

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 116 (1998)  
**Heft:** 42

**Artikel:** Thermophotovoltaik: die leuchtende Heizung  
**Autor:** Humm, Othmar  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-79581>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

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

Othmar Humm, Zürich

# Thermophotovoltaik

## Die leuchtende Heizung

**Eine Wärmequelle – beispielsweise ein Gasbrenner – emittiert Strahlung, die in ihrem Spektrum auf handelsübliche Photozellen zugeschnitten ist. Die spektrale Übereinstimmung von Emittier und Generator führt zu einem höheren elektrischen Wirkungsgrad der Zellen. Diese Variante der Wärmekraftkopplung wird als Thermophotovoltaik bezeichnet und ist Forschungsgegenstand in mehreren europäischen Ländern, auch in der Schweiz: Am Paul-Scherrer-Institut wird mit Unterstützung des Gas-Forschungsfonds das Potential dieser Technologie ausgelotet.**

Mit 1% ist der elektrische Wirkungsgrad der mit photovoltaischen Zellen bestückten «Campinglampe» am Paul-Scherrer-Institut (PSI) äusserst bescheiden. Und doch, in dieser Technik der Wärmekraftkopplung liegen grosse Hoffnungen – nicht nur von Forschern in Villigen. Allein in Europa beschäftigen sich Gruppen in fünf Ländern mit der Thermophotovoltaik (TPV), zum Teil seit Jahren. Die Idee selbst ist älter: Zu Beginn der sechziger Jahre schlugen Blair und andere vor, eine Lichtquelle in ihrer spektralen Verteilung derart auf photovoltaische Zellen abzustimmen, dass ein wesentlich höherer Zellenwirkungsgrad resultiert [1]. Für die heute bekannten Silizium-Zellen unter der breitbandigen Sonnenstrahlung auf die Erde, beträgt das theoretische Limit 33,4%. Zum Vergleich: Auf 25,4% kommt die beste – im Labor produzierte – monokristalline Silizium-Zelle, jede weitere Effizienzsteigerung ist mit unverhältnismässig hohen Kosten verbunden. Für Photozellen, die in ihrem «Fenster» (Bandgap) – das heisst: wellenlängenmässig optimal – beleuchtet werden, liegen theoretisch 70% drin. Das Sonnenlicht ist demnach für unsere handelsüblichen Zellen eine eher ungünstige Strahlungsquelle.

Um fossile Energien – insbesondere Erdgas – auf diesem thermophotovoltaischen Weg in Elektrizität zu konvertieren, sind vier Prozessstationen nötig: eine Wärmequelle, ein selektiver Emittier, ein Filter und schliesslich die Photozelle (die traditionelle Bezeichnung Solarzelle ist naturgemäss unzutreffend).

### Die Wärmequelle – ein Gasbrenner

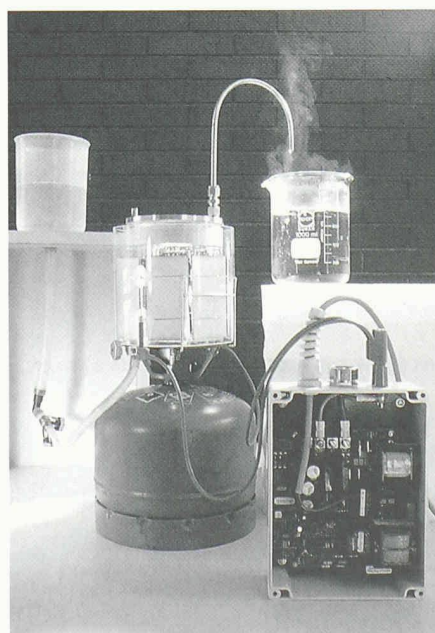
Gas bietet sich schon aus praktischen Gründen als Energieträger an, doch sind auch Heizöl oder sogar radioisotopische Generatoren sowie regenerative Energien wie Holz und Biogas einsetzbar. Die Wärmequelle erhitzt den Emittier; je höher dessen Temperatur ist, desto besser. Denn der Wirkungsgrad des Gesamtsystems steigt mit der Emittier-Temperatur, weil der verwertbare Strahlungsanteil zunimmt. Gleiches gilt allerdings auch für die Stickoxid-Emissionen: Hier setzt die Luftreinhalteverordnung Grenzen. Sofern aus lufthygienischen Gründen tiefere Temperaturen gefahren werden müssen, bringen Photozellen mit kleinerer Bandlücke bessere Wirkungsgrade. Bei den am PSI eingesetzten selektiven Emittieren wächst bei einer Temperatur von 1500°C die Leuchtkraft proportional zu  $T^8$  (T: absolute Temperatur).

