



# **DAS THERMOELEKTRISCHE KRAFTWERK**

## **BEURTEILUNG DER THERMOELEKTRISCHEN ENERGIEKONVERSION FÜR DIE STROMERZEUGUNG AUS NIEDERTEMPERATURENERGIE**

### **Schlussbericht**

Ausgearbeitet durch

**Prof. Fröhlich K., ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie**

Physikstrasse 3, 8092 Zürich, [froehlich@eeh.ee.ethz.ch](mailto:froehlich@eeh.ee.ethz.ch), [www.eeh.ee.ethz.ch](http://www.eeh.ee.ethz.ch)

**Eisenhut Ch., ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie**

Physikstrasse 3, 8092 Zürich, [eisenhch@eeh.ee.ethz.ch](mailto:eisenhch@eeh.ee.ethz.ch), [www.eeh.ee.ethz.ch](http://www.eeh.ee.ethz.ch)

**Bitschi A., ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie**

Physikstrasse 3, 8092 Zürich, [abitschi@eeh.ee.ethz.ch](mailto:abitschi@eeh.ee.ethz.ch), [www.eeh.ee.ethz.ch](http://www.eeh.ee.ethz.ch)

## **Impressum**

Datum: *21. Dezember 2008*

### **Im Auftrag des Bundesamts für Energie**

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Bereichsleiter, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151645 / 101356

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) / [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

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

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Abstract .....	4
1. Ausgangslage .....	4
2. Ziel der Arbeit .....	5
3. Methode .....	5
4. Ergebnisse .....	14
5. Diskussion .....	29
6. Schlussfolgerungen .....	30
Symbolverzeichnis .....	32
Referenzen .....	33
Anhang .....	34

## Zusammenfassung

Die Machbarkeit von thermoelektrischen Energieerzeugungssystemen für verschiedene Anwendungsszenarien wurde gezeigt. Mit den heute verfügbaren Materialien (Gütezahl  $ZT=1$ ) stellt die thermoelektrische Energieerzeugung jedoch wegen des geringen Wirkungsgrades keine konkurrenzfähige Alternative zu konventionellen Technologien dar. Auch im Bereich der Abwärmenutzung, wo es kaum oder keine Mitbewerber gibt, ist die Generierung von elektrischer Energie in grossen Leistungsklassen aufgrund enormer spezifischer Investitionskosten noch nicht vorstellbar. Mit den verstärkten Anstrengungen der Materialwissenschaft und daraus resultierenden effizienteren (ab  $ZT=2-3$ ) und evtl. gleichzeitig auch billigeren Materialien würde sich das Anwendungspotential und somit der Markt für thermoelektrische Generatoren stark vergrössern. Ein  $ZT > 5$  könnte die gesamte Stromerzeugung aus thermischer Energie „revolutionieren“.

## Abstract

In a proof of concept study, practicability of thermoelectric energy conversion system has been demonstrated. However, because of the low efficiency (Figure of merit  $ZT\sim 1$ ) of materials presently available thermoelectric energy conversion is not yet competitive with conventional technologies. Even in the area of waste heat recovery, where there are hardly any serious contenders, large scale thermoelectric power generation would be impractical because of very high specific investment costs. Once scientific efforts result in higher efficiency materials ( $ZT\sim 2-3$ ), the potential of applications and thus the market would grow strongly, with  $ZT > 5$  electrical power generation could be revolutionized.

## 1. Ausgangslage

Zurzeit beschränkt sich der Einsatz von thermoelektrischen Materialien auf die Raumfahrt. Als terrestrische Anwendungen findet man thermoelektrische Materialien hauptsächlich in der Temperaturmessung und als Sensoren für Regelungssysteme. Durch die verstärkten Anstrengungen in der Materialwissenschaft stellt die Thermoelektrizität eine immer interessanter werdende Alternative für die Energiewandlung dar. Im Bereich der Kühltechnik gibt es seit langem kommerzielle Anwendungen.

Im Bereich der terrestrischen elektrischen Energieerzeugung wurden thermoelektrische Wandler jedoch aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades bisher nicht oder nur in speziellen Fällen (autarke Systeme) berücksichtigt. Dominierenden Einfluss auf den Wirkungsgrad haben die Materialeigenschaften von thermoelektrischen Materialien, zusammengefasst in der dimensionslosen Gütezahl  $ZT$  oder auch „Figure of Merit“ genannt.

Die Vorteile von Thermoelektrischen Generatoren (TEG)s sind unbestritten:

- Einsetzbarkeit über breite Temperaturbereiche
- Geringer bis kein Wartungsaufwand,
- Modularität,
- Geräuschlosigkeit.

Gerade im unteren Bereich der Niedertemperaturenergie ( $T < 100^\circ\text{C}$ ) gibt es keine Möglichkeiten der Energiewandlung mit den oben genannten Eigenschaften. Die Forschungsaktivitäten zum Thema Thermoelektrizität waren in der Schweiz bislang kaum oder gar nicht vorhanden. Das hier beschriebene Projekt „Das thermoelektrische Kraftwerk“ ist ein Kombiprojekt des Institutes für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich und der Abteilung Festkörperchemie und Katalyse der EMPA Dübendorf. Gemeinsam soll auf den verschiedenen Ebenen der Materialsynthese, Deviceaufbau und Systemintegration die Weiterentwicklung von thermoelektrischen Devices vorangetrieben werden.

## 2. Ziel der Arbeit

Im Projektantrag vom August 2005 wurden folgende Zielsetzungen formuliert:

*„Generell soll die Machbarkeit eines thermoelektrischen Kraftwerks mittels theoretischen Betrachtungen, Simulationen und punktuellen, experimentellen Abklärungen erarbeitet werden.“*

Teilziele:

- *Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität unter Einbezug von ökonomischen Kriterien beschreibt.*
- *Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien, wie sie interaktiv an der EMPA erarbeitet und beschrieben werden, validiert*
- *Applikationsmöglichkeiten werden aufgezeigt und bewertet.*

Wie schon erste Abschätzungen in Vorfeld gezeigt haben, müsste die Gütezahl wirtschaftlich nutzbarer thermoelektrischer Materialien mindestens den Wert 5 erreichen, um in TEG-Systemen Wirkungsgrade vergleichbar zu konventionellen thermodynamischen Kreisprozessen zu erhalten. Dieser Wert wird kurz und mittelfristig für kommerziell erhältliche Materialien aus heutiger Sicht nicht erreicht.

Der Begriff des Thermoelektrischen Kraftwerkes muss also folgendermassen verstanden werden:

- Thermoelektrische Stromerzeugung bei kleinen (schwankenden) Temperaturdifferenzen (erneuerbare Quellen)
- Thermoelektrische Generatoren ermöglichen eine effizientere Nutzung der Ressourcen dank Abwärmenutzung oder Wärme-Kraft-Kopplung

## 3. Methode

Die durchgeführten Arbeiten können grundsätzlich in folgende Teilbereiche unterteilt werden.

- Analytische/Numerische Modelle für Systembetrachtungen
- Mehrdimensionale Deviceanalyse mittels FE-Simulation und Prototypencharakterisierung
- Bewertung von möglichen Applikationen für die Niedertemperaturnutzung

Modellierung thermoelektrischer Generatoren für Systembetrachtungen:

Für die Bewertung von Einsatzmöglichkeiten für thermoelektrische Generatoren wurde ein analytisches Modell für breite Leistungsspektren mit variablen Parametern für die Optimierung entwickelt. Das Modell vereint Erkenntnisse aus der einschlägigen Literatur und kann an verschiedenste Anwendungsfälle angepasst werden. Das Modell arbeitet sowohl mit analytischen Näherungen als auch mit numerischen Methoden, wobei die numerischen Ergebnisse auch gleichzeitig zur Validierung verwendet wurden.

### 3.1 ANALYTISCHES MODELL

Eine gute Näherung des Wirkungsgrades eines Thermoelementes wurde von Rowe und Min [14] gefunden:

$$\eta_i = \frac{\eta_C}{\left(1 + \frac{2rl_C}{d}\right)^2 \left(2 - \frac{1}{2}\eta_C + \left(\frac{4}{ZT_H}\right) \cdot \left(\frac{d(1+\delta)}{d+2rl_C}\right)\right)} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $\eta_C$  den Carnot-Wirkungsgrad. Weiters gelten folgende Beziehungen:

$$r = \frac{\lambda}{h \cdot l_C} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{R_C}{R} \quad (3)$$

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda} \quad \text{mit} \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\rho_n + \rho_p}{2} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_n + \lambda_p}{2} \quad (7)$$

wobei  $r$  die thermischen und  $\delta$  die elektrischen Kontakteffekte berücksichtigt.  $Z$  stellt die Gütezahl der verwendeten Materialien dar.

Beim Einsatz von seriegelagerten Thermocouples in einem Wärmetauscher spielen die zusätzlichen Wärmeübergänge und der Verlauf der Temperaturen auf der kalten und warmen Seite eine grosse Rolle. Diese Einflüsse werden durch die Einführung der dimensionslosen Grösse  $X$  nach Suzuki berücksichtigt. [15] Die Wärmeübergänge des Wärmetauschers zu den Thermoelementen werden dabei als gleich angenommen und führen zu folgenden Beziehungen.

$$X = \frac{Lwl}{\beta \dot{m} C_p} \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{\frac{2}{h} + \frac{d}{\lambda}} \quad (9)$$

Zur Vereinfachung des Modells wurden auf beiden Seiten des Modells identische Massenströme und Wärmekapazitäten angenommen. Die in (8) eingeführte Grösse  $\beta$  beschreibt die Leistungsreduktion eines Thermogenerators aufgrund des Peltiereffektes (Wärmeaufnahme an der warmen Seite, Wärmeabgabe an der kalten Seite).

$$\beta = \varepsilon \cdot \beta^* \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{R^*}{R} \quad (11)$$

$$\beta^* = \frac{4 \cdot \eta_i \cdot \lambda}{ZLd(T_H^{in} - T_L^{in})} \quad (12)$$

Die Grösse  $R^*$  beschreibt den effektiven Innenwiderstand eines einzelnen Thermoelementes.

$$R^* = R(1+\delta) + \frac{\alpha^2(T_H h + T_L h)}{A_0 h^2 + 2K \cdot h} \quad (13)$$

Hier ist  $K$  der Wärmefluss durch die Halbleiter Schenkel, der sich nach

$$K = \frac{A_n \cdot \lambda_n}{d} + \frac{A_p \cdot \lambda_p}{d} \quad (14)$$

berechnet, wobei die Schichtdicke  $d$  und  $A_n$  und  $A_p$  die Querschnitte der Halbleiter darstellen. Der Wirkungsgrad des TEG im Wärmetauscher lässt sich jetzt als Bruchteil von  $\eta_i$  annähern, wobei, wie bereits erwähnt,  $\eta_i$  den elektrischen Wirkungsgrad bei angepasster Last beschreibt.

$$\eta_{TEGinWT} \approx \frac{1}{X+1} \cdot \eta_i \quad (15)$$

Nach der Methode von Suzuki und Tanaka kann die abgegebene elektrische Leistung des Generators in Abhängigkeit von  $X$  bestimmt werden. Diese ist natürlich abhängig vom Massenstrom sowie von der Geometrie des Wärmetauschers.

