

Rapport de synthèse 2010

Programme de recherche Solaire industriel à haute température



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Page de couverture :

Installation solaire thermique chez Colas Genève

Projet pilote et démonstration de maintien en chauffe d'un stockage de 80'000 litres de bitume à 160 °C par des panneaux solaires thermiques à ultra vide avec miroirs cylindriques réfléchissants.

Programme de recherche de l'OFEN Solaire industriel à haute température

Rapport de synthèse 2010

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne

Chef de programme (auteur) :

Pierre Renaud, Stefano Giamboni, Planair SA (pierre.renaud@planair.ch)

Responsable de domaine de l'OFEN :

Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)

www.bfe.admin.ch/forschungindustriesolar

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Introduction

Les systèmes solaires à concentration transforment la radiation solaire en énergie thermique à haute température pour produire de l'électricité ou de la chaleur et pour entraîner des réactions chimiques. Ces technologies énergétiques propres sont particulièrement appropriées à des applications dans les pays à fort ensoleillement où la radiation solaire directe est élevée. Les nombreux types de systèmes en développement (comprenant les collecteurs paraboliques linéaires et de technologie Fresnel, les centrales à tour et les systèmes parabole/moteur Stirling) pour les différents marchés se caractérisent principalement en fonction des dispositifs de concentration, des méthodes de conversion de l'énergie, des systèmes de stockage.

Les centrales solaires thermiques pour la production d'électricité (CSP) sont actuellement en phase commerciale et seront prochainement viables économiquement en tant que source d'énergie renouvelable avec une position de premier plan dans le portfolio des entreprises électriques. L'Association européenne pour l'électricité solaire thermique (ESTELA) estime que, dans les dix prochaines années, les CSP seront à même de fournir de l'électricité à un prix concurrentiel par rapport aux sources conventionnelles et aux autres sources renouvelables. Elles pourront s'imposer sans subventions. Dans le scénario le plus favorable et avec un soutien approprié, les CSP pourraient atteindre une puissance installée globale de 100 GW à l'horizon 2025. Grâce aux nombreux programmes de recherche et développement et aux projets pilote et démonstration actuellement en cours, les coûts de production de l'électricité par cette technologie pourraient être réduits jusqu'à 30 % à l'horizon 2015 et de plus de 50 % à l'horizon 2025. Fin 2010, les installations en service atteignent une puissance installée de 820 MW, celles en construction 1,8 GW et celles planifiées 14,5 GW.

La production de chaleur pour les processus industriels par des systèmes solaires à moyenne et haute température (tubes sous vide, panneaux sous vide avec miroirs réfléchissant, à concentration, etc.) se développe de plus en plus et représente une alternative intéressante aux vecteurs énergétiques fossiles. Les projets concernent la recherche appliquée pour l'amélioration des systèmes et des composants, les installations pilote et démonstration ainsi que des installations de taille industrielle.

Le domaine de la thermochimie solaire, actif sous forme de recherche fondamentale et de projets pilote et démonstration visent à développer et optimiser les processus thermochimiques solaires et à démontrer leur faisabilité technique et économique à une échelle industrielle. La recherche se concentre notamment sur la production de vecteurs énergétiques en transformant certains matériaux à l'aide d'énergie solaire en carburants (hydrogène et gaz de synthèse) stockables et transportables.

Dans le domaine de la recherche sur le solaire industriel à haute température, la Suisse occupe une position de premier plan au niveau mondial notamment avec les activités de l'ETHZ, du PSI, du SPF et d'entreprises privées. Des récompenses reconnues internationalement ont été attribuées à deux personnalités : le Dr. Paul Kesselring, ancien directeur du Laboratoire de la technologie solaire et des processus au PSI, lauréat du « Lifetime SolarPACES Award » 2009 en reconnaissance pour sa contribution décennale au développement de la technologie des CSP ainsi que le Prof. Dr. Aldo Steinfeld, professeur à l'ETH de Zurich et directeur du Laboratoire de technologie solaire au PSI récompensé avec le « American Society of mechanical Engineers (ASME) Yellott Award » 2008 pour ses recherches dans le domaine de la chimie solaire.

Classification de l'AIE : 3.1.3 Solar thermal power and high-temp. applications

Classification Suisse : 2.1.3 Ind. Solarenergienutzung

Centres de gravité du programme

Les axes principaux du programme de recherche sont la thermochimie solaire, la chaleur solaire dans les processus industriels et les centrales solaires thermiques à concentration (CSP). Ces applications ont en commun le fait qu'elles font intervenir des températures supérieures à 100 °C (de 150 °C pour les processus industriels à 2'000 °C pour la thermochimie).

Le potentiel au niveau suisse et mondial dans les trois domaines cités ci-dessus est considérable. En Suisse, la thermochimie est principalement axée sur la production de zinc par cycle thermochimique ZnO/Zn et est menée par le Paul Scherrer Institut (PSI). Le deuxième domaine (processus solaires industriels) vise à mettre en place des systèmes qui permettent l'intégration de l'énergie solaire dans les processus de production industriels traditionnels. Les centrales solaires thermiques sont des centrales possédant un fort potentiel de production d'électricité appelées à un développement considérable au niveau mondial dans les années à venir. Les points clés du programme de la thermochimie solaire sont la finalisation des recherches sur le cycle ZnO/Zn, la mise au point du réacteur solaire de thermo-dissociation, la réduction carbo-thermique du ZnO et la prospection pour la production thermochimique de carburants.

