

# Thermoelektrische Wandler als Zusatzstromerzeuger

von Werner Roth,  
Jürgen Schilz und  
Andreas Steinhüser

## Überblick

Zur autonomen Energieversorgung bietet sich in netzfernen Gebieten, in denen der Jahresgang der solaren Einstrahlung starken Schwankungen unterworfen ist, die Möglichkeit, photovoltaische (PV) Generatoren mit einem Zusatzstromerzeuger zu einem PV-Hybridssystem zu kombinieren. Damit kann die Größe des PV-Generators deutlich reduziert, ein hoher Zuverlässigkeitsgrad weiterhin gewährleistet und zudem eine Kostensenkung erzielt werden. Thermoelektrische (TE) Wandler sind für den Einsatz als Zusatzstromerzeuger in kleinen PV-Hybridssystemen aufgrund ihrer Langlebigkeit, Zuverlässigkeit und Wartungsarmut prädestiniert. Es wird ein Beispiel einer Realisierung vorgestellt sowie ein Szenario entwickelt, mit dem Ziel, die Effizienz eines PV-Hybridsystems mit TE-Zusatzstromerzeuger zu steigern.

Remote electrical appliances, located far away from the public electricity grid, are more and more supplied by means of photovoltaics (PV). Especially where solar radiation varies significantly throughout the year, these PV power supplies should be combined with a fossil fueled generator. Such PV hybrid systems have the advantages of higher reliability and reduced installation costs. Due to their long lifetime, excellent reliability and low costs for maintenance thermoelectric (TE) generators are highly qualified to serve as auxiliary generators in these systems. This paper presents an example of such a PV-TE hybrid system. An outlook is given, how the efficiency of a PV-TE hybrid system on one hand, and the TE generator on the other can be raised.

Systeme, d.h. PV-Generatoren in Verbindung mit Kurzzeitspeichern (meist wiederaufladbare Bleibatterien) eingesetzt, deren Vorteil darin besteht, daß die Erzeugung von Lärm und Abgasen, der hohe Wartungsaufwand bei Dauerbetrieb und der Verbrauch von begrenzten fossilen Energievorräten entfällt.

Wegen des fluktuierenden Charakters der Solarstrahlung führt eine ausschließlich photovoltaische Energieversorgung vor allem in äquatorfernen Gebieten zu großen und damit teuren Anlagen. Wird nämlich eine hohe Zuverlässigkeit der Stromversorgung gefordert, so muß das System auf den einstrahlungsärmsten, vom Energiespeicher nicht überbrückbaren Zeitraum ausgelegt werden. Der Generator und die Batterie des PV-Systems werden also auf die Einstrahlungsverhältnisse im Winter angepaßt und sind somit während der übrigen Monate überdimensioniert. Ein weiteres Problem in reinen PV-Systemen ist, daß der dauerhaft niedrige Ladezustand der Batterien während des Winters deren Lebensdauer verkürzt. Außerdem ist es nicht ausgeschlossen, daß sich der Energiespeicher nach besonders langen Perioden mit geringer Sonneneinstrahlung erschöpft und die Last nicht mehr versorgt werden kann. Diesen Schwierigkeiten kann begegnet werden, indem das PV-System mit einem Zusatzstromerzeuger kombiniert wird.

## 1. Einleitung

Steht einem elektrischen Verbraucher zur Energieversorgung kein öffentliches Stromnetz zur Verfügung oder sprechen andere Gründe wie z.B. hohe Anschlußkosten, lange Wartezeiten oder notwendige örtliche Flexibilität für eine netzunabhängige Versorgung, so muß ein eigenständiges Stromversorgungssystem aufgebaut werden. Das gilt z.B. für viele Telekommunikationseinrichtungen, Meßstationen und Leuchtbojen. Bisher wurden solche autonomen Stromversorgungssysteme hauptsächlich auf der Basis fossil betriebener Motoren mit angekoppeltem Generator realisiert. Aufgrund der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte im Bereich regenerativer Energieerzeugung werden immer häufiger Photovoltaik (PV)-

Da der Zusatzstromerzeuger die PV-Generatoren in einstrahlungsarmen Zeiträumen bei der Versorgung der Last unterstützen kann, lassen sich PV-Generatorgröße und Batteriekapazität bei unverminderter Versorgungssicherheit verringern. In unseren Breiten reduziert sich bei einem Zusatzstromversorgungsanteil von lediglich 10% des Jahresenergiebedarfs der PV-Generator auf ca. 1/3 seiner ursprünglichen Größe.

## 2. Aufbau eines PV-Hybridsystems

Ein PV-Stromversorgungssystem, das um einen Zusatzstromerzeuger erweitert ist, nennt man PV-Hybridssystem (**Abbildung 1**). Bei guter Sonneneinstrahlung wird der Verbraucher ausschließlich aus dem Solargenerator versorgt. Zusätzlich wird die Batterie

Dipl.-Ing. Werner Roth ist Leiter und Dipl.-Ing. Andreas Steinhüser ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe PV-Produkte in der Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

Dr. Jürgen Schilz ist Leiter der Arbeitsgruppe „Thermoelektrische Materialien“ am Institut für Werkstoff-Forschung der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln.

