

Geothermale Wässer als nachhaltige Rohstoff- und Frischwasserquelle

Valentin Goldberg, Fabian Nitschke, Daniel Winter, Joachim Koschikowski und Thomas Kohl

Die hier vorgestellte Arbeit findet im Rahmen des deutsch-chilenischen BrineMine-Projektes statt und ist Teil einer Cotutella, einer binational betreuten Promotion zwischen dem Karlsruher Institut für Technologie und der Universidad de Chile. Das Ziel des Projektes ist die Erforschung des Potenzials geothermischer Wässer als Ressource für eine nachhaltige Rohstoff- und Trinkwassergewinnung sowie der Technologietransfer in den lokalen Rohstoff- und Energiesektor.

Die Energiewende und die damit einhergehende Elektrifizierung erfordert die Verfügbarkeit einer Vielzahl an strategischen mineralischen Rohstoffen, wobei Lithium eine zentrale Rolle spielt [1]. Eines der größten Vorkommen für das Metall befindet sich in den Wässern der Salzseen in der Atacama-Wüste in Chile. Dort sorgt der Abbau jedoch regelmäßig für Konflikte zwischen Unternehmen und lokaler Bevölkerung aufgrund des Umwelteinflusses und der Wassernutzung.

Chile ist aber nicht nur bekannt für seine Lithiumvorkommen, sondern auch für die einzigartige Landschaft, die von über 200 aktiven Vulkanen geprägt ist. Diese besondere Geologie entlang des pazifischen Feuerrings führt dazu, dass Chile eines der größten Potenziale für geothermische Energiegewinnung weltweit besitzt. Bei dieser Form der Energiegewinnung werden Thermalwässer mit hohen Fließraten in Geothermiekraftwerken zirkuliert, welche neben Wärme auch teilweise erhöhte Konzentrationen von wirtschaftlich-strategischen Elementen aufweisen können [2-4]. Aus dem großen geothermischen Potenzial und der hohen Mineralfracht werden im BrineMine-Projekt Synergien entwickelt, die zukünftig eine alternative, nachhaltigere Form der kombinierten Rohstoff- und Energiegewinnung ermöglichen. Daraus ergibt sich aber nicht nur das Potenzial, den chilenischen Bergbausektor nachhaltiger zu gestalten. Beim heutigen Ausbau des Geothermiesektors in Deutschland bietet der Ansatz zudem die Möglichkeit einer heimischen Lithiumgewinnung.

Geothermale Wässer als Rohstoffquelle

Die hohen Temperaturen und Drücke, die typischerweise in geothermischen Reser-

voiren herrschen, sind Katalysatoren für Wasser-Gesteins-Wechselwirkung. Der Salzgehalt geothermischer Wässer kann dadurch Werte von bis zu 400 g/l erreichen [2]. Die chemische Zusammensetzung selbst ist sehr variabel und abhängig vom Reservoirgestein, der Entstehungsgeschichte des Wassers und dem regionalen Strömungssystem [5]. Groß angelegte Studien haben bereits nachgewiesen, dass Thermalwässer hohe Konzentrationen an wertvollen Rohstoffen enthalten können [2, 6].

Um das Rohstoffpotenzial zu quantifizieren, wurden geochemische Literaturdaten unterschiedlicher internationaler Kraftwerke und Thermalquellen gesammelt. Grundlage für die Berechnung sind Annahmen, die auf Betriebsparametern realer Geothermiekraftwerke basieren, wie z.B. in Cerro Pabellón in Chile oder in Insheim in Deutschland [3, 15]. Zur Quantifizierung der zirkulierenden Masse der Rohstoffe wurde ein repräsentativer Volumenstrom berechnet. Hierbei wurde von einer typischen Fließrate eines Geothermiekraftwerks von 80 kg/s [7] und einer Geothermie-typischen Verfügbarkeit

der Kraftwerke von 90 % (330 Betriebstagen) ausgegangen, woraus sich das jährliche Gesamtvolumen der zirkulierten Sole ergibt. Für die weitere Berechnung wurde eine Rohstoffgewinnungsrate von 50 % - basierend auf Literaturrecherche zu Extraktionstechnologien - herangezogen, um eine konservative aber realistische Einschätzung für die mögliche Produktion pro Jahr zu erhalten [8-11]. Die Ergebnisse für ausgewählte Rohstoffe für zwei Standorte in Deutschland und Chile sind in der Tabelle dargestellt.

