

Erste Erfahrungen mit der 100 kW Pilotanlage zur solaren ZnO-Dissoziation im 1 MW Solarofen in Odeillo – Kurzbericht über Experimentierkampagne 2011 und Ausblick

Anton Meier, PSI

Erste Experimentierkampagne – Rückblick

Die erste Experimentierkampagne in Odeillo dauerte vom 30.5. bis 27.7.2011 (total 7.5 Wochen). Der 1 MW Solar Furnace (MWSF) war während fünf Feiertagen geschlossen, so dass effektiv 6.5 Wochen zur Verfügung standen. Dank der guten Vorbereitung am PSI war die Pilotanlage in weniger als einer Woche zusammengebaut und auf der mobilen Plattform montiert. Die Inbetriebnahme im Solarturm dauerte weitere 10 Tage. Es wurden Systemtests von sämtlichen Komponenten wie Kühlwasser, Gasversorgung, Abgassystem, elektrische und elektronische Verbindungen, Prozessleitsystem und Datenerfassung durchgeführt. Die meisten Systeme funktionierten auf Anhieb oder nach kleinen Modifikationen. Der erste Solarversuch fand nach 2.5 Wochen statt. In den folgenden 4.5 Wochen wurden im Ganzen elf Experimente während insgesamt mehr als 60 Sonnenstunden durchgeführt. Die letzte halbe Woche war für Packen und Aufräumen reserviert.

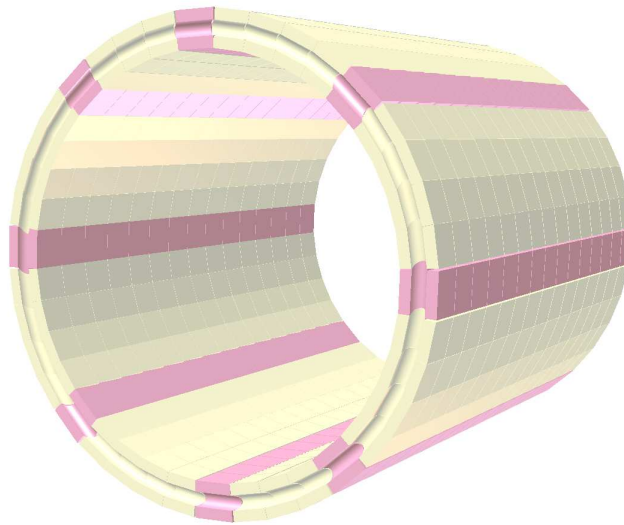
Von den elf Experimenten dienten acht dazu, durch Ausheizen der Kavität die Feuchtigkeit aus der Isolation zu entfernen, die vom Herstellungsprozess stammte und wegen Zeitdruck (verspätete Lieferung der Reaktorschale) vom Ofenbauer nicht bereits beim Einbau in den Reaktor ausgetrieben werden konnte. Ausserdem musste das organische Bindungsmaterial der Klebstoffe weggedampft werden. Zu diesem Zweck wurden die Ausheizversuche ohne Fenster und mit offenem Auslass gefahren, um das Austreten des Wasserdampfs zu erleichtern. Diese Versuche dauerten jeweils 3 bis 7 Stunden und erreichten maximale Temperaturen von 1623°C. Schon bei einem der ersten Versuche, als der Programmleiter Pierre Renaud und das Schweizer Fernsehen (Sendung „Einstein“) anwesend waren, wurde die Kavitätsauskleidung während 7 Stunden und bei Temperaturen bis 1500°C arg strapaziert. Einige Kacheln zeigten daraufhin Risse und eine Al₂O₃-Kachel an der Rückwand fiel heraus. Die Rückwand wurde repariert und der ganze Innenausbau mit hitzebeständigem Keratin ausgestrichen. Bei weiteren Langzeit-Versuchen wurde der Reaktor wieder auf jeweils über 1500°C geheizt, wobei zwischendurch die Kacheln nochmals mit Keratin behandelt wurden. Zu Beginn und nach Abschluss der Ausheizversuche wurde der Reaktor gewogen, wobei ein Gewichtsverlust von total 73 kg (hauptsächlich entwichene Feuchtigkeit) festgestellt wurde.