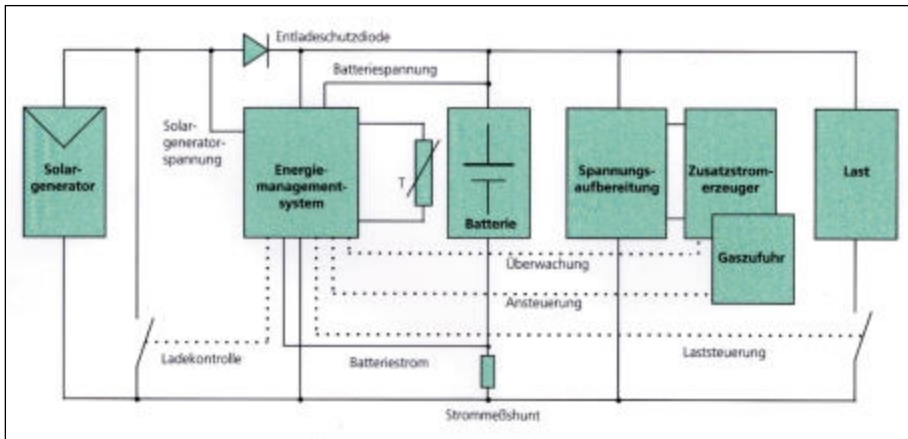
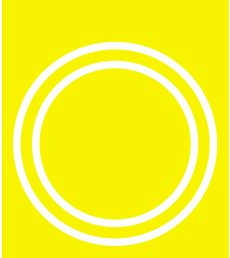


Abbildung 1: Blockschaltbild eines Photovoltaik-Hybridsystems mit Energiemanagementsystem

geladen. Nimmt die Sonneneinstrahlung ab, übernimmt die Batterie die Stromversorgung. Erst wenn der Ladezustand der Batterie dies nicht mehr zuläßt – zum Beispiel nach einer langen Phase niedriger Einstrahlung – wird der Zusatzstromerzeuger gestartet. Er übernimmt dann sowohl die Versorgung der Last, als auch das Nachladen der Batterie.

Ein Energiemanagementsystem (EMS) entscheidet, wann der Zusatzstromerzeuger zu- bzw. abgeschaltet wird. Es berücksichtigt neben der zuverlässigen Versorgung der Last auch die Betriebsführung der Batterie und vermeidet z.B. Tiefentladungen und lange Standzeiten bei niedrigem Ladezustand.

Gute PV-Hybridsysteme gewährleisten eine zuverlässige, autonome und kostengünstige Stromversorgung und zeichnen sich durch Langlebigkeit und geringen Wartungsaufwand aus.

### 3. Auswahl des geeigneten Zusatzstromerzeugers

Ob ein PV-Hybridsystem einen ähnlich geringen Wartungsbedarf wie ein reines PV-System erreicht und sich damit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber rein fossil versorgten Anlagen verschaffen kann, ist stark von der Auswahl des Zusatzstromerzeugers abhängig. Zu berücksichtigen sind der Standort, die Installationskosten, die Überwachung und Wartung der Anlage, Lebensdauer und Effizienz des eingesetzten PV-Generators und der Batterie, der Energieverbrauch des Zusatzstromerzeugers sowie der Transport von Treibstoffen und Ersatzteilen.

Hinzu kommt der Anspruch der Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit an den Zusatzstromerzeuger. Potentielle Zusatzstromerzeuger sind Stromquellen wie Redoxsysteme, Brennstoffzellen, Primärelemente, an Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren angekoppelte Generatoren sowie thermophotovoltaische und thermoelektrische (TE) Wandler.

Wie oben aufgeführt, soll der Zusatzstromerzeuger lediglich einen geringen Anteil (ca. 10% im Jahresmittel) des benötigten Stroms liefern. Sein Einsatz ist dabei unregelmäßig und typischerweise in den kalten, einstrahlungsarmen Wintermonaten. In diesem Zusammenhang sind thermoelektrische Wandler [1] besonders interessant. Als Direktwandler von thermischer in elektrische Energie haben sie sich in der Raumfahrt zur Energieversorgung von Weltraumsonden bewährt und in Millionen von Betriebsstunden ihre Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und Wartungsfreiheit bewiesen. Quelle der thermischen Energie ist im Falle der Raumfahrtanwendung ein nuklearer Zerfall, wogegen im terrestrischen Bereich sinnvollerweise fossiler Brennstoff eingesetzt wird. TE-Wandler können in PV-Hybridsystemen im Leistungsbereich zwischen 50 und 150 W, der z.B. zur Energieversorgung von Telefon- oder Daten-Relaisfunkstellen von Bedeutung ist, wirtschaftlich eingesetzt werden [2].

### 4. Erste Betriebserfahrungen

Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) wurde ein derartiges photovoltaisch-thermo-

elektrisches (PV-TE) Hybridsystem entwickelt und aufgebaut. Es ist mit einem Solargenerator von 270 W Spitzenleistung und einem TE-Wandler der Firma Global Thermoelectric (Kanada) ausgestattet und dient zur Versorgung einer Last mit 18 W Dauerleistungsaufnahme. Die Ausgangsleistung des TE-Wandlers wurde durch eine Neukonstruktion der Regelungselektronik und des DC/DC-Wandlers von ursprünglich 21,5 W auf ca. 27 W gesteigert. Das entspricht einer Wirkungsgradsteigerung von 2,5% auf ca. 3%. Vor den Langzeitmessungen wurden zunächst Leistungsabgabe, Wirkungsgrad, Zündverhalten und Abgaswerte untersucht. Es zeigte sich, daß insbesondere die Emissionen des TE-Wandlers stark reduziert werden müssen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich der Emissionen des eingesetzten thermoelektrischen Wandlers 5030 der Firma Global Thermoelectric mit dem Gütezeichen „Blauer Engel“ für Gas-Heizungsanlagen, dessen Emissionsvorgaben von modernen Gasbrennern weit unterschritten werden.

