

Solarthermische Kraftwerke



DLR
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal
robert.pitz-paal@dlr.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Wetzel
thomas.wetzel@kit.edu

ISE
Dr. Peter Nitz
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

WI
Dr. Julia Terrapon-Pfaff
julia.pfaff@wupperinst.org
Dr. Thomas Fink
thomas.fink@wupperinst.org

Ole Soukup
ole.soukup@wupperinst.org

Zusammenfassung

Der Schutz des Klimas und die dafür erforderliche Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien ist eine globale Herausforderung, welche nach maßgeschneiderten Lösungen für die unterschiedlichen Klimazonen und Märkte der Erde verlangt. Die verstärkte Solarenergienutzung spielt dabei eine maßgebliche Rolle. Die Rolle Deutschlands als Exportnation beschränkt sich hierbei nicht auf die Klimawende im eigenen Land, sondern beinhaltet auch den weltweiten Export erneuerbarer Energietechnologien.

Die Kosten der photovoltaischen Stromerzeugung (PV) und der Windkraft sind in den vergangenen Jahren erfreulicherweise deutlich gesunken, entsprechend wurden in vielen Ländern große Kapazitäten zugebaut. Die resultierende stark gestiegene Einspeisung fluktuierender Erzeuger stellt Netzbetreiber vor neue Herausforderungen, insbesondere durch die extremen Lastschwankungen für plan- und steuerbare, heute größtenteils fossil befeuerte konventionelle Kraftwerke.

Hier bieten solarthermische Kraftwerke (► *Abbildung 1a*) Parabolrinnenkraftwerk; *1b*) Solarturmkraftwerk)

Lösungen: Sie bestehen aus großen Feldern von konzentrierenden Kollektoren, die Hochtemperaturwärme mit einer Temperatur von mehr als 400 °C bereitstellen, die in einem konventionellen Kraftwerksblock zur Stromerzeugung genutzt wird. Durch die Zwischenspeicherung der Wärme in großen thermischen Energiespeichertanks können sie in sonnenreichen Ländern Solarstrom flexibel und nach Bedarf produzieren.

Die Stromgestehungskosten solarthermischer Kraftwerke für planbare elektrische Energie sanken in den letzten Jahren bereits deutlich von rund 30 €/ct/kWh auf heute unter günstigen Einstrahlungs- und Finanzierungsbedingungen etwa 6 €/ct/kWh. An weiteren deutlichen Kostensenkungen muss jedoch auch zukünftig gearbeitet werden, um die noch sehr schmale Marktbasis von einigen hundert Megawatt pro Jahr signifikant zu verbreitern. FVEE-Einrichtungen arbeiten seit vielen Jahren zusammen mit der Industrie im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten an dieser Zielsetzung, was im Folgenden anhand einiger Beispiele erläutert wird:

1. Markt und Kostensituation

In ► *Abbildung 2* werden die verschiedenen Ausbauphasen für solarthermische Kraftwerke gezeigt:

- Phase 1: Erste kommerzielle solarthermische Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 350 MWe wurden bereits Mitte der 1980er Jahre in Kalifornien installiert.
- Phase 2: Eine großtechnische Markteinführung erfolgte aber erst ab dem Jahr 2007 vor allem in Spanien und den USA, angetrieben durch Förderprogramme für die Markteinführung von erneuerbaren Energien.
- Phase 3: Seit 2013 erfolgte der weitere Ausbau in zahlreichen Ländern des Sonnengürtels wie z. B. Südafrika, Marokko, Vereinigte Arabische Emirate oder China. Bis Ende 2016 waren etwa 5,2 GW an Anlagen am Netz, sehr viele von ihnen mit großen thermischen Energiespeichern, die einen Betrieb des Kraftwerks nach Sonnenuntergang zwischen 3 bis mehr als 12 Stunden ermöglichen.