Durch das Trocknen der Kavität schrumpfte die Isolation, was zu einem Spalt zwischen der äussersten Isolationsschicht und dem Reaktormantel führte. Beim Rotieren des Reaktors entstanden dadurch mechanische Spannungen in der Kavitätsauskleidung, so dass eine grössere Anzahl Kacheln sowie Teile der Isolation herunterfielen. Obwohl die beschädigte Kavität relativ schnell wieder repariert werden konnte, indem die heruntergefallenen Kacheln auf die Isolation geklebt wurden, verzichteten wir in der Folge auf das Rotieren des Reaktors, um wenigstens ein paar Versuche mit ZnO-Dissoziation durchführen zu können. Dabei wurde das Fenster eingesetzt, und auch das Förder- und Quenchsystem wurde betriebsbereit gemacht. Leider konnten nur noch drei Experimente von jeweils 5-6 Stunden Dauer und bei maximalen Betriebstemperaturen von 1600-1630°C durchgeführt werden, wobei alle wegen der jeweils am Nachmittag zunehmenden Bewölkung vorzeitig abgebrochen werden mussten. So konnte nach Erreichen der Betriebstemperatur nur während kurzer Zeit ZnO zersetzt werden. Immerhin konnte gezeigt werden, dass in diesem 100 kW Pilotreaktor Zinkausbeuten von etwa 50% möglich sind, ähnlich wie im 10 kW Prototypreaktor. Nach so kurzer Messzeit darf dieses Ergebnis als Erfolg angesehen werden und ist bereits mehr, als andere Gruppen in monate- bzw. jahrelangen Messkampagnen mit ihren jeweiligen aufskalierten Solarreaktoren und Prozessen erreicht haben.

Das Design und Layout der Pilotanlage im MWSF in Odeillo sowie vorläufige Testresultate werden in Kürze an der SolarPACES Konferenz in Granada publiziert (Hutter et al., 2011).

Zweite Experimentierkampagne – Ausblick

Die oben geschilderten Probleme mit der Kavität erzwangen eine nicht planmässige Rückführung des Pilotreaktors ans PSI, da hier eine umfassende Reparatur einfacher durchzuführen ist als in Odeillo. Nach den Erfahrungen im MWSF erscheint es nunmehr praktisch unmöglich, beim 100 kW Pilotreaktor wegen der grossen Dimensionen eine mechanisch stabile Kavitätsauskleidung aus flachen, mit hochtemperaturbeständigem Kleber verleimten Kacheln herzustellen – dies im Gegensatz zum kleinen 10 kW Prototypreaktor, wo dies problemlos machbar war. Es braucht deshalb eine selbsttragende Konstruktion, z.B. aus Nut- und Federsteinen, wie in der nachfolgenden Figur skizziert. Es ist allerdings nicht einfach, einen Lieferanten zu finden, der solche hochtemperaturbeständigen Keramiksteine nach unseren Vorgaben zu einem bezahlbaren Preis herstellen kann. Diesbezügliche Abklärungen sind im Gang.



Figur: Selbsttragende Kavitätsauskleidung mit Nut- und Federsteinen.

Projekt 1: Demonstration des 100 kW Pilotreaktors (1 Jahr; 2012)

Die Erneuerung der Kavitätsauskleidung und weitere Modifikationen werden längere Zeit beanspruchen, so dass die zweite Messkampagne nicht wie ursprünglich vorgesehen bereits im Februar/März 2012, sondern erst im Juni/Juli 2012 stattfinden kann. Gemäss Strahlungsdaten (DNI) von Odeillo sind dies auch jene Monate, die am meisten Sonnentage versprechen (wobei das schlechte Wetter 2011 hoffentlich eine Ausnahme war).

Am Ende der zweiten Kampagne sollen alle *Meilensteine* erreicht sein, die aus den obgenannten Gründen noch nicht oder nicht vollständig erreicht werden konnten (gemäss Projektbeschreibung):

- *Zuverlässiger Reaktorbetrieb* ohne Unterbrechung während eines Sonnentages im Solarofen;
- *Reproduzierbare Experimente* zur solaren Zinkherstellung mit Wirkungsgrad >15%.

Dies ist ein sehr ambitioniertes Vorhaben und erfordert eine Verlängerung des gegenwärtigen Projekts um ein Jahr bis Ende 2012. Die ausstehenden *Arbeiten* nach Beendigung der Experimente umfassen die

- (1) *Auswertung der Messdaten*;
- (2) *Validierung des Reaktormodells* mit den experimentellen Daten;
- (3) *Konzeptstudie* einer industriellen 10-50 MW Solaranlage zur ZnO-Dissoziation, wobei diese aus Zeitgründen voraussichtlich erst in einem Nachfolgeprojekt erarbeitet werden kann (siehe unten).

Weil das gegenwärtige Projekt nicht wie früher antizipiert um 6 Monate, sondern um 1 Jahr verlängert werden muss, kann das PSI die Zusatzkosten nicht alleine tragen. Wir möchten deshalb anregen, ein 1-Jahresprojekt mit je einer 50%-Beteiligung des BFE (oder allenfalls einer anderen Förderagentur) und des PSI in Erwägung zu ziehen. Da die Kosten für die zweite Kampagne im Wesentlichen gedeckt

sind, fallen hauptsächlich ausserordentliche Kosten für die Erneuerung der Kavitätsauskleidung sowie Salärkosten an. Es ist mit Gesamtkosten in der Höhe von schätzungsweise 600-800 kCHF zu rechnen.

Mögliche zukünftige Entwicklungen – Roadmap

Im Folgenden soll in einer Roadmap aufgezeigt werden, wie die industrielle solare Zinkherstellung bis 2020 realisiert werden kann. Dazu werden zwei weitere aufeinanderfolgende Projekte skizziert.

Parallel dazu wird in zwei separaten Projekten einerseits die Abtrennung von Sauerstoff aus dem Inertgasstrom untersucht (ETH-Projekt *Gastrennung*) und andererseits der zweite Prozessschritt des Zn/ZnO-Zyklus, nämlich die Produktion von Wasserstoff und Synthesegas, weiter vorangetrieben (BFE-Projekt *Solar Fuels*). Beide Projekte zeigen bisher vielversprechende Resultate, die ein erfolgreiches Schliessen des Zn/ZnO-Kreisprozesses erwarten lassen.

Projekt 2: Vorbereitung eines industriellen solaren Reaktorbetriebs (3 Jahre; 2013-2015)

Unter der Annahme eines erfolgreichen Abschlusses des vorgeschlagenen 1-Jahresprojekts (1.1.-31.12.2012) mit Erreichung der Meilensteine ist der nächste logische Schritt die Vorbereitung eines industriellen solaren Reaktorbetriebs, vorzugsweise unter Beteiligung eines interessierten und potenten Industriepartners. Potenzielle Industriepartner sollen angeschrieben und gegen Ende der zweiten Messkampagne (Juli 2012) zu einer Demonstration der Pilotanlage nach Odeillo eingeladen werden.

Das Projekt umfasst experimentelle Untersuchungen mit einem skalierbaren Solarreaktor, der auf einer industriellen Solarturm-Anlage betrieben werden kann:

- (1) *Mechanische Anpassung des Solarreaktors*: Ein industrieller Solarreaktor, der auf einer Solarturm-Anlage betrieben wird, muss vermutlich gegenüber der Horizontalen geneigt sein und mit seiner Apertur Richtung Heliostatenfeld schauen. Dies erfordert mechanische Anpassungen am Reaktor und eine Abstimmung des geänderten Strömungsverhaltens der Gase im Reaktor. Speziell muss das Funktionieren des Fördersystems unter den geänderten Bedingungen gesichert sein.
- (2) *Sekundärkonzentrator (CPC)*: Weiter ist absehbar, dass ein industrieller Solarreaktor auf einem Turm mit einem sogenannten Sekundärkonzentrator (CPC) vor der Apertur ausgerüstet sein muss, um die Solarstrahlung genügend zu konzentrieren und so die verlangten hohen Temperaturen zu erreichen. Ablagerungen auf der wassergekühlten Spiegelfläche des CPC durch kondensierbare Gase müssen verhindert werden (analog zum Sauberhalten des Fensters mit Hilfe von Inertgasströmen).

