



Schlussbericht

«SLAGSTOCK»

(SOLAR-ERA.NET-001)

Thermische Energiespeichersysteme basierend auf rezyklierten Abfällen der Stahlindustrie



Schlackenabfluss in einem Stahlwerk, © Republic Steel Corp., Youngstown, Ohio 1941



PAUL SCHERRER INSTITUT



Datum: 13. Juni 2018

Ort: Villigen PSI

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solare Hochtemperaturrenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Paul Scherrer Institut
CH-5232 Villigen PSI
www.psi.ch

Autor/in:

Christian Wieckert, Paul Scherrer Institut, christian.wieckert@psi.ch

BFE-Bereichsleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501231-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Von zentraler Bedeutung für konzentrierende Solarkraftwerke ist die Speicherung der Solarwärme zur Entkoppelung der Zeiten der Solarstromerzeugung von den Zeiten der Sonneneinstrahlung, was eine Anpassung der Produktion an den Strombedarf erlaubt. Stand der Technik ist die Speicherung in geschmolzenen Nitratsalzen, die jedoch gravierende Nachteile wie eingeschränkter Temperaturbereich (typisch 290–565 °C) und latente Gefahr des Einfrierens, hohe Salzkosten und relativ hohe CO₂-Belastungen bei der Herstellung aufweisen. Im SOLAR-ERA.NET-Projekt «SLAGSTOCK» wird ein vielversprechendes Alternativkonzept untersucht: die Verwendung von metallurgischem Schlackengranulat als Festbett in einem grossen Speichertank, der vom Wärmeträgermedium (Luft oder Salzschnmelze) durchströmt wird und jeweils während der Sonnenstunden aufgeheizt (geladen) und nach Bedarf zur Stromerzeugung abgekühlt (entladen) wird. Sechs Partner aus vier Ländern studierten dazu die verschiedenen Aspekte eines derartigen Speicherkonzeptes inklusive der Realisation eines 1 m³-Versuchstanks gefüllt mit Schlackengranulat für die Speicherung von etwa 350 kWh_{th} aus heisser Luft. Der globale Stahlkonzern ArcelorMittal stellte die metallurgischen Schlacken zur Verfügung, die auf zwei verschiedenen Wegen in das für den Speicher geeignete Granulat von wenigen cm Korngrösse aufbereitet wurden. Gleichzeitig wurden die relevanten physikalischen Eigenschaften des Granulats bestimmt, die Verträglichkeit der Schlacke mit Salzschnmelze und Luft untersucht sowie industrielle Speichertanks für 1 GWh_{th} simuliert, insbesondere ihre Ladung und Entladung. Die Rolle des Schweizer Forschungspartners PSI bestand zum einen in der Modellierung des Verhaltens eines solchen Tanks mit Salzschnmelze als Wärmeträgermedium und zum anderen in der Erstellung einer Ökobilanz (LCA) des neuen thermischen Speicherprozesses, welche klar die ökologischen Vorteile des neuen Konzepts gegenüber dem heutigen 2-Tank-Salzschnmelze-Speichersystems aufzeigt. Je nach betrachtetem Detailkonzept wird grob eine Halbierung der äquivalenten CO₂-Emissionen des Speichersystems prognostiziert. Die Resultate von «SLAGSTOCK» fliessen unter anderem in das verwandte grosse EU-Projekt «RESLAG» ein, von dem aus die weitere Entwicklung des neuen Verfahrens erfolgen könnte.



Résumée

Un aspect majeur des centrales solaires est le stockage de la chaleur solaire pour découpler les heures de production d'électricité solaire de la présence du soleil, ce qui permet d'ajuster la production à la demande. Le stockage de l'art antérieur dans les sels de nitrate fondu, cependant, présentent des inconvénients graves tels que la gamme de température limitée (généralement 290–565 °C) et le danger de la solidification, les coûts élevés de sel et la production de CO₂ relativement élevées dans sa fabrication. Le projet SOLAR-ERA.NET « SLAGSTOCK » étudie un autre concept prometteur: l'utilisation de granules de mâchefer métallurgique sous forme de lit fixe dans un grand réservoir, qui est traversé par le fluide chaud (air ou sel fondu) et chauffé au cours de la journée et est refroidie pour la production d'énergie. Six partenaires de quatre pays étudiés les aspects divers de cette stratégie de stockage, y compris la réalisation d'un réservoir d'essai 1 m³ de mâchefer granulé pour stocker environ 350 kWh_{th}. ArcelorMittal a présenté le mâchefer métallurgique disponible qui a été préparé de deux façons différentes en granules de quelques centimètres. En parallèle, les propriétés physiques pertinentes des granules ont été déterminées pour examiner la compatibilité du mâchefer avec les deux fluides chauds considéré, sel fondu et de l'air et la charge et la décharge des réservoirs de stockage industriels pour une GWh_{th} ont été simulé. PSI, partenaire suisse, a modelé le comportement d'un tel réservoir avec du sel fondu comme fluide chaud et a accompli une évaluation du cycle de vie (ACV) du nouveau processus de stockage thermique, qui démontré les avantages environnementaux de la nouvelle approche. Selon le concept détaillé considéré, il est prévu de partager les émissions de CO₂ équivalentes du système de stockage. Les résultats du projet « SLAGSTOCK » vont faire partir du projet UE « RESLAG » qui poursuite le développement du nouveau processus.

Summary

A key component of modern concentrating solar power plants is a thermal storage unit, which allows adapting the production to the needs by decoupling the energy collection during sunny hours from the power production hours. State of the art is a storage in two tanks via molten nitrate salts, which, however, faces a couple of drawbacks including limited operation temperature (typically 290–565°C), danger of salt freezing, high costs and high CO₂ footprint of the salt production. In the SOLAR-ERA.NET project „SLAGSTOCK” a promising alternative thermal storage concept is investigated: the use of one large storage tank filled with a packed bed of metallurgical slag pebbles, through which the heat transfer fluid (molten salt or air) flows and which is heated (charged) during the sunny hours and is cooled (discharged) as needed to generate electricity. Six partners from four countries have investigated the major aspects of the new process including the realisation of a 1 m³ test tank for storing about 350 kWh_{th} from hot air. The global steel manufacturer ArcelorMittal provided the metallurgical slags, which were processed by two alternative routes to few cm sized slag pebbles suited for the packed bed. In parallel studies of the relevant physical properties of the pebbles were conducted, the compatibility of the slag with molten salt and hot air was investigated and the behaviour of industrial sized storage tanks (for 1 GWh_{th}) was modelled, considering charging and discharging cycles. The specific work of the Swiss partner PSI consisted in the modelling of the storage tank with molten salt as heat transfer fluid and in the performance of a life cycle assessment (LCA) for the new process, clearly demonstrating the advantages of the new process compared to the established 2-tank molten salt process. Depending on the detailed process variant the equivalent CO₂-emissions can be approximately reduced to one half. The results of „SLAGSTOCK” are amongst others contributing to the related large EU-project „RESLAG”, from which the further development of the innovative slag based thermal storage process might take place.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé.....	4
Summary	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Ziele des Projektes	7
3 Struktur des Gesamtprojektes	8
3.1 Projektpartner und internationale Zusammenarbeit	8
3.2 Arbeitspakete	9
4 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse (Schwerpunkt PSI)	10
4.1 Modellierung des Schlackengranulatspeichers für HTF Salzschnmelze.....	11
4.2 Ökobilanzierung (LCA).....	15
5 Ausblick und weitere Schritte	17
6 Referenzen	18