Während der Markteinführung in Spanien wurde anfänglich eine Einspeisevergütung von knapp 30 ct/kWh gezahlt. Die Kosten sind seitdem stark gefallen und erreichen heute unter günstigen Randbedingungen Werte von etwa 6 ct/kWh. Neben

Abbildung 1

Solarthermische Kraftwerke:

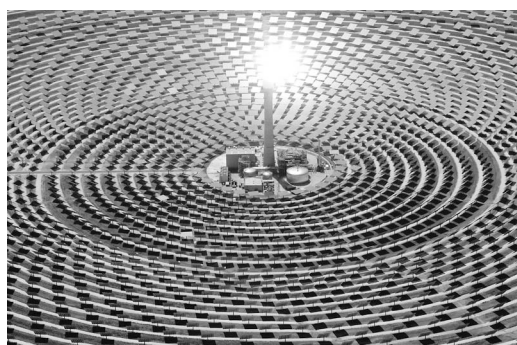
a) Parabolrinnenkollektorsysteme, bei denen ein Thermöl in einem bestrahlten Rohrleitungsnetz durcherhitzt wird

Quelle Solar Millennium



b) Solarturmsystem, bei dem der Sonne nachgeführte Spiegel einen Rohrbündelwärmübertrager auf der Spitze eines Turmes bestrahlen, in dem eine Salzschnmelze als Wärmeträgerfluid zirkuliert

Quelle Gemasolar solar thermal plant owned by Torresol Energy
© Sener



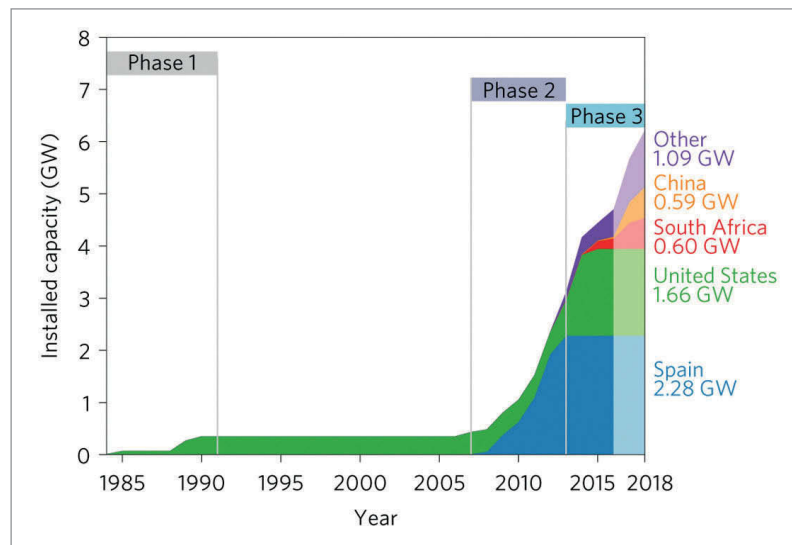


Abbildung 2

Installierte Kapazität aller solarthermischen Kraftwerke weltweit als Funktion der Zeit

(Bild nach Lilliestam, J., Labor-dena, M., Patt, A. & Pfenninger, S. *Nat. Energy* 2, 17094 (2017)).

technischen Innovationen sind vor allem Skalierungseffekte, langfristige Stromabnahmeverträge und ein verstärkter Wettbewerb um Schlüsselkomponenten wesentliche Treiber für die Kostensenkung.

Insbesondere die Kombination von PV-Kraftwerken, die den Strom an sonnenreichen Standorten für unter 3 ct/kWh produzieren können, mit solarthermischen Kraftwerken, die mittels ihrer Wärmespeicher erst am späten Nachmittag, während Wolken durchgängen oder Sandstürmen und in der Nacht den Strom produzieren, erlaubt eine Rund-um-die-Uhr-Versorgung, die wettbewerbsfähig mit fossilbefeuerten Gas- und Dampfturbinen Kraftwerken ist. Gleichzeitig vermeiden sie die Volatilitätsrisiken in Bezug auf den Brennstoffpreis sowie CO₂-Emissionen und bieten ein erhebliches lokales Wertschöpfungspotenzial in den Zielmärkten.

2. Forschungsansätze zur Markteinführung und Kostensenkung

Forschung und Entwicklung zielen darauf ab, die Effizienz von Komponenten und Systemen zu verbessern und gleichzeitig die Herstellungskosten zu senken.

Ein wesentlicher Treiber dafür ist die im System erzielte obere Prozesstemperatur, die heute bei 400 °C für Parabolrinnen und bei 560 °C für Solar-turm-kraftwerke liegt. Höhere Prozesstemperaturen erlauben es, die Umwandlung von Wärme in Strom effizienter zu gestalten. Dafür werden alternative Wärmeträgerfluide benötigt, die die Wärmeenergie auf diesem Temperaturniveau gut aufnehmen und speichern können.