Concernant la chaleur à haute température pour des processus industriels, les points clés sont l'engineering et l'implémentation dans les industries. Une étude a également été réalisée pour définir le potentiel réel de cette technologie.

Dans le cadre des centrales héliothermiques, l'objectif est de s'insérer dans des marchés de niche (voir par exemple les travaux réalisés par Airlight) et de développer des héliostats, turbines, échangeurs de chaleur, logiciels et installations pilotes, etc. propres à cette technologie.

L'implication des instituts de recherche, des acteurs privés et de l'industrie, ainsi que les ressources financières disponibles (publiques et privées) sont à intensifier dans le but de permettre à la Suisse d'occuper une place de premier plan dans ces domaines appelés à jouer un rôle fondamental pour l'avenir énergétique.

Revue et évaluation 2010

En 2010, les progrès les plus significatifs dans le domaine de la thermochimie solaire sont les suivants : consolidation de la technique de séparation des gaz (Zn et O₂), détermination d'un système pour la protection du verre de séparation du réacteur, modélisation du transfert de chaleur du réacteur pilote ainsi que conception de l'installation pilote de 100 kW.

Pour le domaine de la chaleur solaire dans les processus industriels, les projets R&D menés en 2010 ont permis de déterminer, grâce à des audits, les possibilités d'implémentation de systèmes de production de chaleur solaire dans l'industrie, d'évaluer la faisabilité d'une installation de mesure mobile ainsi que d'investiguer les méthodes de mesure et certification des tubes absorbeurs. Grâce aux projets P&D, trois systèmes différents de capteurs solaires pour la production de chaleur dans l'industrie ont été mis en place (tubes sous vide standard, panneaux plats à ultraviolette et concentrateurs paraboliques linéaires).

Dans le domaine des CSP, le projet R&D actuellement en cours a permis de modéliser, simuler et tester différents prototypes d'absorbeur à air avec l'objectif d'optimiser l'échange de chaleur du fluide caloporteur et diminuer la perte de charge. Un 3ème prototype de concentrateur solaire ainsi qu'un prototype de système de stockage de l'énergie thermique ont été construits, modélisés, simulés et des mesures ont été menées pour en évaluer les performances et valider le modèle. Un projet P&D a démarré visant la construction d'une installation pilote pour valider le principe global, dont notamment le stockage de l'énergie thermique.

Perspectives 2011

Concernant la thermochimie solaire, le réacteur pilote de 100 kW est actuellement en construction au PSI et sera testé à l'aide du four solaire de 1 MW d'Odeillo en France en juin-juillet 2011 et février-mars 2012. Les données expérimentales seront utilisées pour valider le modèle numérique du réacteur et les résultats des tests conduiront à la conception d'une installation solaire industrielle.

Dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels, il sera procédé à l'évaluation des possibilités d'implémenter ces systèmes. De plus, une analyse sera faite face aux possibilités de normalisation de certification. L'évaluation et la comparaison des performances des trois systèmes de capteurs mis en place dans les projets P&D sera possible grâce à des campagnes de mesure détaillées.

En 2011, la recherche sur les CSP se concentrera sur l'amélioration des performances de l'absorbeur à air, du système de stockage de l'énergie thermique, de l'optique au niveau du concentrateur secondaire ainsi que sur le choix des fluides thermiques. Les objectifs du projet P&D se focalisent sur la réalisation d'un prototype.

Points forts 2010

Les trois points principaux présentés dans les paragraphes suivants concernent des projets appartenant à chacun des trois axes prioritaires du programme.

Solar Production of Zinc and Hydrogen

Les deux projets du PSI actuellement cofinancés par le programme de recherche OFEN – « Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimisation for Scale-up » (R&D) et « Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation » (P&D) – s'inscrivent dans une dynamique de recherche fondamentale et appliquée en cours depuis plusieurs années et disposent de perspectives sur le moyen et long terme. Outre les deux projets susmentionnés, le PSI mène ou a finalisé ces dernières années pas moins de 18 projets dans le domaine de l'énergie solaire à concentration.

Au niveau de la dissémination des résultats en 2010, un article complet a été publié sur le cycle thermochimique solaire de dissociation du H_2O/CO_2 basé sur des réactions redox Zn/ZnO [1]. Les résultats expérimentaux de séparation des produits gazeux par trempage [2] et un modèle de

transfert thermique du réacteur pilote de 100 kW [3] ont été présentés à la Conférence SolarPACES à Perpignan en France. En outre, plusieurs études sur le verre de protection du réacteur pilote ont été exécutées pour éviter son encrassement.

L'objectif général de cette recherche est d'étudier la dissociation endothermique de l'oxyde de zinc en zinc et oxygène par l'énergie solaire thermique. La partie R&D du projet vise l'optimisation du réacteur solaire à haute température pour un fonctionnement fiable et efficace à des températures supérieures à 2'000 K (réacteur prototype de 10 kW). Dans la partie P&D du projet, une installation pilote de 100 kW va être réalisée et une démonstration expérimentale aura lieu dans le four solaire de 1 MW (MWSF) à Odeillo en France (cf. Fig. 1).