Abkürzungsverzeichnis

CSP	Concentrated Solar Power (konzentrierendes Solarkraftwerk)
GHG	Greenhouse Gas (Emissionen gemessen in kg CO ₂ equivalent)
HTF	Heat transfer fluid (Wärmeträgermedium)
LCA	Life-cycle Assessment (Ökobilanz)
TES	Thermal Energy Storage
WP	Work Package



1 Einleitung

Erneuerbare Stromerzeugung mittels konzentrierender Solarstrahlung kommt in sonnenreichen Regionen wie in Spanien, Nord- und Südafrika, dem Südwesten der USA usw. mehr und mehr zum Einsatz [1]. Gegenüber der photovoltaischen Solarstromerzeugung hat die thermische Solarstromerzeugung den Vorteil, dass die Stromerzeugung mittels thermischen Speichern vergleichsweise einfach in die Abendstunden verlegt oder ausgedehnt werden kann. Je nach Auslegung dieser Speicher ist auch eine Grundlaststromproduktion über 24 h pro Tag möglich.

Die zur Zeit etablierte Speichertechnologie basiert auf der Aufheizung von geschmolzenen Nitratsalzen von einem niedrigen Temperaturniveau bei etwa 300 °C während des Tages auf ein höheres Temperaturniveau bei maximal etwa 565 °C und der Verwendung von zwei grossen Salztanks für die beiden Temperaturniveaus. Diese Speichertechnologie hat jedoch gravierende Nachteile, wie die eingeschränkten oberen und unteren Betriebstemperaturen bedingt durch Zersetzung bzw. Einfrieren des Salzes, die latente Gefahr des Einfrierens, die erheblichen Kosten und Umweltbelastungen, die mit der Herstellung der grossen Salzmengen (zum Beispiel etwa 8 500 t für ein 20 MW_{el}-Kraftwerk mit 15 h Speicher [2]) verbunden sind. Deshalb wird intensiv an alternativen thermischen Speicherverfahren geforscht [3].

Eine vielversprechende Alternative sind Festbett tanks, die alle genannten Nachteile vermeiden könnten. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn geeignete Abfallstoffe als thermisches Bettmaterial verwendet werden. Von besonderem Interesse sind dafür die riesigen anfallenden Mengen an metallurgischen Schlacken, die zu erheblichen Teilen deponiert werden. Eine systematische Untersuchung der Eignung solcher Schlacken für die thermische Speicherung von konzentrierter Sonnenenergie für die Stromerzeugung sowie eine Verfahrensdemonstration im Pilotmassstab stand bisher aus.

2 Ziele des Projektes

Ziel des Projektes ist – der Ausgangslage entsprechend – eine umfassende Untersuchung der Nutzbarmachung von Abfallschlacken der Stahlerzeugung als thermisches Speichermedium für konzentrierende Solarkraftwerke.

Abbildung 1 zeigt ein Schema einer konzentrierenden Solarstrom (CSP-) Anlage mit integriertem thermischem Speichertank. In der in «SLAGSTOCK» analysierten Ausführung besteht dieser Speicher aus einem grossen mit Schlacke granulat gefüllten Tank, durch den entweder Luft oder alternativ Salzschnmelze als Wärmeträgermedium (HTF) strömt. Im Falle der Verwendung von Salzschnmelze besteht der Vorteil der Verwendung des Schlacke granulats darin, dass zur Speicherung der gleichen Energiemenge viel weniger teures Salz benötigt wird. Der Hauptfokus des Projektes liegt jedoch auf dem Wärmeträgermedium Luft, also auf thermischen Speichern für Luftreceiver für CSP-Turmkraftwerke, bei denen auch der Vorteil einer höheren möglichen Arbeitstemperatur zum Tragen kommt. In jedem Fall wird der Speicher tagsüber durch Durchströmen mit von der Sonne erhitztem Wärmeträgermedium aufgeladen und – für die Entnahme der gespeicherten Energie – durch Durchströmen mit kaltem Wärmeträgermedium in umgekehrter Strömungsrichtung entladen. Im Tank wandert dabei jeweils eine Zone mit starken Temperaturgradienten (eine sogenannte «Thermocline») in Strömungsrichtung.