Ein weiterer Ansatz bezieht sich darauf, digitale Techniken zum Einsatz zu bringen, um Betrieb und Wartung der großen Solarfelder zu optimieren. Eine Markteinführung dieser Technologien muss neben

den Kosten weitere Kriterien berücksichtigen, um erfolgreich zu sein. Auf diese drei Aspekte wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1 Neue Wärmeträgerfluide

Wärmeträgerfluide müssen neben guten Wärmeübertragungs- und Speichereigenschaften auch über eine gute Temperaturstabilität für den Einsatzbereich oberhalb von 550 °C sowie geringe Kosten verfügen. Drei Materialklassen stehen hiermit im Fokus: kostengünstige Salzmischungen, die im Einsatzbereich flüssig und möglichst wenig korrosiv sind, inerte keramische Partikel und Flüssigmetalle. Ihre Einsatzmöglichkeiten werden im Folgenden diskutiert:

Salzschmelze

Bereits heute werden Schmelzen aus Nitratsalzen (40 % KNO₃, 60 % NaNO₃) bei Temperaturen bis 560 °C als Wärmeträgerfluid und gleichzeitig auch Speichermedium kommerziell eingesetzt. Ein Forschungsansatz zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung ist die Untersuchung neuer Salze und Mischungen mit tieferen Erstarrungs- und höheren Betriebstemperaturen. Dabei müssen auch Materialverträglichkeiten und Korrosionsbeständigkeit berücksichtigt und verbessert sowie eine geeignete Anlagentechnik entwickelt werden.

Ein Ansatz, der hierzu am Fraunhofer ISE verfolgt wird, ist die Verwendung von Ein-Tank-Schichtspeichern, die im Vergleich zu den aktuellen Zwei-Tank-Speichern Kosteneinsparungen versprechen. An dem aufgebauten Prototyp-Speicherteststand (► *Abbildung 3*) konnte erfolgreich eine sehr gute Schichtung (Trennung von kälterer und wärmerer Schmelze durch Dichteunterschiede) nachgewiesen werden. Die vergleichsweise kleinskalige Versuchsanlage erlaubt den Test neuer Materialien sowie von Füllkörpern, um die Kosten weiter zu senken.

Abbildung 3
Ein-Tank-Speicherteststand
 für Salzschnmelzen des Fraunhofer ISE. Eine sehr gute Schichtung der Salzschnmelze im Speicher (links im Bild) konnte erfolgreich nachgewiesen werden.
 Quelle Fraunhofer ISE



Partikel

Kommerzielle Partikel aus Bauxit sind sehr kostengünstig und bis zu 1.000 °C stabil. Noch wichtiger ist, dass die dunklen Partikel direkt mit der konzentrierten Sonnenstrahlung erhitzt werden können. Dieses Merkmal, das als „direkte Absorption“ bezeichnet wird, reduziert den Bedarf an teuren Hochtemperaturlegierungen für Rohrleitungen erheblich. In ersten Studien wurde das Kostenreduktionspotenzial auf bis zu 16 % im Vergleich zu den Solarturmsystemen mit geschmolzenem Salz geschätzt.

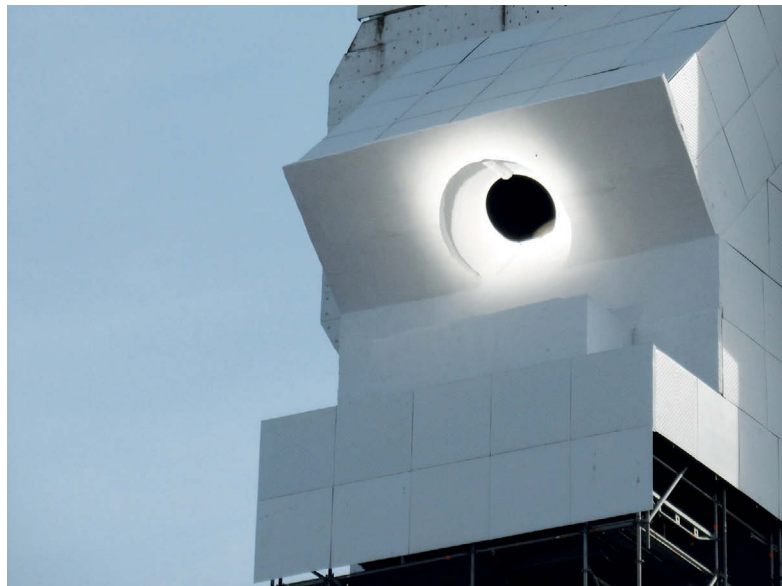
Im DLR wird das Konzept des rotierenden Zentrifugalreceivers (► [Abbildung 4](#)) verfolgt. Die Partikel werden gegenüber der Strahlungseintrittsöffnung eingeführt und bewegen sich langsam an der rotierenden Zylinderwand, wo sie durch Zentrifugal-