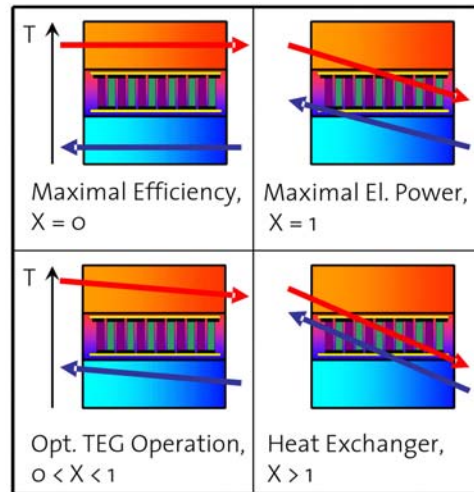
$$P_{TEGinWT} = \beta^* \dot{m} C_p \frac{Ld}{\lambda} Z (T_H^{in} - T_L^{in})^2 \quad (16)$$

Der eingeführte Faktor  $\gamma$  beschreibt die Art des verwendeten Wärmetauschers. Als Beispiele werden hier die Gleichungen für einen Gleichstromwärmetauscher (17) und einen Gegenstromwärmetauscher (18) aufgeführt.

$$\gamma = \frac{(1 - e^{-2X})^2}{16X} \quad (17)$$

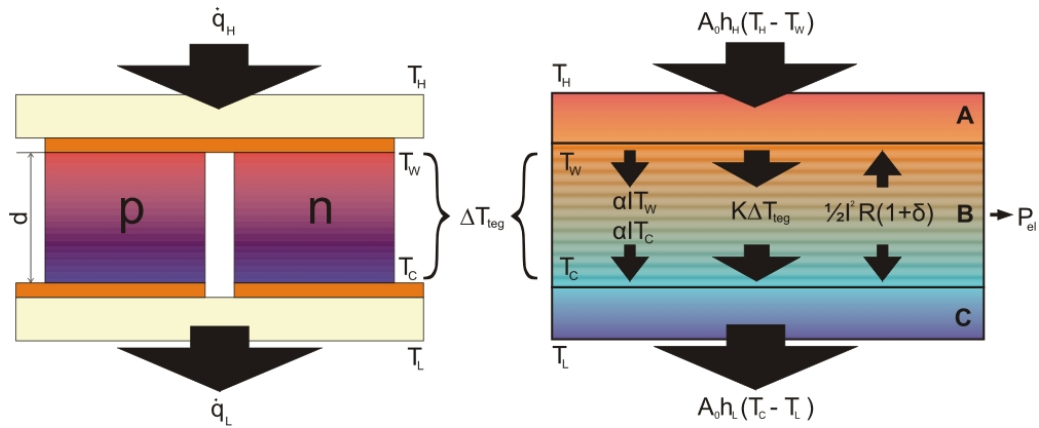
$$\gamma = \frac{X}{4(1+X)^2} \quad (18)$$

Es ist leicht ersichtlich, dass  $\gamma$  für einen Gegenstromwärmetauscher bei gleichen  $X$  einen grösseren Wert aufweist. In einem Gegenstromwärmetauscher wird zudem bei einem Wert von  $X = 1$  die maximale Leistung abgegeben. Aus Gleichung (15) ist ersichtlich, dass sich der Wirkungsgrad dabei auf die Hälfte des erreichbaren Werts reduziert. Den maximalen Wirkungsgrad erreicht man bei  $X = 0$ , was nur theoretisch mit einem unendlich grossen Massenstrom oder unendlich kleiner Wärmetauscherfläche möglich erreichbar wäre. Soll ein gegebener Abwärmestrom genutzt werden, wird die maximale Leistung mit  $X=1$  erzeugt. Wie gross  $X$  gewählt werden muss, ist vom maximal möglichen Massestrom bzw. von der gewünschten übertragenen thermischen Leistung abhängig und muss individuell bestimmt werden. Die mit der Grösse  $X$  charakterisierten Betriebspunkte für thermoelektrische Generatoren sind in Figur 1 zusammengefasst. In realen Anwendungen wird dabei immer ein Kompromiss zwischen maximaler Leistung und maximalem Wirkungsgrad angestrebt, also  $0 < X < 1$ . In seltenen Fällen könnte eine Anwendung in einem Wärmetauscher ( $X > 1$ ) sinnvoll sein. Das Bild macht deutlich, dass stets ein Kompromiss zwischen maximaler Leistung und maximalem Wirkungsgrad gesucht werden muss.



**Figur 1:** Betriebsbereiche des integrierten thermoelektrischen Generators

### 3.2 NUMERISCHES MODELL:



**Figur 2:** Schema eines Thermocouples (links), Aufteilung des TEG für die Modellierung (rechts)

Zur Veranschaulichung des verwendeten numerischen Modells eines einzelnen Thermocouples wird das Couple in drei Teile zerlegt:

Der Wärmeübergang vom heissen Medium in die elektrische Isolationsschicht zusammen mit der elektrischen Kontaktierung (A),

die Halbleiterelemente (p- und n- Schenkel) (B) und

die elektrische Kontaktierung mit der Isolationsschicht und dem Wärmeübergang ins vorbeiströmende Medium auf der kalten Seite (C).

Der Wärmeübergang vom Medium zum Element und der Kontaktierung wird jeweils repräsentiert durch einen gesamten Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten  $h_H$  bzw.  $h_L$ . Die Wärmeströme lassen sich wie folgt berechnen.

$$\dot{q}_{H_i} = A_0 \cdot h_H \cdot (T_{H_i} - T_{W_i}) \quad (20)$$

$$= K \cdot \Delta T_{teg_i} + \alpha I T_{W_i} - \frac{1}{2} I^2 R (1 + \delta) \quad (21)$$

$$\dot{q}_{L_i} = A_0 \cdot h_L \cdot (T_{C_i} - T_{C_i}) \quad (22)$$

$$= K \cdot \Delta T_{teg_i} + \alpha I T_{C_i} + \frac{1}{2} I^2 R (1 + \delta) \quad (23)$$

Der Term  $A_0 \cdot h_H \cdot (T_{H_i} - T_{W_i})$  stellt den Wärmestrom von der konvektiven Wärmequelle (Wasserstrom) durch den Teil A mit der Kontaktfläche  $A_0$  dar. Dieser Wärmestrom muss im Gleichgewicht mit der in den Teil B abfliessenden Energie sein. An diesen Übergang setzt sich die Energie aus den Termen für die Wärmeleitung  $K \cdot \Delta T_{teg_i}$ , dem Term für die Peltierwärme  $\alpha I T_{W_i}$  und dem Term für die Joulschen Energieverluste  $0.5 \cdot I^2 R (1 + \delta)$  zusammensetzt. Es gilt die Annahme, dass je die Hälfte der Joulschen Verluste an die warme bzw. an die kalte Seite abgegeben wird. Weiters gilt, dass die Elemente gegen die Umgebung thermisch isoliert sind und somit keine Verluste durch freie Konvektion oder Strahlung entstehen.

In der numerischen Berechnung eines ganzen Moduls oder Generators werden die einzelnen Elemente elektrisch in Serie und thermisch parallel geschaltet. Der Index  $i$  bezeichnet dabei das  $i$ -te Element einer Serienschaltung von  $N$  Elementen zu einem Modul, wie nachfolgend beschrieben. Auf der kalten Seite fliesst Wärme in analoger Zusammensetzung ab. Die Differenz der beiden Energieströme wird als elektrische Leistung  $P_{el}$  abgegeben. Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Grössen und deren Ermittlung im Detail beschrieben.

$$\Delta T_{teg_i} = T_{W_i} - T_{C_i} \quad (24)$$

$$T_{H_{i+1}} = T_{H_i} - \frac{\dot{q}_{H_i}}{C_p \dot{m}_H} \quad (25)$$

$$T_{L_i} = \frac{T_{L_{i+1}}}{C_p \dot{m}_L} \quad (26)$$



$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha \cdot \Delta T_{tegi}}{NR(1+\delta) + R_L} \quad (27)$$

$$V = I \cdot R_L \quad (28)$$

$$P_{el} = I^2 R_L = \sum_{i=1}^N (\dot{q}_{H_i} - \dot{q}_{L_i}) \quad (29)$$

$$= \sum_{i=1}^N (\alpha I T_{W_i} - \alpha I T_{C_i}) = I \sum_{i=1}^N \alpha \Delta T_{tegi} \quad (30)$$

$$\eta = \frac{P}{\sum_{i=1}^N \dot{q}_{H_i}} \quad (31)$$

Für die Massenströme wurden dabei die beiden Grössen  $\dot{m}_H$  und  $\dot{m}_L$  benutzt. So können zwei unterschiedlich grosse Ströme verwendet werden um verschiedenen Anwendungsbereiche abzudecken.

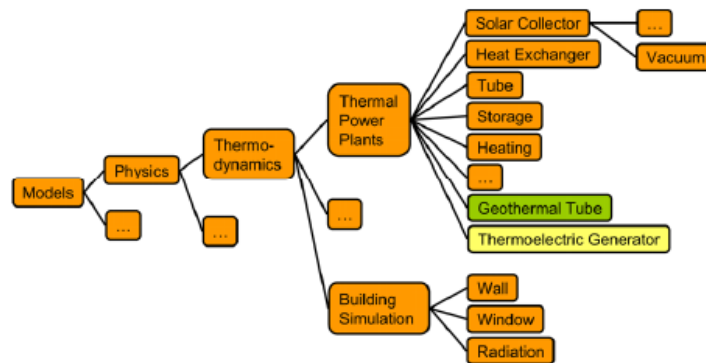
Im stationären Zustand stellt sich der Strom  $I$  ein, der abhängig ist vom inneren Widerstand  $R$ , dem Lastwiderstand  $R_L$ , dem Verhältnis  $\delta = R_C/R$  zwischen Kontaktwiderstand  $R_C$  und innerem Widerstand  $R$  sowie der Summe der Seebeckspannung aller Einzelelemente. Der innere Widerstand beschreibt den elektrischen Widerstand der Halbleiterschlenkel:

$$R = \frac{\rho_n \cdot d}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot d}{A_p} \quad (32)$$

Aus dem Strom sowie dem Lastwiderstand lässt sich die abgegebene elektrische Leistung  $P_{el}$  und daraus folgend der Wirkungsgrad  $\eta$  (31) der Anordnung berechnen.

### 3.3 SMILE –MODELLE

Das im obigen Abschnitt vorgestellte numerische Modell wurde in der Simulationsplattform SMILE implementiert. SMILE ist eine objekt-orientierte Umgebung zur Modellierung und Simulation von dynamischen Systemen kontinuierlicher oder diskreter Natur. Die Modellbibliotheken beinhalten eine grosse Zahl von Anwendungen im Bereich der Energietechnik und Gebäudetechnik. Ein Auszug davon ist in Figur 3 dargestellt.

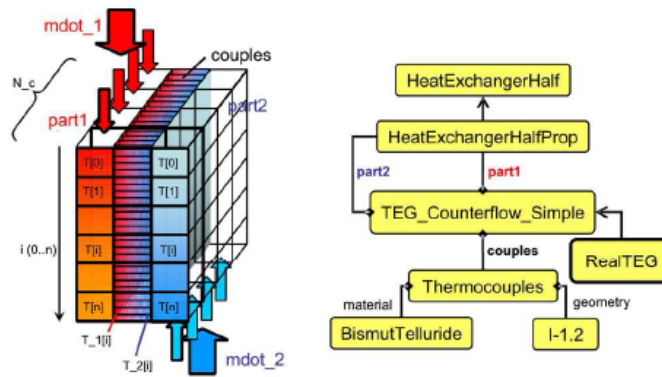


**Figur 3:** Modellkomponenten aus der SMILE Bibliothek

Der Vorteil der objektorientierten Modellierung liegt in der einfachen Wiederverwendbarkeit bereits bestehender Modelle wie auch dem Ergänzen und Einfügen komplexer Modellansätze.

#### 3.3.1 SMILE – Modell eines thermoelektrischen Generators

Die Objektorientierung erlaubt einen einfachen und übersichtlichen Aufbau komplexer Modelle. Für den Thermoelektrischen Generator wurde die in Figur 4 gezeigte Modellstruktur gewählt.