Die Berechnungen zeigen das große Rohstoffpotenzial, welches in Thermalwässern schlummert. Das größte Potenzial zeigen Materialien für die High-Tech-Industrie wie Lithium oder Cäsium. Aber auch Massenrohstoffe wie Kalium, welches z.B. für die Düngerherstellung verwendet wird, können ein lukratives Ziel für eine geothermische Rohstoffextraktion sein.

Die Berechnungen zeigen bisher nur das wirtschaftliche Potenzial. Für die Extraktion müssen darauf basierend standortspezi-

Standort	Rohstoff	Extraktionspotenzial [t/yr]	Spezifischer Preis [\$/t]	Wirtschaftliches Potenzial [\$/yr]
Cerro Pabellón (CHL)	Li ₂ CO ₃	375	\$ 52.000 [12]	\$ 19.500.000
Cerro Pabellón (CHL)	K ₂ O	1.539	\$ 980 [13]	\$ 1.500.000
Cerro Pabellón (CHL)	CHC ₅ O ₂	49	\$1.656.000[14]	\$ 80.500.000
Insheim (DE)	Li ₂ CO ₃	1.015	\$ 52.000 [12]	\$ 52.800.000
Insheim (DE)	K ₂ O	5.219	\$ 980 [13]	\$ 5.100.000
Insheim (DE)	CHC ₅ O ₂	22	\$1.656.000 [14]	\$ 36.600.000

Tab. Wirtschaftliches Potenzial unterschiedlicher Produktionsszenarien. Die zirkulierende Menge ergibt sich aus den durch Wasseranalysen bestimmten Elementgehalten multipliziert mit dem Volumen der zirkulierten Sole und der Extraktionsrate. Für das Extraktionspotenzial wurde aus den reinen Elementgehalten (Li, K, Cs) in den Wässern berechnet, wieviel der gehandelten Rohstoffe (Li₂CO₃, K₂O, CHC₅O₂) daraus produziert werden könnte. Wenn für die Rohstoffe unterschiedliche Preise angegeben waren, wurde der niedrigere Preis gewählt, um das Modell so konservativ wie möglich zu halten