La technique de séparation des gaz (Zn et O_2) par trempage (quenching) est réalisée par l'injection rapide d'un gaz inerte froid. En 2010, les 15 séries de tests menées sur le réacteur de 10 kW avec différentes unités de trempage ont démontré que, tant le taux de dilution que le niveau de refroidissement ont une influence notable sur le rendement de l'opération.

Concernant la protection aérodynamique du verre du réacteur, des si-

mulations ont permis d'identifier les conditions de flux de gaz optimales pour conserver cet interface libre de dépôt provenant des gaz condensés. Le meilleur résultat est obtenu avec l'injection d'Ar au flux de 8,5 lN/min. Pour cette configuration, des jets radiaux ne sont pas nécessaires pour atteindre une protection constante de ce vitrage.

Concernant l'analyse du transfert de chaleur, un modèle numérique 3D du réacteur a été développé pour investiguer les performances du réacteur de 100 kW qui sera soumis au rayonnement solaire concentré du MWSF. Le modèle a démontré que les pertes de chaleur principales sont dues à la réflexion et au rayonnement depuis le corps du réacteur. Des solutions pour diminuer ces points vont être étudiées.

La phase P&D a démarré en janvier 2010 et sera finalisée en juin 2012. La conception de l'installation pilote de 100 kW (configuration, plateforme expérimentale, réacteur) ainsi que la définition des instruments et du procédé de contrôle ont été finalisés de manière détaillée. L'installation est actuellement en construction au PSI. Le réacteur solaire et ses périphériques (systèmes d'alimentation en ZnO et traitement du Zn) seront testés au MWSF lors d'une première campagne en juin-juillet 2011 et d'une deuxième en février-mars 2012. Les données expérimentales seront utilisées pour valider le modèle numérique du réacteur. Finalement, les résultats des tests pilote conduiront à la conception d'une installation solaire industrielle. Cette installation devra également répondre à des critères économiques.

Le principal objectif de la première campagne de mesures est de faire fonctionner le réacteur de manière fiable. Les objectifs spécifiques sont : rendement supérieur à 8 kg/h pour la dissociation du ZnO, contenu de Zn supérieur à 50 %, validation du modèle de transfert de chaleur, rendement de la conversion solaire – énergie chimique supérieur à 5 %. L'objectif de la deuxième campagne est d'optimiser la performance du réacteur et d'atteindre un rendement de la conversion solaire – énergie chimique s'approchant de 15 %.

Les résultats de ces projets de recherche permettront d'améliorer le stockage de

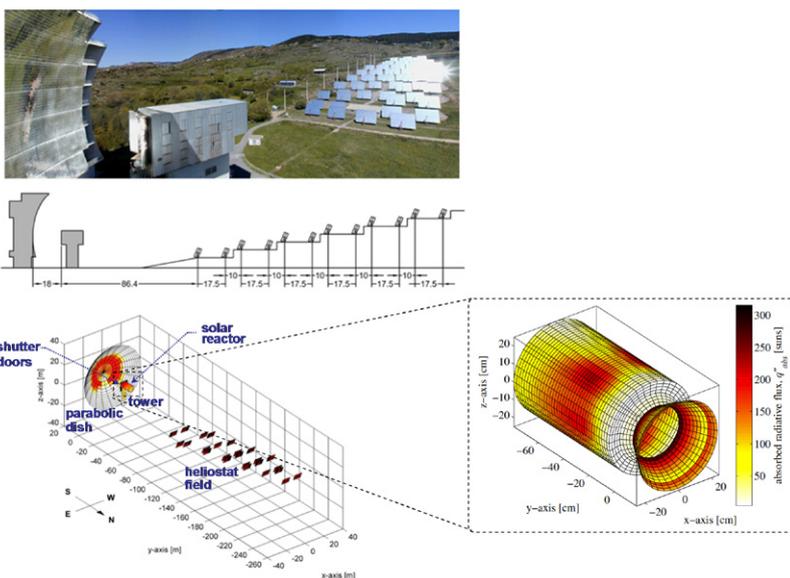


Figure 1 : vue d'ensemble du four solaire d'Odeillo composé d'un champ d'héliostats, un concentrateur parabolique et d'une tour avec plateforme expérimentale (en haut de la figure). La simulation du rayonnement par la méthode Monte Carlo a été appliquée pour la distribution du flux radiatif sur la partie avant du réacteur solaire de 100 kW et dans la cavité rotative.