Die experimentellen Untersuchungen mit dem geneigten Solarreaktor mit eingebautem CPC sollen zuerst im 10 kW Prototypreaktor und anschliessend im 100 kW Pilotreaktor durchgeführt werden.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wird die Reaktormodellierung weiter entwickelt und es werden Konzeptstudien durchgeführt:

- (3) *Modifikation und Validierung des Reaktormodells*: Das bestehende Solarreaktormodell, welches Wärmeübertragung und chemische Reaktionskinetik verknüpft, wird für den modifizierten Reaktor angepasst und im 10 kW sowie 100 kW Massstab experimentell validiert.
- (4) *Konzept eines modularen Solarreaktors*: Ein modulare Reaktorkonzept mit variabler Anzahl Modulen und verschiedenen Modulgrössen wird entwickelt und optimiert.
- (5) *Konzept einer industriellen Solaranlage*: Basierend auf dem Reaktormodell wird eine Konzeptstudie einer industriellen 10-50 MW Solaranlage zur ZnO-Dissoziation erstellt.
- (6) *Konzept für Wärmerückgewinnung*: Weiter wird ein Konzept für die Wärmerückgewinnung erarbeitet und, falls zeitlich und finanziell machbar, im 100 kW Solarreaktor implementiert und getestet.

Der Umfang der oben genannten Arbeiten erfordert eine Projektdauer von 3 Jahren. Erste Kostenschätzungen beziffern sich auf ca. 3 MCHF.

Projekt 3: Bau und Betrieb einer vor-kommerziellen Solaranlage (4 Jahre; 2016-2019)

Im nächsten Schritt, der den Beizug eines finanziell engagierten Industriepartners bedingt, geht es um den Bau und Betrieb einer vor-kommerziellen Solaranlage zur Zinkherstellung.

Das Projekt umfasst folgende experimentellen Untersuchungen:

- (1) *Test eines modularen Solarreaktor:* Auf einer bestehenden 1-5 MW Solarturm-Anlage wird ein modularer Solarreaktor getestet, der in einer ersten Phase aus 3 Modulen und in einer zweiten Phase aus 7 Modulen besteht. Die Modulgrösse kann zwischen 100 kW und 500 kW variieren.
- (2) *Wärmerückgewinnung:* Ein Verfahren zur Wärmerückgewinnung wird im modularen Reaktor implementiert und die rezyklierte Wärme zur Gastrennung (Sauerstoff und Inertgas) verwendet.
- (3) *Einkopplung des zweiten Prozessschritts:* Der zweite Prozessschritt des Zn/ZnO-Kreisprozesses wird eingekoppelt, wobei das solar produzierte Zink für die Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas verwendet wird. Anschliessend wird das resultierende ZnO in den Solarreaktor rezykliert, so dass der Materialzyklus geschlossen ist.

Ergänzend zu den experimentellen Studien wird die Reaktor- und Prozessmodellierung weiter entwickelt:

- (4) *Modifikation und Validierung des Reaktormodells:* Das Reaktormodell wird auf den modularen Solarreaktor angepasst und mit den experimentellen Daten validiert.
- (5) *Dynamisches Prozessmodell:* Ein dynamisches Modell zur Prozessregelung wird formuliert, um den Betrieb der Solaranlage unter transienten Bedingungen während des Aufstartens, Abschaltens und bei Unterbrüchen in der Solarstrahlung zu simulieren und zu optimieren.

Die geschätzten Kosten für dieses 4-Jahresprojekt belaufen sich auf etwa 5 MCHF, wobei ca. 1 MCHF auf den modularen Solarreaktor entfallen.

Ausblick

Mit dem erfolgreichen Abschluss der Projekte 2 und 3 ist der Weg frei zur Errichtung einer industriellen Solaranlage zur Herstellung von Zink. Zeitgleich ist zu erwarten, dass der zweite Prozessschritt – die Herstellung von Wasserstoff und Syngas – im industriellen Massstab realisierbar sein wird und somit solare Brenn- und Treibstoffe produziert werden können.

Literatur

- C. Hutter, W. Villasmil, M. Chambon, A. Meier, Operational Experience with a 100 kW Solar Pilot Plant for Thermal Dissociation of Zinc Oxide, Proc. 17th SolarPACES Conference, Granada, Spain, September 20-23, 2011.