	TE-Wandler	Blauer Engel
NO <sub>x</sub> [mg/kWh]	242	50 – 60
CO [mg/kWh]	249	50 – 60

Ein wichtiger Faktor bei der Anpassung der Steuerung des TE-Wandlers an die übrige Systemtechnik ist u.a. die genaue Kenntnis des Anlaufverhaltens des Wandlers (Abbildung 2). Der hier eingesetzte TE-Wandler kann erst ca. 45 Minuten nach dem Einschalten den maximal möglichen Strom liefern. Erste Erfahrungen mit dem Hybridsystem zeigen, daß sich insbesondere für die bisher wartungsaufwendigste Komponente eines PV-Systems, den Akkumulator, neue Möglichkeiten der Betriebsführung durch gezielte Vollaftung, kontrollierte Gasungsladung, Ausgleichsladungen und durch Nutzung der Abwärme des TE-Wandlers zur Beheizung des Batterieraumes ergeben. Gelingt es auf diese Art die Lebensdauer der Akkumulatoren zu steigern, lassen sich die Betriebskosten solcher Systeme zusätzlich senken.

Es zeigt sich aber auch, daß aus dem Hybrideinsatz neue Anforderungen an die verwendeten thermoelektrischen

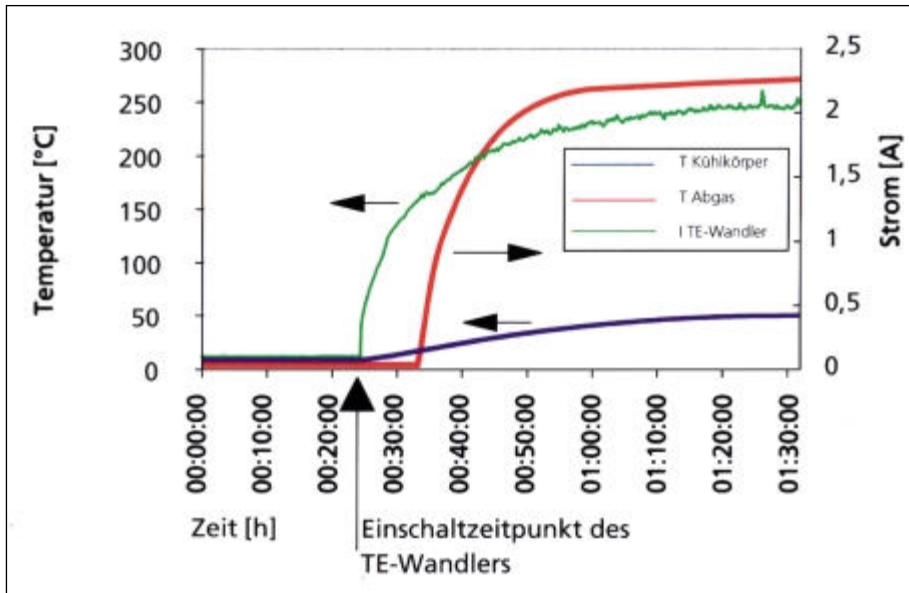
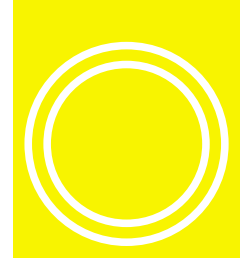


Abbildung 2: Anlaufverhalten des thermoelektrischen Wandlers

Stromerzeuger resultieren. So macht es wenig Sinn, Photovoltaik als saubere und umweltfreundliche Energiequelle in einem Hybridsystem einzusetzen, wenn der Zusatzstromerzeuger nicht hohe Standards bezüglich seiner Emissionen und seines Verbrauchs erfüllen kann. Auch die Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Zusatzstromerzeugers sollten den in dieser Hinsicht hervorragenden Eigenschaften der Solargeneratoren nahekommen [3].

Der Aufbau eines weiteren Hybrid-

systems (Abbildung 3) zur Versorgung von Lasten mit einer Leistungsaufnahme von 50 W (entspricht z.B. D-Netz-Repeatern) wurde bereits begonnen. Dabei wurden zahlreiche Anforderungen wie z.B. erhöhte Einbruch- und Vandalismussicherheit, flexible Montagemöglichkeiten im Innenraum sowie eine Trennung zwischen Gastechnik und elektrischen Installationen realisiert (Abbildung 4). Damit entspricht dieser Aufbau den Anforderungen an leinstehender Telekommunikations- oder Meßeinrichtungen. Er ist für den

Abbildung 3: Kompaktes PV-TE-Hybridsystem mit integriertem Solargenerator zur Versorgung von Telekommunikationseinrichtungen



Einsatz unter extremen Umweltbedingungen ausgelegt und dennoch architektonisch ansprechend gestaltet.

Im Rahmen zukünftiger Aktivitäten werden der konstruktive Aufbau, die gesamte Systemtechnik und das vollautomatische mikroprozessorgesteuerte Energiemanagement ausführlich getestet und optimiert.

### 5. Szenario zur Erhöhung der Effizienz und zur Verminderung der Emissionen des TE-Systems

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen mit dem vorhandenen Experimentalaufbau und der daran vorgenommenen Analysen läßt sich ein Szenario zur Effizienzsteigerung des PV-TE-Hybridsystems entwickeln. Dieses beinhaltet eine Erhöhung der Wandlungseffizienz des TE-Zusatzstromerzeugers durch Verbesserung des TE-Materials, geschickte Auswahl und Anpassung des Brenners sowie durch die Verbesserung des Energiemanagementsystems.