### Der selektive Emittier

Herzstück und eigentliche Innovation des TPV-Generators ist der Emittier. Er muss strenge Anforderungen erfüllen. Da Körper ihre Energie über Leitung, Konvektion oder Strahlung verlieren, sind zur Maximierung des Strahlungsanteiles – und damit zur Optimierung der Emissivität –

1

Funktionsmuster des thermophotovoltaischen Generators am Paul-Scherrer-Institut (Bilder: Nadja Athanasiou)



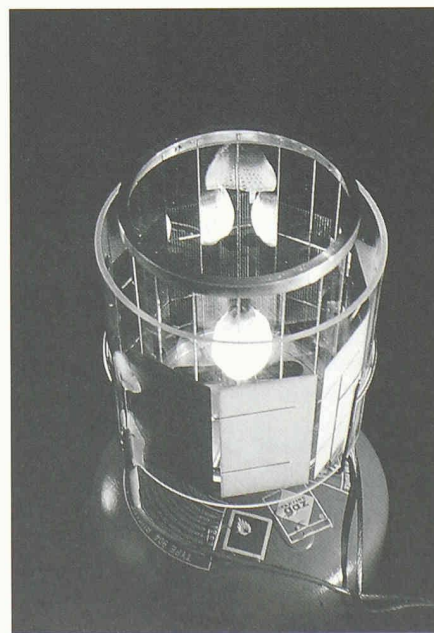
### Foga

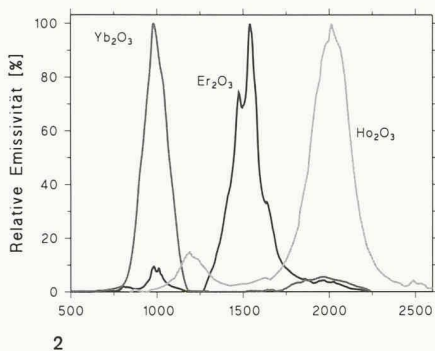
Der Forschungs-, Entwicklungs- und Förderungsfonds der Schweizerischen Gasindustrie (Foga) ist Geburtshelfer der Schweizer TPV-Variante. Als einer der drei NEFF-Nachfolger unterstützt der Foga, oft zusammen mit dem Bundesamt für Energie, Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte im Energiebereich. (NEFF steht für Nationaler Energie-Forschungs-Fonds.) Anträge an den Foga sind zu richten: SVGW, Postfach, 8027 Zürich.

Projektgruppe im Paul-Scherrer-Institut, Villigen: Markus Schubnell, Beda Grob, Jean-Claude Mayor, Jan-Christoph Panitz, Willhelm Durisch.

minimale Verluste durch Wärmeleitung und Konvektion erwünscht. Zwar unterbinden heisse Verbrennungsgase um den Emittier dessen konvektive Verluste weitgehend, doch wie lässt sich die Wärmeleitung drastisch reduzieren?

Karl Auer von Welsbach stellte um 1890 in Wien sein «Gas-Glüh-Licht» vor, ein aus «Seltene Erden» gewirkter Glühstrumpf. Seltene Erden sind Oxide der Lanthaniden, die zwar weitverbreitet, aber nur in niedrigen Konzentrationen zu finden und schwer zu gewinnen sind. Der österreichische Baron wollte mit seinem Glühstrumpf der Gasbeleuchtung grössere Chancen im Vergleich zu elektrischen Lichtbögen und Glühlampen eröffnen. Tatsächlich ist mit gasbeschickten Leuchtkörpern in der Bauart von Auer eine deutlich höhere Lichtausbeute möglich als mit anderen, als «Brenner» konfigurierten Gaslampen. (Glühstrümpfe sind bei Gasbe-





2  
Emissionsspektren von drei für die Thermophotovoltaik geeigneten Emittiermaterialien (von links): Ytterbiumoxid, Erbiumoxid und Holmiumoxid

leuchtungen noch heute üblich; eine weitverbreitete Variante geht auf Tilley zurück.) In Villigen kommen versuchsweise die Oxide von Ytterbium ( $\text{Yb}_2\text{O}_3$ , 1794 im schwedischen Steinbruch Ytterby entdeckt), Erbium ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) und Holmium ( $\text{Ho}_2\text{O}_3$ ) zum Einsatz. Diese Seltenen Erden sind für selektive Emittier besonders geeignet (Bild 1 zeigt die Emissionsspektren). Interessant ist, dass für alle drei Emittiermaterialien Photozellen mit passenden Bandlücken verfügbar sind (Bild 3). Aus Kostengründen kommen am PSI indessen nur Silizium-Zellen in Frage.

Die niedrige Wärmeleitfähigkeit prädestinieren die Seltenen Erden zum Einsatz in Emittieren. Da sich die Kühlwirkung im wesentlichen auf die Strahlung beschränkt, entstehen sehr hohe Temperaturen mit dem dafür typischen weissen Licht. Nachteilig sind die geringe mechanische und chemische Stabilität. Schon Auer zerfielen die Strümpfe in den Händen. Ziel

des PSI-Projektes ist es, mit dem Emittier vier - teilweise gegensätzliche - Forderungen zu erfüllen: Neben der niedrigen Wärmeleitung und einer hohen Festigkeit sind eine dichte Oberfläche (ermöglicht hohe Flächenhelligkeit) sowie eine an die PV-Zelle weitgehend angepasste Selektivität erforderlich. Die Lösung liegt in einem Kompromiss.