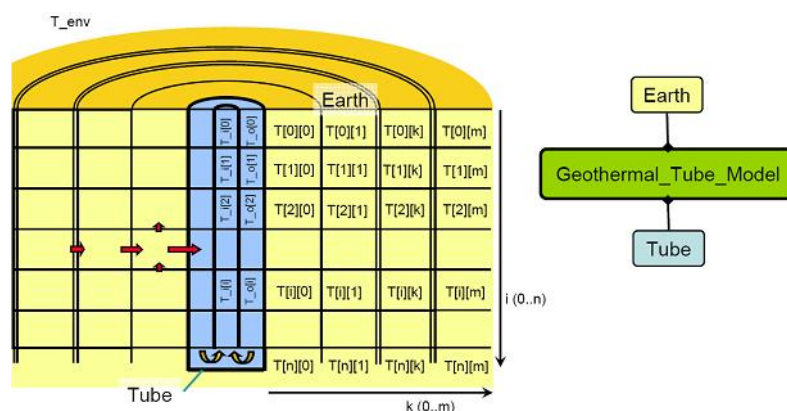
**Figur 4:** SMILE-Modell des Thermoelektrischen Generators. Modellaufbau (links) und Modellkomponenten (rechts)

Der Generator besteht aus zwei Wärmetauschern (warme Seite mit dem Massenstrom  $\dot{m}_{dot\_1}$ , kalte Seite mit dem Massenstrom  $\dot{m}_{dot\_2}$ ) und den Halbleiterschchenkeln (Thermocouples). Zur Modellierung der Temperaturänderung im Fluid wird der Generator in der Flussrichtung des Fluids in einzelne Bereiche aufgeteilt (jeweils eindimensionale Arrays  $T[0..n]$ ,  $T_{-1}[0..n]$ , ...). Da in dieser Generatorkonfiguration zwei identische Wärmetauscher eingebaut sind, reicht ein Wärmetauschermodell (HeatExchangerHalf) aus. Ein „Kind“ dieses Modells (HeatExchangerHalfProp) beschreibt zusätzlich die Temperaturabhängigkeiten der Fluidparameter. Die beiden von dieser Klasse instanziierten Objekte part1 und part2 beschreiben die beiden Wärmetauscher und sind Teil des Generatormodells (TEG\_Counterflow\_Simple). Die Modellklasse „Thermocouples“ beinhaltet zwei Objekte, die die Materialdaten und Daten zur Couple-Geometrie enthalten. Dieser Aufbau ermöglicht somit eine einfache Änderung der Materialdaten und Geometrien.

Sind alle entsprechenden Modellparameter bekannt, erlaubt obiges Modell eine sehr genaue Simulation des TEG-Betriebsverhaltens. Eine Herausforderung ist die genaue Behandlung des Wärmeübergangs vom Fluid in die Halbleiterschlenkel sowie die genaue Kenntnis der thermischen und elektrischen Kontaktparameter (Kontaktwiderstände).

### 3.3.2 SMILE – Modell einer tiefen Erdwärmesonde

Ein zweites in SMILE implementiertes Modell beschreibt eine tiefe Erdwärmesonde. Die einfache Struktur des Modells ist in Figur 5 gezeigt. Wie im TEG-Modell erlaubt die Objektorientierung auch hier eine einfache Unterteilung des Modells in die Sonde (Tube) und das Erdreich (Earth). Die Modellstruktur wurde dabei im Wesentlichen aus einer an der TU-Berlin durchgeführten Diplomarbeit übernommen. Durch die Diskretisierung des Modells können die Temperaturen der Sondenflüssigkeit ( $T_i$ ,  $T_o$ ) als eindimensionales Array, die Temperatur im Erdreich als zweidimensionales Array definiert werden.



**Figur 5:** SMILE-Modell einer tiefen Erdwärmesonde, Diskretisierung (links) und Modellkomponenten (rechts)

### 3.3 MEHRDIMENSIONALE DEVICEANALYSE MITTELS FE-SIMULATION UND PROTOTYPEN-CHARAKTERISIERUNG

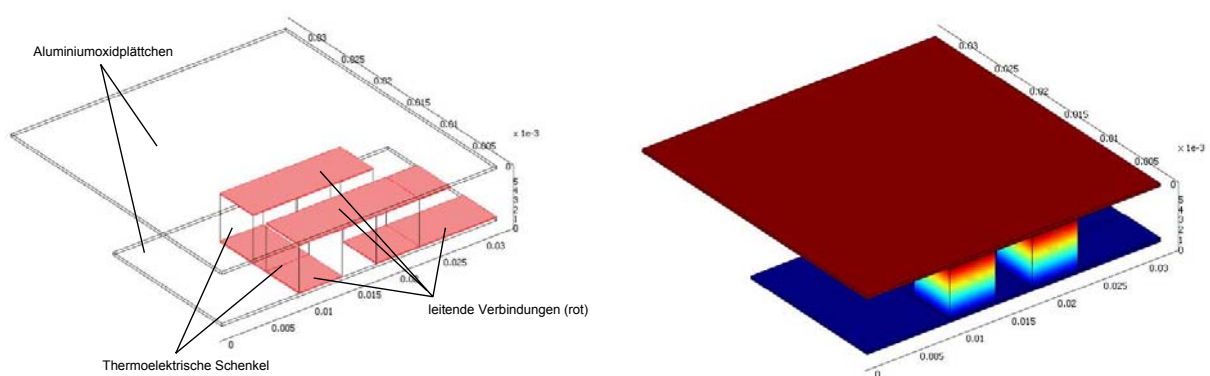
Für die Bestimmung der Ausgangsleistung und der Effizienz sind verschiedenen Modellierungstechniken bekannt. Der einfachste Ansatz bedient sich der Anwendung von gemittelten Werten für die verschiedenen Materialparameter. Neben iterativen Methoden (infinite staging) werden auch analytisch exakte Methoden angewendet, die jedoch nur mit hoher mathematischer Kunst bzw. numerischen Verfahren gelöst werden können.

Die vorher genannten Methoden gehen von eindimensionalen Verteilungen der Temperatur und des elektrischen Potentials aus. Obgleich diese Annahme im Allgemeinen eine gute Annahme ist, gibt es Konfigurationen, für die diese Annahme möglicherweise nicht gültig sein kann. Es wurde eine Methode entwickelt, die nicht auf dieser Annahme beruht und eine Analyse erlaubt, in der die Temperatur- und die elektrische Potentialverteilung ein, zwei oder dreidimensional sein kann.

Dafür wurden zuerst die Bestimmungsgleichungen für die mehrdimensionale Temperatur- und Potentialverteilung in thermoelektrischen Materialien für den stationären Zustand unter Abwesenheit von angelegten magnetischen Feldern aufgestellt. Dabei entsteht ein System aus zwei gekoppelten partiellen Differentialgleichungen mit zwei abhängigen Variablen, der Temperatur  $T$  und dem elektrischen Potential  $V$ . Für die exakte Lösung dieses nichtlinearen Gleichungssystems wurde auf die Methode der finiten Elemente zurückgegriffen. Das Gleichungssystem konnte mit einer erweiterten Form der gedämpften Newton-Methode gelöst werden.

Diese Simulation für einzelne thermoelektrische Komponenten (Schenkel) wurde für ganze Module (Multicouples) erweitert.

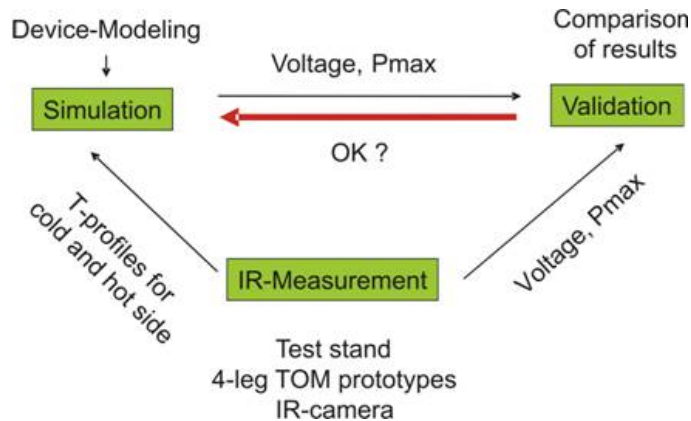
Für diese Erweiterung des Modells wurden „nichtthermoelektrische“ Komponenten wie die leitenden Verbindungen zwischen den einzelnen Schenkeln als auch die elektrisch isolierenden Aluminiumschichten mit all ihren temperaturabhängigen, nichtlinearen Materialeigenschaften integriert. (siehe Figur 6). Die Nichtlinearität der verschiedenen Materialgrößen wurde durch an Messdaten angepasste Funktionen höherer Ordnung berücksichtigt. Die Randbedingungen wurden erweitert und ermöglichen in Kombination mit der Verwendung eines parametrischen Solvers die Beurteilung bei verschiedenen Lastfällen. Die Modellierung berücksichtigt die meisten in der Literatur genannten Irreversibilitäten. Unberücksichtigt blieben die Kontaktwiderstände zwischen den Schenkel und den leitenden Verbindungen bzw. den leitenden Verbindungen und dem Isolationsmaterial. Diese Phänomene beeinflussen sowohl das thermische als auch das elektrische Verhalten und sind sehr stark von der Fertigungssorgfalt abhängig. Sie werden deshalb auch allgemein mit einem sog. „Manufacturing Factor“ berücksichtigt. Die somit entstehenden Mehrkomponentensysteme stellten speziell für die Rechnerinfrastruktur eine grosse Herausforderung dar, will man vernünftige Rechenzeiten einhalten. Ein Beispiel für eine durchgeführte Simulation ist ebenfalls in Figur 2 zu sehen.



**Figur 6:** Modell eines thermoelektrischen Modul-Prototypen (links), Temperaturverteilung simuliert (rechts)

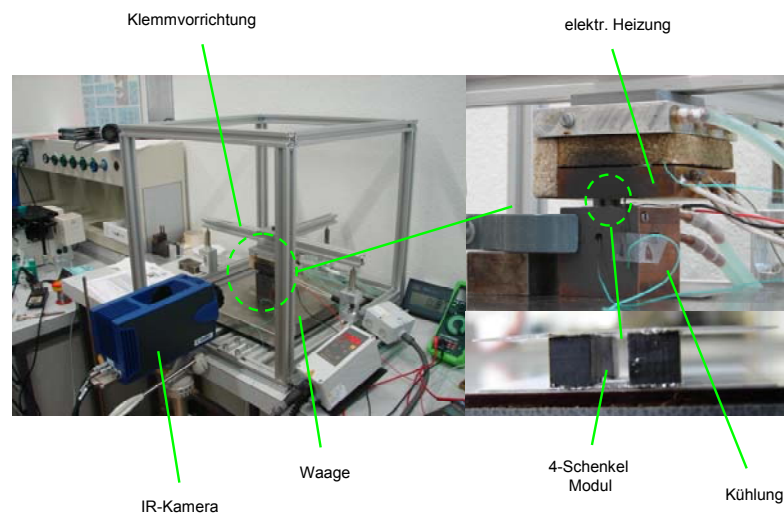
## Aufbau und messtechnische Charakterisierung von Thermoelektrischen Oxid Modulen (TOMs)

Für die Validierung der Simulation und der Aufnahme von ersten Leistungscharakteristika der Materialien integriert in ersten Prototypen wurden verschiedene Module mit thermoelektrischen Oxiden (TOMs) aufgebaut. (allgemeiner Ansatz siehe Figur 7)



**Figur 7:** Schema der Simulationsvalidierung

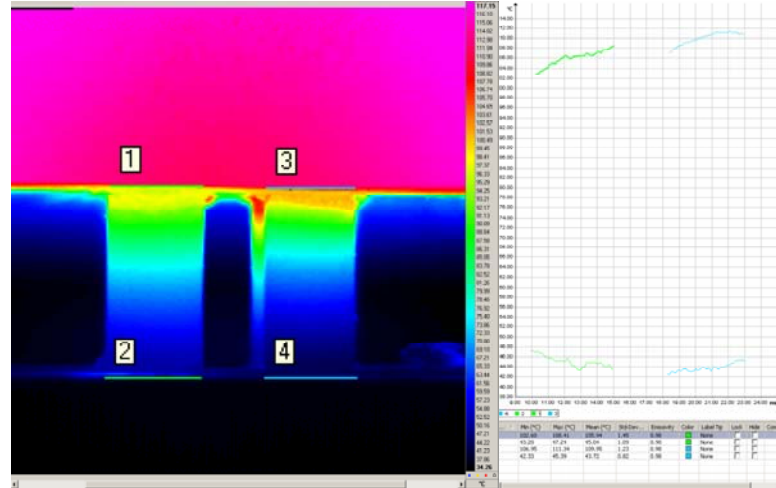
Dafür wurden, an der EMPA Dübendorf Abteilung Festkörperchemie und Katalyse, neu entwickelte und synthetisierte n- und p- Materialien zu Barren mit einem Querschnitt von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  gesintert und in Längen 2, 5 und 10 mm zugeschnitten. Die leitenden Verbindungen wurden mit einer Mischung aus Silberleitpaste, Kupfer und weiteren Beigaben hergestellt. Die gesamte Anordnung wurde zwischen zwei Aluminiumoxidplättchen, welche die warme bzw. kalte Seite des Moduls darstellen, eingebettet. Speziell die Herstellung der leitenden Verbindungen stellte eine grosse Herausforderung dar, da die Mixtur sehr empfindlich (ungenügende Bindung bis partielles Verdampfen) auf die nachfolgende Temperaturbehandlung reagierte. Nach der abschliessenden Wärmebehandlung entstanden somit 4-Schenkel-TOMs mit guten thermischen und elektrischen Kontakten sowie ausreichender mechanischer Festigkeit. Für die messtechnische Charakterisierung wurde ein Messstand mit einer Klemmeinrichtung und integrierter Waage für einen definierten und reproduzierbaren Wärmeübergang aufgebaut. Die warme Quelle wurde mit einer regelbaren elektrischen Heizung, die kalte Quelle mit einem regelbaren Wasserkühler realisiert. Die Daten der Temperaturmessung und der Messung der elektrischen Grössen wurden über eine Messwertkarte und einem LABVIEW-Applet aufgezeichnet. Um die Temperaturverteilung an der Oberfläche der thermoelektrischen Schenkel sichtbar zu machen wurden zusätzlich Aufnahmen mit einer IR-Kamera gemacht. Einen Überblick über den gesamten Messaufbau gibt Figur 8. Für die Bestimmung der Leistungscharakteristik wurden die Module mit einem schaltbaren Widerstandsnetzwerk bei verschiedenen Temperaturen belastet. Die gesamte Prozedur wurde mehrfach durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Der gesamte Teststand ist seit seinen Anfängen stark weiterentwickelt und verbessert worden und stellt heute eine komfortable Möglichkeit für die Charakterisierung von Modulen dar.