kräfte gehalten werden. Eine geeignete Einstellung der Rotationsgeschwindigkeit steuert die Verweilzeit im Receiver und ermöglicht somit die Kontrolle der Temperatur. Nach Labortests im 10-kW-Maßstab bis zu Austrittstemperaturen von 900 °C erfolgte eine Skalierung in den 500 kW Maßstab, die zurzeit auf dem Solarturm in Jülich getestet wird.

Flüssigmetalle

Flüssige Metalle sind in einem breiten Temperaturbereich von ca. 100 °C bis hin zu Temperaturen über 1000 °C als flüssige Wärmeträgermedien einsetzbar und zeichnen sich dabei durch vorteilhafte thermophysikalische Eigenschaften aus. Für leichte Metalle wie Lithium, Natrium, Kalium und ihre Legierungen, aber auch schwere Metalle wie Zinn, Blei, Wismut und deren Legierungen liegen langjährige Einsatzer-

Abbildung 4
Test eines Zentrifugalpartikelreceivers
 mit einer Leistung von 500 kWth auf der Testplattform des DLR-Solarturms in Jülich
 Quelle DLR



fahrungen aus speziellen Bereichen vor. Hierzu gehören metallurgische Prozesse, die Glasherstellung und die Kerntechnik. Die hervorstechendsten Merkmale der Flüssigmetalle sind ihre Hochtemperaturstabilität und ihre gegenüber konventionellen Flüssigmedien zeh- bis hundertfach höhere Wärmeleitfähigkeit. Beide Eigenschaften ermöglichen höhere und inhomogenere Strahlungsdichten an den Absorbern, welche u. a. in eine erhebliche Verkleinerung der spezifischen Absorberflächen und damit verbundene Kostenvorteile übersetzt werden können.

Zwischen DLR und KIT besteht eine enge und komplementäre Zusammenarbeit bei der Erforschung und Entwicklung von flüssigmetallbasierten Receiversystemen [Fritsch2017, Fleisch2017]. Am KIT wird dazu ein Forschungsansatz verfolgt, der alle flüssigmetallspezifischen Aspekte zukünftiger Solarturmkraftwerke umfasst. Dazu gehören Grundlagenfragen zur Thermofluidynamik [Marocco2016], Fragen des Anlagenbetriebs und der Sicherheit [Fleisch2015], Forschung zu Korrosionsbeständigkeit und Korrosionsschutz von Strukturmaterialien bei Verwendung mit Flüssigmetallen [Kap. 6 in Heinzel2017] bis hin zu Möglichkeiten der direkten Wandlung von Wärme in Elektrizität in flüssigmetallbasierten elektrochemischen Wandlern [Onea2015]. Auch der Einsatz als innovatives Arbeitsmedium in thermochemischen Prozessen [Geißler2016] und Optionen zur thermischen Speicherung beim Einsatz von Flüssigmetallen [Niedermeier2016] werden hier untersucht.

2.2 Nutzung von Digitalisierungstechniken für Betrieb und Wartung

Die Nutzung insbesondere hochauflösender optischer Sensoren und die automatische Bildverarbeitung der damit aufgenommenen großen Datenmengen ermöglichen einen zunehmend besseren Betrieb und einen verringerten Wartungsaufwand. Hier ist es das Ziel, möglichst viele Informationen zu koppeln. Im Folgenden werden dazu zwei Beispiele vorgestellt.

Heliostatfeldsteuerung

Eine neue Kombination aus modulierter Nachföhrbewegung von Heliostaten, hoch auflösenden Kameras und geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen erlaubt einen Abgleich von Soll- und Ist-Position von Brennflecken aller Heliostaten eines Turmkraftwerkes im laufenden Betrieb. Damit werden sowohl der Aufbau und die erstmalige dabei notwendige Kalibrierung der Heliostaten sowie die Regelung und die Kontrolle der Kalibrierung im Betrieb durch einen geschlossenen Regelkreis wesentlich vereinfacht (► *Abbildung 5*, schematisch).