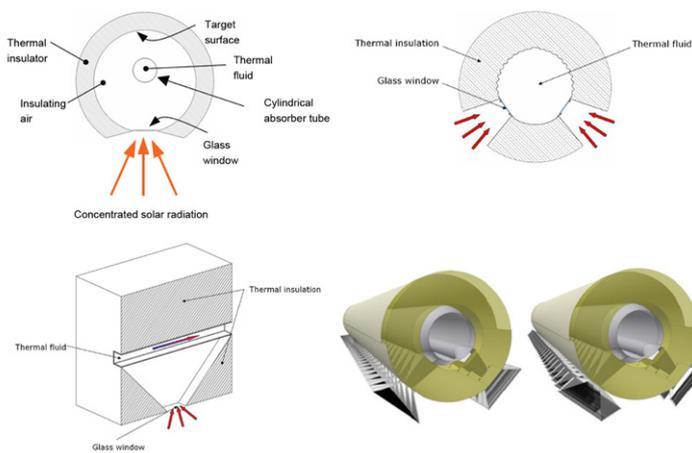


Figure 2 : différents concepts d'absorbeur évalués pour le concentrateur linéaire parabolique d'Airlight (BR-2 en haut à gauche, PR-3 en haut à droite, BRF-4 en bas à gauche et PRF-5 en bas à droite).

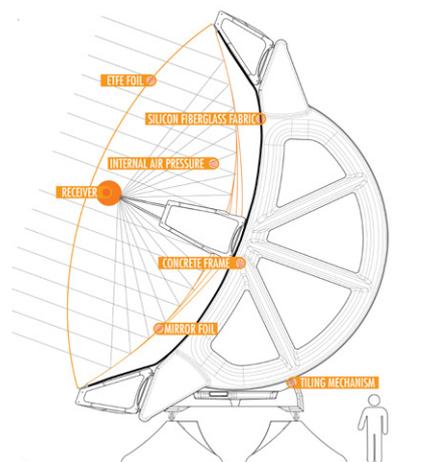


Figure 3 : 3ème prototype de concentrateur Airlight avec une structure en béton.

l'énergie solaire sous forme de carburants tels que le Zn ou le H₂ et augmenteront ainsi les chances de disposer d'une solution durable au problème de l'intermittence de l'énergie solaire.

SolAir

Les deux projets d'Airlight Energy actuellement cofinancés par le programme de recherche OFEN sont « SolAir-2 Innovative solar collectors for efficient and costeffective solar thermal power generation » (R&D) et « SolAir Pilot Plant » (P&D).

Le premier objectif du projet R&D est le développement de l'absorbeur pour en optimiser le rendement. A ce propos, différents prototypes ont été modélisés, simulés et testés avec l'objectif d'explorer plusieurs configurations et d'identifier les meilleures performances en termes d'échange de chaleur du fluide caloporteur et de perte de charge. Les différents absorbeurs évalués sont les suivants (cf. Fig. 2): le BR-2 est composé d'une cavité cylindrique avec une seule ouverture (vitrage) entourée par une isolation thermique, le PR-3 est un tube avec deux ouvertures entouré par une épaisse couche d'isolation thermique, le BRF-4 a été étudié pour tester la possible utilisation d'une optique secondaire (lentilles Fresnel plates) et le PRF-5 sur lequel les lentilles Fresnel courbées focalisent l'énergie en profitant de nombreuses petites ouvertures. Les performances de ce dernier sont en cours d'évaluation ; une augmentation importante du rendement global de l'absorbeur est prévue.

Le développement du concentrateur solaire dans sa globalité pour en améliorer les performances s'est poursuivi (cf. Fig. 3). Les modifications majeures par rapport au 2ème prototype sont la suppression des concentrateurs secondaires et l'introduction de trois membranes de support superposées sous chaque membrane du réflecteur. Selon les simulations, le dernier concept permettra d'être très proche de la parabole linéaire idéale. La divergence entre la distribution du flux mesurée et l'optimum théorique indique que les exigences élevées au niveau de la précision de la forme du concentrateur arc-spline n'ont pas été complètement atteintes.

Le deuxième objectif du projet R&D en cours est l'étude du système de stockage de l'énergie thermique (TES). Ce stockage est réalisé à l'aide d'un lit de galets enfuis dans un récipient en béton enterré (cf. Fig. 4). Les travaux de recherche ont permis la modélisation et la simulation des cycles de charge/décharge du TES. La validation du modèle a été faite expérimentalement sur le prototype réalisé. Les tests démontrent que le modèle est cohérent avec le comportement de stockage observé et, qu'en conséquence, il peut être utilisé pour prédire les performances du système de stockage y compris la dissipation d'énergie thermique ainsi que la chute de pression (env. 25 à 30 Pa) à travers les parois du système. L'optimisation du prototype de TES, l'affinage du modèle touchant la simulation de la conductivité thermique et l'étude de la porosité des rochers pour obtenir une meilleure cohérence avec les données expérimentales (performances fluïdo-

dynamiques, taux de transfert de chaleur et de l'évolution de la température) constituent les travaux principaux pour 2011.

Le projet P&D a pour objectif d'affiner le concept global et de mettre en place une installation pilote complète à Biasca.

L'étude a été menée pour explorer les solutions techniques applicables à une installation CSP basée sur la technologie de collecteur Airlight Energy. Les premiers résultats concernant le concept global de l'installation, l'évaluation du cycle thermodynamique à utiliser (Rankine ou Brayton) et le choix des processus auxiliaires (p.ex. eau de refroidissement) sont déterminants pour la conception de l'installation pilote à réaliser sur le site de Biasca. Cette installation aura pour objectif de fournir des informations permettant de réaliser une installation de taille industrielle.