### Photozellen - noch aus Silizium

Kompromisse sind auch beim Einsatz der Photozellen nötig. Denn einige der bekannten Technologien, wie die Low-band-gap-Zellen in Gallium-Antimonid und in Indium-Gallium-Arsenid, sind zwar aufgrund der Bandlücke sehr geeignet, in ihrem Wirkungsgrad aber bislang ungenügend. Insofern liegen zwischen der Silizium-Zelle und den Gallium-Zellen Jahrzehnte der Forschung und der Entwicklung. Zudem sind diese neuen Zellen selbst für Laborarbeiten «unbezahlbar». Handelsübliche Silizium-Zellen dagegen sind vergleichsweise kostengünstig und garantieren einen Wirkungsgrad von bis zu 16% (bei Solarstrahlung).

### Der Filter als Wärmetauscher

Zwischen Glühstrumpf und Photozellen liegt ein Filter. Im TPV-Funktionsmuster in Würenlingen besteht dieser Filter aus zwei konzentrisch angeordneten Gläsern in einem Abstand von 5 mm. Der mit Wasser gefüllte Zylindermantel hat zwei Funktionen: Als Hitzeschutzschild filtert das Wasser die für die Si-Zellen nicht verwertbare und wirkungsgradsenkende Infrarot-Strahlung weg; der Mantel bildet zudem einen Wärmetauscher, um die Wärme aus dem Gerät auszukoppeln. Im PSI-Muster ist der Filter mit einem Was-

### Literatur

- [1]  
*Blair J., White D.C., Wedlock B.D.*: Recent Advance in Thermal Energy Conversion. In: Proceedings 15th Power Source Conference, pages 125-132, 1961
- [2]  
*Schubnell M., Benz P., Mayor J.-C.*: Design of a Thermophotovoltaic Residential Heating System. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998
- [3]  
*Panitz J.-C., Schubnell M., Geiger F., Durisch W.*: Proceedings of the 3rd NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. Colorado Springs, AIP, 1997
- [4]  
*Durisch W., Panitz J.-C.*: Development and Characterisation of a Rare Earth Emittier for a Thermophotovoltaic Power Generator. PSI Annual Report, Annex V, p. 35, 1996

serbehälter verbunden, der sinnvollerweise direkt oberhalb des Brenners montiert ist.

### Modellierung notwendig

Der jetzige TPV-Generator funktioniert und hat im internationalen Vergleich einen guten elektrischen Wirkungsgrad. Doch das genügt nicht. Die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet geht mit kontinuierlicher finanzieller Unterstützung weiter.

So mussten die Forscher ein Modell entwickeln, um den Prozess in allen Schritten qualitativ zu beschreiben. Im Zentrum stand der Strahlungsaustausch zwischen Emittier, Filter und Zelle. Eine Unzahl von Parametern lässt sich anhand dieses Modells variieren, um dann über die Parameterstudien zur Dimensionierung und zur Optimierung des TPV-Generators zu kommen. Eines Tages, so die Hoffnung der Beteiligten, werden unsere Heizungen leuchten wie Gaslampen - und dabei Strom erzeugen.

Adresse des Verfassers:

*Othmar Humm*, dipl. EI-Ing HTL, Gubelstrasse 59, 8050 Zürich

Emittiermaterial	Passende Photozelle	Bandlücke
Ytterbiumoxid ( $\text{Yb}_2\text{O}_3$ )	Silizium (Si, monokristallin)	1100 nm
Erbiumoxid ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ )	Gallium-Antimonid (GaSb)	1770 nm
Holmiumoxid ( $\text{Ho}_2\text{O}_3$ )	Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs)	2200 nm

3  
Photozellen und ihre Bandlücken für drei verschiedene Emittiermaterialien

4  
Eckdaten eines thermophotovoltaischen Generators mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 4,0%.  
Quelle: Nationale PV-Tagung in Bern, 1998

Eingangsgrössen		Berechnete Grössen [ $\text{kW/m}^2$ ]	
Emittiertemperatur	1500 °C	Brennerleistung	85
Filtertemperatur	100 °C	Kühlleistung des Filters	21
Zellentemperatur	20 °C	Kühlleistung der Zellen	17,5
Vorwärmtemperatur	500 °C	Leistung im Abgas	43
Luftzahl (Luftüberschuss)	1,0	Elektrische Leistung	3,4

AR. Der interessierte Leser findet zum selben Thema einen umfassenden Artikel mit dem Titel: «Thermophotovoltaics; Semiconductors that convert radiant heat to electricity may prove suitable for lighting remote villages or powering automobiles» im soeben erschienenen Scientific American, September 1998, Volume 279, Number 3, S. 68 ff. Die Autoren Timothy J. Cousts und Mark C. Fitzgerald befassen sich schon seit Jahren mit erneuerbaren Energien.