Die am Fraunhofer ISE entwickelte Methode wurde bereits erfolgreich im Labor und prototypisch im Feld getestet. Die Weiterentwicklung und Anbindung an kommerzielle Steuerungen sind Gegenstand laufender Aktivitäten.

Qualitätskontrolle mittels Flugdrohnen

Nutzt man hochauflösende Digitalphotographie in Verbindung mit Flugdrohnen, ist es möglich, die optisch großen Solarkollektorfelder in sehr kurzer Zeit und ohne Einfluss zu qualifizieren (► *Abbildung 6*).

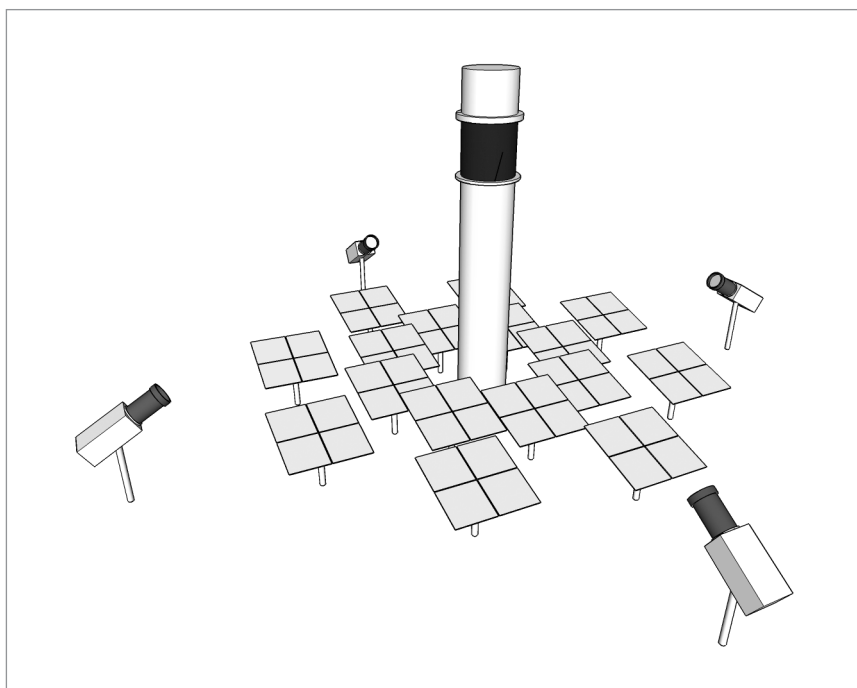


Abbildung 5

Optimierte Nachführung von Heliostaten: Schematischer Einsatz von digitaler Kamera-technik und Bildauswertung für die Nachführung von Heliostaten in Turmkraftwerken in einem geschlossenen Regelkreis. Durch die eingesetzten Algorithmen kann die Regelung im laufenden Betrieb erfolgen.

Quelle Fraunhofer ISE

Abbildung 6
Flugdrohnen
 mit hochauflösender
 Digitalkamera beim
 Überflug über ein
 Solarfeld.
 Quelle: DLR



Dabei wird das Spiegelbild des Absorberrohrs in den Spiegelfacetten des Kollektors genutzt, um die Formabweichung und Richtungsabweichung des Spiegels vom Idealzustand zu ermitteln. Mittels numerischer Modelle lässt sich daraus die optische Effizienz des Kollektorfeldes orts aufgelöst bestimmen. Dies gibt dem Betreiber des Kraftwerks wichtige Hinweise in Bezug auf die Steuerung seiner Anlage und die Notwendigkeit zur Nachjustierung seiner Kollektoren.

2.3 Akzeptanzforschung

Neben diesen technologischen und ökonomischen Aspekten spielen die politische und gesellschaftliche Akzeptanz allgemein und vor Ort eine wichtige Rolle für den weiteren Ausbau von solarthermischen Kraftwerken. Partizipative Multi-Stakeholderprozesse sowie empirische Feldforschung können dabei helfen, das Wissen über die komplexen Beziehungen zwischen verschiedenen Optionen zukünftiger Stromerzeugung, nachhaltiger Entwicklung und gesellschaftlichen Präferenzen zu verbessern und so die Akzeptanz von solarthermischen Kraftwerken zu erhöhen.

