. In: Holstenkamp, Lars; Radtke, Jörg (Hrsg.): Handbuch Energiewende und Partizipation, Wiesbaden: Springer VS, 1147 – 1164.
- Kunze, Conrad, Pfeiffer Mareen (2018): Tiefe Geothermie – Proteste statt Beteiligung. In: Holstenkamp, Lars; Radtke, Jörg (Hrsg.): Handbuch Energiewende und Partizipation, Wiesbaden: Springer VS, 665 – 682.
- Goldberg, Valentin; Dashti, Ali; Egert, Robert; Benny, Binil; Kohl, Thomas; Nitschke, Fabian (2023), Challenges and Opportunities for Lithium Extraction from Geothermal Systems in Germany – Part 3: The Return of the Extraction Brine, In: Energies (2023), Vol. 16.
- Goldberg, Valentin; Kluge, Tobias; Nitschke, Fabian (2022), Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 1: Literaturvergleich bestehender Extraktionstechnologien, In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2022), Vol. 27, 239 – 259.
- Goldberg, Valentin; Nitschke, Fabian; Kluge, Tobias (2022), Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 2: Potenziale und Produktionsszenarien in Deutschland, In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2022), Vol. 27, 261 – 275.
- Mai, Manfred (2018): Die Energiewende als Herausforderung der Zivilgesellschaft. In: Holstenkamp, Lars; Radtke, Jörg (Hrsg.): Handbuch Energiewende und Partizipation, Wiesbaden: Springer VS, 227 – 242.
- Mayring, Philipp (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 13. überarb. Auflage, Weinheim: Beltz.

Paz, S., Kelley, R.-C., Castaneda, S., Colwell, R., Dolega, R., Flores, M., Hanks, J., Lopez, A., Olmedo, L., Reynolds, A., Ruiz, F., Scott, M., Soto, T., & Weisgall, J. (2022). Report of the Blue Ribbon Commission on Lithium Extraction in California (CEC-300-2022-009-F). California Energy Commission.

Sankar, Tapan Kumar; Abhilash, Meshram, Pratima (2023) : Environmental Impact Assessment in the Entire Life Cycle of Lithium-Ion Batteries. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (2024) 262:5, Springer Nature Switzerland AG 2023.

Schmidt, M. (2017): Rohstoffrisikobewertung – Lithium. – DERA Rohstoffinformationen 33: Berlin.

Stober, Ingrid; Bucher, Kurt (2020): Geothermie. 3. Auflage, Freiburg: Springer Spektrum.

Stockmann, Reinhard; Meyer, Wolfgang (2017): Evaluation von Nachhaltigkeit. Studienbrief EZ1020 des Studiengangs der Nachhaltigen Entwicklungszusammenarbeit an der Rheinland-Pfälzisch Technischen Universität Kaiserslautern-Landau.

Voigt, Wolfgang (2014): Lithiumgewinnung aus Primärrohstoffen – Stand und Perspektiven, In: Kausch, Peter; Bertau, Martin; Gutzmer, Jens; Matschullat, Jörg (Hrsg.): Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge, Springer Spektrum, 75 – 92.

Vulcan Energy (2023). Haftpflicht: Absicherung und Kommunikation. Bausteine für ein Haftpflichtkonzept der Vulcan Energy Ressourcen GmbH für ihre Geothermievorhaben. (Das Dokument ist nicht öffentlich zugänglich. Es lag zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit vor mit der Bitte seitens Vulcan Energy um vertrauliche Behandlung).

Walker, Gordon (2012): Environmental Justice. Concepts, Evidence and Politics. Abingdon. Routledge.

Internetquellen:

Zum 10. April 2024 waren alle Internetquellen in der zitierten Form einsehbar.

AMG Lithium GmbH (2022), (URL: <https://amglithium.com/de/unternehmen/news/translate-to-deutsch-groundbreaking-ceremony-for-europes-first-lithium-hydroxide-refinery-in-bitterfeld-wolfen>).

Baisch, Stefan et al. / Traditional Seismic Risk Analysis Expert Group (SERIANEX Group) (2009), Deep Heat Mining Basel – Seismische Risikoanalyse, (URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22128030>).