Trois types de capteurs solaires pour la production de chaleur dans l'industrie

La production de chaleur solaire à des températures comprises entre 100 et 200 °C pour des processus industriels peut être réalisée à l'aide de différents types de capteurs, dont trois sont utilisés dans les projets P&D soutenus par ce programme.

Le premier projet « Kerzenfabrik Fischer AG, Root LU – Prozesswärme mit Vakuumröhrenkollektoren » consiste à chauffer par l'énergie solaire de la paraffine pour la production de bougies.



Figure 4 : construction du système de stockage d'énergie thermique à Biasca : lit de galets en place (en haut à droite), montage du couvercle (en bas à gauche), système prêt pour les tests de charge-décharge (en bas à droite).

Le matériau doit être stocké à une température constante comprise entre 65 et 110 °C. Le maintien en température des deux tanks d'une capacité totale d'env. 50 tonnes nécessite la consommation d'env. 160'000 à 170'000 kWh d'énergie électrique par an. Grâce à la mise en service, à partir de fin mars 2010, d'une installation de 81 m² de collecteurs à tubes sous vide (cf. Fig. 5), la participation solaire a contribué à raison d'environ 47'000 kWh (valeur estimée) à cette production. Un système de contrôle de la production solaire est en place et permettra d'analyser les performances de l'installation une fois les derniers réglages et optimisations effectués.

Le deuxième projet « Colas Suisse, Genève – Chauffage à 160 °C de 80'000 litres de bitume par panneaux solaires thermiques à ultra vide » représente une première mondiale concernant le

type de panneaux utilisés (cf. Fig. 6). En effet, Colas Suisse exploite ce tout nouveau type de champ solaire conçu et réalisé par SRB Energy à partir d'un brevet du Centre européen de recherche nucléaire (CERN). L'installation contribue à maintenir en température à 160 °C 80'000 litres de bitume pour la construction routière. Les capteurs thermiques plats à ultravide présentent la particularité d'utiliser la lumière directe et diffuse compte tenu qu'ils sont équipés de miroirs cylindriques réfléchissants en aluminium permettant d'atteindre des températures de fonctionnement très élevées (jusqu'à 400 °C). De plus, ces panneaux ont des absorbeurs isolés par vide d'air, assuré par de l'ultra vide et maintenu par une pompe getter (substance chimique utilisée pour consommer le gaz se produisant au chauffage du panneau). Les performances sont aussi dues au re-

vêtement sélectif de chrome noir des absorbeurs. Sur le site de Genève, Colas a installé 78 m² de capteurs solaires, soit un champ de 20 panneaux. Les économies d'énergie réalisées sur un an seront, dans le meilleur des cas, de 3,25 tonnes de fuel ou 3'500 m³ de gaz naturel, soit 35'000 kWh. L'installation était opérationnelle au début de mai 2010 et a été inaugurée le 15 juin 2010 en présence des différents acteurs impliqués dans le projet (notamment les SIG et le canton de Genève).

Le projet « Bever, Lesa / Solare Prozesswärmeerzeugung » est une installation solaire pilote permettant la production d'une partie de la chaleur à haute température utilisée par la laiterie de Bever aux Grisons. Les collecteurs sont des paraboles linéaires à concentration. Ce type de collecteurs représente une première suisse pour la production de chaleur dans le cadre d'un processus industriel. Le projet permettra d'acquérir des expériences dans le domaine de l'utilisation d'installations solaires thermiques pour petites et moyennes puissances dans un environnement alpin. Des informations sur une éventuelle utilisation future de ce type de capteurs pour la climatisation sur le plateau suisse pourront également être collectées. L'installation sera composée de 115 m² de concentrateurs paraboliques linéaires NEP Solar et chauffera le fluide caloporteur à 150 – 180 °C pour la production de vapeur à injecter dans le réseau existant. La puissance nominale prévue est d'env. 65 kW et la production de 60'000 kWh/an couvrira env. 7 % de l'énergie nécessaire pour la production de vapeur. Cette installation substituera 7'100 litres de mazout par an et évitera l'émission de 18 tonnes de CO₂ par an. La mise en service est prévue pour fin mai 2011.



Figure 5 : capteurs solaires thermiques à tubes sous vide installé auprès de la fabrique de bougie Fischer AG à Root LU.



Figure 6 : capteurs solaires thermiques à ultra vide installé auprès de Colas Suisse à Genève.

Collaboration nationale

Afin de promouvoir la collaboration et les échanges entre les différents acteurs suisses liés au solaire industriel à haute température, un symposium sur les interactions entre industrie et recherche en Suisse a eu lieu à Neuchâtel le 27 octobre 2010. Dans ce cadre, des projets et technologies suisses ainsi que le Pôle suisse de technologie solaires ont été présentés. Le Prof. Dr. Aldo Steinfeld

a parlé du présent et du futur des projets R&D dans le domaine du solaire à concentration pour la production d'électricité, de carburants et de matériaux.

Au niveau de la thermochimie solaire, le Laboratoire de technologie solaire du PSI travaille en collaboration avec le département d'énergies renouvelables de l'ETH Zurich.