#### 5.1 Das thermoelektrische Wandler-system

Ein TE-Wandler basiert auf Thermoelementen (TE-Element) mit Schenkeln aus massiven Halbleitermaterialien (Abbildung 5). Wird die gemeinsame

Abbildung 4: Separater Raum mit TE-Wandler und Gastechnik



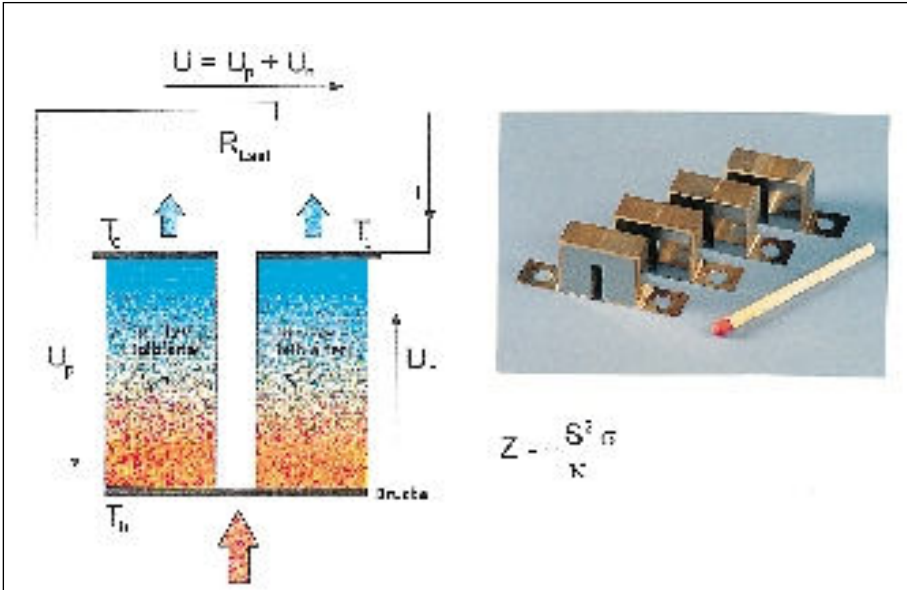
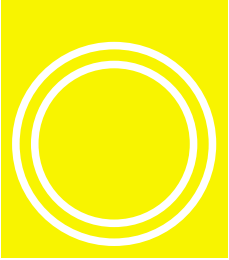
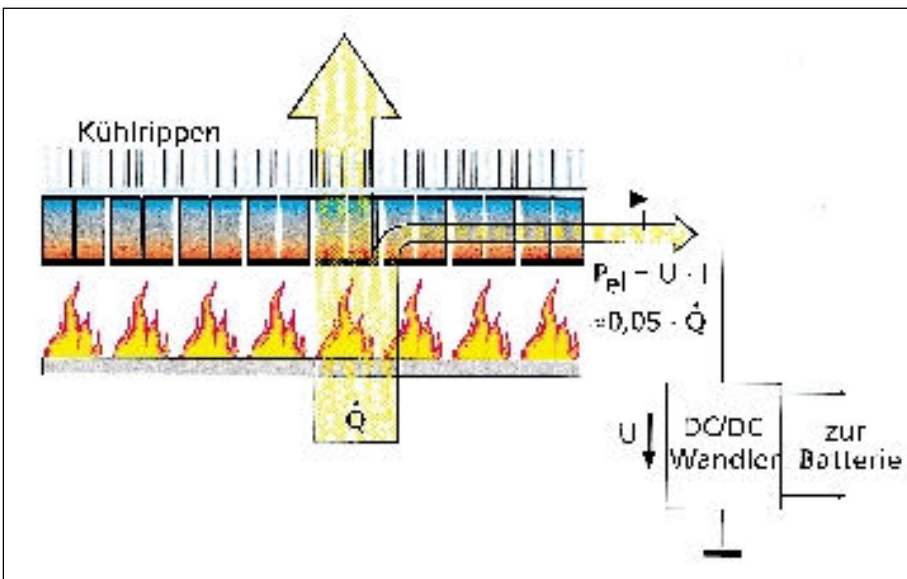


Abbildung 5: Thermoelektrisches Wandlerelement

Abbildung 6: Verschaltung der Elemente zum thermoelektrischen Generatormodul



Kontaktstelle (unten) gegenüber den Einzelanschlüssen (oben) erwärmt, so entsteht über den Schenkeln eine Thermospannung (Seebeck-Effekt), deren Summe am eingezeichneten Lastwiderstand wirkt. Mehrere derartige Elemente werden zum Gesamtgenerator (TE-Modul) verschaltet (Abbildung 6). Wird der Generator von unten beheizt, strömt Wärme durch die Anordnung hindurch, wovon einige Prozent in den Elementen in elektrische Energie gewandelt werden.

Ein Ziel in der Entwicklung eines effizienteren Wandlersystems ist es, den Wirkungsgrad  $\eta$  eines TE-Elementes, definiert als das Verhältnis von erhalte-

ner elektrischer Leistung zur hineinströmenden Wärmeleistung, zu erhöhen. Dazu muß die über den Elementen herrschende Temperaturdifferenz möglichst groß gemacht werden (thermodynamischer Wirkungsgrad). Bei der Auswahl des Halbleitersystems kommt es auf folgende Bedingungen an: (a) möglichst große Thermospannung  $S$ , (b) möglichst geringer Innenwiderstand des Generators, d.h. ein Material mit hoher elektrischer Leitfähigkeit  $\kappa$ , sowie (c) ein Material mit möglichst geringer thermischer Leitfähigkeit  $\sigma$ . Diese drei Größen setzt man zu einer Gütekennzahl,  $Z = S^2\sigma/\kappa$ , zusammen, die es zu maximieren gilt. Alle genannten Werkstoffkennzahlen

sind üblicherweise temperaturabhängig, damit auch die Gütekennzahl  $Z$ .