Bürgerinitiative Geothermie Landau e.V., (URL: <https://www.geothermie-landau.de/index.html>)

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023), Erneuerbare Energien, (URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>).
- Bundesregierung (2023), Kanzler bei Geothermie-Projekt in Bayern, „Ich freue mich über den Pioniergeist“, (URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/zukunftstechnologie-geothermie-2216006>.)
- Bundesregierung (2021), Mehr Fortschritt wagen, Koalitionsvertrag der Bundesregierung 2021 – 2025, (URL: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf)
- Bundesverband Geothermie (2020), Geothermie in Zahlen, (URL: <https://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen>).
- Daily Metal Price, Metal Spot Prices Charts, Lithium Price, (URL: <https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=li&u=kg&d=240>).
- DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. DERA Themenheft 01/21. (URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=873ECF5BDEF1AFEB1EC40CC4500C9723.internet012?_blob=publicationFile&v=6)
- Deutscher Naturschutzring, Geothermie in Landau – Fallstudie im Rahmen des DNR-Projektes „Umweltschutz und Ressourcenschutz und Reform des Bundesberggesetzes“, (URL: https://www.dnr.de/sites/default/files/Publikationen/Themenhefte/16_05_R2-0_Fallstudie-Geothermie-Landau.pdf).
- Dickson, M.H. & Fanelli, M. (2004): What is Geothermal Energy?, Geocom, (URL: https://geocom.geonardo.com/assets/elearning/1.2.Geothermal_energy_enMeruDickson.pdf).
- Dobson, William et al., Characterizing the Geothermal Lithium Resources at the Salton Sea. A Project Report to the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Geothermal Technologies Office, Submitted by Lawrence Berkeley National Laboratory, November 2023, (URL: <https://escholarship.org/uc/item/4x8868mf>).
- Earthworks (2023), Landmark Legal Challenge to Imperial Valley Lithium Project, (URL: <https://earthworks.org/releases/community-environmental-groups-issue-landmark-legal-challenge-to-imperial-valley-lithium-project/>).
- Europäische Investitionsbank (2024), Zero Carbon Lithium, (URL: <https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20200749>)
- Ewen, Christoph / Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (2014), Broschüre Tiefe Geothermie Vorderpfalz, (URL: https://mwvlw.rlp.de/fileadmin/08/Abteilung_2/8203/Meditation_Tiefe_Geothermie_Vorderpfalz_Verhandlungsphase/Broschuere_Tiefe_Geothermie_Vorderpfalz.pdf).

- Fraunhofer-Gesellschaft / Helmholtz-Gemeinschaft, Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland, Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende, Strategiepapier, (URL: <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf>).
- Mediation Geothermie-Forum (2014), Protokoll zur 7. Sitzung des Geothermie-Forums Vorderpfalz (GF) (URL: [https://mwvlw.rlp.de/fileadmin/08/Abteilung_2/8203/Mediation_Geothermie-Forum/7. Sitzung Protokoll.pdf](https://mwvlw.rlp.de/fileadmin/08/Abteilung_2/8203/Mediation_Geothermie-Forum/7._Sitzung_Protokoll.pdf)).
- J. Dunn, M. Slattery, A. Kendall, H. Ambrose, S. Shen, Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles, Environ. Sci. Technol. (2021), (URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.0c07030>).
- K. Hund, D. La Porta, T.P. Fabregas, T. Laing, J. Drexhage (2020), Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition, World Bank, 2020, (URL: <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>.)
- Landesregierung Rheinland-Pfalz, Rohstoffdialog, Mediationsverfahren (URL: <https://mwvlw.rlp.de/themen/wirtschaftszweige/rohstoffwirtschaft-geologie/buergerdialog>)
- Landesregierung Rheinland-Pfalz (2013), Ergebnisse der Mediation Tiefe Geothermie Vorderpfalz, (URL: https://mwvlw.rlp.de/fileadmin/08/Abteilung_2/8203/Mediation_Tiefe_Geothermie_Vorderpfalz_Verhandlungsphase/Abschlussvereinbarung_vom_21.05.2013.pdf)
- Landesregierung Rheinland Pfalz (2022), Beitrittserklärung Ergebnisse Mediation der Vulcan Energy Ressourcen GmbH, (URL: https://mwvlw.rlp.de/fileadmin/08/Abteilung_2/8203/Mediation_Tiefe_Geothermie_Vorderpfalz_Verhandlungsphase/Vulcan_Energie_Ressourcen_GmbH_Beitrittserklaerung_Ergebnisse_Mediation_Tiefe_Geothermie_Vorderpfalz_02.02.2022.pdf).
- Landtag Rheinland-Pfalz (2016), Antwort des Ministeriums für Wirtschaft, Landwirtschaft und Weinbau auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Christine Schneider und Martin Brandl (CDU) – Drucksache 17/1121 – Geothermie-Forum Vorderpfalz, (URL: <https://dokumente.landtag.rlp.de/landtag/drucksachen/1379-17.pdf>).
- Lehmann, Markus (2022) / Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Strategie zum Umgang mit Wassermangel in Baden-Württemberg, Erfordernisse zur Verringerung von Risiken und Nutzungskonflikten bei Niedrigwasser und abnehmenden Grundwasserreserven, (URL: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Wassermangel-Strategie-barrierefrei.pdf)
- Liu, Yubo; Baozhong, Ma; Lü, Yingwei; Wang, Chengyan; Chen, Yongqiang, A review of lithium extraction from natural sources, In: International Journal of Minerals,

Metallurgy and Materials, 209 – 224, (URL: <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2544-y>).

