



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht** 30. Januar 2009

---

# **Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

ETH Zürich  
Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie  
Physikstrasse 3  
CH-8092 Zürich  
[www.eeh.ee.ethz.ch](http://www.eeh.ee.ethz.ch)

**Autoren:**

Prof. Klaus Fröhlich, ETH Zürich, [froehlich@eeh.ee.ethz.ch](mailto:froehlich@eeh.ee.ethz.ch)  
Christian Eisenhut, ETH Zürich, [eisenhch@eeh.ee.ethz.ch](mailto:eisenhch@eeh.ee.ethz.ch)  
Andreas Bitschi, ETH Zürich, [abitschi@eeh.ee.ethz.ch](mailto:abitschi@eeh.ee.ethz.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 152367 / 101706

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Abstract .....	4
1. Ausgangslage .....	5
2. Ziel der Arbeit .....	6
3. Methode .....	7
4. Ergebnisse .....	8
4.1 Allgemeines Fallbeispiel für die Hochtemperaturnutzung mittels TEG .....	8
4.2 Vergleich konventioneller Konversionstechnologien/Thermoelektrik .....	9
5. Diskussion .....	14
6. Schlussfolgerungen .....	14
Symbolverzeichnis .....	14
Referenzen .....	15

## Zusammenfassung

Theoretische Abhandlungen über thermoelektrische Materialien mit einer Gütezahl  $ZT > 1$  bis 3 und mehr haben neue und verstärkte Aktivitäten im gesamten Bereich der statischen Energiewandler angeregt.

Neue, effiziente Materialien, die insbesondere im Hochtemperaturbereich ( $T > 150^\circ\text{C}$ ) gute thermoelektrische Eigenschaften zeigen und gleichzeitig langzeitbeständig und preiswert sind, könnten interessante Anwendungen im Bereich der Hochtemperaturnutzung ermöglichen.

Verschiedene relevante Szenarien für den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren (TEGs) wurden bezüglich ihrer Leistungscharakteristika evaluiert und mit konventionellen Energiekonversionstechnologien verglichen. Abgesehen von der Hochtemperatur-Abfallwärmenutzung und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anwendungen [2] erscheint der Einsatz von TEGs mit den heute verfügbaren Materialien ( $ZT \sim 1$ ) nicht sinnvoll bzw. konkurrenzfähig. Die Entwicklungen im Bereich der Materialwissenschaft sind jedoch enorm und versprechen mittelfristig die Verfügbarkeit von Materialien mit markant verbesserter Gütezahl. Es soll betont werden, dass die Thermoelektrizität das Potential hat sowohl Hochtemperatur als auch Niedertemperaturenergie effizient und konkurrenzfähig in elektrische Energie zu wandeln. Diese Perspektive sollte verstärkt Kräfte und Mittel frei setzen, um einen wertvollen Beitrag zur effizienteren Nutzung von Energie mit hoher ökologischer Verträglichkeit zu leisten.

Dieses Projekt gilt als Ergänzung zum Projekt „Das thermoelektrische Kraftwerk“ und vervollständigt die Beurteilung der Einsatzgebiete um den Hochtemperaturbereich.

## Abstract

Publications regarding to thermoelectric materials with a figure of merit  $ZT > 1$  to 3 and more triggered new and increased activities in the field of thermoelectric energy conversion.

New efficient materials, especially in the high temperature range ( $T > 150^\circ\text{C}$ ), could lead to interesting applications for thermoelectric energy conversion.

Various relevant scenarios of thermoelectric power generation systems have been evaluated and compared to conventional energy conversion technologies. Besides the usage of the topping-up co-generation [2] principle it seems that with today's materials ( $ZT \sim 1$ ) the utilization of thermoelectric generators for high temperature applications is not competitive. The advances of material science promise the availability of significant improved materials in medium term. It should be noted here that thermoelectric power generation has the potential to convert low-temperature and high-temperature thermal energy into electrical power in an efficient and competitive way. This outlook should free additional strengths and resources to establish thermoelectric power generation as a valuable contribution for a more efficient usage of energy with a high ecological impact.

This project is a completion to the project “Das thermoelektrische Kraftwerk” and expands the evaluations with considerable high temperature applications.

## 1. Ausgangslage

Die nachhaltige, am Bedarf an Energiedienstleistungen orientierte Versorgung mit Energie steht im Mittelpunkt einer umweltgerechten Wirtschaftsstruktur. Hier wird es darauf ankommen, durch umfassenden Einsatz verbrauchs- wie aufkommensseitiger Instrumente eine weitere deutliche Erhöhung der Energieeffizienz sowie den Einsatz erneuerbarer Energieträger zu erreichen.

Für die Stromerzeugung aus thermischer Energie wird in konventionellen Kraftwerken (Gas-Kraftwerke, Kombi-Kraftwerke, Dampfkraftwerke) auf hohe Prozesstemperaturen gesetzt. Entsprechend stehen in der Nutzung von Hochtemperatur-Energiequellen technisch gute Lösungen zur Verfügung.

In der Nutzung von Hochtemperatur-Quellen bestehen potenzielle Anwendungen thermoelektrischer Generatoren dort, wo konventionelle Wärme-Kraft-Maschinen aufgrund der Rahmenbedingungen (stark variierende Temperaturunterschiede und Prozesstemperaturen, Forderung nach geringem Wartungsaufwand und Robustheit) nicht zum Einsatz kommen können.

Systeme zur Nutzung von Abwärme oder zur Co-Generation von Wärme und elektrischer Energie sind ein weiteres Anwendungsspektrum. Abwärme kann sowohl in Hoch- wie auch in Niedertemperatur anfallen. Allerdings darf bei höheren Temperaturen teilweise nicht mehr von Abwärme gesprochen werden, da oft eine Nutzung durch konventionelle Anlagen möglich wäre. In unzähligen Industrieprozessen, Kraftwerken und Verbrennungsanlagen fällt Abwärme, die sinnvoll und günstig genutzt werden kann, in sehr grossen Mengen an. Abwärmequellen zeigen meistens folgende Charakteristika:

- Teilweise sehr hohe Temperaturen in Industrieprozessen (Metallindustrie) und in Müll-Verbrennungsanlagen, im Allgemeinen sehr breiter Temperaturbereich
- Grosse Zahl an kleinen, dezentralen Einspeisungen (Quellen)
- Signifikante Variation der Quelle bezüglich Temperatur und Massenstrom
- Verschiede Wärmeträger (Gase, Feststoffe, Flüssigkeiten)
- Kleine Energiedichte bezüglich Volumen oder Masse.

Diese Punkte sprechen alle für einen Einsatz thermoelektrischer Generatoren, da konventionelle Systeme oft aufgrund eines oder mehrerer der oben genannten Punkte ungeeignet sind. Auch bei der Nutzung von Hochtemperaturenergie aus erneuerbaren Energiequellen, wie Solarthermie oder Geothermie, muss sich der thermoelektrische Generator gegen bewährte Alternativen behaupten. Sein grosser Vorteil ist seine Robustheit dank der Funktion ohne bewegliche Teile und dem dadurch entstehenden geringen Wartungsaufwand. Auch Vorteile wie der relativ einfache Aufbau, die hohe Modularität und einfache Regelbarkeit des Generators sprechen für die Thermoelektrik. Technisch müssen allerdings neue Materialien gefunden werden, die die Effizienz des Generators deutlich verbessern. Hier liegt die Herausforderung für die Materialforscher. Aus der Sichtweise des Gesamtsystems können die Materialanforderungen definiert werden, um technisch konkurrenzfähige Systeme aufzuzeigen.

## 2. Ziel der Arbeit

Dieses Projekt gilt als Ergänzung zum Projekt „Das thermoelektrische Kraftwerk“ und basiert auf den dafür entwickelten Modellen und Simulationen [1].

### *Ziele:*

Generell soll das Anwendungspotential Thermoelektrischer Generatoren für die Nutzung von Hochtemperatur-Quellen mittels theoretischer Betrachtungen, Simulationen und punktuellen, experimentellen Abklärungen aufgezeigt werden. Da im Projekt „Das Thermoelektrische Kraftwerk“ [1] der Nieder-temperatur-Bereich abgedeckt wird, kann schlussendlich ein Überblick über den gesamten nutzbaren Temperaturbereich gegeben werden. So wird es auch möglich sein, die Systeme zur Abwärmenutzung zu beurteilen.

### *Teilziele:*

- Die konventionellen (Konkurrenz-) Systeme der Hochtemperatur - Energiekonversion sind einheitlich dargestellt und verglichen.
- Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität des Thermoelektrischen Generators in der Nutzung von Hochtemperatur – Wärmequellen beschreibt.
- Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien validiert.  $\Rightarrow$  Mindestanforderungen an die thermoelektrischen Materialien
- Applikationsmöglichkeiten werden aufgezeigt und bewertet.

### 3. Methode

#### Analytisches TEG-Modell

Für die Beurteilung der Performance und möglicher Einsatzgebiete von thermoelektrischen Generatoren für die Nutzung von Hochtemperaturenergie wurden das analytische Modell wie im Schlussbericht „Das thermoelektrische Kraftwerk“ detailliert beschrieben, verwendet. Damit ist es möglich die Leistung und den Wirkungsgrad beliebig grosser Generatoren hinreichend genau zu beschreiben. Im Folgenden werden noch zusätzlich zu berücksichtigende Aspekte für die Modellierung im Hochtemperaturbereich kurz erläutert.

Das Verhalten eines einzelnen Generatorelementes (pn-Couple) kann analytisch nur dann sehr genau beschrieben werden, wenn die Generatorschenkel aus jeweils einem Material mit hinreichend konstanten Materialparametern resp. konstanter thermoelektrischer Gütezahl  $Z$  aufgebaut sind. Einfache Thermoelektrische Generatoren, wo die Temperaturen auf der warmen und kalten Seite konstant sind, können entsprechend analytisch hinreichend genau beschrieben werden [4]. Falls Thermoelektrische Generatoren für den Hochtemperaturbereich aus zwei oder mehreren thermoelektrischen Materialien pro Schenkel bestehen, wird die Modellierung komplizierter. Snyder hat mit seinem Compatibility-Approach [5] eine Methode definiert, die eine Optimierung entsprechender Schenkel ermöglicht. Falls die einzelnen Materialien im jeweiligen optimalen Temperaturbereich und bei optimaler Stromdichte betrieben werden können, erreicht der Wirkungsgrad ein Optimum.

Aufwändiger wird die Modellierung im Falle eines TEGs, der mit konvektiven Quellen (z. B. Wasser) sowohl gespeist als auch gekühlt wird. Die Änderung der Temperaturen auf der heissen und kalten Seite des Generators müssen dann zusätzlich berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Projektes „Das Thermoelektrische Kraftwerk“ [1] wurde an der 25. Internationalen Konferenz für Thermoelektrik (6. bis 10. August 2006 in Wien) ein analytisches Modell vorgeschlagen, das sich zur einfachen Beschreibung eines grossen Thermoelektrischen Generators, auch unter Berücksichtigung der Temperaturänderung auf der heissen und kalten Seite, sehr gut eignet [3]. Die Modellvereinfachungen können dabei wie folgt zusammengefasst werden:

- Materialparameter, wie die thermische Leitfähigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und der Seebeck-Koeffizient sind als Konstanten angenommen. Bei stark veränderlichen Materialparametern, beispielsweise in Abhängigkeit der Temperatur, müssen die Werte entsprechend gemittelt werden.
- Die Wärmeübergänge vom Fluid in den Festkörper und durch den Isolator zu den Thermoelementen sind in einer Konstante (Overall heat transfer coefficient) zusammengefasst. Die Werte müssen also je nach Strömungsbedingung und Wärmetauscherdesign jeweils neu bestimmt werden.
- Ein einfacher analytischer Ausdruck ergibt sich nur für den Fall gleicher Massenströme auf der heissen und kalten Seite des Generators.

Die konventionellen (Konkurrenz-)Technologien wurden bewertet, einheitlich dargestellt und im Rahmen einer Effizienzbetrachtung mit thermoelektrischen Systemen verglichen. Die verschiedenen möglichen Einsatzmöglichkeiten für die thermoelektrische Hochtemperaturkonversion wurden zusätzlich detaillierter untersucht, diskutiert und bewertet.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 ALLGEMEINES FALLBEISPIEL FÜR DIE HOCHTEMPERATURNUTZUNG MITTELS TEG

Bei Kenntnis der Quellentemperaturen des warmen und kalten Fluids ( $T_H^{in}$ ,  $T_L^{in}$ ), der thermoelektrischen Gütezahl  $Z$ , der Wärmedurchgangszahl  $L$ , der Dicke der Halbleiterschlenkel  $d$ , der thermischen Leitfähigkeit des Halbleitermaterials  $\lambda$ , der Wärmekapazität  $C_p$ , und des Massenstroms  $\dot{m}$  kann die Leistung sehr einfach berechnet werden zu

$$P_4 = \beta^* \gamma \dot{m} C_p \frac{Ld}{\lambda} Z (T_H^{in} - T_L^{in})^2 \quad (1)$$

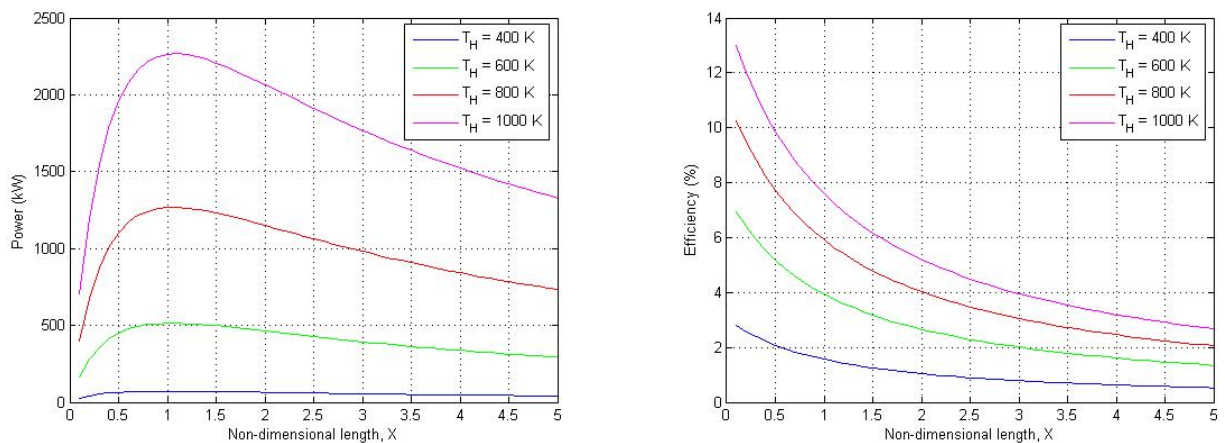
$\gamma$  kann als Geometriefaktor interpretiert werden. Für thermoelektrische Generatoren basierend auf dem Gegenstromprinzip gilt

$$\gamma = \frac{X}{4 \cdot (1 + X)^2} \quad (2)$$

Wobei  $X$  als relative Grösse des Thermoelektrischen Generators bezeichnet werden kann:

$$X = \frac{Lwl}{\beta \dot{m} C_p} \quad (3)$$

Hier ist  $w$  die Breite und  $l$  die Länge des Generators, das Produkt  $wl$  entspricht also der gesamten Querschnittsfläche (Wärmetauscherfläche) des Thermoelektrischen Generators.  $\beta$  und  $\beta^*$  sind Konstanten, die den Peltier-Effekt berücksichtigen (siehe [3]).



**Figur 1:** Elektrische Leistung (links) und Wirkungsgrad (rechts) eines TEG in Abhängigkeit der relativen Grösse  $X$  für verschiedene Quellentemperaturen.

Figur 1 (links) zeigt die TEG-Leistung in Abhängigkeit von  $X$  für verschiedene relative Grössen  $X$  und Temperaturen der heissen Quelle  $T_H^{in}$ . Im Beispiel beträgt der Massenstrom  $\dot{m}$  auf der warmen und kalten Seite jeweils 20 kg/s, die Quellentemperatur der kalten Seite beträgt 288 K und die Materialdaten entsprechen einer durchschnittlichen Gütezahl  $ZT$  von 1.

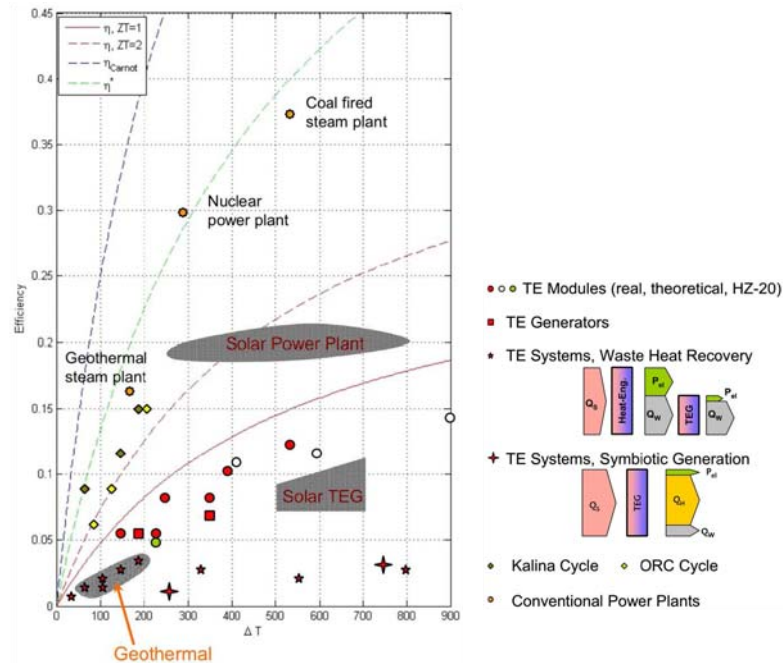
Das Beispiel (Figur 1, rechts) zeigt, dass mit Materialien im Bereich  $ZT = 1$  maximale Wirkungsgrade zwischen 10 % und 20 % des Carnot-Wirkungsgrades erreicht werden können, was im Vergleich zu konventionellen Wärmekraftmaschinen sehr bescheiden ausfällt. Ein maximaler Wirkungsgrad von 3% bei  $T_H = 400$  K,  $T_L = 288$  K und  $X = 0$  entspricht 10% des Carnot Wirkungsgrades  $(T_H - T_L)/T_H$ ; ein maximaler Wirkungsgrad von 14% bei  $T_H = 1000$  K,  $T_L = 288$  K und  $X = 0$  entspricht 20% des Carnot Wirkungsgrades.

Vergleicht man die Abbildungen links und rechts in Figur 1, so fällt auf, dass die relativen Maxima für die Leistung und den Wirkungsgrad nicht an derselben Stelle (relativ zu  $X$ ) liegen. Für  $X = 1$  liefert der Generator maximale Leistung,  $X$  nahe 0 bedeutet einen hohen Wirkungsgrad (entweder hoher Massenstrom oder kleine TEG-Fläche). Die relative Grösse  $X$  des thermoelektrischen Generators erlaubt also eine einfache Abschätzung der Generatorgrösse, je nach zur Verfügung stehenden Quellen und gewünschtem Betriebszustand.



## 4.2 VERGLEICH KONVENTIONELLER KONVERSIONSTECHNOLOGIEN/THERMOELEKTRIK

In den nachfolgenden Ausführungen werden konventionelle thermisch-elektrische Energieerzeugungstechnologien zum Vergleich mit der thermoelektrischen Energiewandlung dargestellt und diskutiert.



**Figur 2:** Wirkungsgrade verschiedener Konversionstechnologien im Vergleich

Figur 2 zeigt die Wirkungsgrade von verschiedenen Wärme-Kraft-Maschinen in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes zwischen der Wärmequelle und -senke. Dabei finden sich im unteren Teil die thermoelektrischen Wandler. Die Bedeutung der Symbole ist im Bild rechts angegeben. Die rot-durchgezogene Linie zeigt den theoretischen Wirkungsgrad eines idealen thermoelektrischen Generators mit einer Gütezahl der Materialien von  $ZT = 1$ . Die heutigen thermoelektrischen Module (Kreise), thermoelektrischen Generatoren (Quadrate), thermoelektrischen Systeme zur Abwärmenutzung (5-Stern) und thermoelektrischen Systeme zur Wärme-Kraft-Kopplung (4-Stern) kommen aufgrund der bescheidenen Effizienz heutiger Materialien nicht über diese theoretische Grenze hinaus. Wo der theoretische Wirkungsgrad eines idealen thermoelektrischen Generators mit  $ZT = 2$  liegen würde, zeigt die rot-strichlierte Linie.

Als absolute Grenze ist der Carnot-Wirkungsgrad mit

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (4)$$

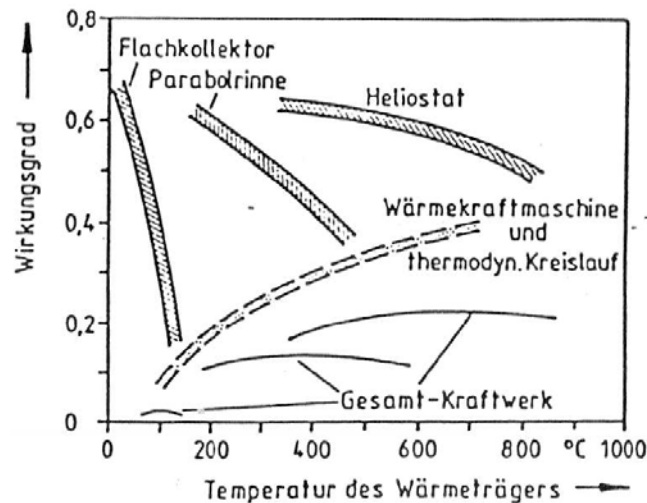
gegeben (blau-gestrichelt). Dieser gilt für reversible Wärme-Kraft-Maschinen. Da alle realen Prozesse irreversibel verlaufen, kann dieser Wirkungsgrad nie erreicht werden. Zur Beschreibung von konventionellen Wärme-Kraft-Maschinen, die im Bereich der maximalen Leistungsdichte betrieben werden, eignet sich die Curzon-Ahlborn-Effizienz

$$\eta^* = 1 - \left( \frac{T_C}{T_H} \right)^{0.5} \quad (5)$$

wesentlich besser. In Figur 2 ist dieser Wirkungsgrad grün-strichliert dargestellt.

Als Vergleich dazu sind weiters die Wirkungsgrade eines Kohle-Kraftwerks und des Geothermiekraftwerkes in Lardarello (ITA) dargestellt. Zum Effizienzvergleich mit weiteren Technologien sind in Figur 2 ausserdem die folgenden drei Bereiche (grau schraffiert) dargestellt.

**Solar Power Plant:** Der Wirkungsgradbereich von Solarthermischen Kraftwerken vom Tower-Typ (Heliostaten mit einem zentralen Absorber) bewegt sich im Bereich von maximal 20 %, siehe Figur 3. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks ist dabei einerseits durch die Effizienz der Wärme-Kraft-Maschine (Turbine) wie auch durch die Effizienz der Heliostaten und des Absorbers begrenzt.



**Figur 3:** Wirkungsgrade verschiedener solarthermischer Kraftwerke [6]

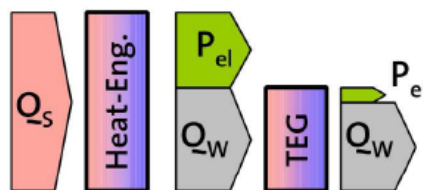
**Solar TEG:** Als Vergleich zum obigem Punkt ist der theoretische Wirkungsgradbereich eines Solarthermischen Kraftwerkes basierend auf thermoelektrischen Generatoren ( $ZT \approx 1$ ) dargestellt.

**Geothermie:** Die abgeschätzten Werte für die Nutzung der Geothermie mittels thermoelektrischer Generatoren ( $ZT \approx 1$ ), siehe Abschnitt Thermoelektrizität in der Erdwärmennutzung, bewegen sich alle im Bereich der in der Literatur angegebenen Wirkungsgrade für TEG-Systeme zur Abwärmennutzung. Als Vergleich dazu sind auch die Wirkungsgrade von konventionellen Systemen basierend auf dem Kalina- und ORC-Prozess eingezeichnet.

In den folgenden Abschnitten werden die Prinzipien der Abwärme-Nutzung, der Wärme-Kraft-Kopplung und der reinen Elektrizitätserzeugung mittels thermoelektrischer Generatoren näher erläutert.

### Abwärme-Nutzung

Das Prinzip der Abwärme-Nutzung mittels thermoelektrischer Generatoren ist in Figur 4 dargestellt. Die in einem konventionellen System zur Erzeugung elektrischer Energie (Heat-Engine) anfallende Abwärme  $Q_w$  könnte in vielen Fällen weiter genutzt werden.



**Figur 4:** Prinzip der Abwärme-Nutzung mittels thermoelektrischer Generatoren

Beispiele der Nutzung von Abwärme sind

- Abgase in Fahrzeugen
- Abwärme in diversen Prozessen der Industrie
- Kehrlicht-Verbrennungsanlagen

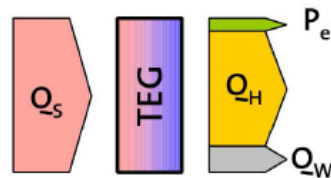
Da zahlreiche Abwärme-Quellen eine oder mehrere der folgenden Charakteristika zeigen

- Grosse Anzahl von (kleinen) Quellen
- Breiter Temperaturbereich
- Grosse Variation von Wärmeleistung, Massenstrom etc.
- Anforderung an Robustheit
- Kleine Energiedichte

eigenen sich thermoelektrische Generatoren besonders gut zur Nutzung von Abwärme. Einziger grosser Nachteil bleibt dabei der bescheidene Wirkungsgrad. Da die Kosten der Energiequelle in der Abwärmenutzung oft vernachlässigbar sind, spielt jedoch der Wirkungsgrad eine untergeordnete Rolle. Dies ist auch der Grund, weshalb auf dem Gebiet der Abwärmenutzung weltweit eine sehr grosse Forschungsaktivität beobachtet werden kann.

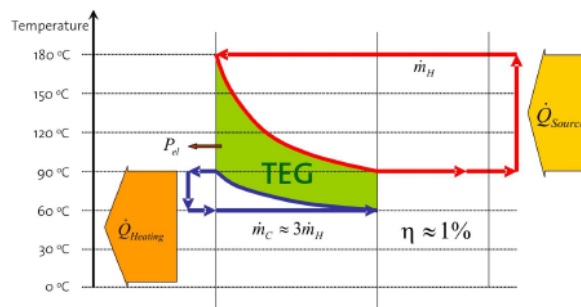
## Wärme-Kraft-Kopplung

Eine weitere Möglichkeit, den bescheidenen Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren zu umgehen, sind Anwendungen basierend auf dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (siehe Figur 5).



**Figur 5:** Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung mittels thermoelektrischer Generatoren

Das Prinzip beruht ganz einfach darauf, dass ein grosser Teil der im thermoelektrischen Generator entstandenen Abwärme weiter genutzt wird ( $Q_H$ ), beispielsweise zu (Vor-)Heizzwecken. Zur Illustration dieses Prinzips ist in Figur 6 ein fiktives Beispiel zur Nutzung tiefer Erdwärme ( $T_H = 180\text{ °C}$ ) für die Versorgung eines Fernwärmenetzes mit einer Vorlauftemperatur von  $90\text{ °C}$  und einer Rücklauftemperatur von  $60\text{ °C}$  dargestellt.



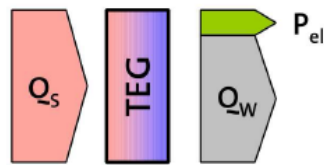
**Figur 6:** Beispiel einer Kraft-Wärme-Kopplung durch einen thermoelektrischen Generator

Bei dreifachem Massenstrom  $m_c$  und gleichen Wärmekapazitäten der Wärmeträger wird sich zwischen dem Kreislauf der Wärmequelle und dem Kreislauf des Fernwärmenetzes ein Temperaturunterschied einstellen, der über einem thermoelektrischen Generator genutzt werden könnte. Der Generator ersetzt hier also den sonst üblichen Wärmetauscher. Für den dargestellten Temperaturbereich würde für einen TEG basierend auf  $ZT = 1$  ein Wirkungsgrad  $\eta = 1\%$  resultieren, was einem bescheidenen Ertrag elektrischer Energie gleichkäme. Dieses Prinzip ist besonders interessant für Heizsysteme, die einen Eigenbedarf an elektrischer Energie haben.

## Reine Elektrizitätserzeugung

Thermoelektrische Systeme zur reinen Elektrizitätserzeugung haben, verglichen mit obigen Systemen, aufgrund des schlechten Wirkungsgrades und der dadurch grossen Abwärmemengen (Verluste) ein deutlich geringeres Durchsetzungspotenzial. Das Prinzip dazu ist in Figur 7 dargestellt. Nur im Falle sehr geringer Energiekosten der Quellenwärme  $Q_S$  oder der Anforderung nach sehr hoher Robustheit, Wartungsfreiheit, Geräuschlosigkeit oder hoher Energiedichte (Radio-Nuklidbatterien) kann ein ent-

sprechendes System Erfolgchancen haben. Aus der Sicht der Thermoelektrizität existieren für potentielle zukünftige Anwendungen heute Technologien, die bezüglich Effizienz und Leistungsdichte die Nase vorne haben.



**Figur 7:** Prinzip der reinen Elektrizitätserzeugung mittels thermoelektrischen Generatoren

Dies sind beispielsweise:

- Konventionelle Wandler im Niedertemperaturbereich, ORC- oder Kalina-Prozess für die Geothermie
- Stirling-Prozess für Kraft-Wärme-Kopplung im Gebäudesektor
- Photovoltaik für die Nutzung der Sonnenenergie.

Das technische Potenzial für den Einsatz thermoelektrischer Generatoren in der Erdwärmenutzung und in der Nutzung der Sonnenenergie ist in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

### Thermoelektrizität in der Erdwärmenutzung

Die Nutzung der Geothermie mittels thermoelektrischen Generatoren ist auf den ersten Blick vielversprechend, insbesondere wenn dabei das Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung angewendet wird und entsprechend die Abwärme der Generatoren weiter zu Heizzwecken genutzt wird. Ein Beispiel basierend auf dem Stand der Technik heutiger Generatoren ist in Figur 6 dargestellt.

	Kalina	ORC	TEG ZT=1	TEG ZT=3	TEG ZT=5
Quellentemperatur (°C)	150	150	150	150	150
Massenstrom (kg/s)	20	20	20	20	20
Kühltemperatur (°C)	15	15	15	15	15
Rücklauftemperatur (°C)	86	64	82	82	82
Thermische Leistung (MW)	5.35	7.19	5.69	5.69	5.69
Wirkungsgrad (%)	11.8	8.8	2.5	6	8
Elektrische Leistung (kW)	629	630	142	341	455
Wärmetauscherfläche (m <sup>2</sup> )	1212	956	142	341	455

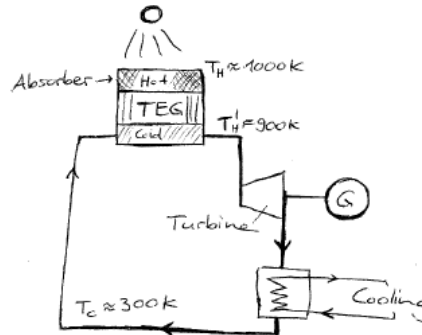
**Tabelle 1:** Abschätzung der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades von TEG-Systemen zur Nutzung der Erdwärme für verschiedene ZT-Werte

In Tabelle 1 sind Ergebnisse solcher Abschätzungen aufgeführt. Sie zeigen, dass die Gütezahl thermoelektrischer Materialien mindestens verfünffacht werden müsste, um in denselben Wirkungsgradbereich zu kommen wie konventionelle Systeme zur Nutzung der Geothermie.

Haben allerdings eine hohe Verfügbarkeit und Robustheit eine grössere Priorität oder zeigt die Quelle eine grosse Temperaturbandbreite und Leistungsschwankung, könnten thermoelektrische Wandler schon bei deutlich geringerem Wirkungsgrad attraktiv werden. Ideen zur Nutzung der Erdwärme mittels thermoelektrischen Energiewandlern sind nicht neu. Interessant erscheinen dabei in jüngster Zeit spezielle Hybridsysteme, die eine Energieversorgung basierend auf Thermoelektrizität, Photovoltaik und teilweise konventionellen Systemen vorschlagen.

### Thermoelektrizität in der Sonnenenergienutzung

Besonders in den späten 70er Jahren und 80er Jahren war die Nutzung der Sonnenenergie mittels thermoelektrischen Generatoren ein aktuelles Thema an diversen Konferenzen. Mit zahlreichen Verbesserungen im Bereich der Photovoltaik scheint jedoch die Thermoelektrizität in diesem Bereich praktisch verschwunden zu sein. Eine Idee, konventionelle solarthermische Kraftwerke mittels thermoelektrischen Generatoren noch effizienter zu gestalten, könnte dank dem Topping-Up-Prinzip dann erfolgreich sein, wenn besonders robuste und effiziente Materialien für den Bereich sehr hoher Temperaturen gefunden werden.



**Figur 8:** Topping-Up Prinzip zur Verbesserung der Effizienz solarthermischer Kraftwerke mittels thermoelektrischen Generatoren

In Figur 8 ist das Topping-Up-Prinzip dargestellt. Die gesamte solare Wärmemenge, die im Absorber bei sehr hoher Temperatur anliegt, könnte über einen im Absorber integrierten thermoelektrischen Generator geleitet werden. Auf der kalten Seite des TEG könnte sich das Arbeitsmedium der Dampfturbine bis zur maximalen (begrenzten) Temperatur aufheizen. Bei diesem Prinzip wird also die Verlustwärme des thermoelektrischen Generators genutzt, um eine konventionelle Wärme-Kraft-Maschine anzutreiben. Für thermoelektrische Generatoren basierend auf Materialien mit  $ZT = 1$  und einer mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta T = 350 \text{ K}$  würde ein Wirkungsgrad von  $\eta_{\text{TEG}} = 6 - 8 \%$  resultieren. Die Effizienz eines konventionellen solarthermischen Kraftwerkes ( $\eta = 20 \%$ ) könnte also theoretisch um  $\eta_{\text{TEG}}$  gesteigert werden. Allerdings müssten bei einer näheren Untersuchung unbedingt folgende Punkte beachtet werden:

- Wie stark sinkt die Effizienz des Absorbers aufgrund der höheren Absorbertemperatur (grössere Strahlungsverluste) und des aufgrund des TEG grösseren thermischen Widerstandes vom Absorber zum Arbeitsmedium?
- Lässt sich solarthermisch überhaupt eine genügend hohe Temperatur am thermoelektrischen Generator ohne grosse Verluste generieren?
- Lässt sich ein Absorber mit integriertem TEG überhaupt realisieren?

Die Turbine könnte mit einem Bypass umgangen werden, um auch bei Randbedingungen, die für die Turbine nicht ausreichen, einen Teil der solaren Strahlung in elektrische Energie zu wandeln. Nebst diversen möglichen Anwendungen in der Abwärmenutzung hoher Temperaturen zeigt dieses Beispiel, dass die Entwicklung neuer Materialien mit guten thermoelektrischen Eigenschaften nicht nur im Niedertemperaturbereich, sondern ebenso für sehr hohe Temperaturen notwendig ist. Gewünscht sind insbesondere Materialien, die über einen grossen Temperaturbereich gute Eigenschaften zeigen und trotz hoher Temperaturen sehr robust und günstig sind.

## 5. Diskussion

Die mit heutigen Materialien erreichbaren Effizienzen von thermoelektrischen Generatoren liegen weit unter denen von konventionellen Technologien, wie sie heutzutage für die Stromerzeugung aus thermischer Energie im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden. Die thermoelektrische Energiekonversion ist analog zu Niedertemperaturbetrachtungen im Bereich der Abwärmenutzung (mit den oben genannten Randbedingungen) und Wärme-Kraft-Kopplung interessant. Die Substitution von thermodynamischen Kreisläufen (Gas- Dampfkraftwerke) durch TEGs erscheint mittelfristig als auch langfristig unrealistisch. Allerdings könnte mit TEGs in Kombination mit konventionellen Wärmekraftmaschinen der Gesamtwirkungsgrad erhöht werden. (Topping-Up-Prinzip).

## 6. Schlussfolgerungen

Für die Generierung von elektrischer Energie aus Hochtemperaturquellen stellen thermoelektrische Generatoren mit den heute verfügbaren Materialien keine Alternative dar. Die Konkurrenz in diesem Segment ist mit den thermodynamischen Kreisläufen, die über eine Jahrzehnte lange Optimierungsgeschichte verfügen, sehr stark. Um im Hochtemperaturbereich konkurrenzfähig zu werden, muss die Qualität sprich die Gütezahl der Materialien um den Faktor 5 (auf  $ZT = 5$ ) gesteigert werden. Dieses Ziel scheint zum heutigen Tage nur sehr langfristig erreichbar. Neben den Materialeigenschaften ergeben sich bei der Hochtemperaturkonversion zusätzliche Schwierigkeiten im Bereich des Modulaufbaus bzw. der Langzeitstabilität der Devices. Die hohe Modularität von TEGs könnte aber auch für Materialien ab  $ZT = 2-3$  und gleichzeitig geringen Investitionskosten interessante und sinnvolle Anwendungen (Abwärmenutzung im Hochtemperaturbereich) erlauben.

## Symbolverzeichnis

Parameter	Beschreibung	Einheit
$P_4$	Elektrische Leistung	[W]
$\beta, \beta^*$	Konstanten zur Berücksichtigung des Peltiereffektes	[-]
$\gamma$	Geometriefaktor	[-]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
$C_p$	Wärmekapazität des Arbeitsmediums	[KJ/kgK]
$L$	Wärmedurchgangszahl	[W/K]
$D$	Dicke (Höhe) der Halbleiterschenkel	[m]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
$Z$	Gütezahl der thermoelektrischen Materialien	[-]
$T_H^{in}$	Einlauftemperatur des Fluids an der warmen Seite des Wärmetauschers	[K]
$T_L^{in}$	Einlauftemperatur des Fluids an der kalten Seite des Wärmetauschers	[K]
$X$	Relative Grösse des thermoelektrischen Generators	[-]
$\eta, \eta_{Carnot}$	TEG – Wirkungsgrad, Carnot – Wirkungsgrad	[-]
$\eta^*$	Curzon-Ahlborn-Effizienz	[-]

## Referenzen

- [1] BfE-Schlussbericht, Das thermoelektrische Kraftwerk, Dezember 2008
- [2] T. Kajikawa, Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano, chapter 51, pages 51.1-51.12. CRC Press, Inc., 2006
- [3] C. Eisenhut and A. Bitschi, Thermoelectric Conversion System based on Geothermal and Solar Heat, Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics, Vienna 2006
- [4] K. Matsuura and D. M. Rowe, Handbook of Thermoelectrics, chapter 44, pages 573-593. CRC Press, Inc., 1995.
- [5] G. J. Snyder, Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano, chapter 9, pages 9.1-9.26. CRC Press, Inc., 2006
- [6] B. Seiler, Energiesysteme mit erneuerbaren Quellen, Vorlesungsskript ETHZ