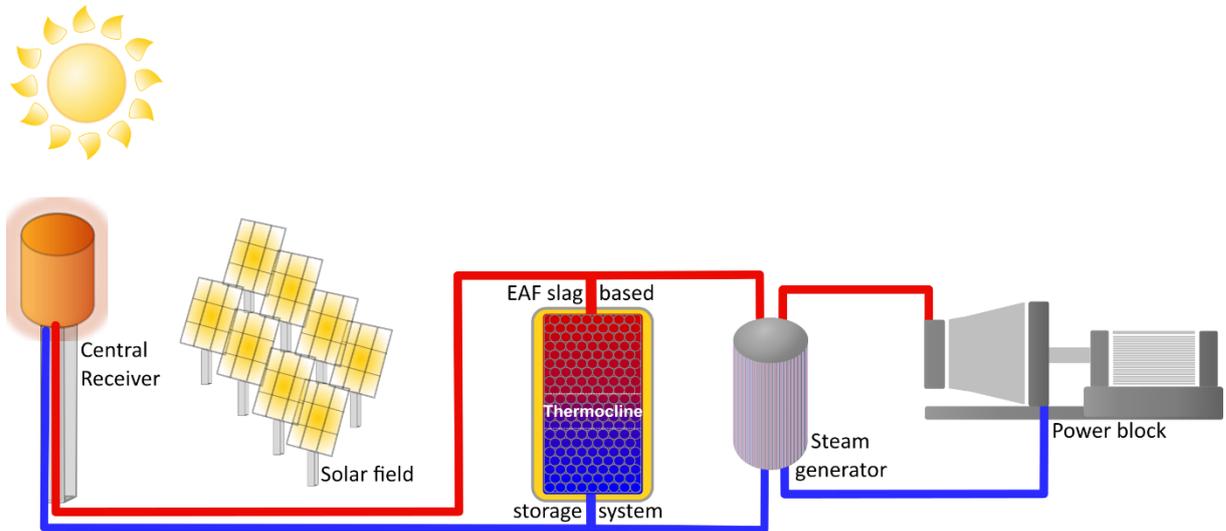


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema eines konzentrierenden Solarkraftwerkes mit einem thermischen Speichertank gefüllt mit einem Granulat aus metallurgischer Schlacke. Das «SLAGSTOCK»-Projekt befasst sich mit der konzeptionellen und experimentellen Erforschung dieses Speicherkonzeptes.

Das SOLAR-ERA.NET Forschungsprojekt «SLAGSTOCK» wurde von sechs Partnern aus vier europäischen Ländern durchgeführt, siehe Kapitel 3. Die Hauptbeiträge des PSI bestehen in der Beteiligung an den Modellierungsaktivitäten des gewählten Ein-Tank-Festbett-Speicherprozesses und in der Erstellung einer Ökobilanz (LCA) für das untersuchte Verfahren.

3 Struktur des Gesamtprojektes

3.1 Projektpartner und internationale Zusammenarbeit

«SLAGSTOCK» als SOLAR-ERA.NET-Projekt basiert auf der internationalen Zusammenarbeit der sechs Projektpartner, welche die verschiedenen erforderlichen Kompetenzen für das Projekt mitbringen. Von zentraler Bedeutung ist hier der globale Stahlkonzern ArcelorMittal, in dessen Stahlwerk bei Bilbao die in diesem Projekt verwendeten metallurgische Schlacken anfallen.

Partner No	Entity	Type	Country
1	CIC Energigune (Coordinator)	Research Centre	Spain
2	PSI	Research Centre	Switzerland
3	IK4-Azterlan	Research Centre	Spain
4	ArcelorMittal - RC - Planta Sestao	Large Enterprise	Spain
5	Institute of Biomaterials, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg	University	Germany
6	Tellus-Ceram	SME	France

Tabelle 1: Partner im «SLAGSTOCK»-Konsortium. Koordinator ist CIC Energigune.



Projektmonat (Datum)	Gastpartner	Ort	Land	#PSI Teilnehmer
0 (20.04.2015)	CIC Energigune	Vitoria Gasteiz	E	1
7 (17.11.2015)	Tellus-Ceram	Monsempron- Libos	F	1
13 (04.05.2016)	PSI	Villigen	CH	4
19 (08.11.2016)	IK4-Azterlan	Durango	CH	1
25 (03.05.2017)	Institute of Biomaterials, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg	Erlangen	D	2
31 (29.11.2017)	ArcelorMittal	Bilbao	E	2
36 (23.04.2018)	CIC Energigune	Vitoria Gasteiz	E	1

Tabelle 2: Projekttreffen im Verlauf des «SLAGSTOCK»-Projektes.

Halbjährig erfolgten Gesamtprojekttreffen aller sechs Partner zwecks Besprechung der Resultate der Partner und der Koordination der Projektarbeiten, siehe Tabelle 2. Zwischen den Treffen wurden zum Teil Webmeetings abgehalten. Auch erfolgten weitere Koordinationsaktivitäten auf der Ebene Work Package (WP).

3.2 Arbeitspakete

Neben den übergreifenden Aktivitäten *Koordination* und *Dissemination* wurde die Projektarbeit in sechs Arbeitspakete aufgeteilt. Tabelle 3 zeigt diese Projektstruktur inklusive der Tasks in den Arbeitspaketen und die jeweilig beteiligten Partner. Der Rückzug von zwei Partnern des ursprünglichen Konsortiums vor dem Projektstart erforderte eine grössere Anpassung gegenüber der ursprünglichen Planung beim SOLAR-ERA.NET-Antrag. Ausserdem musste das PSI auf Grund seines bereits kurz vor Projektbeginn beschlossenen Ausstiegs aus der konzentrierenden Solarenergieforschung sein Budget stark reduzieren. In der modifizierten Version der Projektstruktur, wie sie nach dem Kickoff-Meeting vereinbart wurde und in Tabelle 3 dargestellt ist, übernahm das PSI die durch das Fehlen des ursprünglichen Partners CNRS freigewordene Aufgabe der Erstellung einer Ökobilanz (LCA) des neuen Prozesses (WP6). Gleichzeitig gab das PSI seine zunächst vorgesehene Leitungsfunktion der Modellierungsarbeiten (WP2) ab und beschränkte sich hier auf einen kleineren Beitrag zum System Schlacke-Salzschnmelze.



Work-Packages (WP)	Year 1			Year 2			Year 3			Participant																												
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	M31	M32	M33	M34	M35	M36	Leader	Partners
WP0. Coordination of the project																																						
Task 0.1. Legal, financial and administrative management																																					M0.1	
Task 0.2. Reporting Management																																					M0.2	
Task 0.3. Quality and risk Management																																					M0.2	
Task 0.4. Interrelation with other work packages																																					M0.2	
WP1. Definition of the TES system parameters for CSP applications and characterisation of steel slags																																						
Task 1.1: Definition of TES unit parameters for CSP applications																																					M1.1	
Task 1.2: Characterization of the different as-received slags																																					M1.2	
Task 1.3: Compatibility of slags with Heat Transfer Fluids (HTF) & struct. material																																					M1.3	
WP2. Modelling																																						
Task 2.1: Modelling of packed-bed configuration																																						
Task 2.2: Modelling of multi-hole configuration																																						
Task 2.3: Modelling of honey-comb configuration																																					M2.1	
Task 2.4: Modelling of the slag casting process																																					M2.2	
WP3. Manufacture of TES systems																																						
Task 3.1: Manufacturing of slags for packed-bed configuration																																						
Task 3.2: Manufacturing of slags for multi-holes configuration																																						
Task 3.3: Manufacturing of honeycomb configuration																																					M3.1	
Task 3.4: Complete characterisation after manufacturing																																					M3.2	
WP4. Testing of TES systems																																						
Task 4.1: Design and construction of a laboratory-scale HT hot-air loop																																					M4.1	
Task 4.2: Testing of packed bed configuration																																						
Task 4.3: Testing of multi-hole configuration																																						
Task 4.4: Testing of honeycomb configuration																																						
Task 4.5: Analysis of the TES modules after testing																																						
Task 4.6: Validation of the models																																					M4.2	
WP5. Technical and Economical Assessment (TEA)																																						
Task 5.1: Technical Assessment																																					M5.1	
WP6. Life Cycle Assessment (LCA) of the new TES systems																																						
Task 6.1: LCA																																					M6.1	
WP7. Dissemination of project results and management of IP																																						
Task 7.1: Dissemination																																					M7.1	

Tabelle 3: Gantt-Chart des «SLAGSTOCK»-Projektes.