Die Auswahl des geeigneten Halbleitersystems geschieht somit nach der Einsatztemperatur, d.h. es wird das System gewählt, welches im gewählten Temperaturbereich ein möglichst großes  $Z$  zeigt. Abbildung 7 zeigt mit der mittleren Temperatur  $T$  multiplizierte Kennzahlen ( $Z \cdot T$ ) als Funktion der Temperatur für verschiedene thermoelektrische Materialien.

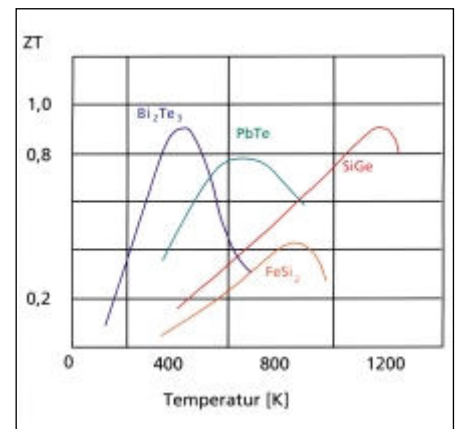
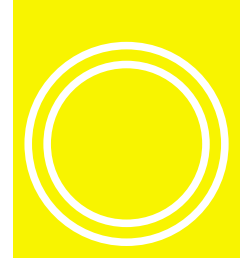


Abbildung 7: Dimensionslose Kennzahlen  $Z(T)$  für verschiedene Halbleitersysteme als Funktion der Temperatur

Die kommerziellen TE-Wandler mit den höchsten Wirkungsgraden beinhalten TE-Elemente aus Bleitellurid ( $PbTe$ ), die ein hohes Wandlungsvermögen von ca. 5% aufweisen. Allerdings muß sich das Material aufgrund seiner Oxidationsempfindlichkeit und wegen des Abdampfens von Tellur in einem mit Schutzgas gefüllten Behälter befinden. Diese Kapselung hat sowohl die beobachteten langen Anlaufzeiten als auch eine Reduktion des Wirkungsgrades zur Folge. Aufgrund dieser Komplizierung und wegen der Toxizität des eingesetzten Materials sollte zu anderen Halbleitern übergegangen werden.

Von allen etablierten thermoelektrischen Halbleitern ist  $Bi_2Te_3$  (Bismuth-tellurid) derjenige mit den höchsten Wirkungsgraden. Nach den gezeigten Kennwerten läßt er sich bis ca. 400°C effektiv einsetzen, wobei Laborwirkungsgrade von 8% gemessen wurden. Leider sind langzeitstabile elektrische Kontakte nur bis 300°C bekannt. Außerdem kann  $Bi_2Te_3$  nicht in stark oxidierender Atmosphäre, d.h. insbesondere nicht in Gasbrennern, betrie-



ben werden. Zwar enthält auch dieses System Tellur, aber die Verbindung  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ist stabil genug, so daß ein Abdampfen verhindert wird. Dagegen ist Eisendisilizid ( $\text{FeSi}_2$ ) ein thermoelektrisches Material mit guten thermomechanischen Eigenschaften und ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit. Es ist bis  $850^\circ\text{C}$  einsetzbar, wobei sich allerdings der Wirkungsgrad mit maximal 3% eher bescheiden darstellt.

Um die Vorteile der beiden zuletzt vorgestellten Halbleiter zu nutzen schlagen wir vor, sogenannte gradierte Elemente herzustellen, bei denen die Schenkel am heißen Ende aus  $\text{FeSi}_2$  und im Kaltseitenbereich aus  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  bestehen [4]. Dazwischen gibt es einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Materialien, um thermomechanische Spannungen gering zu halten. Der geometrische Ort der Übergangsstelle wird dabei so gewählt, daß das  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  bei max.  $400^\circ\text{C}$  betrieben, also nicht überhitzt wird. Die Grädierung hat gegenüber den homogenen Materialien zusätzlich eine Wirkungsgradsteigerung zur Folge. **Tabelle 2** listet zur Verdeutlichung Werte homogener Materialien auf, wie sie bei pulvermetallurgischem  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  kommerzieller Hersteller [5] und bei heißverpreßtem  $\text{FeSi}_2$  [6] erreicht werden. Ferner werden die daraus berechneten Wirkungsgrade des gradierten Elementes dargestellt. Dabei wurden die Dicken der Module so gewählt, daß bei den angegebenen Temperaturen stets ein Wärmefluß von  $10 \text{ W/cm}^2$  erreicht wird.

5.2 Brenner und Brennerankopplung

Bei der Auswahl des Brenners eines TE-Wandlers stellen die Temperatur- und Wärmeleistungsanforderungen des TE-Moduls ein wichtiges Kriterium dar. Daneben sind aber – insbesondere im Einsatz zusammen mit der „sauberen“ Photovoltaik – die Emissionen des Brenners von zunehmender Bedeutung. Wegen der Umweltgefahren beim Transport flüssiger Brennstoffe (Öl, Diesel, Benzin, etc.) werden im folgenden nur gasbefeuerte Brenner betrachtet.