Collaboration internationale

Pour la thermochimie solaire, la coopération internationale fonctionne dans le cadre de

- IEA's SolarPACES Implementing Agreement (Task II – Solar Chemistry Research; Operating Agent: Dr. A. Meier)
- IEA's Hydrogen Implementing Agreement (Task 25 – High Temperature Hydrogen. Production Processes; Swiss Representative: Dr. A. Meier)
- Strategic Alliance between PSI and CIEMAT (Spain) – Roadmap to Solar Hydrogen Production.
- IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy (Project: Solar driven high temperature thermochemical production of hydrogen; Swiss Representative: Prof. Dr. A. Steinfeld). Participants: CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), U. Colorado (USA), ETH & PSI (Switzerland), NU & TIT (Japan), WIS (Israel).
- SOLLAB – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems. Collaboration of five

leading European solar research laboratories, namely CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), ETH & PSI (Switzerland); Swiss Representative: Prof. Dr. A. Steinfeld.

- EERA – European Energy Research Alliance. Participants: CEA (France), CESI (Italy), CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), ECN (Netherlands), ENEA (Italy), INETI (Portugal), PSI (Switzerland). Swiss Representative: Prof. Dr. A. Wokaun; Swiss Representative for CSP Joint Programming: Dr. A. Meier.
- SFERA – Solar Facilities for the European Research Area (EU Project). Partners: CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), ENEA (Italy), PSI (Switzerland), WIS (Israel)
- SynPet (Industrial Project with PDVSA) – Solar steam-gasification of petroleum coke (petcoke).

Concernant les CSP, divers contacts internationaux sont en cours pour la réalisation d'une première installation Airlight à l'échelle industrielle.

Participation suisse dans l'IEA Implementing Agreement SolarPACES

www.solarpaces.org

Annex / Task

Solar Chemistry Research
Solar Technology and Advanced Applications
SHIP - Solar Heat for Industrial Processes

Délégué suisse

Paul Scherrer Institut
ETHZ
SPF HSR Rapperswil

Références

[1] P.G. Loutzenhiser, A. Meier, A. Steinfeld: Review of the two-step H₂O/CO₂-splitting solar thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions, *Materials* 3, 4922-4938, (2010).

[2] D. Gstoehl, W. Villasmil, H. Wallimann, C. Hutter, A. Meier: Solar thermal dissociation of ZnO – Separation of gaseous products by quenching, *Proc. 16th SolarPACES Conference, Perpignan, France, September 21-24, 2010.*

[3] W. Villasmil, D. Gstoehl, T. Cooper, A. Steinfeld: Heat transfer analysis of a 100 kW reactor for the solar thermal dissociation of zinc oxide, *Proc. 16th SolarPACES Conference, Perpignan, France, September 21-24, 2010.*

Projets en cours et terminés dans l'année de référence

(* Classification de l'AIE)

- **SOLAIR – INNOVATIVE SOLAR COLLECTORS FOR EFFICIENT AND COST-EFFECTIVE SOLAR THERMAL POWER GENERATION** R+D 3.1.3*
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ALE Airlight Energy SA | Funding: | BFE |
| Contact: | Andrea Pedretti
andrea.pedretti@airlightenergy.com | Period: | 2007–2012 |
- Abstract: The present project aims at the engineering investigation and design of a breakthrough concept of a solar collector system for efficient and cost-effective solar thermal power generation. The novel collector technology exploits a revolutionary air-inflated reflective structure for concentrating solar radiation. Since this new arrangement reduces drastically the investment costs of the collector field, the solar thermal plant promises to be highly economic competitive.
- **IEA-SOLARPACES-PROGRAMM** 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | DLR | Funding: | BFE |
| Contact: | Mörsdorf M.
http://www.solarpaces.org | Period: | 1989–2010 |
- Abstract: SolarPACES is an international cooperative network bringing together teams of national experts from around the world to focus on the development and marketing of concentrating solar power systems (also known as solar thermal power systems). It is one of a number of collaborative programs, called Implementing Agreements, managed under the umbrella of the International Energy Agency to help find solutions to worldwide energy problems.
- **TOWARDS INDUSTRIAL SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN – REACTOR OPTIMIZATION AND SCALE-UP** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | BFE |
| Contact: | Anton Meier
anton.meier@psi.ch | Period: | 2007–2011 |
- Abstract: Die endotherme solarthermische Dissoziation von Zinkoxid in Zink und Sauerstoff wird untersucht. In diesem Projekt wird der Hochtemperatur-Solarreaktor für den zuverlässigen und effizienten Betrieb bei Temperaturen über 2000 K (10 kW Prototypreaktor) optimiert.
- **SOLAR CO2-SPLITTING USING REDOX REACTIONS** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | SNF |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2009–2011 |
- Abstract: The solar production of syngas from H₂O and CO₂ is examined via two-step thermochemical cycles based on redox reactions such as Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄. The first, endothermic step is the thermal dissociation of the metal oxide using concentrated solar radiation as the energy source of high-temperature process heat.
- **SOLHYCARB** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | EU FP6 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2006–2010 |
- Abstract: The SOLHYCARB project addresses the development of an unconventional route for potentially cost-effective hydrogen production from solar energy without emitting carbon dioxide. The process thermally decomposes natural gas in a high temperature solar chemical reactor. Two products are obtained: H₂-rich gas and a marketable high-value nano-material, Carbon Black (CB).
- **SOLREF** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | EU FP6 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2005–2010 |
- Abstract: The use of concentrated solar power for supplying high-temperature process heat to the steam-reforming of natural gas has the potential of avoiding up to 35% of the CO₂ emissions derived from the conventional fossil-fuel-based method. The cost of hydrogen is estimated at 0.05 EUR/kWh_{LHV-H₂}. The project aims at developing the technology to a pre-commercial phase.
- **HYCYCLES** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | EU FP6 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2008–2011 |
- Abstract: Project aimed at the development of materials and components for the sulfur-based water-splitting thermochemical cycles for hydrogen generation. Concentrated solar radiation is used as the energy source of high temperature process heat. The ultimate objective is to bring the technology closer to realization by improving efficiency, reliability, and costs.