Stadt Landau in der Pfalz (2023), Stadtverwaltung, Geothermie, (URL: <https://www.landau.de/Verwaltung-Politik/%C3%96ffentliche-Informationen/Geothermie/>).

Stringfellow, William; Dobson, Patrick, Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines, In: Energies (2021), Vol. 14 (URL: <https://doi.org/10.3390/en14206805>).

The White House. (2022). *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Driving U.S. Battery Manufacturing and Good-Paying Jobs*. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/10/19/fact-sheet-biden-harris-administration-driving-u-s-battery-manufacturing-and-good-paying-jobs/>

T. Riofrancos, A. Kendall, K. Dayemo, M. Haugen, B. Hasan, K. McDonald, Achieving zero emissions with more mobility and less mining. Climate and community project, (URL: https://www.climateandcommunity.org/_files/ugd/d6378b_b03de6e6b0e14eb0a2f6b608abe9f93d.pdf), Januar 2023.

Schmidt, Michael / DERA (2023): Rohstoffrisikobewertung – Lithium, DERA Rohstoffinformation 54, (URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-54.pdf?blob=publicationFile&v=4).

Stadt Landau (2023), Geothermie, (URL: <https://www.landau.de/Verwaltung-Politik/%C3%96ffentliche-Informationen/Geothermie/>).

SWR aktuell (2023), Trotz Widerstands: Stadt Landau will voll auf Geothermie setzen, (URL: <https://www.tagesschau.de/inland/regional/rheinlandpfalz/swr-stadt-landau-will-komplett-auf-geothermie-setzen-100.html>).

SWR aktuell (2024), So forschen Ulmer Wissenschaftler an umweltfreundlichen Batterien für E-Autos, (URL: <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/ulm/grundlagenforschung-ulm-umweltfreundliche-batterien-elektroautos-100.html>).

Umweltbundesamt (2022), Bergrecht, Entwicklung und Herausforderung aus Sicht des Umwelt- und Ressourcenschutzes (URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltrecht/umweltschutz-im-fachrecht/bergrecht#gesetzessystematik-und-anknuepfungspunkte-fur-umwelt-und-ressourcenschutz>).

Umweltbundesamt (2024), Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme, (URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeerzeugung-aus-erneuerbaren-energien>).

Umweltbundesamt Österreich / Fritz, David; Heinfellner, Holger; Lambert, Stefan (2023): Rohstoffe der Elektromobilität – Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und

möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen, (URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0850.pdf>).

United States Department of Energy (2024), Celebrating Another Breakthrough in Domestic Lithium Production, (URL: <https://www.energy.gov/eere/articles/celebrating-another-breakthrough-domestic-lithium-production>).

United States Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2023), (URL: <https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-analysis-confirms-californias-salton-sea-region-be-rich-domestic>).

Vera, María; Torres, Walter; Galli, Claudia; Changes, Alexandre; Flexer, Victoria, (2023) Environmental impact of direct lithium extraction from brines, in: nature reviews earth & environment, Vol. 4, SS.149 – 165, (URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>).

Vulcan Energy (2023), Vulcan eröffnet Lithiumextraktionsoptimierungsanlage (2023), (URL: <https://v-er.eu/de/vulcan-eroeffnet-lithiumextraktionsoptimierungsanlage/>).

Vulcan Energy (2024), Vulcans Lithiumextraktionsoptimierungsanlage produziert Europas erstes grünes Lithiumchlorid, (URL: <https://v-er.eu/de/blog/2024/04/10/vulcans-lithiumextraktionsoptimierungsanlage-produziert-europas-erstes-gruenes-lithiumchlorid/>).

Vulcan Energy, A growing wave of sustainable lithium supply: adsorption-type direct lithium extraction (DLE), Power Point presentation, (URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/8798fbf1-90a.pdf>).