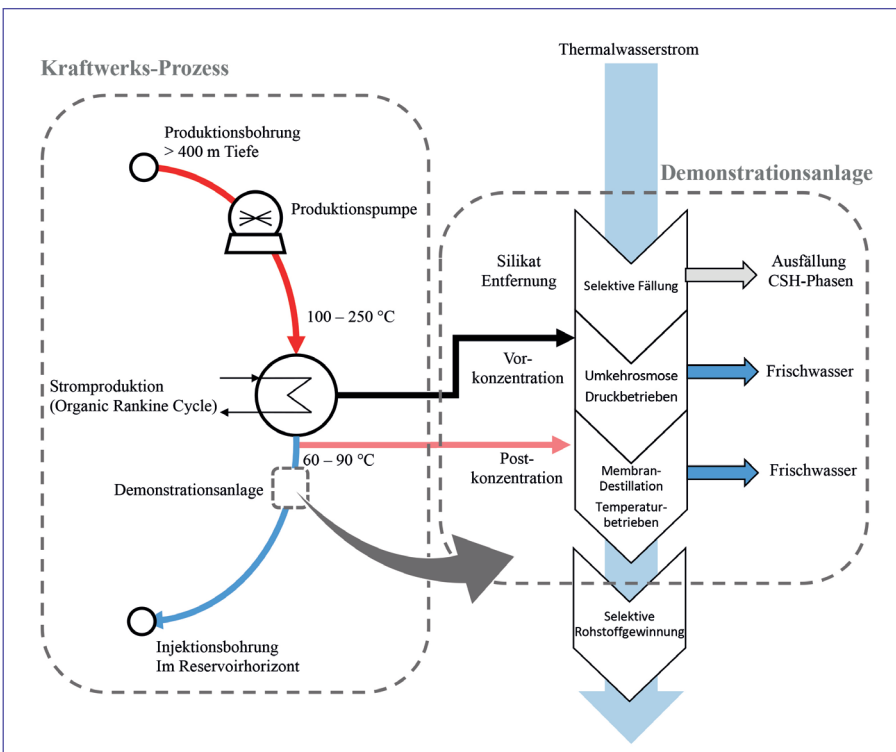


Abb. 1 Schematische Darstellung eines geothermischen Kraftwerksprozesses sowie des entwickelten Demonstrators zur Thermalwasservorbehandlung

fische Technologien entwickelt werden. Hier ist jedoch hervorzuheben, dass der Wert nur eine aktuelle Momentaufnahme darstellt. Insbesondere der Lithiummarkt hat sich in den vergangenen Jahren als sehr volatil gezeigt, wodurch Prognosen über die Wirtschaftlichkeit mit großen

Unsicherheiten behaftet sind. Gerade bei dem sehr kleinen Cäsiummarkt kann der Wert nur als Abschätzung dienen, da die erzielten Werte zwischen Unternehmen vereinbart werden und weiterhin die potenziell extrahierbaren Mengen einen Großteil des globalen Marktes einnehmen

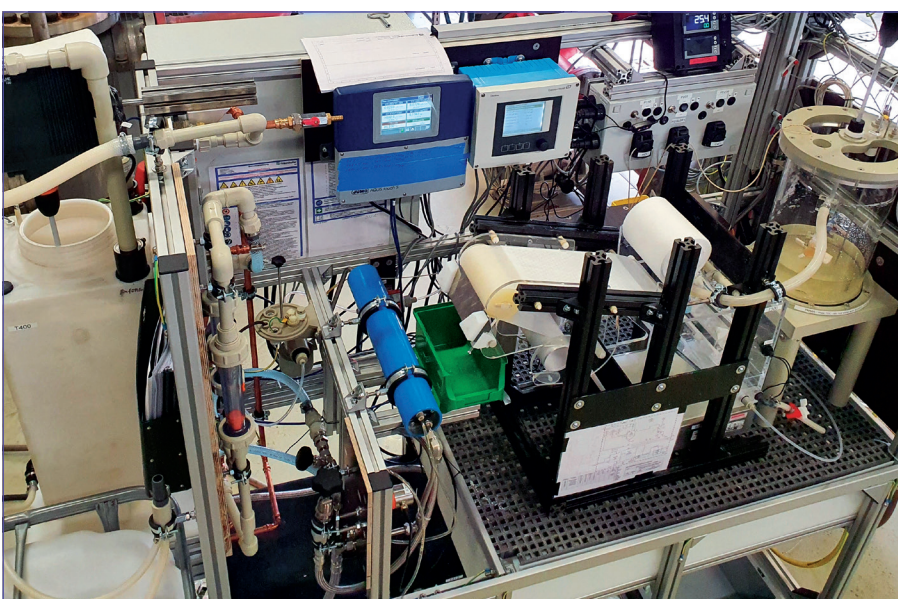


Abb. 2 Felddemonstrator installiert in einem Geothermiekraftwerk im Oberrheingraben. Der Demonstrator wurde in zwei Feldkampagnen im Juli und August 2020 sowie im März 2021 getestet

würden, was sich ebenfalls stark auf den Preis auswirken würde.

Thermalwasservorbehandlung

Um diese nachhaltige Produktion zu ermöglichen, wurde im Rahmen des Brine-Mine-Forschungsprojekts ein interdisziplinärer, aus mehreren Verfahrensschritten bestehender Ansatz gewählt (Abb. 1). Ein zentraler Bestandteil sind zwei Membranprozesse als Vorbehandlung der Wässer. Diese bereichern den Mineralgehalt der Thermalwässer ohne Verdunstung und Wasserverlust an, um die Effektivität der Rohstoffgewinnung zu erhöhen und gleichzeitig eine Wassergewinnung zu ermöglichen. Der durch die geothermische Wärme und produzierte Energie betriebene Prozess eröffnet damit die Perspektive einer Energie- und Treibhausgasneutralen Rohstoffproduktion mit geringem Platzbedarf, minimalem Eingriff in den Untergrund sowie Wasserproduktion statt Wasserverbrauch.