In kommerziell erhältlichen TE-Wandlern arbeiten hauptsächlich Flammenbrenner, deren Flamme einen Stahlabsorber mit dahinterliegendem TE-

Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften kommerziell erhältlicher thermoelektrischer Module mit berechneten Werten eines gradierten  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ -Moduls

	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	$\text{FeSi}_2$	$\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ gradiert
$T_h$ in $^\circ\text{C}$	230	400	850	850
$T_c$ in $^\circ\text{C}$	30	60	60	60
Moduldicke in mm	5	8	35	28
Wärmefluß in $\text{W/cm}^2$	10	10	10	10
Elektr. Leistung	0,45	0,74	0,23	0,86
Wirkungsgrad	4,5%	7,4%	2,3%	8,6%

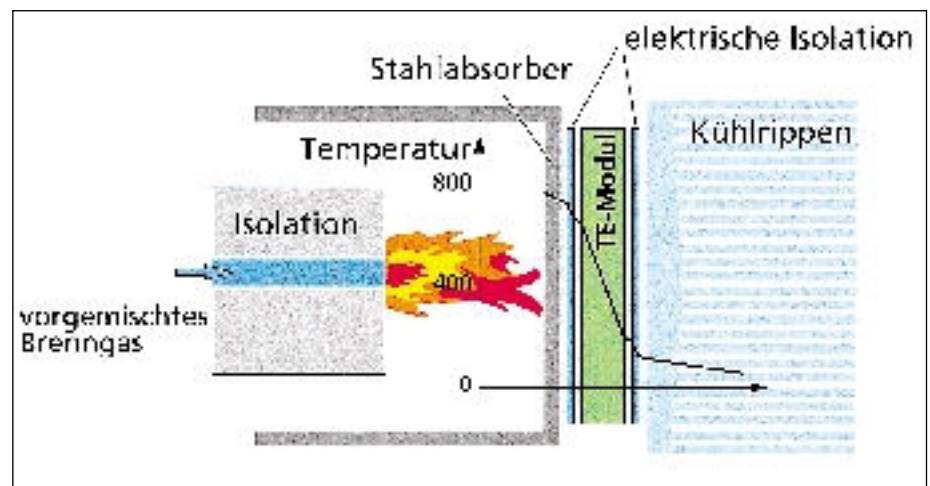
Modul (**Abbildung 8**) direkt erhitzt. Die Flammentemperatur liegt dabei über  $800^\circ\text{C}$ . Die verwendeten TE-Module aus PbTe haben eine Nenntemperatur von etwa  $600^\circ\text{C}$  auf ihrer heißen Seite. Der Vorteil dieser Anordnung und auch der Materialwahl ist der relativ hohe Gesamtwirkungsgrad von bis zu 4%. Nachteilig sind neben dem Schadstoffgehalt der Abgase vor allem die Giftigkeit von PbTe und die Tatsache, daß dieses mit gutem thermischen Kontakt in eine inerte Atmosphäre gekapselt werden muß (siehe oben). Letzteres stellt insbesondere bei einem Einsatz in einem PV-TE-Hybrid-system, in dem der TE-Wandler häufig an und abgeschaltet wird, aufgrund der auftretenden thermischen Spannungen ein Problem dar.

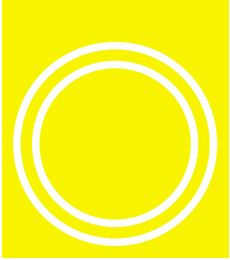
Im Gegensatz dazu können Materialien wie  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  auch in Kontakt mit der Atmosphäre betrieben werden. Da sie bei Temperaturen von unter  $400^\circ\text{C}$  effizient arbeiten, bietet sich der kataly-

tische Brenner als emissionsarme Alternative zum Flammenbrenner an. Katalytische Brenner bestehen aus (mindestens) einer meist keramischen Wabe, die mit dem Katalysator (Platin) beschichtet ist. Vorteile katalytischer Brenner sind ihre absolute Lautlosigkeit, ihre hohe Zuverlässigkeit und der äußerst geringe Schadstoffanteil im Abgas.

Ein Katalysator senkt die Aktivierungsenergie der Verbrennungsreaktion und führt die Verbrennung des Gases bereits unterhalb der Entzündungstemperatur – also ohne Flamme – durch. Die gewonnene Wärmeenergie führt zur Erhitzung der Wabe und somit zur Erwärmung des Gases. Mit zunehmender Temperatur des Gases und der Wabe wird die katalytische Umsetzung weiter erleichtert und beschleunigt. Grenzen dieses Prozesses sind einerseits die Temperaturbeständigkeit der Wabe und andererseits die Entzündungstemperatur des Gases.

Abbildung 8: Temperaturabfall in einem herkömmlichen thermoelektrischen Wandler





Die Wärmeabgabe einer katalytischen Wabe erfolgt fast ausschließlich durch Strahlung. Möchte man diese nutzen, ist wegen des Strahlungsgesetzes eine möglichst hohe Arbeitstemperatur von Vorteil. Im Falle der Verbrennung von Propan oder Butan setzt eine katalytische Wabe das vorgemischte Gas sehr schnell, das heißt auf den ersten Millimetern, um. Die Wärmeabgabe durch Strahlung geschieht also fast ausschließlich zu der Seite, auf der das Gasgemisch einströmt. Auf der anderen Seite tritt das heiße Abgas aus.

Ein mögliches Konzept zum Einsatz eines katalytischen Brenners mit einer Wabe zeigt [Abbildung 9](#). Das kalte und vorgemischte Brenngas wird auf die Oberseite der Wabe geleitet, verteilt sich dort und verbrennt beim Durchgang durch die Wabe. Diese erhitzt sich und bestrahlt durch die Glasplatte die geschwärzte Oberfläche des TE-Moduls. Die Wärme des Abgases darf nur sehr vorsichtig zur Vorwärmen des Brenngases eingesetzt werden, kann aber z.B. an einem zweiten TE-Modul genutzt werden.