Partizipative Strategieentwicklung und Entscheidungsunterstützung

Im Rahmen des Projekts MENA SELECT wurden beispielsweise mittels partizipativer Szenarienentwicklung, Stromsystemmodellierung sowie empirischer Feldforschung verschiedene Strommixmaptionen für drei ausgewählte Länder (Marokko, Jordanien und Tunesien) mit vielfältigen lokalen Akteuren und Entscheidungsträgern entwickelt und diskutiert. Abschließend wurde mit Hilfe einer Multi-Kriterien-Analyse ein Ranking der verschiedenen Strommixmaptionen für die drei untersuchten Länder erstellt. Laut diesem Ranking weisen durch die beteiligten Stakeholder-Gruppen bevorzugte Szenarien in allen drei Zielländern bis zum Jahr 2050 hohe Anteile erneuerbarer Energien auf. Im Mix verschiedener

erneuerbarer Erzeugungstechnologien spielen dabei auch solarthermische Kraftwerke (mit installierten Leistungen im ein- bis zweistelligen GW-Bereich) eine wichtige Rolle.

Evaluierung von sozioökonomischen Auswirkungen

Untersuchungen am Beispiel des solarthermischen Kraftwerks NOOR₀ I am Standort Ouarzazate in Marokko haben gezeigt, dass derartige Kraftwerke nicht nur erneuerbare Stromlieferanten für den steigenden Energiebedarf im südlichen Mittelmeerraum sind, sondern dass diese auch positive Effekte auf die regionale Entwicklung haben können. Die Studie hat zudem gezeigt, dass Planung und Bau von NOOR₀I durch die lokale Bevölkerung bisher sehr positiv aufgenommen wurden. Gleichzeitig sind aber auch Befürchtungen, beispielsweise über mögliche Folgen des Kraftwerksbetriebs (z. B. Wasserbedarf), und die Entwicklungsbedürfnisse der lokalen Bevölkerung beim zukünftigen Ausbau von solarthermischen Kraftwerken zu berücksichtigen.

3. Perspektiven

Solarthermische Kraftwerke sind mit etwa 5 GW an installierter Kapazität weltweit noch eine vergleichsweise junge Technologie, die jedoch inzwischen flexiblen Strom zu sehr attraktiven Kosten anbieten kann und somit den weiteren Ausbau von fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Technologien wie Wind und PV ermöglicht. Weitere rasche Kostensenkung erscheint auf der Basis jüngster Forschungsergebnisse möglich, insbesondere durch den Ausbau der oberen Prozesstemperatur und der damit verbunden Wirkungsgradsteigerungen. Die FVEE-Institute sind dafür gut aufgestellt, um gemeinsam mit der Industrie diese Innovationen umzusetzen.

Referenzen

- [Flesch2015] Flesch, J., Fritsch, A., Cammi, G., Marocco, L., Fellmoser, F., Pacio, J., & Wetzel, T. (2015). Construction of a test facility for demonstration of a liquid lead-bismuth-cooled 10kW thermal receiver in a solar furnace arrangement-SOMMER. *Energy Procedia*, 69, 1259-1268.
- [Flesch2017] Flesch, J., Niedermeier, K., Fritsch, A., Musaeva, D., Marocco, L., Uhlig, R., ... & Wetzel, T. (2017, July). Liquid metals for solar power systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 228, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [Fritsch2017] Fritsch, A., Uhlig, R., Marocco, L., Frantz, C., Flesch, R., & Hoffschmidt, B. (2017). A comparison between transient CFD and FEM simulations of solar central receiver tubes using molten salt and liquid metals. *Solar Energy*, 155, 259-266.
- [Geißler2016] Geißler, T., Abánades, A., Heinzl, A., Mehravarán, K., Müller, G., Rathnam, R. K., ... & Weisenburger, A. (2016). Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed. *Chemical Engineering Journal*, 299, 192-200.
- [Heinzl2017] Heinzl, A., Hering, W., Konys, J., Marocco, L., Litfin, K., Müller, G., ... & Weisenburger, A. (2017). Liquid Metals as Efficient High Temperature Heat Transport Fluids. *Energy Technology*.
- [Marocco2016] Marocco, L., Cammi, G., Flesch, J., & Wetzel, T. (2016). Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 22-35.
- [Niedermeier2016] Niedermeier, K., Flesch, J., Marocco, L., & Wetzel, T. (2016). Assessment of thermal energy storage options in a sodium-based CSP plant. *Applied Thermal Engineering*, 107, 386-397.
- [Onea2015] Onea, A., Hering, W., Palacios, J. L., & Stieglitz, R. (2015). AMTEC Clusters for power generation in a concentrated solar power plant. *Magnetohydrodynamics* (0024-998X), 51(3).