4 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse (Schwerpunkt PSI)

Die Resultate der verschiedenen Arbeitspakete sind kurz im Schlussbericht zuhanden SOLAR-ERA.NET dargestellt und sollen hier – was die Aktivitäten der übrigen Partner betrifft – nicht im Detail wiederholt werden. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Projektarbeiten zum grössten Teil zufriedenstellend abgeschlossen werden konnten.

Ausführlicher werden im Folgenden die Resultate der Beiträge des PSI zusammengefasst. Diese bestanden vor allem in zwei Aktivitäten:

- Mitarbeit bei den Modellierungen (WP2, Leitung Partner CIC Energigune)
- Ausarbeitung einer LCA (WP6, Leitung PSI)



4.1 Modellierung des Schlackengranulatspeichers für HTF Salzschnelze

Die federführend von Dr. Stefan Stroehle am PSI durchgeführten Modellierungen beziehen sich auf das Verhalten eines Festbetspeichers bei Verwendung von Flüssigsalz als Wärmeträgermedium, während CIC Energigune entsprechende Modellierungen für das Wärmespeichermedium Luft durchgeführt hat. Die PSI-Arbeiten basieren auf der Anpassung einer Simulationssoftware [4], die vorgängig am PSI für die Beschreibung der Vorgänge im Festbett bei thermochemischer Speicherung entwickelt worden war, dies im Rahmen des EU-Projektes «TCS-Power» [5]. Stefan Ströhle, der diese Entwicklung als Kernaktivität seiner Dissertation durchgeführt hatte, wurde nach Abschluss seiner Doktorarbeit für vier Monate (März bis Juni 2016) für «SLAGSTOCK» angestellt. In dieser Zeit passte er diese Software auf «SLAGSTOCK»-Bedingungen an und führte die entsprechenden Auswertungen durch.

Kernschritte und zentrale Ergebnisse dieser Modellierungsaktivitäten sind die folgenden:

- Anpassung des existierenden Festbettmodells [4] für Flüssigsalz als Wärmeträgermedium und Schlackengranulat als Bettmaterial.
- Erfolgreiche Validierung des adaptierten Modells mit experimentellen Resultaten aus der Literatur. Abbildung 2 zeigt ein Validationsbeispiel.
- Ergänzung des Modells durch eine vereinfachte Beschreibung einer Dampfturbine mit Dampfgenerator [7], um den Effekt einer abnehmenden Austrittstemperatur aus dem Speicher auf die Stromproduktion zu untersuchen. Der Wirkungsgrad der Dampfturbine nimmt mit sinkender Temperatur ab. Auch ist eine Mindesttemperatur erforderlich, siehe Resultat in Abbildung 3.
- Anwendung des Modells auf einen industriellen Speicher (Speicherkapazität etwa 1 GWh_{th}, was bei einem Festbettdurchmesser von 15 m eine Höhe von etwa 20 m erfordert). Insbesondere wurde das Verhalten für verschiedene Betriebsstrategien untersucht, vor allem im Hinblick auf den Grad der zyklischen Ladung und Entladung des thermischen Speichers.

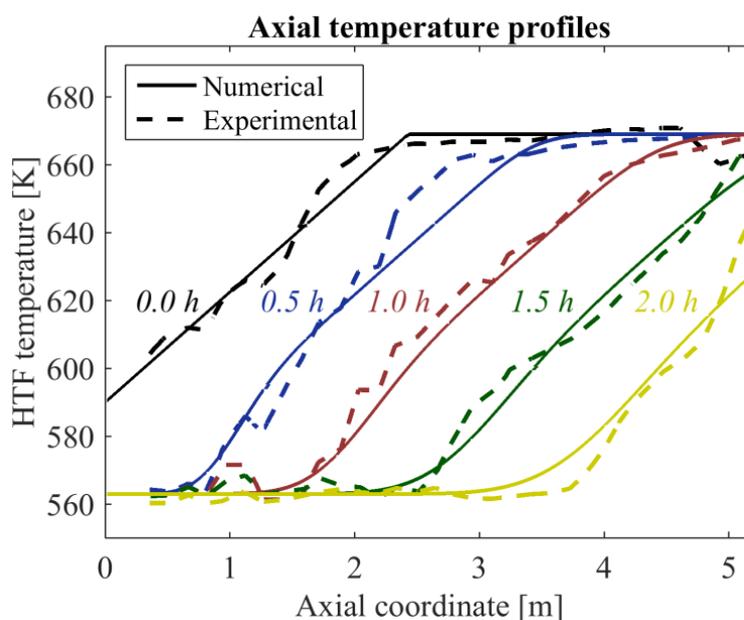


Abbildung 2: Validation des modifizierten Programms: Vergleich gemessener Daten [6,7] mit den Modellierungsergebnissen für einen Speichertank mit 3 m Durchmesser und 5.2 m Höhe, gefüllt mit Quarzit-Steinen und Sand. Das Wärmeträgermedium ist Salzschnelze.