**Figur 8:** Überblick Messaufbau

## Validierung der 3D-Finite Elemente Simulation

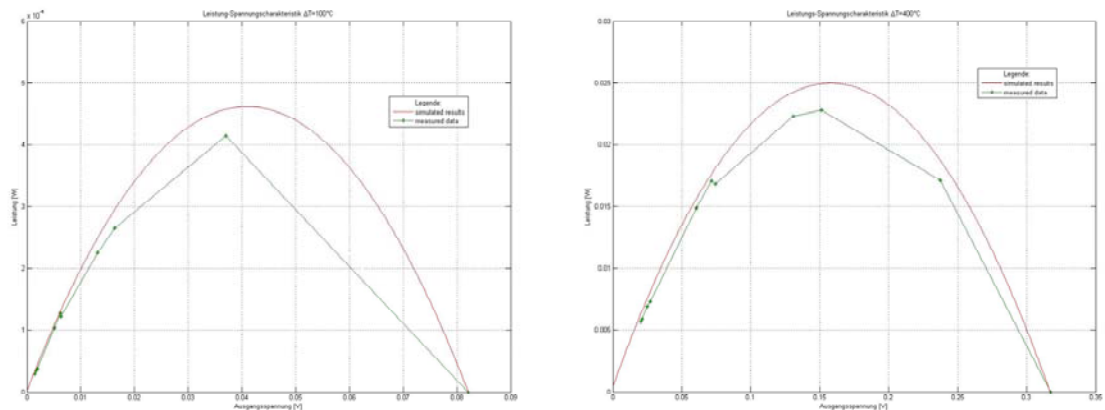
Für die Validierung der Simulation wurden die Temperaturprofile der IR-Messung als Randbedingungen für die Simulation verwendet (siehe Figur 9). Als eigentliche Vergleichsgrößen wurden die generierten Spannungen am Modul bzw. die Leistungen bei verschiedenen Lasten herangezogen. Die gute Übereinstimmung von Messdaten und Simulationsergebnissen (siehe Figur 4) erlaubt die Beurteilung und Optimierung von neuen Moduldesigns mit neuen thermoelektrischen Materialien mittels Simulation.



**Figur 9:** Temperaturprofile aus IR-Messung

Übersicht der Resultate:

Als Beispiel sind die Ergebnisse von Messung und Simulation in Figur 5 dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse sichtbar. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von 5-8%. Eine mögliche Ursache könnten die Verbindungen zum Widerstandsnetzwerk darstellen. Der sehr kleine (speziell bei hohen Temperaturen) Innerwiderstand dieser Prototypen Module liegt in den Größenordnungen von 1 – 4 Ohm. Dies entspricht ca. 2 m Kupferleitung mit  $d = 0.25$  mm.



**Figur 10:** Vergleich der gemessenen Daten und der simulierten Resultate für ein 5mm TOM bei  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$  (links) und  $400^\circ\text{C}$  (rechts)

Diese Einflüsse werden sich jedoch selbst verringern bzw. auflösen, da die nächste Ausbaustufe von Modulen bereits eine bedeutend grössere Zahl von Couples beinhaltet und somit der Innenwiderstand in Dimensionen anwächst, dem gegenüber die Zuleitungen vernachlässigbar sind.

## 4. Ergebnisse

Für die Beurteilung von Systemen mit thermoelektrischen Generatoren wurden verschiedene Applikationsmöglichkeiten angedacht. Die nutzbare thermische Energie liegt hier immer in konvektiver Form sprich als Massenstrom eines Arbeitsmediums (meist Wasser) mit definierter Temperatur vor. Auch die erforderlichen kalten Quellen liegen meist in dieser Form vor. Für die Beurteilung solcher Systeme wurde ein Modell eines in einem Wärmetauscher integrierten thermoelektrischen Generators entwickelt. Mit diesem Modell können verschiedene interne und externe Grössen variiert und deren Einfluss auf die Leistungscharakteristik beurteilt werden.

Folgende Einsatzmöglichkeiten (Szenarien) wurden analysiert und beurteilt:

- Generierung von elektrischer Energie im Leistungsbereich von 100 KW bis zu mehreren MW aus thermischen Quellen mit Temperaturen bis 500 K, wie geothermische Quellen, solarthermische Quellen und Abfallwärme aus Industrieprozessen.
- Thermoelektrische Generatoren in der Gebäudetechnik, verschiedene Szenarien mit in Wohnhäusern denkbaren warmen und kalten Quellen wurden skizziert, bewertet und die aussichtsreichsten im Detail untersucht.

Ein detaillierte Beschreibung des (der) verwendeten Modell(e) ist im Anhang A ersichtlich.

### 4.1 ELEKTRISCHE ENERGIE AUS THERMISCHEN QUELLEN MIT TEMPERATUREN BIS 500 K

Im Folgenden werden Ergebnisse für die Erzeugung elektrischer Energie aus thermischen Quellen mit Temperaturen bis 500 K, wie geothermische Quellen, solarthermische Quellen und Abfallwärme aus Industrieprozessen dargestellt.

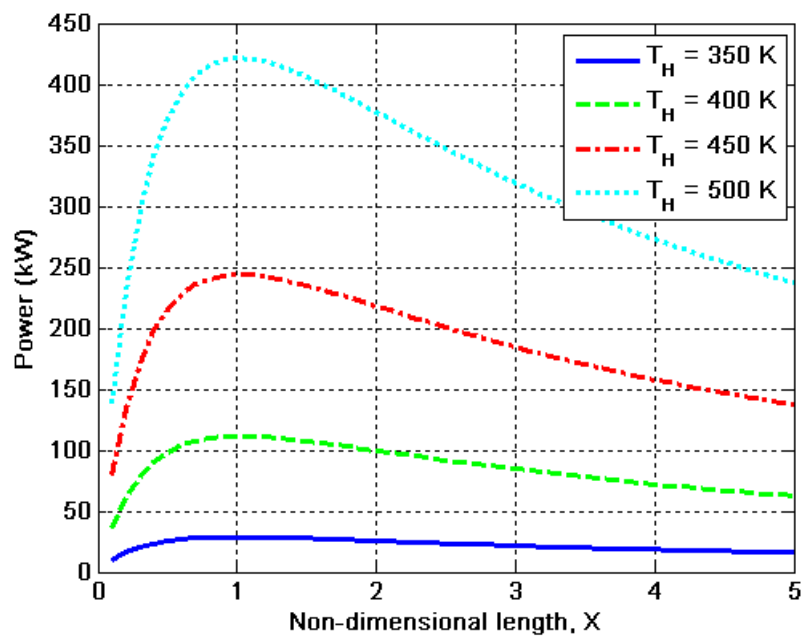
Parameter	Wert	Einheit
Massenstrom $\dot{m}$	100	kg/s
Eingangstemperatur der warmen Quelle $T_H$	variabel 350...500	K
Eingangstemperatur der kalten Quelle $T_C$	300	K
Seebeckkoeffizient $\alpha =  \alpha_p  +  \alpha_n $	$3.47 \cdot 10^{-4}$	V/K
Spez. elektrischer Widerstand $\rho = (\rho_p + \rho_n) / 2$	$1 \cdot 10^{-5}$	$\Omega m$
Thermische Leitfähigkeit $\lambda = (\lambda_p + \lambda_n) / 2$	1.15	W/mK
Länge der thermoelektrischen Schenkel $d$	$1 \cdot 10^{-3}$	m
Dimensionslose Länge $X$	1	-
Allgemeiner Wärmeübertragungskoeffizient $h$	1000	W/m <sup>2</sup> K
Wärmeträgermedium Wasser Wärmekapazität $C_p$	4182	J/kgK

**Tabelle 1:** Systemparameter zu den Ergebnissen in Kap.4.1

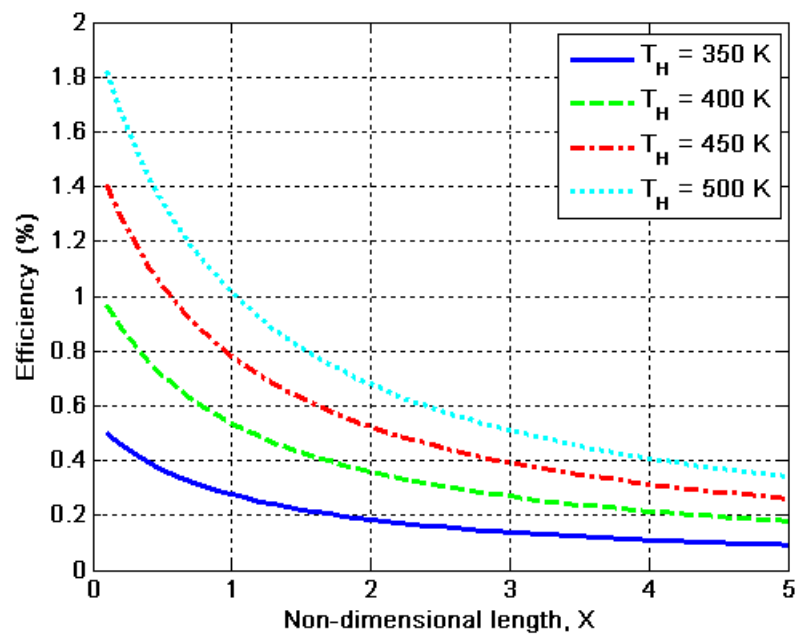
Die Grössen  $\alpha$ ,  $\rho$ , und  $\lambda$  sind die Materialparameter von zurzeit verwendeten Materialien und ergeben eine „Figure of Merit“ (Gütezahl) von  $ZT \sim 1$  für den betrachteten Temperaturbereich von 300 K bis 500 K.



Die Figuren 11 und 12 zeigen die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der dimensionslosen Länge  $X$ .