Für in 5.1 angesprochene Materialien mit höherer Arbeitstemperatur, deren Oberfläche auch in einer stark oxidierenden Umgebung betrieben werden können, bietet sich der Strahlungsbrenner als Wärmequelle an. Er besticht durch ein gutes Abgasverhalten, hohe Zuverlässigkeit und eine große, gleichmäßig heiß strahlende Fläche mit einem Wärmefluß von bis zu  $20 \text{ W/cm}^2$ . Auch in diesem Brenner ist eine feine Keramikwabe das entscheidende Bauteil. Das vorgemischte Brenngas strömt durch die Keramik und wird oberhalb gezündet. Etwa die Hälfte der Wärme wird an die Wabe abgegeben und von dort als Strahlung emittiert. Damit die Flamme nicht durch die Wabe zurückschlägt, darf bei diesem Brennertyp das Brenngas ebenfalls nicht vorgewärmt werden.

Der Vorteil dieses Brenners im Einsatz in TE-Wandlern ist, daß hier Strahlungswärme und konvektive Wärme auf einer Seite zur Verfügung stehen. Die große Fläche der Flamme ermöglicht die direkte, gleichmäßige Bestrahlung des TE-Moduls. Diese Anordnung weist einen extrem geringen Wärmewiderstand zwischen Brennraum und TE-Material auf.

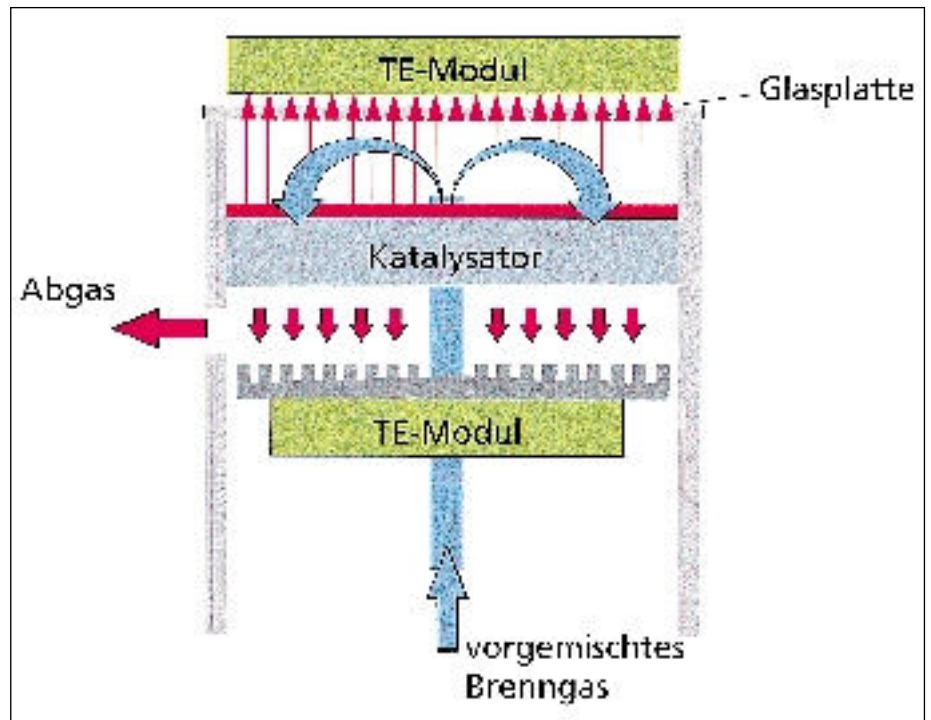


Abbildung 9: Einsatzprinzip eines katalytischen Brenners in einem thermoelektrischen Wandler

### 5.3 Das Energiemanagementsystem

Das Energiemanagementsystem (EMS) hat die Aufgabe, die zuverlässige Versorgung der Last bei minimalem Einsatz fossilen Brennstoffes und optimaler Betriebsführung der Batterie zu gewährleisten. Es muß in der Lage sein das PV-TE-Hybridssystem vollautomatisch über lange Zeiträume zu betreiben und beim Auftreten von Fehlern in einen sicheren Zustand zu bringen. Ferner muß es die verschiedenen Betriebszustände des Systems erkennen und anzeigen sowie Fehlermeldungen abgeben können.

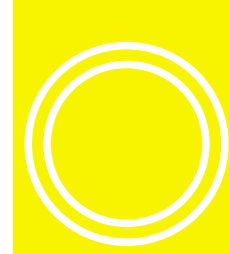
Das am Fraunhofer ISE realisierte EMS ist auf Basis des stromsparenden Mikrocontrollers H8/300 (Hitachi) aufgebaut. Es hat einen Eigenstromverbrauch von lediglich 5 mA. Um eine schnelle kundenspezifische Anpassung zu erleichtern, wurde auf die Verwendung von Standard-Bussystemen (ILC) und auf die Softwareentwicklung in einer flexiblen Hochsprache geachtet.

Die zentrale Entscheidungsgröße des Energiemanagements ist der Ladezustand der Batterie. Er wird durch die fortlaufende, temperaturkompensierte Überwachung der Batteriespannung abgeschätzt. Um die Batterie vor Überladung zu schützen, kann der So-

largenerator in zwei Stufen abgeschaltet werden. Sinkt der Ladezustand der Batterie unter eine vorgegebene Schwelle muß der TE-Wandler die Versorgung der Last übernehmen. Er wird durch Öffnen der Gaszufuhr und Auslösen der Zündung gestartet. Der Startvorgang und die weitere Funktion des TE-Wandlers werden mit Hilfe eines Temperatursensors und durch Messen der Ausgangsspannung überwacht. Ausschaltkriterium ist das Erreichen eines gewünschten Ladezustandes der Batterie.

Zusätzlich ist das derzeitige EMS in der Lage, drei verschiedene Lasten mit unterschiedlicher Priorität mit Strom zu versorgen. Diese Prioritäten sind, wie alle anderen Parameter in einem komfortablen Bildschirmdialog auf einem LC-Display abrufbar und können vom Nutzer geändert werden. Zu Wartungszwecken ist es auch möglich, z.B. Teststarts des TE-Wandlers durchzuführen. Eine serielle Schnittstelle erlaubt eine komfortable Konfiguration des Systems von einem PC aus und ermöglicht den einfachen Aufbau einer Messwerterfassung.

Das EMS ist gegen Ausfälle (z.B. durch EMV-Störungen) gesichert. Die für den Betrieb wichtigen Parameter werden in einem nichtflüchtigen Datenspei-



cher (EEPROM) abgelegt und bleiben auch bei langem Spannungsausfall erhalten.

Die Weiterentwicklung des EMS konzentriert sich auf die Verbesserung der Ladezustandschätzung durch eine Strombilanzierung. Die Speicherung der Ladezustände über längere Zeit kann dann zusammen mit einem Betriebsführungsalgorithmus die Batterielebensdauer weiter steigern. Auch die Notwendigkeit der Zuschaltung des TE-Wandlers läßt sich damit besser abschätzen. Dadurch werden die Betriebszeit des TE-Wandlers minimiert und der Bedarf an fossiler Energie reduziert.

Weitere Entwicklungsschritte sind z.B. die Einbindung einer Funkuhr und eines Diagnosesystems, das Fehler in den Lasten und im Solargenerator erkennen und aufzeichnen kann. Insbesondere im Einsatz zur Versorgung von Telekommunikationseinrichtungen wird die Übertragung wichtiger Parameter, z.B. Gasvorrat oder Fehlerstatus, an eine Leitstelle interessant.

## 6. Fazit

Die richtige Wahl des Zusatzstromer-

zeugers ist für die Langlebigkeit, Zuverlässigkeit und Wartungsarmut kleiner PV-Hybridsysteme von entscheidender Bedeutung. Wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, erfüllen thermoelektrische (TE) Wandler diese Anforderungen. Es zeigt sich aber auch, daß TE-Wandler insbesondere bezüglich ihrer Emissionen und ihres Wirkungsgrades noch ein signifikantes Verbesserungspotential aufweisen. Die Entwicklung zuverlässiger und effizienterer Brenner kann die Umweltverträglichkeit erhöhen und Energiekosten senken; robustere thermoelektrische Materialien können direkt beheizt werden und führen ebenfalls zu einer Effizienzsteigerung.

Der Einsatz geeigneter Energiemanagementsysteme sorgt im Rahmen einer guten Betriebsführung für die zuverlässige Versorgung der Last, für eine hohe Lebensdauer der Batterie und für möglichst kurze Betriebszeiten des TE-Wandlers.

Die kontinuierliche Meßdatenerfassung und -auswertung der am Fraunhofer ISE aufgebauten PV-TE-Hybridsysteme ist die Grundlage für eine Fort-

entwicklung der Betriebsführung, für Verbesserungen des konstruktiven Aufbaus des Hybridsystems und für das Aufstellen von Richtlinien zur Auslegung und Dimensionierung der Systemkomponenten. Aus dem praxisnahen Einsatz ergeben sich auch die Anforderungen an den Zusatzstromerzeuger. Die umfangreichen Erfahrungen auf den Gebieten Brennertechnik und Systemtechnik des Fraunhofer ISE und die Arbeiten des Institutes für Werkstoff-Forschung der DLR an thermoelektrischen Materialien bilden die Basis für Verbesserungen am TE-Wandler.

## Dank

Ein Großteil der vorgestellten Arbeiten wurde durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) gefördert. Die Autoren bedanken sich bei Rainer Kügele und Wolfgang Schulz für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung dieses Beitrages und bei Odette Deuber für die redaktionelle Bearbeitung.

## Literatur

- [1] J. Schilz, W.A. Kaysser  
„Direktumwandlung von Wärme in Elektrizität mittels thermoelektrischer Wandler – Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit“, Werkstoffwoche DGM, Stuttgart (1996)
- [2] R. Kügele, W. Roth, W. Schulz, A. Steinhüser  
„Thermoelectric Generators in Photovoltaic Hybrid Systems“, Proc. 15th Intl. Conf. on Thermoelectrics (ITC '96), Pasadena, CA (1996)
- [3] R. Kügele, W. Roth, A. Steinhüser  
„Thermoelectric Converters in Photovoltaic Hybrid Systems“, Proc. 2nd Europ. Workshop on Thermoelectrics, Nancy (1995)
- [4] J. Schilz  
„On the Current Understanding of the Dependence of Thermoelectric Properties on Material Structure“, Proc. 1st CAsian Symp. on Thermophysical Properties (SEAS'95), Kuala Lumpur (1995)
- [5] J.C. Bass, N.B. Elsner, F.A. Leavitt  
„Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator“, Proc. 13th Intl. Conf. on Thermoelectrics (ICT'94), AIP Conf. Proc. 316 (1995) 295
- [6] U. Birkholz, E. Groß, U. Stöhrer  
„Polycrystalline Iron Disilicide as a Thermoelectric Generator Material“, CRC Handbook on Thermoelectrics, Ed. D.M. Rowe, 287