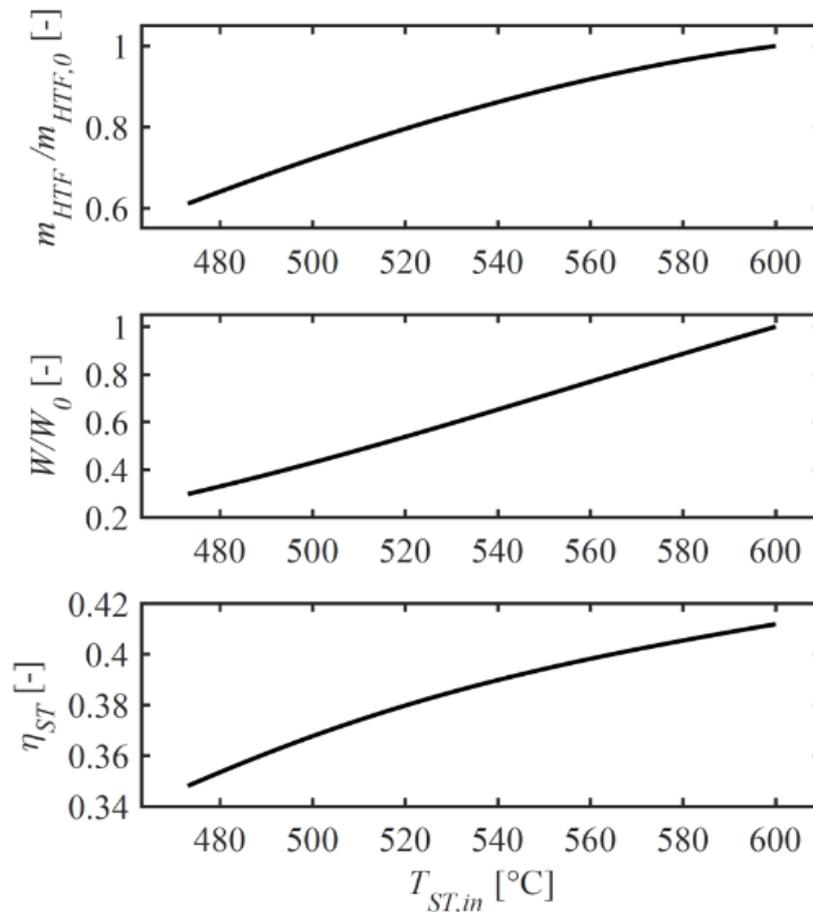


Abbildung 3: Abhängigkeit des Massenflusses des Wärmeträgermediums Salzschnmelze, der Turbinenleistung und des Wirkungsgrades als Funktion der Eintrittstemperatur in die Turbine [7]. Unter 473°C beträgt die Leistung unter 30% der Nennleistung, welche als untere Grenze für einen sinnvollen Betrieb angesehen werden.

- Parameterstudie mit dem gekoppelten Modell Speicher-Dampfturbine zum Einfluss des Grades von Ladung und Entladung auf den Wirkungsgrad und die Speicherdichte, u.a. in Abhängigkeit von der Schlacken-Granulatgrösse (0.5–3 cm).

Resultat: Es gibt eine bevorzugte Speichergrösse (d.h. einen bevorzugten Grad von Ladung/Entladung), bei dem die Stromproduktion (Wirkungsgrad) nahezu maximal ist bei einer gleichzeitig recht hohen Speicherdichte, siehe Resultatbeispiel für einen typischen Parametersatz in Abbildung 5. Für weniger hohe Speicher sinkt der Wirkungsgrad, für höhere die Speicherdichte. Das Optimum liegt bei den untersuchten sonst konstanten Bedingungen (u.a. konstantem Bettdurchmesser) bei einer Höhe von 19–21 m, nur schwach abhängig von der Granulatgrösse. Diese Optimierung gilt für den Fall, dass für die nicht verstromte «Verlustwärme» anderweitig keine sinnvolle Nutzung vorhanden ist. Ansonsten verschiebt sich dieses Optimum zu etwas weniger hohen Festbettspeichern und damit vollständigeren Speicharentladungen.