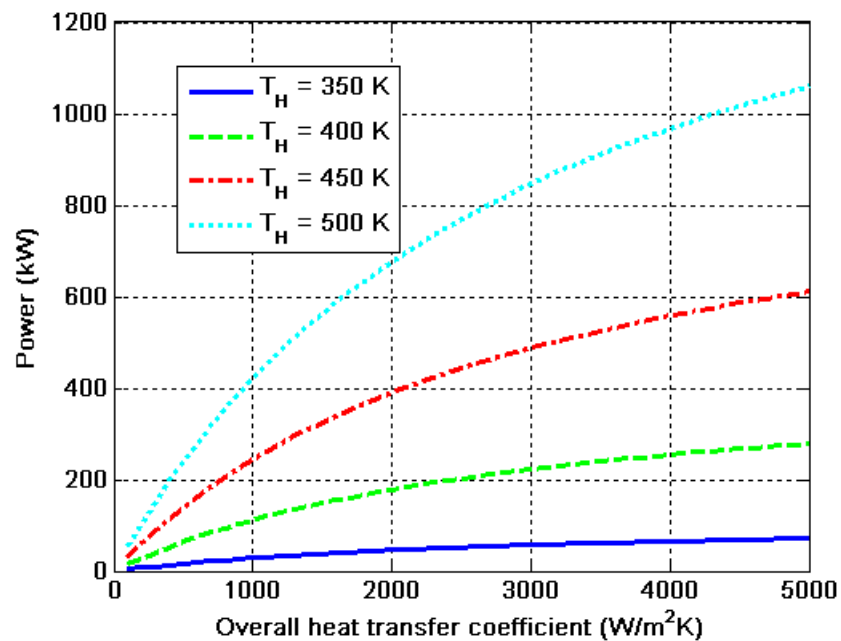


**Figur 11:** Elektrische Leistung in Abhängigkeit der dimensionslosen Grösse  $X$

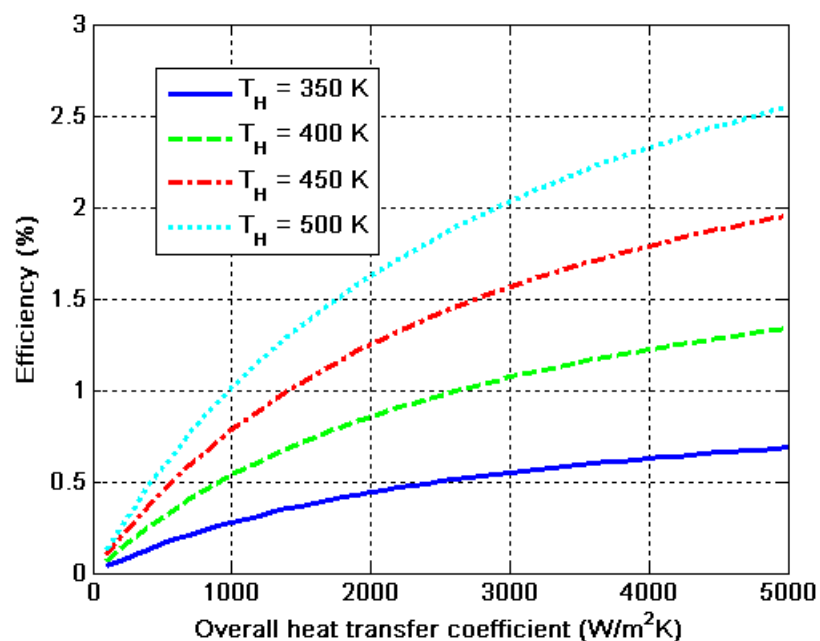


**Figur 12:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit der dimensionslosen Grösse  $X$

Der allgemeine Wärmeübergangskoeffizient  $h$  vereint alle thermischen Widerstände zwischen dem jeweiligen Fluid und den Enden der Thermocouples. Der Wärmeübergangskoeffizient ist sehr stark von den Strömungsbedingungen abhängig und variiert deshalb auch in einem sehr grossen Bereich. Einen Standardwert stellt  $h = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  dar. Kleinere thermische Widerstände und höhere Nusselt-Zahlen (dimensionslose Kennzahl – beschreibt den Wärmeübergang von und zu strömenden Medien) den Wärme erhöhen den allgemeinen Wärmeübergangskoeffizienten. Dies führt zu einer Erhöhung der Temperaturdifferenz an den thermoelektrischen Schenkeln und somit sowohl zu einer Erhöhung der elektrischen Leistung als auch zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades des thermoelektrischen Generators. Die Abhängigkeit der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades vom allgemeinen Wärmeübertragungskoeffizienten sind in den Figuren 13 und 14 dargestellt.



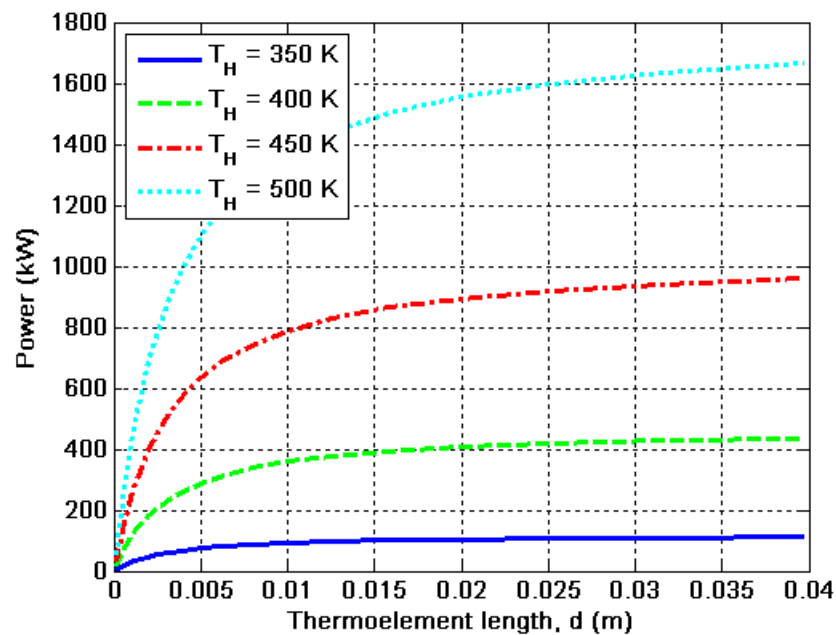
**Figur 13:** Elektrische Leistung in Abhängigkeit des allg. Wärmeübertragungskoeffizienten



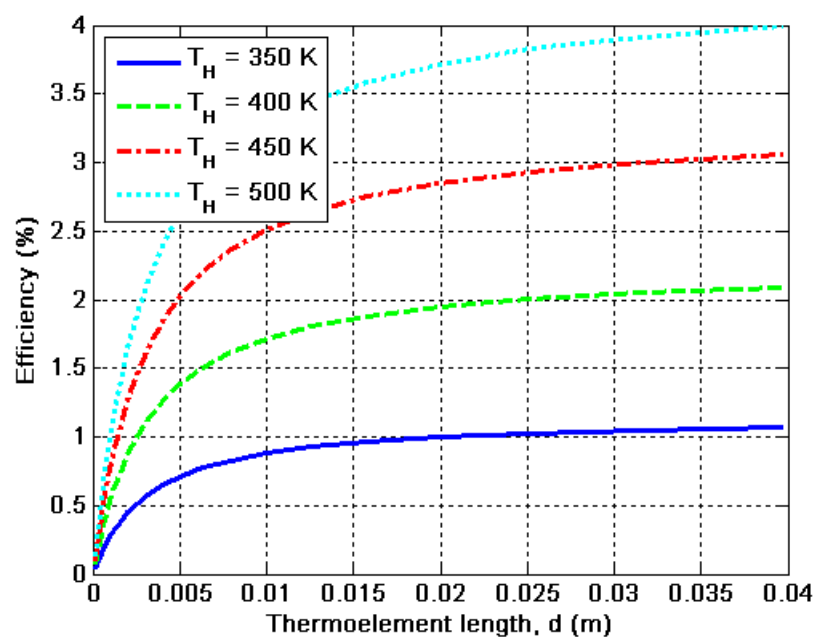
**Figur 14:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit des allg. Wärmeübertragungskoeffizienten



In den Figuren 15 und 16 werden die Abhängigkeiten der beiden Grössen elektrische Leistung und Wirkungsgrad von der Länge der Schenkel des Generators dargestellt. Eine Verlängerung der thermoelektrischen Schenkel führt gleichzeitig zu einer Erhöhung von Ausgangsleistung und Wirkungsgrad.

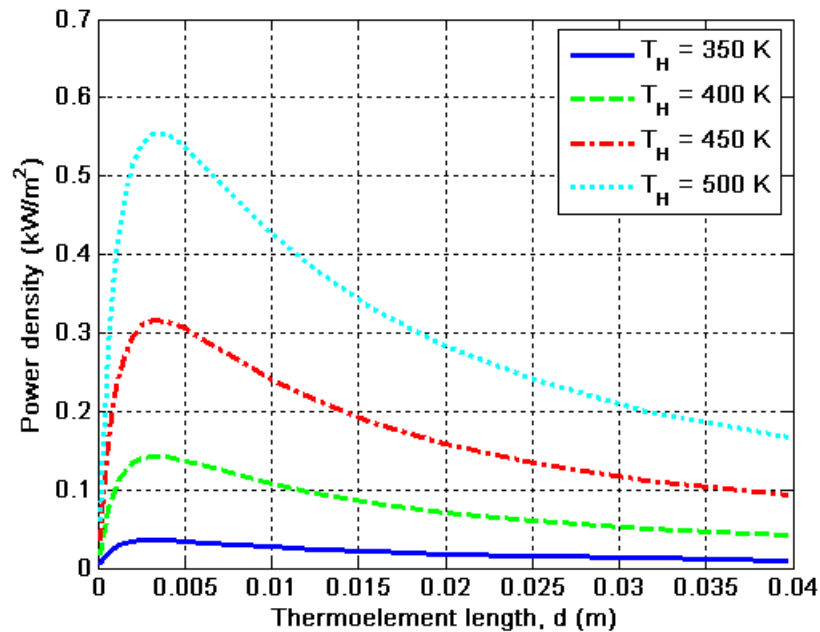


**Figur 15:** Elektrische Leistung in Abhängigkeit der Schenkellänge

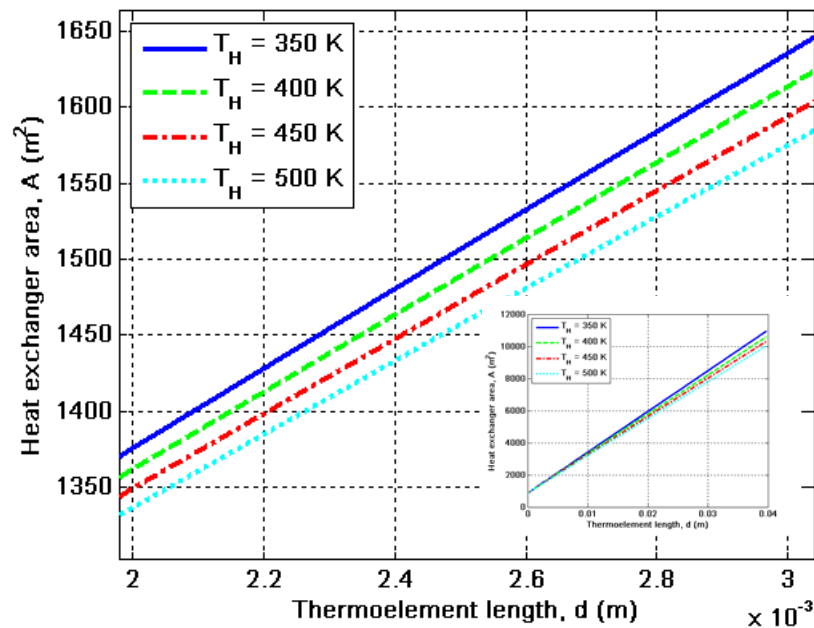


**Figur 16:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Schenkellänge

In den Figuren 17 und 18 werden die spezifische Leistungsdichte  $S = P/A$  und die erforderliche Wärmetauscherfläche  $A$  in Abhängigkeit der Schenkellänge dargestellt.  $S$  stellt die Grösse des TEG, die Kosten dominierend ist, in Relation mit der elektrischen Leistung, die den Ertrag darstellt.