Die hohe Mineralfracht in geothermischen Wässern ist nicht nur eine Chance für die Geothermie, sondern auch eine der größten Herausforderungen. Unkontrollierte mineralische Ausfällungen können die Effizienz der geothermischen Energieproduktion beeinträchtigen und die Anlage beschädigen, was bis zum Verlust einer Bohrung führen kann. Besonders Ausfällungen von Silikaten sind ein bekanntes Problem aus der Geothermie und Wasseraufbereitung und folglich auch ein großes Hindernis für die kombinatorische Rohstoff- und Frischwassergewinnung aus Thermalwässern.

Um eine störungsfreie Rohstoffextraktion zu ermöglichen, wurde im Labor eine Vorbehandlung dieser Silikate entwickelt, welche keinen Einfluss auf Rohstoffe wie Lithium im Wasser hat. Zur Anwendung dieses Ansatzes auf eine reale Umgebung und zur Dimensionierung eines Prototyps für die Feldanwendung wurde eine numerische Designrechnung entwickelt, um die Prozesse in realen geothermischen Solen vorherzusagen.

Der Demonstrator (Abb. 2) wurde erfolgreich in einem laufenden Kraftwerk implementiert, in welchem er in einem kontinuierlichen Prozess hochkorrosive Wässer mit bis

zu 100g/l Salz und hohen Lithiumgehalten aufbereitete. Der Einsatz in der realen Umgebung erzielte die gleichen hohen Silicium-Reduktionsraten von 98 %. Ebenso blieb, wie durch die Laborexperimente und die numerische Simulation vorhergesagt, der Lithiumgehalt während der gesamten Behandlung unberührt.

Bei der Behandlung durch die Membranprozesse konnte der Mineralgehalt der behandelten Wässer von 103 g/l auf 291 g/l erhöht werden. Lithium erreicht im Endkonzentrationsstadium 469 mg/l, während keine Silikate die Integrität der Membranen beeinflussten. Dabei wurde aus dem Ausgangswasser ca. 650 ml Frischwasser pro Liter Thermalwasser produziert. So konnte nicht nur der Mineralgehalt erhöht werden, sondern auch Frischwasser aus einer hochsalzhaltigen geothermischen Sole gewonnen werden. Die Versuche zeigten weiterhin, dass ohne die Vorbehandlung eine Konzentration nicht möglich gewesen wäre und weiterhin auch bei anderen Extraktionstechnologien Silikate unkontrolliert ausfallen würden, wenn man diese nicht vorbehandelt.

Schlussfolgerungen

Das Ziel der Arbeit ist es, die grundlegenden Herausforderungen der zurzeit stark diskutierten Thematik der Rohstoffgewinnung aus Thermalwässern zu charakterisieren und Lösungsansätze zu entwickeln. In einem ersten Schritt konnte gezeigt werden, dass geothermale Systeme ein großes wirtschaftliches Rohstoffpotenzial enthalten können. Dabei ist das Potenzial keineswegs auf Lithium alleine beschränkt, sondern enthält eine große Bandbreite unterschiedlicher mineralischer Rohstoffe für unterschiedliche Industrien. Dieses Potenzial ebnet den Weg für die Erschließung der Ressource als Alternative zur konventionellen Rohstoffgewinnung und eröffnet damit die Perspektive, globale Wertschöpfungsketten nachhaltiger zu gestalten, sowie die einer lokalen Rohstoffproduktion.