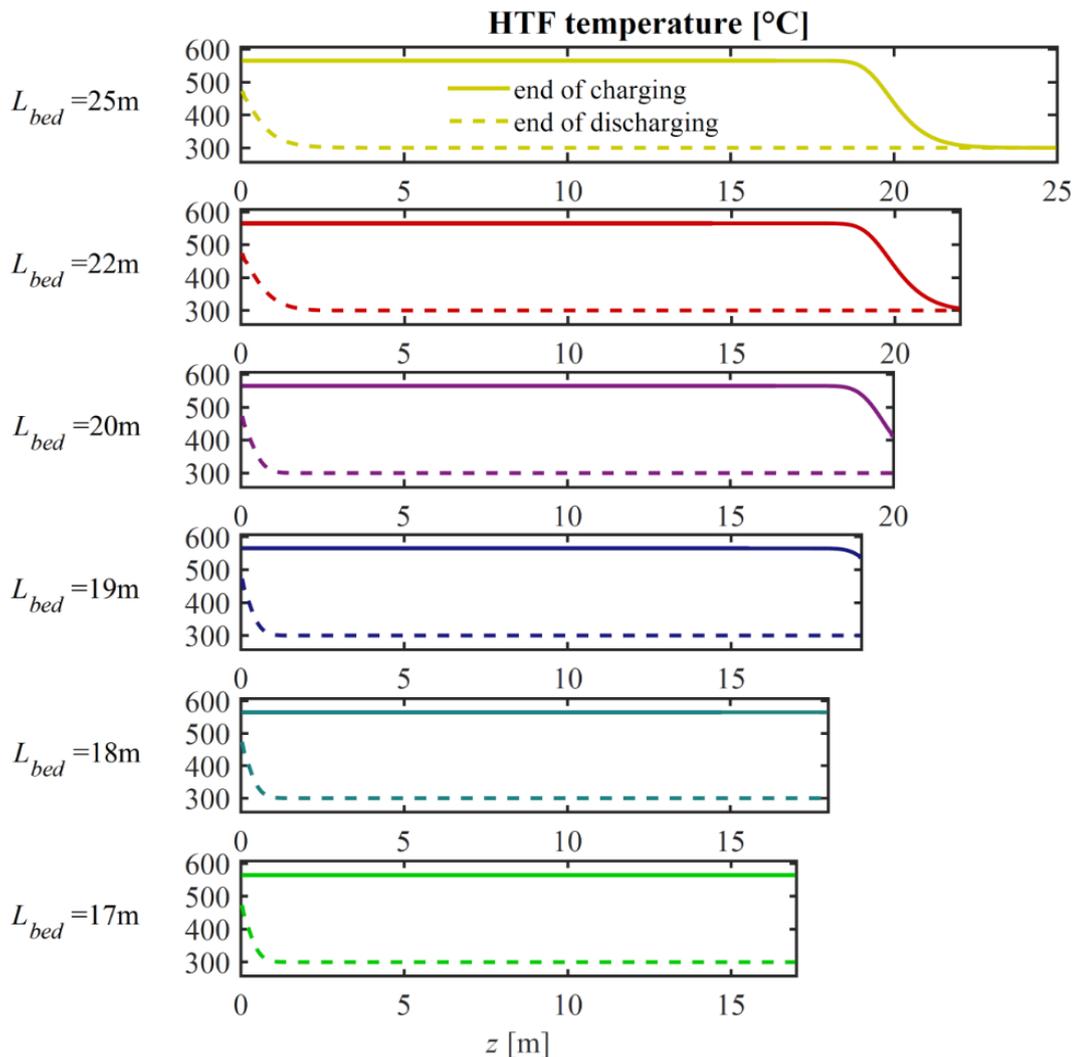


Abbildung 4: Modellierungsergebnisse für HTF Salzschnelze für verschiedene Betthöhen L_{bed} bei konstantem Tankdurchmesser von 15.2 m. Dargestellt sind die quasistationären Temperaturprofile am Ende der Aufladungs- und Entladungs Vorgänge für eine Schlackenkorngrosse von 10 mm, 6 h Aufladung mit 310 kg/s Salzschnelze von 565 °C. Entladung anfangs mit 310 kg/s abnehmend mit abnehmender Austrittstemperatur gemäss Abbildung 3. Ende der Entladung bei Austrittstemperatur von 473 °C. Während «niedrige» Betten bis etwa 18 m Höhe praktisch vollständig aufgeladen werden, werden «hohe» Betten über 22 m Höhe nicht voll genutzt.

Der Einfluss der Granulatgrösse ist aus Abbildung 6 ersichtlich, in der der Zusammenhang zwischen Gesamtwirkungsgrad und Speicherdichte für verschiedene Granulatgrössen dargestellt ist.

Die erzielten Resultate geben wertvolle Hinweise für das Design von Speichertanks mit metallurgischen Steinen, die mit Salzschnelzen durchströmt werden. Das im «SLAGSTOCK»-Projekt realisierte Speichersystem arbeitet mit Luft als Speichermedium. Ein Salzschnelze-Eintankspeicher mit metallurgischem Schlackengranulat wird jedoch zum Beispiel im laufenden EU-Projekt RESLAG [8] erstellt, das ebenfalls von CIC Energigine koordiniert wird. Das in «SLAGSTOCK» entwickelte Modell soll dort zur Validierung eingesetzt werden.

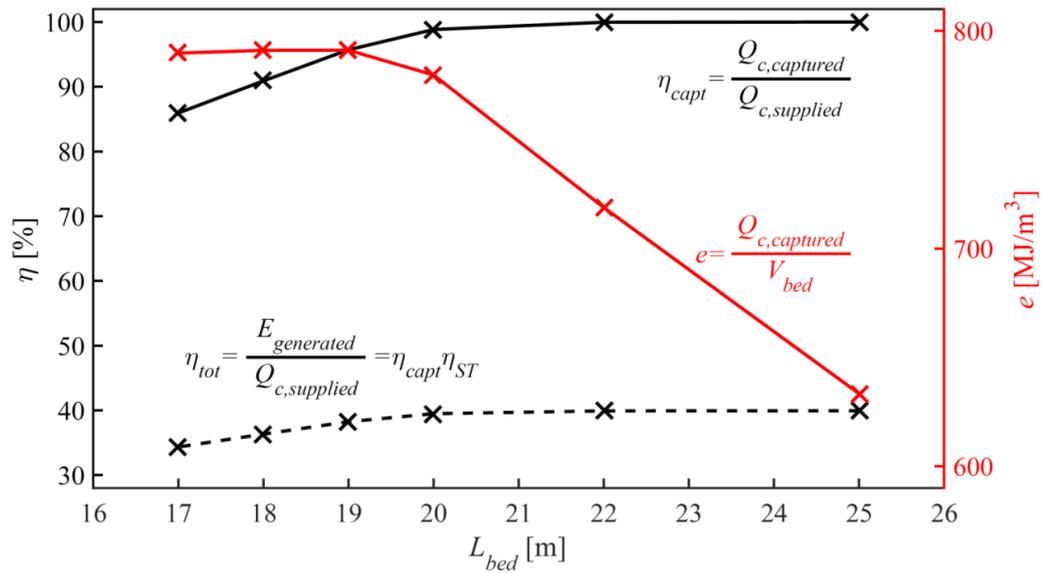


Abbildung 5: Erwarteter Wirkungsgrad η und Speicherdichte e als Funktion der Festbetthöhe L_{bed} eines Schlacke-Granulatspeichers mit HTF Salzschnmelze für etwa 1 GWh_t (Rechnung für Bettdurchmesser 15.2 m, Granulatgröße 10 mm). Die gestrichelte Kurve zeigt den Wirkungsgrad, mit dem die dem Speicher zugeführte thermische Energie via Speicher und Dampfturbine in Strom umgewandelt wird.

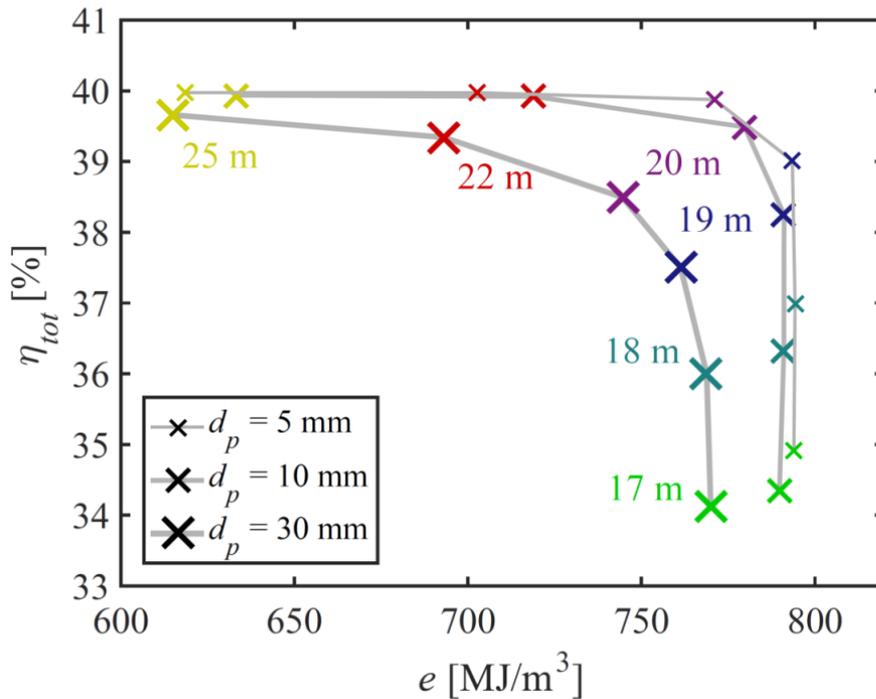


Abbildung 6: Wirkungsgrad und volumetrische Speicher-Energiedichte für verschiedene Betthöhen und Granulatgrößen des 1 GWh_t Speichers mit Schlackengranulat und HTF Salzschnmelze. Übrige Parameter wie in den vorausgegangenen Abbildungen.