● **ENEXAL – SOLAR PRODUCTION OF ALUMINUM BY CARBOTHERMAL REDUCTION OF ALUMINA** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2010–2014
Abstract:	Thermochemical equilibrium calculations indicate the possibility of significantly lowering the onset temperature of aluminum vapor formation via carbothermal reduction of Al ₂ O ₃ by decreasing the total pressure, enabling its vacuum distillation. Further, the use of concentrated solar energy as the source of high-temperature process heat offers considerable energy savings and reduced concomitant CO ₂ emissions.		

● **HITECO – HIGH-TEMPERATURE EFFICIENT COLLECTOR FOR CONCENTRATING SOLAR POWER APPLICATIONS** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2010–2013
Abstract:	In order to accelerate the implementation of the CSP technology, the electricity cost has to be reduced by increasing the plants efficiency. The HITECO Project aims at doing so by increasing the operating temperature of the heat transfer fluid (HTF) up to 600°C and therefore raising the overall efficiency of the process. The current state-of-the-art designs are prevented to reach such temperatures without a dramatic efficiency drop by several key components.		

● **SFERA – SOLAR FACILITIES FOR THE EUROPEAN RESEARCH AREA** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2009–2013
Abstract:	This EU-funded research project aims to boost scientific collaboration among the leading European research institutions in solar concentrating systems, offering European research and industry access to the best research and test infrastructures and creating a virtual European laboratory.		

● **SYNPET** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2003–2010
Abstract:	High-temperature thermochemical processes efficiently convert concentrated solar energy into storable and transportable fuels. In the long run, H ₂ O/CO ₂ -splitting thermochemical cycles based on metal oxide redox reactions are developed to produce H ₂ and CO, which can be further processed to synthetic liquid fuels. In a transition period, carbonaceous feedstocks (fossil fuels, biomass, C-containing wastes) are solar-upgraded and transformed into valuable fuels via reforming, gasification and decomposition processes.		

● **SOLSYN – SOLAR FUELS FOR CEMENT MANUFACTURING** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	KTI
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2007–2011
Abstract:	Holcim, PSI and ETH Zurich have brought together most competent resources to perform long-term oriented research in exploring the use of concentrated solar energy for cement manufacturing. Solar steam-gasification of carbonaceous materials makes use of concentrated solar energy to convert solid feedstocks such as coal, biomass, or carbon-containing wastes into high-quality synthesis gas (syngas)—mainly H ₂ and CO. The synthetic gas could be used for substituting fossil fuels in the cement kiln.		

● **SOLAR-DRIVEN COMBINED CYCLES** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2008–2011
Abstract:	Project aimed at the engineering development of a novel solar receiver for heating compressed air to the entrance conditions of a gas turbine, as part of a combined cycle for power generation. A solar tower concentrating system will be used for electricity generation based on a Brayton-Rankine combined cycle.		

● **SOLRAD** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	SNF
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2008–2010
Abstract:	The project aims at investigating the fundamentals of heat and mass transfer phenomena in high-temperature multiphase reactive flows exposed to high-flux irradiation. The application is focused on the development of solar reactor technology for the production of hydrogen via steam-gasification of carbonaceous materials using concentrated solar radiation.		

- **TOMOGRAPHY-BASED DETERMINATION OF EFFECTIVE HEAT/MASS TRANSPORT PROPERTIES FOR COMPLEX MULTI-PHASE MEDIA** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | SNF |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2009–2012 |
- Abstract: Development of a computer tomography based methodology for the determination of the effective heat/mass transport properties of complex porous materials. The focus is on porous materials applied in high-temperature solar thermal and thermochemical processes for producing power and fuels. The morphological characterization and accurate determination of the effective transport properties are crucial for the optimal design and efficient operation of solar receivers and reactors.
- **BIOMASS (ALGAE) GASIFICATION USING CONCENTRATED SOLAR ENERGY** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | SER |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2010–2013 |
- Abstract: The goal of this project is to transform microalgae into clean, CO₂-neutral chemical fuels. Concentrated solar radiation is used as the energy source of high-temperature process heat for the gasification of microalgae into a high-quality syngas (CO + H₂). Syngas can be further processed to liquid fuels for the power and transportation sector.
- **TOWARDS INDUSTRIAL SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN - 100 KW SOLAR PILOT REACTOR FOR ZNO DISSOCIATION** P+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | PSI | Funding: | BFE |
| Contact: | Anton Meier
anton.meier@psi.ch | Period: | 2010–2012 |
- Abstract: In diesem Projekt wird der 100 kW Pilotreaktor am PSI konstruiert und gebaut. Der Solarreaktor sowie die Zusatzsysteme (Partikelförderer und Produktgasbehandlung) werden anschliessend gemäss Arbeitsplan im 1 MW Solarofen in Odeillo, Frankreich, getestet.
- **SOLAIR PILOT PLANT** P+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ALE Airlight Energy SA | Funding: | BFE |
| Contact: | Andrea Pedretti
andrea.pedretti@airlightenergy.com | Period: | 2010–2012 |
- Abstract: The project deals with the realization of a pilot installation of a Concentrated Solar Power plant in Biasca. Solar energy will be harvested using the innovative Airlight solar concentrator. The plant will use air as working fluid and will have a rock packed bed thermal energy storage system. The hot air will be conveyed in a Heat Recovery Steam Generator to produce steam that will feed a turbine connected to an electric generator to finally produce electric power.
- **PROZESSWÄRME MIT VAKUUMRÖHRENKOLLEKTOREN FÜR DIE BEHEIZUNG DES PARAFFINS FÜR FISCHER KERZEN AG** P+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Theo Fischer AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Martin Kretz
m.kretz@kerzen.ch | Period: | 2009–2012 |
- Abstract: Für die Kerzenfabrik Fischer Root (Kt. Luzern) wurde eine thermische Vakuumröhrenkollektoren Solaranlage für die Beheizung des Paraffins realisiert. Das Material muss dauernd auf einer Temperatur zwischen mindestens 65 und ca 110 °C gelagert werden. Die 81 m² (Absorberfläche) Kollektoren Typ Augusta DF6 (SPF Nr. C938) werden eine Wärmeproduktion von ca. 47'000 kWh generieren.
- **CST RECEIVER TUBE QUALIFICATION, PHASE 1, INVESTIGATION** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Energie Solaire SA | Funding: | BFE |
| Contact: | Jean-Pierre Rossy
rossy@energie-solaire.com | Period: | 2009–2010 |
- Abstract: The possible methods for characterising and qualifying the concentrated solar thermal (CST) receivers with their embedded absorber tubes are investigated. In order to further increase the usage of the CST systems, it is of great importance to provide standards for the qualification and characterisation of the different components of the CST systems. Huge efforts are currently made to define a standard for evacuated receiver tubes.
- **EINSTEIN GOES SWISS** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Institut für Solartechnik SPF | Funding: | BFE |
| Contact: | Elimar Frank
elimar.frank@solarenergy.ch | Period: | 2009–2010 |
- Abstract: Industry Audits in Schweizer Industriesektoren und Entwicklung eines Plug-Ins für Jahressimulationen zum Solarwärmebeitrag von Industrieprozessen in dem Expertensystem EINSTEIN.

● **PREDESIGN STUDIE MOBILER TESTSTAND FÜR SOLARTHERMISCHE PROZESSWÄRMEANLAGEN**

R+D 3.1.3

Lead: Institut für Solartechnik SPF

Funding: BFE

Contact: Andreas Bohren

andreas.bohren@solarenergy.ch

Period: 2009–2010

Abstract: Um die solare Hochtemperatur Technologie zu unterstützen müssen einerseits die Normen geschaffen oder erweitert werden und andererseits auch geeignete Messeinrichtungen verfügbar sein. Die notwendige Infrastruktur ist allerdings noch weitgehend nicht vorhanden. In diesem Projekt sollen deshalb die Grundlagen dafür geschaffen werden um ein entsprechende Messanlage zu bauen.

● **CHAUFFAGE À 160 °C DE 80'000 LITRES DE BITUME PAR PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES À ULTRA VIDE**

P+D 3.1.3

Lead: Colas Suisse

Funding: BFE

Contact: Marc Maranzana

maranzana@colas.ch

Period: 2009–2011

Abstract: Ce projet de chauffage à 160 °C de 80'000 litres de bitume par panneaux solaires thermiques à ultra vide de nouvelle conception est un projet unique. Le domaine de la production de produits bitumineux est un gros consommateur d'énergie, nos panneaux solaires sont une alternative prometteuse aux énergies fossiles. Les 78 m² de l'installation permettront une économie d'énergie fossile de 35'000 kWh/an.

● **BEVER, LESA / SOLARE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG**

P+D 3.1.3

Lead: EWZ

Funding: BFE

Contact: Georg Dubacher

georg.dubacher@ewz.ch

Period: 2010–2013

Abstract: Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich realisiert im Molkereibetrieb Lesa Lalaria Engiadinaisa SA in Bever eine Hochtemperatur-Solaranlage. Mit dieser Anlage wird ein Teil der Dampfproduktion mit Heizöl durch eine Energieproduktion mit erneuerbarer Energie ersetzt. Es werden konzentrierende Rinnenkollektoren eingesetzt, welche gegenüber Vakuumröhrenkollektoren effizienter Hochtemperatur-Wärme erzeugen.