Figur 17: Leistungsdichte in Abhängigkeit der Schenkellänge



Figur 18: Wärmetauscherfläche in Abhängigkeit der Schenkellänge

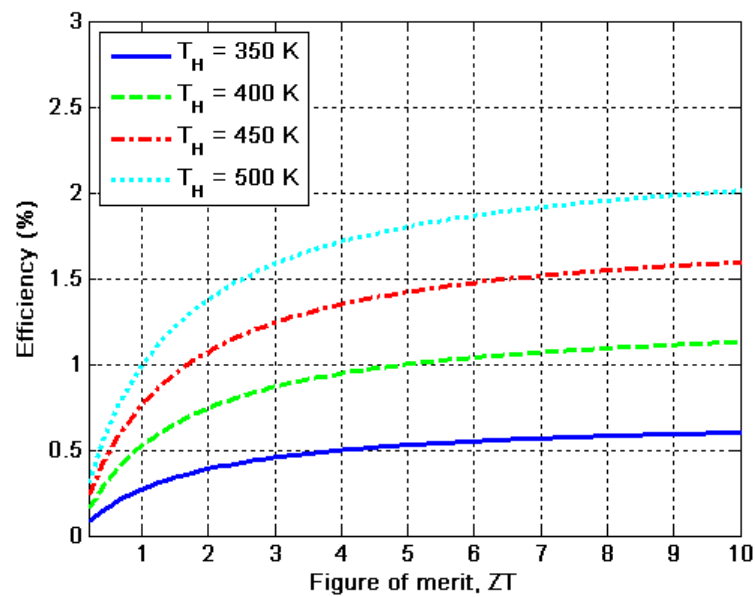
Für die bisherigen Betrachtungen wurden Parameter von Materialien verwendet, wie sie auf dem heutigen Markt erhältlich sind. Zusammengefasst ergeben die Materialparameter die sogenannte „Figure of Merit“ oder auch Gütezahl genannt. Die besten zurzeit erhältliche Materialien haben ein  $ZT \sim 1$ .

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} T_M$$

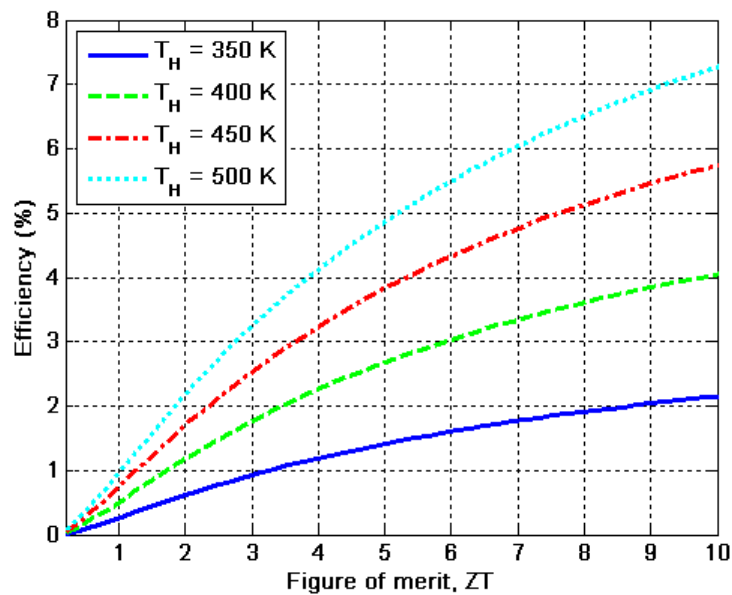
mit  $T_M = (T_H + T_C)/2$ ,  $\alpha$ ...Seebeckkoeffizient, (1)

$\sigma$ ...elektrische Leitfähigkeit,  $\lambda$ ...thermische Leitfähigkeit

In der Materialwissenschaft wird versucht die Parameter Seebeckkoeffizient und thermische Leitfähigkeit zu verändern. Dabei wird eine Erhöhung von  $\alpha$  und/oder eine Verringerung von  $\lambda$  bei gleichbleibendem  $\sigma$  angestrebt. Der Einfluss der jeweiligen Parameter über  $ZT$  auf den Wirkungsgrad wird in der Figur 19 für den Seebeckkoeffizienten und in Figur 20 für die thermische Leitfähigkeit dargestellt.



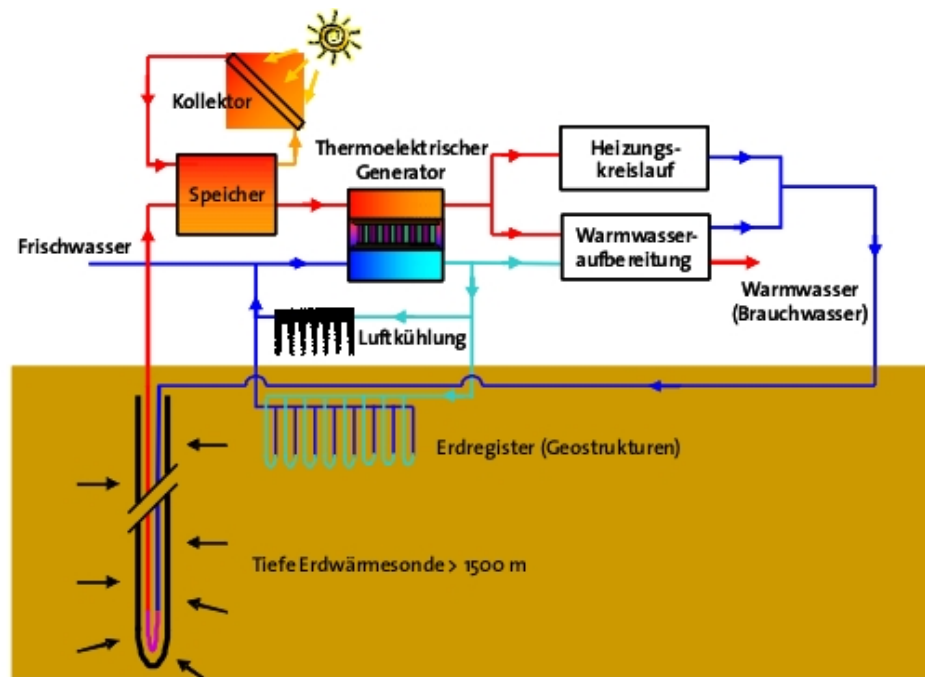
**Figur 19:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit von  $ZT$  für vergrößerten Seebeckkoeffizienten



**Figur 20:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit von  $ZT$  für verkleinerte thermische Leitfähigkeit

## 4.2 THERMOELEKTRISCHE GENERATOREN IN DER GEBÄUDETECHNIK

Im Folgenden werden Ergebnisse für verschiedene Kombinationen (Szenarien) der in Figur 21 dargestellten warmen und kalten Quellen für die thermoelektrische Energieerzeugung in der Gebäudetechnik dargestellt. Die Systemparameter für den TEG entsprechen hier ebenfalls den in Tab.1 angeführten Werten.



**Figur 21:** Schema der möglichen warmen und kalten Quellen für die thermoelektrische Energieerzeugung in der Gebäudetechnik

### Szenario 1a: Tiefe Erdwärmesonde mit Erdregister I

Der thermoelektrische Generator soll mit einer tiefen Erdwärmesonde (warme Quelle) und einem Erdregister (kalte Quelle) betrieben werden. Dabei soll die thermische Energie des Fluids an der warmen Seite weiter genutzt werden.

Das Szenario wurde für 3 verschiedene thermoelektrische Materialien mit ZT-Werten von 1, 3 und 10 durchgerechnet.

Erklärung und Interpretation der folgenden Ergebnisse:

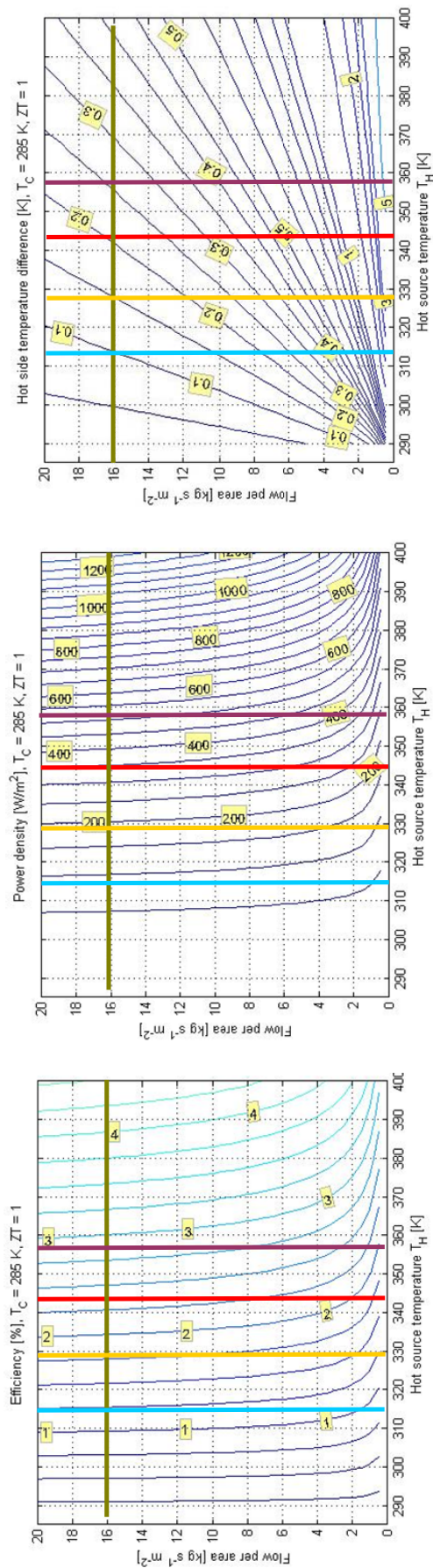
Das warme Arbeitsfluid (Wasser) strömt mit der Temperatur  $T_H$  (Spalte 2 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24) in den thermoelektrischen Generator und kühlt sich dort aufgrund der Abgabe von thermischer Energie leicht ab (Spalte 9 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24). Der Massenstrom (Spalte 8 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24) ist hier so hoch gewählt, dass die Temperatur des Wassers beim Verlassen des TEG an der warmen Seite noch genügend hoch ist, um einen Warmwasserkreislauf zu erwärmen. Die kalte Seite des TEG wird durch das Erdregister auf  $T_C = 285\text{ K}$  gehalten. Die an der kalten Seite des TEG abgeführte Wärmemenge kann somit nicht weiter genutzt werden (Umgebungstemperatur).

Die ersten drei Spalten der Tabellen in den Figuren 22-24 beschreiben die Randbedingungen für verschiedene Sondentiefen. In Spalte 1 werden die Sondentiefen angegeben, in Spalte 2 die jeweils dabei zu erwartenden Temperaturen und in Spalte 3 die kontinuierlich maximal entziehbaren thermischen Leistungen.

Die erreichbaren Wirkungsgrade sind aus Spalte 4 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24 ersichtlich. Würde die gesamte thermische Energie für die Stromerzeugung genutzt könnte man die elektrischen Leistungen aus Tabelle 5 erzielen. Dabei wäre aber eine weitere Nutzung des Fluids wie oben angedacht nicht mehr möglich und der TEG würde Dimensionen ( $> 20 \times 20 \times 20\text{ m}^3$ ) erreichen, wie sie für den Gebäudebereich nicht vorstellbar sind. Deshalb wurde die Fläche des TEG (Spalte 6 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24) so gewählt, dass nur ein Teil der thermischen Energie für die Stromerzeugung verwendet wird. Die somit resultierende Leistung ist aus Spalte 7 der jeweiligen Tabelle in Figs. 22-24 ersichtlich.

Aus den Plots in den Figuren 22-24 können für verschiedene Fluidtemperaturen  $T_H$  und Massenströme (Massenstrom/m<sup>2</sup>) der TEG-Wirkungsgrad, die Leistungsdichte (elektrische Leistung/m<sup>2</sup> TEG-Fläche) und die resultierende Temperaturdifferenz auf der heissen Seite abgelesen werden.

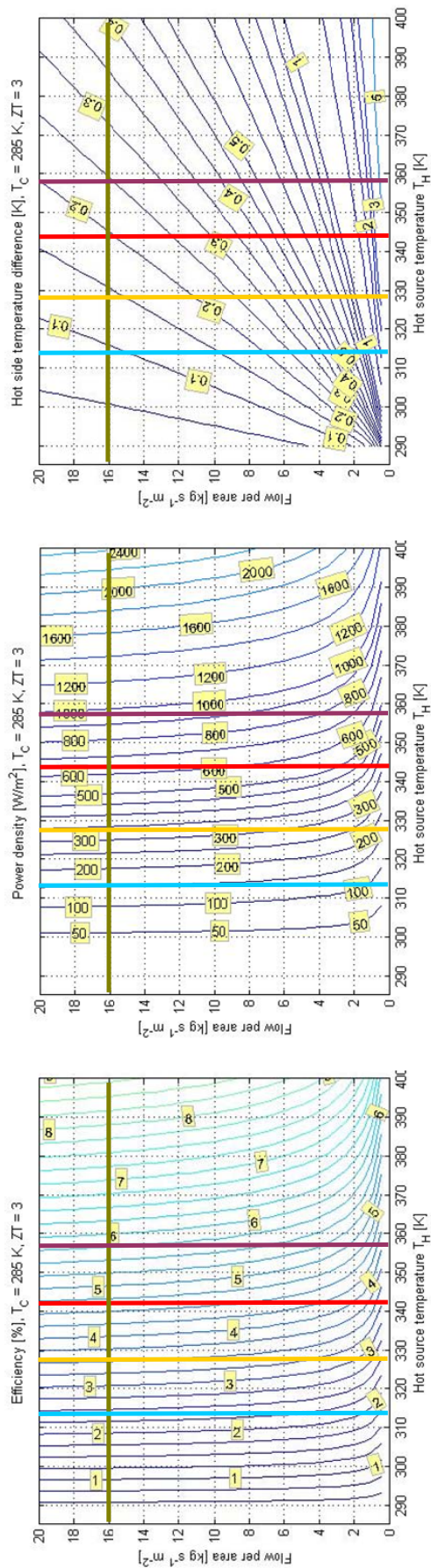
Die hier erreichbaren elektrischen Leistungen sind maximal für die Deckung des Systemeigenbedarfs ausreichend, was eine Realisierung niemals rechtfertigen könnte.



Erdsonden-tiefe	Temperatur	Thermische Leistung	Wirkungsgrad	Maximale elektrische Leistung	Gewählte Fläche	Result. elektrische Leistung	Benötigter Massenstrom	Temperaturgefälle
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	1.25 %	210 W <sub>el</sub>	1.25 m²	100 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.1 K
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	1.8 %	580 W <sub>el</sub>	1.25 m²	225 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.15 K
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	2.3 %	1100 W <sub>el</sub>	1.25 m²	440 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.21 K
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	2.8 %	2000 W <sub>el</sub>	1.25 m²	650 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.26 K

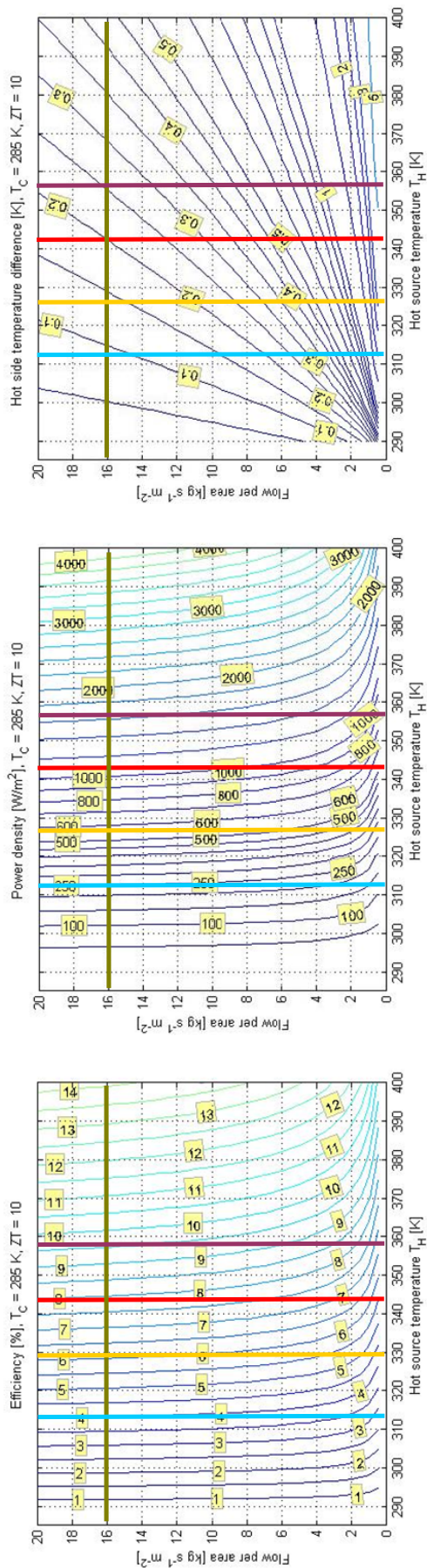
Figur 22: Ergebnisse Szenario 1a für Materialien mit  $ZT \sim 1$





Erdsonden-tiefe	Temperatur	Thermische Leistung	Wirkungsgrad	Maximale elektrische Leistung	Gewählte Fläche	Result. elektrische Leistung	Benötigter Massenstrom	Temperaturgefälle
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	2.4 %	410 W <sub>el</sub>	1.25 m²	190 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.09 K
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	3.6 %	1150 W <sub>el</sub>	1.25 m²	425 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.14 K
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	4.7 %	2260 W <sub>el</sub>	1.25 m²	790 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.2 K
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	5.8 %	4060 W <sub>el</sub>	1.25 m²	1200 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.25 K

Figur 23: Ergebnisse Szenario 1a für Materialien mit  $ZT \sim 3$



Erdsonden - tiefe	Temperatur	Therm- ische Leistung	Wirkungs- grad	Maximale elektrische Leistung	Gewählte Fläche	Result. elektrische Leistung	Benötigter Massen- strom	Tempera- turgefälle
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	4 %	680 W <sub>el</sub>	1.25 m <sup>2</sup>	250 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.08 K
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	6 %	1900 W <sub>el</sub>	1.25 m <sup>2</sup>	730 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.14 K
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	7.8 %	3750 W <sub>el</sub>	1.25 m <sup>2</sup>	1400 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.2 K
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	9.6 %	6720 W <sub>el</sub>	1.25 m <sup>2</sup>	2100 W <sub>el</sub>	20 kg/s	0.26 K

Figur 24: Ergebnisse Szenario 1a für Materialien mit  $ZT \sim 10$



### Szenario 1b: Tiefe Erdwärmesonde mit Erdregister II

Der thermoelektrische Generator soll mit einer tiefen Erdwärmesonde (warme Quelle) und einem Erdregister (kalte Quelle) betrieben werden. Dabei soll die thermische Energie des Fluids an der kalten Seite weiter genutzt werden.

Das Szenario wurde für 3 verschiedene thermoelektrische Materialien mit ZT-Werten von 1, 3 und 10 durchgerechnet.

Erklärung und Interpretation der folgenden Ergebnisse:

Das warme Fluid fliesst aus der Erdwärmesonde mit der Temperatur  $T_H$  in den TEG und von dort entweder zurück in die Erdwärmesonde oder zuvor noch über einen weiteren Wärmetauscher für den Heizkreislauf. Der Massenstrom in diesem Kreislauf wurde mit 10 kg/s angenommen. Im Unterschied zu Szenario 1a soll hier die an der kalten Seite abgeführte Wärme für die Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Der Massenstrom dieses Kreislaufes wird deshalb klein gewählt, dass sich die Temperatur des Mediums an der kalten Seite des TEG so stark erwärmt, dass es für die Warmwasseraufbereitung genutzt werden kann.

Die ersten drei Spalten der Tabellen in den Figuren 25-27 beschreiben hier wieder die Randbedingungen für verschiedene Sondentiefen. In Spalte 1 werden die Sondentiefen angegeben, in Spalte 2 die jeweils dabei zu erwartenden Temperaturen und in Spalte 3 die kontinuierlich maximal entziehbar thermischen Leistungen.

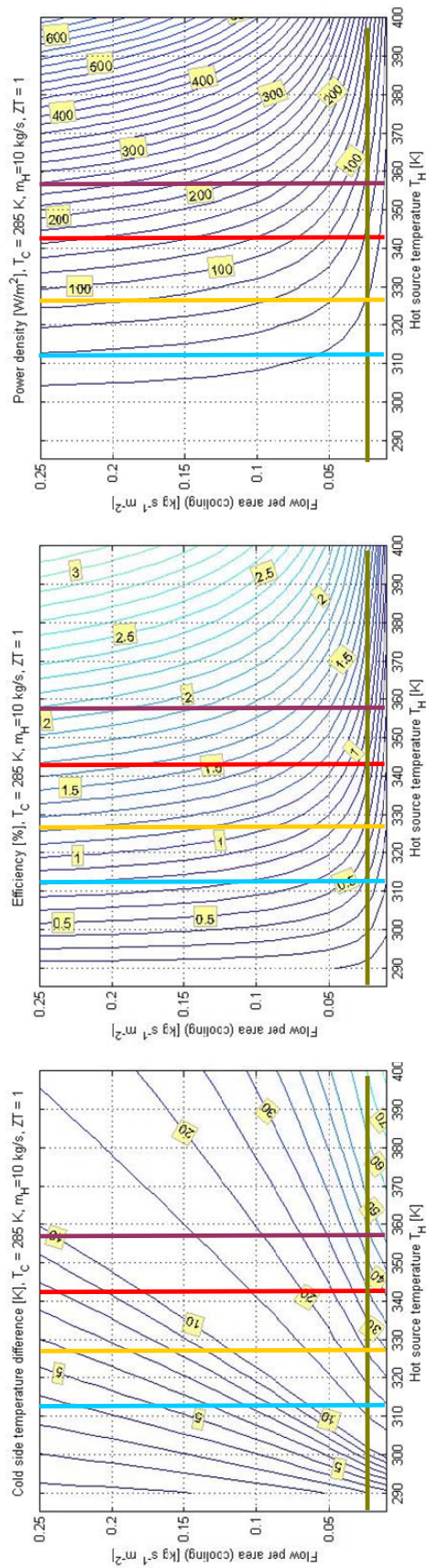
In Spalte 4 ist eine Anzahl von Personen angeführt, deren Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser dem aus Spalte 3 entspricht. Entsprechend dieser Personenzahl ist in Spalte 5 der Tabelle der durchschnittliche Massenstrom für das Gebäude abgeschätzt. Dieser Massenstrom entspricht in der Modellvorstellung dem Fluidstrom, der durch die kalte Seite des TEG fliesst und sich dort ausgehend von der Temperatur  $T_C = 285\text{ K}$  auf die Temperatur für die Warmwassernutzung erwärmt.

Die Grösse resp. die Fläche des thermoelektrischen Generators (Spalte 7 der jeweiligen Tabelle in Figs. 25-27) muss also so gross gewählt werden, dass der Temperaturanstieg des Fluids auf der kalten Seite Warmwasserniveau erreicht und der Wirkungsgrad des TEG nicht zu klein wird. Spalte 8 der Tabelle zeigt den elektrischen Wirkungsgrad des Generators für die entsprechend gewählte Fläche und in Klammer den maximal möglichen Wirkungsgrad bei maximal möglicher Temperaturdifferenz wie in Szenario 1a.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass für  $ZT=1$  nur mit einer sehr tiefen Erdwärmesonde ein befriedigender Temperaturanstieg erreichbar ist. Für höhere ZT-Werte sind auch geringere Sondentiefen vorstellbar. Es ist auch gut ersichtlich, dass aufgrund des Temperaturanstieges auf der kalten Seite der Wirkungsgrad des TEG stark zusammenbricht und nur noch einen Bruchteil des ohnehin schon kleinen Wertes aus Szenario 1a erreicht. Die TEG Abwärme kann zwar genutzt werden, die erreichbaren elektrischen Leistungen sind jedoch minimal.