4.2 Ökobilanzierung (LCA)

In diese Aktivität des PSI war auch das Labor für Energiesystemanalyse des PSI – in der Person von Christian Bauer – mit eingebunden, welches langjährige Erfahrung im Bereich LCA besitzt und zu den Instituten gehört, welche die führende LCA-Datenbank «ecoinvent» [9] entwickelt haben und laufend weiterentwickeln.

Die LCA wurde weitgehend von Frau Yvonne Bäuerle durchgeführt, die neben ihrer Teilzeitanstellung am PSI ein berufsbegleitendes Fernstudium in Energiemanagement absolvierte. In Absprache mit ihrer Universität (Koblenz-Landau, Deutschland) sowie mit Christian Bauer wählte sie die LCA des schlackenbasierten thermischen CSP-Speichers als Thema für ihre Masterarbeit [10].

Eine zentrale Aktivität bei der Erstellung einer LCA ist die Erhebung der erforderlichen Eingabedaten. Während für die Betrachtung des Gesamtsystems eines konzentrierenden Solarkraftwerkes (siehe Abbildung 1) für die meisten Komponenten auf bestehende Inventare zurückgegriffen werden konnte, mussten fundierte Daten insbesondere für den thermischen Speichertank inklusive Inhalt gewonnen werden.

Betrachtet wurden Tanks für 1 GWh_{th} Speicherkapazität gefüllt mit Schlackengranulat für die beiden Wärmeträgermedien Luft und Salzschnmelze. Die aus den Designbetrachtungen/Modellierungen in WP2 resultierenden Tankabmessungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

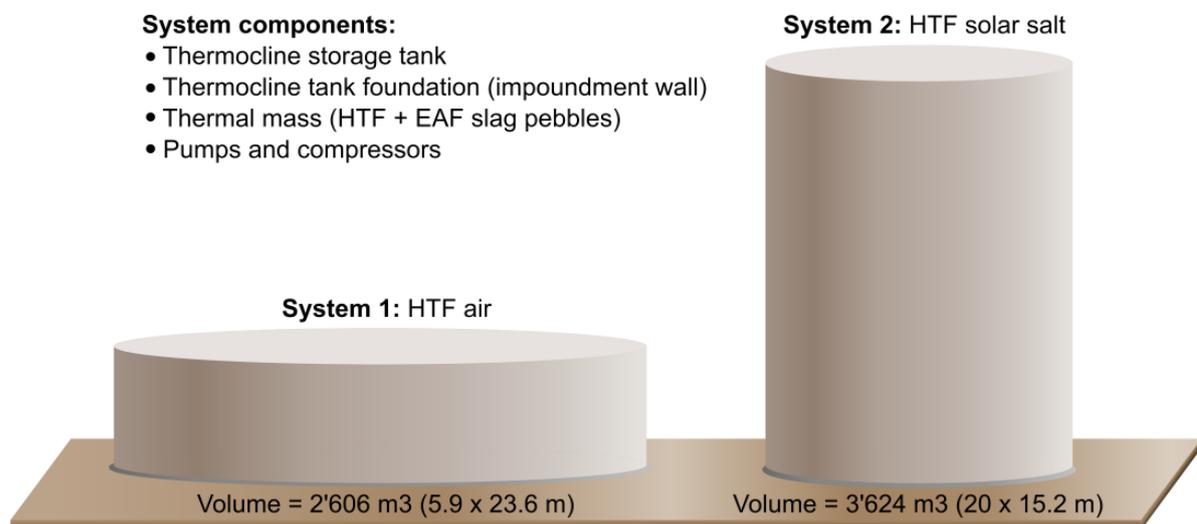


Abbildung 7: Tankdesign für einen 1 GWh_{th} Speicher für die beiden Wärmeträgermedien. Die Höhe des Tanks für HTF Luft ist vergleichsweise gering, um den Druckabfall über den Tank zu beschränken.



Zentrale Teilbeiträge für die LCA beziehen sich auf:

- Speichertank (Hauptdatenquellen: Design gemäss den Resultaten von WP1 und WP2 des «SLAGSTOCK»-Projektes sowie Literaturdaten)
- Schlacken-Granulat. Zwei Typen der Herstellung solarer Speicher aus dem «Rohgranulat» des Stahlwerks wurden betrachtet (siehe unter WP3 im Report für SOLAR-ERA.NET):
 - o «gesintertes Granulat» von Partner Tellus-Ceram sowie
 - o «mechanisch abgerundetes Granulat» von Partner IK4-Azterlan

Hauptdatenquellen: Tellus-Ceram und IK4-Azterlan mittels spezifischen Fragebögen und zahlreichen Direktkontakten

- Flüssigsalz (bei Variante mit Wärmeträgermedium Salzschnmelze) (Hauptdatenquelle: Direktkontakte mit der Firma SQM, weltführender Solarsalz-Hersteller, siehe auch Information im letzten Abschnitt dieses Kapitels)
- Transport (Szenario: Schlackenproduktion bei Bilbao/Baskenland, CSP-Anlage bei Sevilla/Andalusien, Abstand 900 km).

Darüber hinaus wurden in der LCA auch eine gesamte CSP-Anlage mit Wärmeträgermedium Salzschnmelze für verschiedene thermische Speichervarianten analysiert. Die resultierenden GHG-Emissionen pro erzeugter kWh_e für die verschiedenen Komponenten eines derartigen Turmkraftwerkes sind in Abbildung 9 dargestellt. Alle Details zu der Ökobilanz finden sich in der von Yvonne Bäuerle erstellten Masterarbeit [10].