Vulcan Energy, Das Zero Carbon Lithium Projekt, Phase Eins, (URL: <https://v-er.eu/de/projektphase-eins/#:~:text=Vulcan's%20Phase%20One%20is%20targeting,European%20green%20lithium%20supply%20chain.>)

13. Anhang

Abbildungen:

Abb. 3: Projektliste Tiefe Geothermie

Sortierung: Bundesland

Stand: Februar 2023
Quelle (für Projekte in Betrieb): geotis.de



Tiefe Geothermieprojekte in Deutschland Projekte in Betrieb

Name	Bundesland	Art der Nutzung	MWtherm	MWel	max. Temp. (°C)	Teufe (m)	Förderrate (l/s)	Jahr d. Inbetriebnahme
Bruchsal	Baden-Württemberg	Hydrogeothermie	1	0,5	131	2542	31	2009
Pfullendorf	Baden-Württemberg	Hydrogeothermie			75	1530	25	2020
Weinheim	Baden-Württemberg	Hydrogeothermie	1		65	1150	10	2005
Aschheim, Feldkirchen, Kirchheim	Bayern	Hydrogeothermie	12		87	2630	85	2009
Dürnhhaar	Bayern	Hydrogeothermie		5,5	141	3926	133	2012
Erding	Bayern	Hydrogeothermie	10		65	2359	48	1998
Garching a.d. Alz	Bayern	Hydrogeothermie	7	4,9	123	3837	105	2021
Garching bei München	Bayern	Hydrogeothermie	8		75	2226	100	2011
Holzkirchen	Bayern	Hydrogeothermie	24	3,6	157	5078	60	2018
Ismaning	Bayern	Hydrogeothermie	7		78	1906	85	2013
Kirchstockach	Bayern	Hydrogeothermie	12	5,5	141	3882	141	2013
Kirchweidach	Bayern	Hydrogeothermie	31	0,7	127	3421	80	2013
München-Freiham	Bayern	Hydrogeothermie	13		92	2518	121	2016
München-Riem	Bayern	Hydrogeothermie	13		98	2747	87	2004
München-Sendling	Bayern	Hydrogeothermie	50		107	2809	115	2021
Oberhaching-Laufzorn / Grünwald	Bayern	Hydrogeothermie	40	4,3	135	3755	132	2011
Poing	Bayern	Hydrogeothermie	9		85	3014	100	2012
Pullach	Bayern	Hydrogeothermie	17		106	3443	93	2005
Sauerlach	Bayern	Hydrogeothermie	4	5,0	140	4480	110	2014
Simbach-Braunau	Bayern	Hydrogeothermie	9		82	1942	90	2001
Straubing	Bayern	Hydrogeothermie	2		37	825	31	1999
Taufkirchen/Oberhaching	Bayern	Hydrogeothermie	40	4,3	136	3696	120	2013
Traunreut	Bayern	Hydrogeothermie	12	5,5	120	4646	169	2014
Unterföhring	Bayern	Hydrogeothermie	10		87	2124	75	2009
Unterföhring (2. Dublette)	Bayern	Hydrogeothermie	11		93	2341	90	2014
Unterhaching	Bayern	Hydrogeothermie	38		124	3350	140	2007
Unterschleißheim	Bayern	Hydrogeothermie	8		80	1960	93	2003
Waldkraiburg	Bayern	Hydrogeothermie	14		112	2718	80	2012
Berlin (Reichstag)	Berlin	Aquiferspeicher			70	300	28	1999
Neuruppin	Brandenburg	Hydrogeothermie	1		63	1702	4	2007
Heubach/Groß-Umstadt	Hessen	Sonde	0,09		37	773	5	2012
Neubrandenburg	Mecklenburg-Vorpommern	Hydrogeothermie / Aquiferspeicher			80	1268	28	1987
Neustadt Glewe	Mecklenburg-Vorpommern	Hydrogeothermie	4		99	2450	35	1994
Waren	Mecklenburg-Vorpommern	Hydrogeothermie	1		63	1565	17	1984
Arnsberg	Nordrhein-Westfalen	Sonde	0,35		90	2835	20	2012
Bochum Werne / Zeche Robert Müser	Nordrhein-Westfalen	Grubenwasser	0,40		20	570	32	2012
Essen	Nordrhein-Westfalen	Grubenwasser	1		35	1200	bis 300	2010
Marl	Nordrhein-Westfalen	Sonde	0,06		20	700		2010

Quelle: Bundesverband Geothermie (2023), Tiefe Geothermie in Deutschland, (URL: [https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Projektliste Tiefe Geothermie 2023 intern Stand Februar 20230228.pdf](https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Projektliste_Tiefe_Geothermie_2023_intern_Stand_Februar_20230228.pdf))

Abb. 10: Übersicht Expertenauswahl (vgl. Kap. 6.2):

Übersicht Expertenauswahl

Interviewpartner aus Wissenschaft und Forschung:

1. Experte 1, Vertreter einer Institution für Rohstoffforschung
2. Experte 2, Professor einer US-amerikanischen Universität mit Forschungshintergrund zum Thema dieser Abschlussarbeit
3. Experte 3, Doktorand einer US-amerikanischen Universität mit Forschungsschwerpunkt zum Thema dieser Abschlussarbeit
4. Experte 5, Doktorand einer deutschen Universität mit Forschungsschwerpunkt zum Thema dieser Abschlussarbeit

Interviewpartner aus der Zivilgesellschaft:

5. Experte 4, Vertreter einer Bürgerinitiative gegen Geothermie

<p><u>Interviewpartner aus der Wirtschaft:</u></p> <p>6. Experte 6, Vertreter Vulcan Energy</p> <p><u>Interviewpartner aus der Politik:</u></p> <p>7. Experte 7, Vertreter der Stadt Landau</p>

Tabellen:

Tab. 1a Verfahren zur Kategorienbildung nach Mayring (vgl. Mayring 2022, S. 101)

Herleitung der Frage (Studie, Artikel etc.)	Kategorie	Definition der Kategorie	Ankerbeispiel (Zitat)	Kodierregeln
Goldberg, Nitsche, Kluge 2022 : 272	K1a: Ökologisch nachhaltig	Ausdruck von Gewissheit und Überzeugung, dass die Fördermethode ökologisch nachhaltig ist.	„Grundwasserspiegel-Absenkung halte ich für unwahrscheinlich, denn wir reden von, zweieinhalb, 3.000 Metern Teufe. Trinkwasserleiter liegen deutlich darüber. Zumal das Wasser ja auch wieder in das Reservoir zurückgeführt werden soll.“, (Experte 1: xviii)	Die Aussagen lassen klar auf ökologische Nachhaltigkeit schließen
Paz et al : 26	K2a: Ökologisch evtl. nachhaltig	Ausdruck, dass die Methode ökologisch nachhaltig sein kann / evtl. nachhaltig ist.	„...in terms of the environmental impacts, if the lithium is extracted more gradually, obviously it will last longer and have a more minimal impact on the water use and waste generation.“ (Experte 3 : xli)	Die Aussagen lassen auf eine mögliche ökologische Nachhaltigkeit schließen
Dobson et al : 81	K3a: Ökologisch nicht nachhaltig	Keine oder keine klare Aussage, dass die Methode ökologisch nachhaltig ist.	„Die Geothermie wird immer so positiv dargestellt und die CO2-Bilanz ist eben nicht so positiv oder sie ist wesentlich schlechter als sie dargestellt wird“ (Experte 4: lix)	Die Aussagen lassen auf mangelnde ökologische Nachhaltigkeit schließen
Kunze, Pfeiffer 2018 : 670	K1b: Sozial nachhaltig	Ausdruck von Gewissheit und Überzeugung, dass die Fördermethode sozial nachhaltig ist.	„I 100 % know that we have compensation insurance for, for any sort of damage that we might cause to someone else's property.“ (Experte 6 : xc)	Die Aussagen lassen klar auf soziale Nachhaltigkeit schließen
Dobson et al. 2023 : 179	K2b: Sozial evtl. nachhaltig	Ausdruck, dass die Methode sozial nachhaltig	„Das heißt, man kommt auf einen Gesamtschaden von	Die Aussagen lassen auf eine mögliche soziale

		sein kann / evtl. nachhaltig ist.	3,5 Millionen...was ja mit einer Versicherung abgedeckt werden könnte.“ (Experte 5 : lxxv)	Nachhaltigkeit schließen
Bundesberggesetz (BbergG)	K3b: Sozial nicht nachhaltig	Keine oder keine klare Aussage, dass die Methode ökologisch nachhaltig ist.	„...das sind Schäden von 10.000, 20.000. Und ja, es wird halt nicht erstattet oder nur zehn Prozent.“ (Experte 4: lxxv)	Die Aussagen lassen auf mangelnde soziale Nachhaltigkeit schließen
Goldberg et al. 2023 : 2	K1c: Ökonomisch nachhaltig	Ausdruck von Gewissheit und Überzeugung, dass die Fördermethode ökonomisch nachhaltig ist.	„...ökonomisch wird es insofern nicht nur für die Firma, sondern auch für uns sinnvoll sein, dass wir nicht mehr auf dem Spotmarkt oder auf dem Terminmarkt volatil Gas oder Erdöl kaufen müssen...“. (Experte 7 : ci)	Die Aussagen lassen klar auf ökonomische Nachhaltigkeit schließen
Bracke 2014 : 533	K2c: Ökonomisch evtl. nachhaltig	Ausdruck, dass die Methode ökonomisch nachhaltig sein kann / evtl. nachhaltig ist.	„Also man hat natürlich noch einen Rest, ein geringes Risiko der Skalierbarkeit.“ (Experte 5 : lxxviii)	Die Aussagen lassen auf eine mögliche ökonomische Nachhaltigkeit schließen
Kunze, Pfeiffer 2018 : 673	K3c: Ökonomisch nicht nachhaltig	Keine oder keine klare Aussage, dass die Methode ökonomisch nachhaltig ist.	„Die Lithium-Extraktion konnte bisher auch nach Jahren der Forschung im industriellen Maßstab noch nicht realisiert werden...“ (Experte 4 : lv)	Die Aussagen lassen auf mangelnde ökonomische Nachhaltigkeit schließen

Anlage 1: Interviewleitfaden

Interviewleitfaden deutsch (anonymisiert):

Art der Frage	Hauptfragen	Befragte Person (Hauptfrage)	Eventuelle Rückfragen (nur bei Bedarf)	Befragte Person (Rückfrage)
Einleitungsfrage	Wann und wie sind Sie mit dem Thema der Lithiumgewinnung aus Geothermie in Berührung gekommen?	Ale		
Alg. Nachhaltigkeit	Wie nachhaltig ist Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen aus Ihrer Perspektive?	Ale		
Alg. Nachhaltigkeit	Was sind die Vor- und Nachteile der Lithiumextraktion aus lokalen Geothermiequellen aus Ihrer Perspektive?	Ale		
Ökologische Nachhaltigkeit	Welche Chancen sehen Sie in Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Umweltverträglichkeit der Fördermethode im Vergleich zu Bergbau und Sole Umweltverträglichkeit der Extraktionsmethoden (Flüssig-Flüssig-Extraktion, selektive Extraktion durch anorganische Sorptionsmittel, elektrochemische Extraktion, Membrantechnologien) Senkung von CO2-Emissionen durch Extraktionsverfahren und lokale Quellen statt weite Wege <p>3b. Externalisierte Kosten 4. Beitrag an grünem Strom und grüner Wärme 4b. (Notiz f. evtl Rückfrage): Strom für Wärmepumpe muss auch grün sein</p>	anonymisiert anonymisiert anonymisiert anonymisiert
Ökologische Nachhaltigkeit	Welche Risiken sehen Sie in Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Auswirkungen auf Wasserqualität, Grundwasserspiegel (Verbrauch, Verschmutzung durch Blei, Arsen, Quecksilber, Scaling etc.) Umweltschäden durch induzierte Seismizität 	anonymisiert anonymisiert
Ökonomische Nachhaltigkeit	Welche Chancen sehen Sie in Bezug auf die ökonomische Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Wirtschaftlichkeit von Lithium aus lokalen Geothermiequellen Stabilisierung Rohstoffmarkt. Lösung für die Lithiumknappheit in der Industrie (trotz Lithium aus Geothermie) Standortaufwertung, Jobs, andere Industrien und Gewerbe Wirtschaftliches Extraktionsverfahren Lithium aus Geothermie 	anonymisiert anonymisiert anonymisiert anonymisiert anonymisiert
Ökonomische Nachhaltigkeit	Welche Risiken sehen Sie in Bezug auf die ökonomische Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Förderbare lokale Lithiummenge (Verhältnis zum Weltmarkt) Skalierung / Wirtschaftliche Risiken Kosten durch Seismizität 	anonymisiert anonymisiert anonymisiert
Soziale Nachhaltigkeit	Welche Chancen sehen Sie in Bezug auf die soziale Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Sicherstellung Wärme- und Stromversorgung, günstigere Preise? Partizipation: Rolle/Notwendigkeit/ Zufriedenheit mit Projekten/Akzeptanz Standortaufwertung Gesundheit – weniger Emissionen verringern Umwelt- und damit Gesundheitsprobleme im Ausland und vor Ort 	anonymisiert anonymisiert anonymisiert anonymisiert
Soziale Nachhaltigkeit	Welche Risiken sehen Sie in Bezug auf die soziale Nachhaltigkeit?	Ale	<p>Einschätzung zu:</p> <ol style="list-style-type: none"> Gesundheitliche Auswirkungen eventueller Umweltverunreinigungen wie Wasser verschmutzung (Arsen, Blei etc.) Seismizität: Verluste für Privathaushalte (finanziell und nicht monetär – physisch und psychisch) ggf. Statement zu Bergrecht (Lithium & Geothermie als bodentiefe Schätze) Externalisierte Kosten (CO2-Emissionen reduziert, aber Armutsanstieg in vorigen Produktions- oder Lieferländern) 	anonymisiert anonymisiert anonymisiert anonymisiert

Tabelle 3: Initialen / Personenbezeichnungen:
anonymisiert

Interviewleitfaden englisch (anonymisiert):

Type of question	Main Questions	Respondent (Main Question)	Follow-up Questions (if necessary)	Respondent (Follow-up Question)
Introductory Question	When and how did you first encounter the topic of lithium extraction from geothermal sources?	AI		
General Sustainability	From your perspective, how sustainable is lithium extraction from local geothermal sources?	AI		
General Sustainability	What are the advantages and disadvantages of lithium extraction from local geothermal sources from your perspective?	AI		
Ecological Sustainability	What opportunities do you see regarding ecological sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Environmental compatibility of the extraction method compared to mining and brine. 2. Environmental compatibility of extraction methods (liquid-liquid extraction, selective extraction by inorganic sorbents, electrochemical extraction, membrane technologies) 3. Reduction of CO2 emissions through extraction processes and local sources instead of long distances 3b. Externalized costs 4. Contribution to green electricity and green heat 4b. (Note for possible follow-up): Electricity for the heat pump must also be green.	anonymized anonymized anonymized anonymized anonymized anonymized
Ecological Sustainability	What risks do you see regarding ecological sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Impacts on water quality , groundwater levels (consumption, pollution by lead, arsenic, mercury, scaling, etc.) 2. Environmental damage due to induced seismicity	anonymized anonymized
Economical Sustainability	What opportunities do you see regarding economical sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Economic viability of lithium from local geothermal sources 2. Stabilization of the commodity market 3. Solution to lithium scarcity in the industry (despite lithium from geothermal sources) 4. Site upgrading : Jobs, other industries, and commerce 5. Most economical extraction method for lithium from geothermal sources	anonymized anonymized anonymized anonymized anonymized
Economical Sustainability	What risks do you see regarding economical sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Recoverable local lithium quantity in relation to the world market 2. Scaling / Economic risks 3. Costs due to seismicity	anonymized anonymized anonymized
Social Sustainability	What opportunities do you see regarding social sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Ensuring heat and power supply, lower prices? 2. Participation : Role/necessity/satisfaction with projects/acceptance 3. Site upgrading 4. Health – reducing emissions reduces environmental and thus health problems abroad and locally	anonymized anonymized anonymized anonymized
Social Sustainability	What risks do you see regarding social sustainability?	AI	Evaluation of: 1. Health effects of possible environmental contamination such as water pollution (arsenic, lead, etc.) 2. Seismicity : Losses for households (financial and non-monetary – physical and psychological) 2b. If applicable, statement on mining law (lithium & geothermal as ground-free treasures in Germany) 3. Externalized Costs (reduced CO2 emissions, but increase in poverty in previous production or delivery countries)	anonymized anonymized anonymized anonymized

Chatz 3: Initials / names: anonymized

Anlage 2: Anschreiben Anfrage Experteninterview

Anlage 3: Einverständniserklärung zum Interview (Muster)

Einverständniserklärung zum Interview

Thema der Masterarbeit: *Lithium aus lokalen Geothermiequellen – neues Extraktionsverfahren auf dem Nachhaltigkeitsprüfstand*

Interviewende: Katharina Schalk

Datum des Interviews: 19. Februar 2024 _____

Kürzel des Interviewten: Experte 1 _____

Institution/ Studiengang: *Rheinland-Pfälzisch Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Distance & Independent Studies Center
Master-Fernstudiengang Nachhaltige
Entwicklungszusammenarbeit*

Betreuender Professor: *Herr Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann*

Ich erkläre mich dazu bereit, im Rahmen der oben aufgeführten Masterarbeit an einem Expert*inneninterview teilzunehmen. Über das Ziel der Arbeit wurde ich durch die Interviewende schriftlich und mündlich informiert.

Ich bin damit einverstanden, dass das Interview mit einem Aufnahmegerät aufgezeichnet und anschließend transkribiert wird. Die Audiodateien sind auf dem Aufnahmegerät gespeichert und werden mit dem Abgabetermin der Masterarbeit, spätestens jedoch am 30.04.2024, gelöscht. Die Transkriptionen der Interviews werden anonymisiert (beispielsweise Experte 1, Fall 1...) gespeichert. Das Interview erhält sowohl mein Kürzel als auch eine Nummer, unter der das Transkript im Anhang der Arbeit zu finden ist und auf welches sich die Interviewende im Rahmen der Auswertung beziehen kann. Die Inhaltsanalyse und anschließende Auswertung der Interviews erfolgt durch die Befragende selbst. Ich bin damit einverstanden, dass einzelne Sätze aus den Transkription, die nicht mit meiner Person in Verbindung gebracht werden können, im Rahmen der Inhaltsanalyse und Bearbeitung für die Masterarbeit genutzt werden.

Meine Teilnahme am Interview sowie meine Zustimmung zur Verwendung der (persönlichen) Daten sind freiwillig. Ich habe jederzeit die Möglichkeit, meine Zustimmung zum Interview sowie der Verwendung der Daten und Ergebnisse zu widerrufen. Durch Verweigerung oder Widerruf entstehen mir keine Nachteile. Ich habe das Recht auf Auskunft, Berichtigung, Sperrung und Löschung, Einschränkung der Verarbeitung und Widerspruch gegen die weitere Verarbeitung. Unter diesen Bedingungen erkläre ich mich bereit, das Interview zu geben. Ich bin damit einverstanden, dass es aufgezeichnet, verschriftlicht, anonymisiert und ausgewertet wird.

Ort, Datum, Unterschrift Interviewte*r

Ort, Datum, Unterschrift Interviewerin

Anlage 4 Transkriptionsregeln der Interviews

Transkriptionsregeln für die Masterarbeit mit dem Titel:

Lithium aus lokalen Geothermiequellen – neues Extraktionsverfahren auf dem Nachhaltigkeitsprüfstand

1. Grundlage der Transkription: Alle Transkriptionen entstanden auf Basis von Audioaufnahmen mit der Smartphone-App Dictate.

2. Zeitmarken: Zeitmarken bei jedem Wortwechsel sollen die Nachvollziehbarkeit von Sprecherwechseln gewährleisten. Die Marken erleichtern zudem die Zuordnung von Aussagen und verbessern die Lesbarkeit des Transkripts.

3. Überprüfung und Korrektur: Die Texte der Transkriptionssoftware Sonix wiesen laut Eigenangabe der Software nach der Transkription eine Genauigkeit von 92 bis 96 Prozent auf. Zum Ausgleich der verbleibenden Ungenauigkeiten und Verständnislücken sowie zur Qualitätssicherung (8 bis 4 Prozent) überprüfte und korrigierte die Verfasserin alle Transkripte in zwei weiteren Durchgängen.

4. Bearbeitung von Füllwörtern: Im Rahmen der Nachbearbeitung wurden Füllwörter wie „äh“ und „uhm“ entfernt, insbesondere dort, wo sie das Verständnis des Textes beeinträchtigten.

5. Anonymisierung: Zum Schutz der Privatsphäre wurden alle Namen, Orte und sonstigen Angaben, die einen Rückschluss auf die interviewten Personen zulassen könnten, anonymisiert oder pseudonymisiert.

6. Formatierung und Zusammenfassung: Die fertigen Transkriptionen wurden einheitlich formatiert und in ein übergreifendes Dokument überführt. Dieses Dokument dient als Anhang der Masterarbeit und ermöglicht eine strukturierte Präsentation der Forschungsergebnisse.

Abschlussbemerkung: Die Einhaltung dieser Transkriptionsregeln gewährleistet eine hohe Qualität der Textdaten und unterstützt die wissenschaftliche Auswertung der in der Masterarbeit dargestellten Forschung. Die sorgfältige Bearbeitung und Anonymisierung der Transkripte stellt die Einhaltung ethischer Richtlinien und Datenschutzvorgaben als Standards des wissenschaftlichen Arbeitens sicher.

Anlage 5: Vorgehensweise zur Anonymisierung der Interviews:

Erläuterung Vorgehensweise Anonymisierung der Experteninterviews

im Rahmen der Masterarbeit

„Lithium aus lokalen Geothermiequellen – neues Extraktionsverfahren
auf dem Nachhaltigkeitsprüfstand“

Für die sieben Experten, die im Rahmen der Masterarbeit interviewt wurde, wurde eine **Anonymisierung** vorgenommen.

Anstatt der vollständigen Namen wurde den Experten eine **Fall-/Expertennummer** zugewiesen. Bei Angaben im Transkript, die trotz Anonymisierung direkt auf die Person schließen lassen, wurden Textstellen ausgelassen oder eventuelle andere Namen oder Ortsbezeichnungen ebenfalls anonymisiert. Der Verfasserin der Masterarbeit liegen ein **Anonymisierungsprotokoll** für jedes Interview und ein **Schlüsseldokument** vor, das jedem Experten eine konkrete Fallnummer/Expertennummer zuweist. Beide Dokumente können im Falle einer späteren De-Anonymisierung zur Nachverfolgung der Namen der Experten herangezogen werden.

Zudem liegen der Verfasserin die originalen Transkripte vor. Auf diese Weise ist eine nachhaltige Dokumentation des Vorgehens gegeben.

Anlage 6: Häufigkeiten

Auswertung Häufigkeiten Experteninterviews:

Auswertung Häufigkeiten Nachhaltigkeitsbezogene Technikfolgenabschätzung und -bewertung:

Anlage 7: Prozentuale Mittelwerte NTA und Interviews

14. Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Sacramento, 11.4.2024
Ort, Datum

Katharina Schalk
Unterschrift