Weiterhin wurden erste Verfahren zur Verarbeitung der Fluide über die Energiegewinnung hinaus entwickelt und im Feld validiert. Eine effektive Methode zur Silikat-Fällung als Vorbehandlung für die Rohstoff- und Trinkwassergewinnung wurde im Labor getestet

und konnte über ein numerisches Modell erfolgreich in einen Demonstrator und damit in der Zielumgebung implementiert werden. Hierbei zeigte sich die Relevanz der Untersuchung, da neben verfahrenstechnischen Herausforderungen der Ansatz der geothermischen Rohstoffgewinnung auch Herausforderungen an existierende deterministische Berechnungsmodelle stellt. So konnten die geschaffenen Prozesse nur mit einer eigens entwickelten und validierten thermodynamischen Datenbank modelliert werden. Dadurch ergibt sich aber nun auch die Möglichkeit des Transfers auf andere geothermische Kraftwerke.

Die erste erfolgreiche Implementierung eines Demonstrators dieser Art im laufenden Betrieb eines Geothermiekraftwerks im Oberrheingraben bestätigte das Konzept und identifizierte wichtige Optimierungsparameter. Dabei zeigte sich ein großer Forschungsbedarf entlang der kompletten zukünftigen Wertschöpfungskette. Die interdisziplinären Studien, die zum kontinuierlichen Vor-Ort-Betrieb des Prototyps führten, legten jedoch einen Grundstein für die Rohstoffgewinnung aus Thermalwässern in Chile und Deutschland und stellen somit die ersten Schritte hin zu einer nachhaltigeren Alternative zu konventionellen Abbaumethoden dar.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Bd 27; 2020.
- [2] Neupane, G.; Wendt, S. (Hrsg.): Assessment of Mineral Resources in Geothermal Brines in the US, 2017.
- [3] Sanjuan, B.; Millot, R.; Innocent, C.; Dezayes, C.; Scheiber, J.; Brach, M.: Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chem Geol.* 2016;428:27-47. doi:10.1016/j.chemgeo.2016.02.021
- [4] Regenspurg, S.; Milsch, H.; Schaper, J.: Copper in Geothermal Brine: Origin, Reactions, Risks, and Chances. *World Geotherm Congr 2015 (April)*: 5.
- [5] Stober, I.; Bucher, K.: Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids.* 2015;15(3):464-482. doi:10.1111/gfl.12122

- [6] Hauser, A.: *Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile.* Servicio Nacional de Geología y Minería; 1997. <https://books.google.de/books?id=Z-1QAQAIAAJ>
- [7] Cappetti, G.: Cerro Pabellón geothermal plant? A success story Geothermal resources in Chile; 2019.
- [8] Yu, X.; Fan, X.; Guo, Y.; Deng, T.: Recovery of lithium from underground brine by multistage centrifugal extraction using tri-isobutyl phosphate. *Sep Purif Technol.* 2019;211(July 2018):790-798. doi:10.1016/j.seppur.2018.10.054
- [9] Jiang, H.; Yang, Y.; Sun, S.; Yu, J.: Adsorption of lithium ions on lithium-aluminum hydroxides: Equilibrium and kinetics. *Can J Chem Eng.* 2020;98(2): 544-555. doi:10.1002/cjce.23640
- [10] Stringfellow, W. T.; Dobson, P. F.: Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies.* 2021;14(20):6805. doi:10.3390/en14206805
- [11] Liu, G.; Zhao, Z.; Ghahreman, A.: Novel approaches for lithium extraction from salt-lake brines: A review. *Hydrometallurgy.* 2019;187(May):81-100. doi:10.1016/j.hydro-met.2019.05.005
- [12] Trading Economics: Lithium. Published 2022. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- [13] Jasinski, S. M.: POTASH – USGS Report; 2022.
- [14] Tuck, C.: CESIUM – USGS Report; 2022.
- [15] Giudetti, G.; Tempesti, L., Power EG, Pisano VA: First Geochemical Data from Cerro Pabellón Geothermal Project (Apacheta Region , Chile). In: *Proceedings World Geothermal Congress 2020.* Bd 8.; 2020:1-10.

V. Goldberg, F. Nitschke und T. Kohl, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Professur für Geothermie und Reservoir-Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe; D. Winter und J. Koschikowski, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
valentin.goldberg@kit.edu