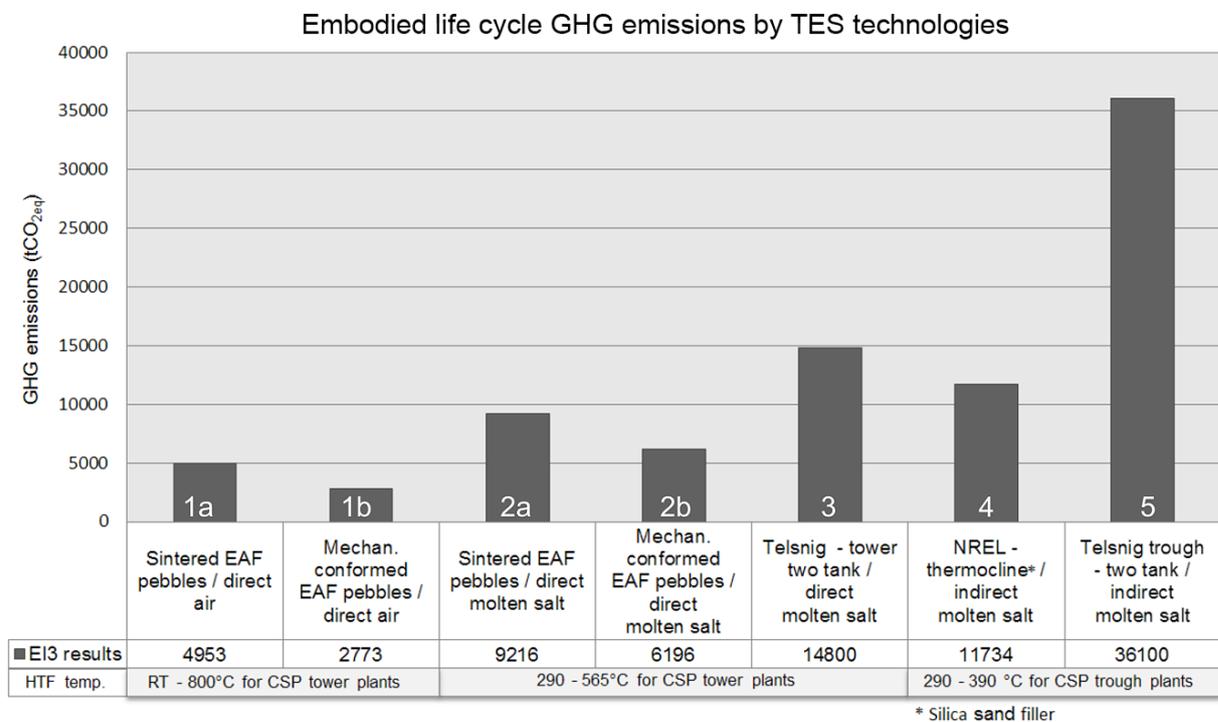


Abbildung 8: Überblick über LCA-Resultate bzgl. dem Speichermodul für einen 1 GW_{th}-Speicher, geeignet für 6h-Speicherung in einem 50 MW_{el}-Solarkraftwerk.



Ein wichtiges Nebenergebnis dieser Aktivität ist die Verbesserung der führenden LCA-Datenbank «ecoinvent» [9] in Bezug auf die Daten für Nitratsalze, wie sie bisher für thermische Speicher für CSP-Anlagen verwendet werden (Standard ist «solar salt» bestehend aus 60 Gewichtsprozent NaNO_3 und 40 Gewichtsprozent KNO_3). Die bisher in ecoinvent verfügbaren Datensätze basieren auf der künstlichen Herstellung dieser Salze unter Verwendung von Salpetersäure. Die zurzeit verwendeten Nitratsalze stammen jedoch aus natürlichen Ressourcen in der Atacama-Wüste in Chile, deren ökologischer Fussabdruck wesentlich kleiner ist als derjenige von synthetischen Salzen. Unter Verwendung von detaillierten Prozessangaben der Firma SQM, die diese Salze abbaut und unter anderem zu «solar salt» aufbereitet, hat Frau Bäuerle entsprechende Datensätze für natürlich abgebaute Salze erarbeitet und für ihre LCA verwendet. Zurzeit läuft – unter Beteiligung der «ecoinvent»-Fachleute am PSI (Labor für Energiesystemanalysen) – der Prozess des Einbaus dieser Daten in die «ecoinvent»-Datenbank. Dieser beinhaltet auch eine Überprüfung durch externe Experten vor der Verfügbarmachung für die Allgemeinheit.

5 Ausblick und weitere Schritte

Von zentraler Bedeutung für die Weiterführung der in «SLAGSTOCK» begonnenen Aktivitäten ist das laufende grosse europäische H2020 Projekt «RESLAG» [8], welches ebenfalls von CIC Energigune koordiniert wird und unter anderem die gleiche Thematik, jedoch weit umfassender und auch für andere Anwendungen behandelt.

Im Rahmen von RESLAG sollen unter anderem Experimente mit der in «SLAGSTOCK» realisierten Versuchsanlage (Lufterhitzer und 1 m^3 Speichertank) bei höheren Lufttemperaturen als bisher durchgeführt werden. Damit fliessen die Ergebnisse direkt in die «RESLAG»-Aktivitäten ein, an denen mehrere weitere relevante Industriepartner beteiligt sind. Die in «RESLAG» geplanten Disseminationen sind deshalb auch für «SLAGSTOCK» relevant.



6 Referenzen

- [1] <http://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>
- [2] Burgaleta J., Arias S., Ramírez D., *GEMASOLAR, the first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage*. Proceedings of the International SolarPACES Conference 2011, Granada, Spain.
- [3] Liu M., Tay S., Bell S., Belusko M., Jacob R., Will G., Saman W., Bruno F. (2016), *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, pp. 1411-1432.
- [4] Stroehle S., Haselbacher A., Jovanovic Z., Steinfeld A. (2014), *Transient Discrete-Granule Packed-Bed Reactor Model for Thermochemical Energy Storage*, Chemical Engineering Science, 117, pp. 465-478.
- [5] <http://www.tcs-power.eu/home.html>
- [6] Pacheco J. E., Showalter S. K., Kolb W. J. (2002), *Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants*, Journal of Solar Energy Engineering, 124, pp. 153-159.
- [7] Flueckiger S. M., Iverson B. D., Garimella S. V., Pacheco J. E. (2014), *System-level simulation of a solar power tower plant with thermocline thermal energy storage*, Applied Energy, 113, pp. 86-96.
- [8] <http://www.reslag.eu/>
- [9] <https://www.ecoinvent.org/>
- [10] Bäuerle Y. (2017), *Life Cycle Assessment: Thermal Energy Storage Systems Using Recycled Steel Industrial Waste for Concentrated Solar Power Plants*, Masterarbeit, Universität Koblenz – Landau, Deutschland.
- [11] Telsnig T. (2015). *Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrika*. Dissertation, Universität Stuttgart, Deutschland. doi:10.18419/opus-2384.
- [12] Heath G., Turchi C., Burkhardt J., Kutscher C., Decker T. (2009). *Life cycle assessment of thermal energy storage: Two-tank indirect and thermocline*. San Francisco, USA: ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability.