

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	91 (2000)
Heft:	1
Artikel:	Coproduction de chaleur et d'électricité
Autor:	Durisch, Willi / Mayor, Jean-Claude / Panitz, Jan-Christoph
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-855498

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Coproduction de chaleur et d'électricité

La thermophotovoltaïque permet de produire de l'électricité au moyen d'une flamme de gaz

Cet article décrit un projet de recherche et de développement d'un système de production combinée de chaleur et d'électricité par voie thermophotovoltaïque. L'état d'avancement des travaux, les premiers résultats théoriques et expérimentaux ainsi que les perspectives de cette nouvelle technologie y sont présentés et discutés.

Le principe fondamental sur lequel est basé le procédé thermophotovoltaïque (TPV) est celui d'une cellule photoélectrique irradiée par un flux lumineux dans un domaine de longueurs d'onde adapté à une conversion efficace en électricité. Ce flux radiatif est délivré par un émetteur sélectif adéquat chauffé par une flamme. Par conséquent, les éléments les plus importants d'un générateur TPV sont une source de chaleur, un émetteur sélectif et les photodiodes. Les caractéristiques spectrales de l'émetteur et des cellules photoélectriques doivent être donc adaptées de manière à ce qu'elles se recouvrent le mieux possible. De plus, un filtre placé entre l'émetteur et les photodiodes permet d'éviter un échauffement excessif de ces dernières.

Des travaux sont effectués à l'Institut Paul Scherrer (PSI) dans le but de démontrer la faisabilité d'un générateur TPV devant être utilisé comme petite station de production combinée de chaleur et d'électricité. Ces travaux sont conduits en collaboration avec un partenaire industriel, Hovalwerk AG, Vaduz (Liechtenstein) et avec le support financier du fonds de recherche de l'industrie gazière suisse (FOGA). L'intention est de produire un appoint de quelques centaines de watts d'électricité, ainsi qu'environ 20 kW de chaleur.

Description du prototype

La figure 1 montre un générateur TPV simple avec un système intégré de recirculation d'eau chaude tel qu'il a été réalisé au PSI. L'électricité produite est injectée dans le réseau local à 230 V par l'intermédiaire d'un convertisseur de courant continu (élévation de la tension) et d'un onduleur (transformation du cour-

rant continu en courant alternatif). Le rendement total de cette interface convertisseur/onduleur s'élève à 89%.

La flamme est produite par un brûleur conventionnel fonctionnant au butane. Sa puissance nominale est de 1,35 kW. L'émetteur est constitué d'une structure tissulaire céramique composée d'un mélange de différents oxydes de terres rares. Ses caractéristiques spectrales sont adaptées à la sensibilité spectrale des photodiodes au silicium cristallin utilisées.

Situé entre le brûleur et les photodiodes, un filtre, réalisé ici par un écran d'eau s'écoulant entre deux cylindres de

quartz, permet simultanément de protéger les cellules contre les gaz de combustion et d'absorber, ou mieux de réfléchir, le rayonnement inévitable de l'émetteur dans l'infrarouge lointain (longueurs

Adresse des auteurs

Dr. Willi Durisch, Jean-Claude Mayor
Dr. Jan-Christoph Panitz, Fritz von Roth
Institut Paul Scherrer, 5232 Villigen PSI

d'onde >1200 nm). Un contact des gaz de combustion avec les photodiodes aurait pour conséquences un échauffement convectif inacceptable de celles-ci, ainsi qu'un encrassement rapide de leur surface.

Les photodiodes utilisées présentent un rendement de 16% sous conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$ et $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$). Elles sont couplées en série afin d'obtenir une tension aussi élevée que possible. La surface active totale des cellules est de 380 cm².

Des réflecteurs axiaux, supérieur et inférieur, permettent de réduire au maxi-

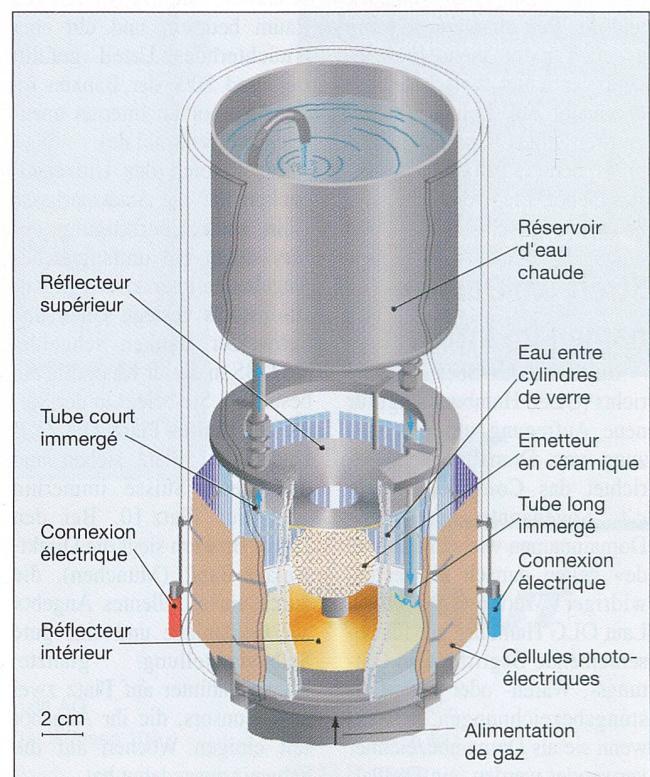


Fig. 1 Générateur TPV avec système intégré de recirculation d'eau chaude

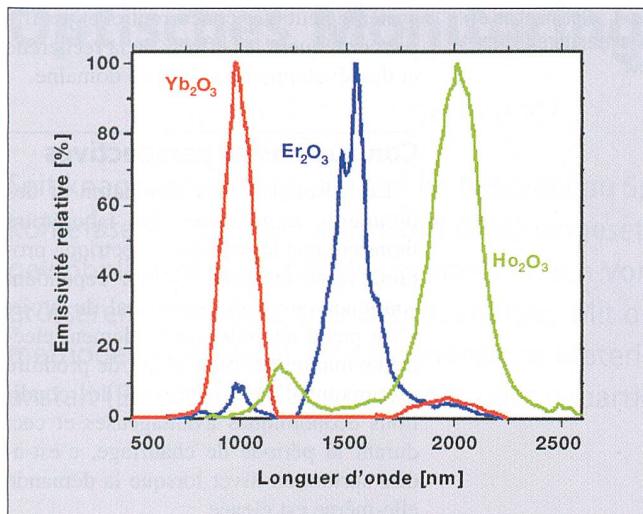


Fig. 2 Caractéristiques spectrales des oxydes de terres rares

ment les pertes axiales par rayonnement et contribuent ainsi également à maintenir la température de l'émetteur à un niveau élevé.

La puissance électrique de ce générateur TPV s'élève actuellement à 18 W.

L'élément crucial: l'émetteur sélectif

Un point essentiel pour le rendement d'un générateur TPV est l'adaptation des caractéristiques spectrales de l'émetteur sélectif à celles de la photodiode utilisée. Dans ce but, les oxydes des métaux du groupe des terres rares, tels l'ytterbium, l'erbium et l'holmium, se sont avérés comme étant particulièrement intéressants (fig. 2). En plus des photodiodes classiques au Si (émetteur: oxyde d'ytterbium, fig. 3), des cellules photoélectriques à l'antimonide de gallium (GaSb) et à l'arsénure de gallium d'indium (InGaAs) sont en cours de développement. Elles permettront de travailler dans des domaines de longueurs d'onde nettement plus intéressants pour un procédé TPV. Les correspondances entre ces éléments sont résumées dans le tableau I.

Pour des raisons économiques cependant, seules les photodiodes au Si sont actuellement utilisées. Les caractéristiques spectrales dépendent fortement de la morphologie des matériaux utilisés pour l'émetteur. Le développement de méthodes de synthèse des oxydes men-

tionnés et de procédés de fabrication d'un émetteur sélectif en céramique est donc une tâche importante dans le cadre du projet.

Les caractéristiques spectrales de l'émetteur dépendent fortement de la morphologie des matériaux utilisés. Le développement de méthodes de synthèse et de fabrication représente donc l'une des tâches prioritaires dans le cadre du projet.

Modélisation du système

Un modèle mathématique décrivant les échanges d'énergie rayonnante entre l'émetteur, le filtre et les photodiodes a été développé.

Le modèle tient compte de la disposition géométrique, de la température et des caractéristiques spectrales des principales composantes du système. Sur la base de ces données la puissance rayonnante de l'émetteur, la puissance de refroidissement nécessaire pour le filtre et les photodiodes et la puissance électrique totale sont alors déterminées.

D'autres modèles ont été développés dans le but d'optimiser la configuration du système brûleur/émetteur, la stabilité de la flamme et le transfert d'énergie de la flamme à l'émetteur.

Les résultats de la simulation montrent, par exemple, qu'il existe une température optimale pour l'émetteur (fig. 4). Cette température dépendant, entre autres, du chiffre d'air de la combustion et des caractéristiques spectrales du filtre utilisé. Il s'avère ainsi que le choix du filtre a également une grande importance, non seulement au niveau des performances énergétiques du système, mais également en ce qui concerne la production des oxydes d'azote thermiques (NO_x).

photodiode	émetteur sélectif
Si	Yb_2O_3
GaSb	Er_2O_3
InGaAs	Ho_2O_3

Tableau I Divers types de photodiodes et les émetteurs correspondants

Pour une photodiode au Si les caractéristiques idéales d'un filtre devraient être les suivantes:

- transmission = 1 pour $\lambda < 1,12 \mu\text{m}$
- réflexion = 1 pour $\lambda > 1,12 \mu\text{m}$

Rendement de conversion

Le rendement de conversion peut être interprété comme le résultat du produit de deux facteurs:

$$\eta_{\text{el}} = \epsilon_{\text{flamme} \rightarrow \text{émetteur}} \cdot \epsilon_{\text{émetteur} \rightarrow \text{photodiode}}$$

avec $\epsilon_{\text{flamme} \rightarrow \text{émetteur}}$ efficacité du transfert convectif d'énergie de la flamme à l'émetteur et $\epsilon_{\text{émetteur} \rightarrow \text{photodiode}}$ efficacité du transfert et de la conversion de l'énergie radiative.

Le premier facteur décroît en fonction de la température de l'émetteur alors que le second augmente. Ces fonctions étant pratiquement linéaires dans le domaine de température considéré, il en résulte une parabole dont le maximum peut être déterminé de manière univoque.

Estimation du potentiel

En 1997 la consommation énergétique totale en Suisse s'éleva à 224 milliards de kWh [3]. Environ la moitié de cette valeur est utilisée pour la production de chaleur. La consommation pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire s'éleva à 62 milliards de kWh. Considérant que la demande moyenne pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude est d'environ 30 000 kWh d'énergie primaire par année, environ 1,5 millions de systèmes de chauffage pourraient être équipés d'un générateur TPV. En admettant qu'un taux

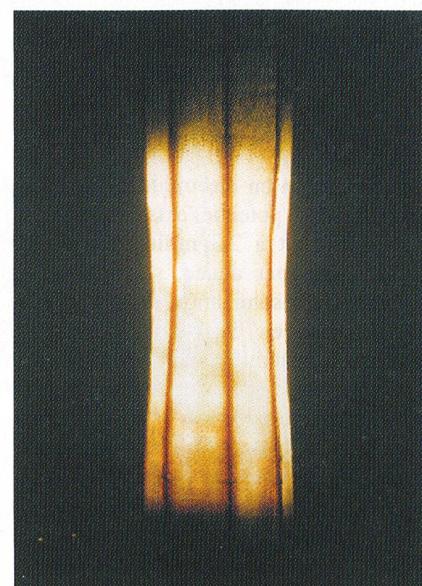


Fig. 3 Emetteur à l'essai (Yb_2O_3)

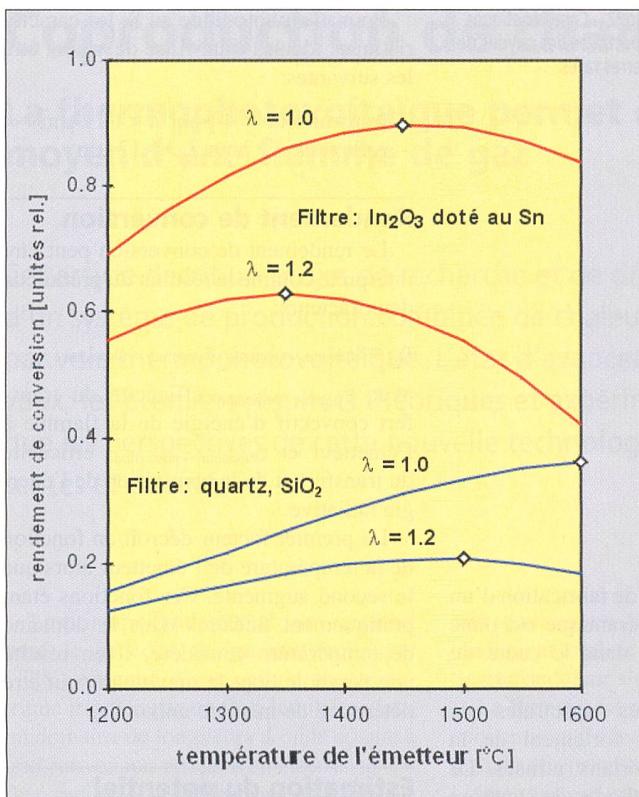


Fig. 4 Optimisation de la température de l'émetteur

système peut être concurrentiel et justifie par conséquent les efforts de la recherche et du développement dans ce domaine.

Conclusions et perspectives

Les résultats de la simulation et des premières expériences en laboratoire montrent que la puissance électrique produite reste modeste. Il faut cependant souligner que le but principal du projet n'est pas d'atteindre un rendement électrique maximum, mais plutôt de produire un appont d'électricité sous des conditions économiques avantageuses et ceci durant la période de chauffage, c'est-à-dire surtout en hiver lorsque la demande elle-même est élevée.

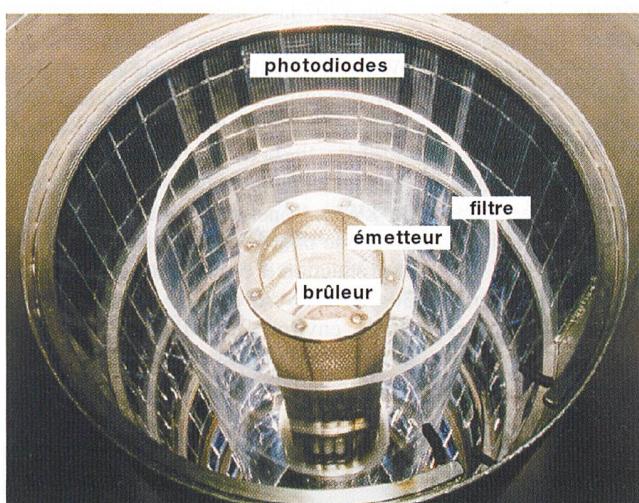
Une chaudière à gaz d'une puissance nominale de 20 kW_{th} équipée d'un système TPV est actuellement en cours de réalisation (fig. 5). Cette installation de démonstration permettra d'étudier le comportement du système complet sous conditions réelles de fonctionnement.

Puissance actuellement atteinte: 80 W_e (système non optimisé et sans réflecteurs axiaux).

*

Fig. 5 Intégration d'un système TPV dans une chaudière à gaz de 20 kW

La puissance électrique atteinte actuellement est de 80 W_e (système non optimisé et sans réflecteurs axiaux).



de conversion en électricité de 5% peut être atteint, le potentiel existant en Suisse correspondrait à 2,3 milliards de kWh d'électricité par année, soit à environ 5% de la consommation annuelle totale d'électricité en Suisse. Ceci montre qu'une cogénération par procédé TPV peut contribuer de manière sensible au système de production d'énergie électrique en Suisse. Des considérations d'ordre économiques montrent que le coût de l'électricité ainsi produite devrait s'élever à environ 20 centimes par kWh, ce qui est comparable aux prix actuels de l'électricité dans les ménages (13 à 28 centimes par kWh). Ceci montre que le

Ces travaux sont effectués à l'Institut Paul Scherrer à Villigen en collaboration avec un partenaire industriel, Hovalwerk AG, Vaduz (Liechtenstein), et avec le support financier du fonds de recherche de l'industrie gazière suisse (Foga).

Bibliographie

[1] M. Schubnell, W. Durisch, B. Grob, J.C. Mayor, J.C. Panitz: Koproduktion von Wärme und Strom mit Thermophotovoltaik. Gas, Wasser, Abwasser, gwa 78(1998)4.

[2] W. Durisch, B. Grob, J.C. Mayor, J.C. Panitz, A. Rosselet: Interfacing a Small Thermophotovoltaic Generator to the Grid. Thermophotovoltaic Generation of Electricity, Fourth NREL Conference, Colorado Springs 1998, AIP Conferences Proceedings 460, American Institute of Physics 1999.

[3] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1997. Sonderdruck Bulletin SEV/VSE 89(1998)16.

Gleichzeitige Gewinnung von Wärme und elektrischem Strom

In den meisten Verbrennungsvorgängen wird neben Wärmeenergie auch Energie im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums freigesetzt. Diese Energie bleibt in heutigen thermischen Kraftwerken ungenutzt. In sogenannten thermophotovoltaischen Systemen dagegen setzt man Solarzellen ein, die das bei der Verbrennung entstehende Licht in elektrischen Strom umwandeln. Dieser Artikel beschreibt ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt des Paul-Scherrer-Instituts in Villigen, in dem das Licht einer Gasflamme zur Produktion einer elektrischen Leistung von 80 W ausgenutzt wurde.