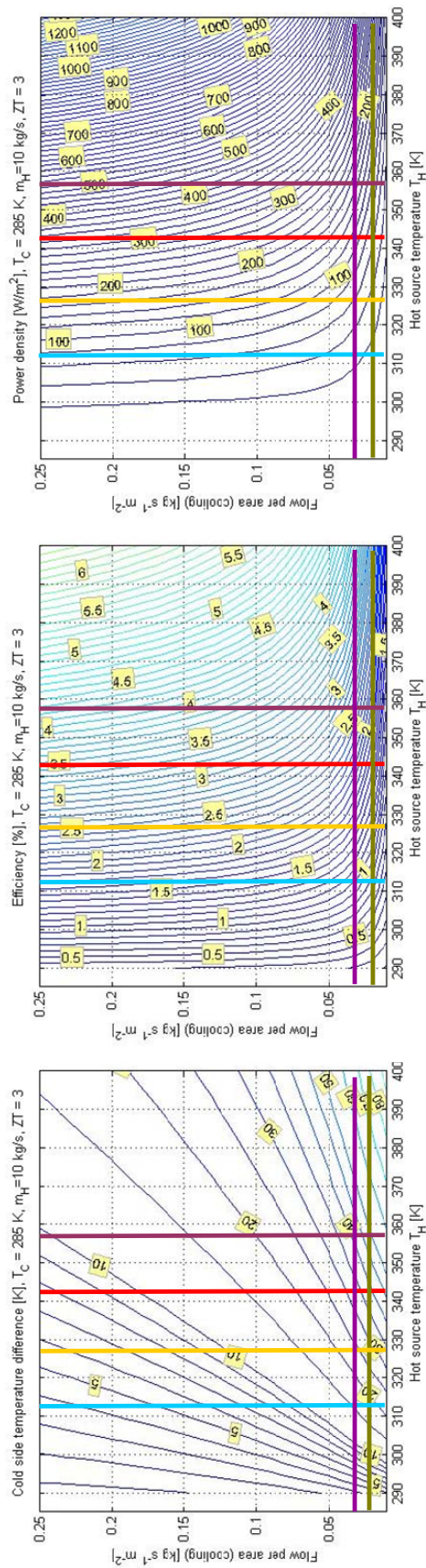
### Thermoelektrische Energiewandlung in Wohnhäusern

Weitere Kombination, wie z. B. Solarthermie als warme Quelle und Kühlung durch ein Erdregister, werden im Anhang A (Auszug Studienarbeit D. Schneider) im Detail beschrieben. Für die Beurteilung wurden dynamische Simulationen mit spezifischen Wetterdaten über längere Zeiträume durchgeführt. Die Ergebnisse und deren Diskussion sind ebenfalls in Anhang A ersichtlich.



Erdsonden - tiefe	Temperatur	Therm- ische Leistung	Anzahl Per- sonen	Gewählter Massen- strom (kalt)	Temperatur- anstieg Warmwasser	TEG- Fläche	Wirkungs- grad (max)	Result. elektrische Leistung
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	80	0.04 kg/s	17 K	2 m <sup>2</sup>	0.4 % (1.25 %)	45W <sub>el</sub>
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	160	0.074 kg/s	26 K	3.7 m <sup>2</sup>	0.6 % (1.8 %)	75 W <sub>el</sub>
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	240	0.11 kg/s	36 K	5.5 m <sup>2</sup>	0.8 % (2.3 %)	220 W <sub>el</sub>
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	340	0.16 kg/s	45 K	8 m <sup>2</sup>	0.95 % (2.9 %)	480 W <sub>el</sub>

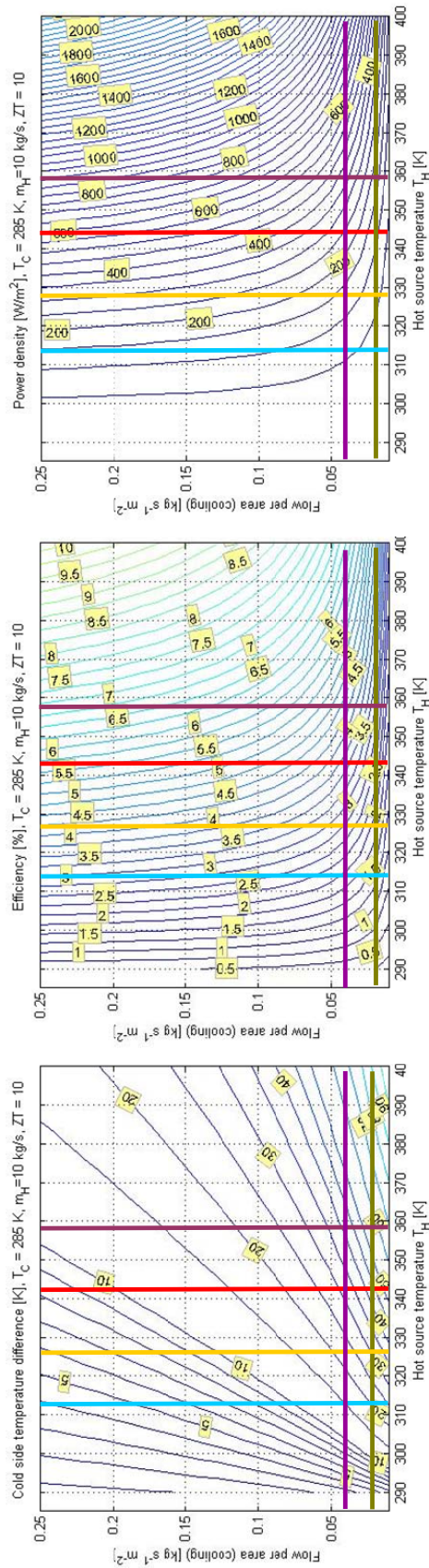
Figur 25: Ergebnisse Szenario 1b für Materialien mit  $ZT \sim 1$



Erdsonden-tiefe	Temperatur	Thermische Leistung	Anzahl Per-sonen	Gewählter Massenstrom (kalt)	Temperaturanstieg Warmwasser	TEG-Fläche	Wirkungsgrad (max)	Result. elektrische Leistung
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	80	0.04 kg/s	20 K	2 m <sup>2</sup>	0.8 % (2.4 %)	32 W <sub>el</sub>
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	160	0.074 kg/s	30 K	3.7 m <sup>2</sup>	1.1 % (3.6 %)	130 W <sub>el</sub>
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	240	0.11 kg/s	40 K	5.5 m <sup>2</sup>	1.5 % (4.7 %)	330 W <sub>el</sub>
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	340	0.16 kg/s	43 K	5.3 m <sup>2</sup>	2.5 % (5.8 %)	900 W <sub>el</sub>

Figur 26: Ergebnisse Szenario 1b für Materialien mit  $ZT \sim 3$



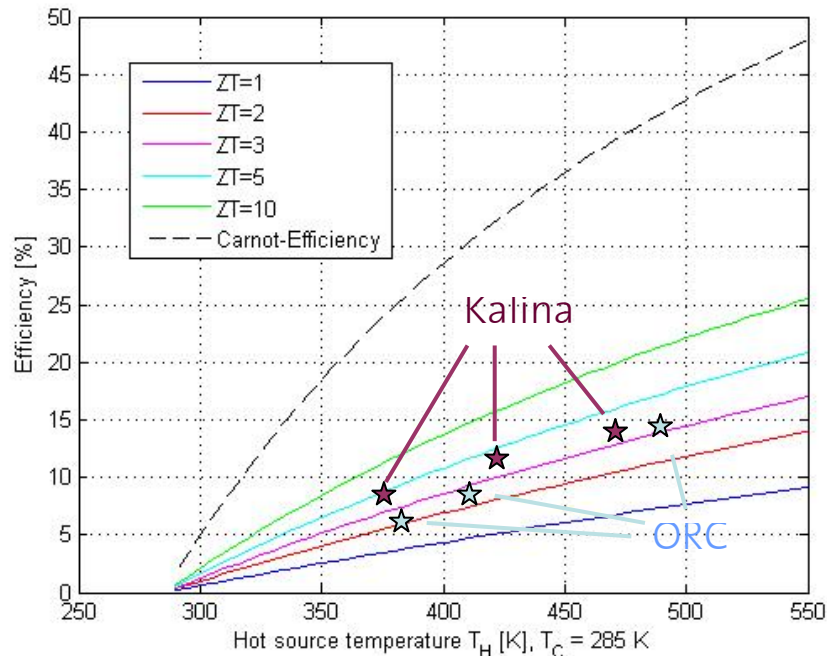


Erdsonden - tiefe	Temperatur	Therm- ische Leistung	Anzahl Per- sonen	Gewählter Massen- strom (kalt)	Temperatur- anstieg Warmwasser	TEG- Fläche	Wirkungs- grad (max)	Result. elektrische Leistung
1000 m	40°C (313 K)	17 kW <sub>th</sub>	80	0.04 kg/s	20 K	2 m²	1.25 % (4 %)	50 W <sub>el</sub>
1500 m	55°C (328 K)	32 kW <sub>th</sub>	160	0.074 kg/s	32 K	3.7 m²	1.75 % (6 %)	205 W <sub>el</sub>
2000 m	70°C (343 K)	48 kW <sub>th</sub>	240	0.11 kg/s	44 K	5.5 m²	2.3 % (7.8 %)	550 W <sub>el</sub>
2500 m	85°C (358 K)	70 kW <sub>th</sub>	340	0.16 kg/s	43 K	4.6 m²	4.3 % (9.6 %)	1660 W <sub>el</sub>

Figur 27: Ergebnisse Szenario 1b für Materialien mit  $ZT \sim 10$

## 5. Diskussion

Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 und Figur 28 zeigen, dass die mit heutigen Materialien erreichbaren Wirkungsgrade für die Generierung von elektrischer Energie aus thermischen Quellen wie Geothermie, Solarthermie etc., gegenüber konventionellen thermodynamischen Kreisläufen klein sind. Das Potenzial zur Verbesserung ist jedoch gegeben und wird anhand der verschiedenen variierten Parameter analysiert.



**Figur 28:** Vergleich der Wirkungsgrade TEG (verschiedene Materialien,  $ZT$ ) – konventionelle Methoden

Die Betriebsweise des Generators  $0 < X < 1$  wurde bereits am Beginn von Abschnitt 4 erläutert. Die Figuren 11 und 12 zeigen, dass immer ein Kompromiss zwischen maximaler Leistung und maximalem Wirkungsgrad gefunden werden muss.  $X$  kann bei gegebener Ausführung des TEG (definierte Abmessungen) über den Massenstrom gesteuert werden. Somit hat man auch die Möglichkeit die Ausgangstemperaturen der Arbeitsfluide an der warmen und kalten Seite des TEG in einem gewissen Bereich an eventuelle nachfolgende Nutzungen anzupassen.

Der allgemeine Wärmeübertragungskoeffizient vereint alle thermischen Widerstände zwischen Fluid und den jeweiligen Enden der thermoelektrischen Schenkel und ist stark von den Strömungsbedingungen abhängig. Die Abhängigkeit von elektrischer Leistung und Wirkungsgrad sind in den Figuren 13 und 14 dargestellt. Kleinere thermische Widerstände der Kontaktschichten (hauptsächlich elektrische Isolation) und grössere Nusseltzahlen (dimensionslose Kennzahl – beschreibt den Wärmeübergang von und zu strömenden Medien) ergeben einen höheren Wärmeübertragungskoeffizienten, was zu einer Erhöhung der wirksamen Temperaturdifferenz an den Schenkeln führt und somit grössere elektrische Leistungen und bessere Wirkungsgrade bewirkt.

Die Figuren 15 und 16 zeigen die Abhängigkeit von Ausgangsleistung und Wirkungsgrad für verschiedene Längen der thermoelektrischen Schenkel. Es ist leicht ersichtlich, dass sich mit wachsender Schenkellänge die Leistungscharakteristik im Bereich kleiner Schenkellängen (bis 1 cm) stark verbessert.

Dabei ist folgendes zu beachten: Mit dem hier verwendeten Modell wird aus einem gegebenen Wärmestrom, beschrieben durch die Eingangstemperaturen und die dimensionslose Länge  $X$ , die maximale elektrische Leistung ( $X=1$ ) gewonnen. Mit steigender Schenkellänge steigt der thermische Widerstand des Generators an. Um bei gegebener Temperaturdifferenz den gleichen Wärmestrom zu nützen muss die Wärmetauscherfläche und somit der Querschnitt des thermoelektrischen Materials erhöht werden. Da mit steigender Schenkellänge der Wirkungsgrad steigt, kommt es somit auch zu einer Erhöhung der elektrischen Leistung. Das dadurch vergrösserte Volumen an thermoelektrischem Material führt aber zu markant höheren Investitionskosten.

Die spezifische Leistungsdichte  $S = P/A$  stellt einen praktischen Wert für die Optimierung der Grösse eines thermoelektrischen Generators dar. Aus Figur 17 ist ersichtlich, dass für die in Tabelle 1 gegebenen Spezifikationen die optimale Schenkellänge 2,5 - 3 mm betragen würde, was gleichzeitig eine Querschnittsfläche des thermoelektrischen Materials (Wärmetauscherfläche) von ca. 1500 m<sup>2</sup> (siehe Figur 18, gross) bedeuten würde. Aus den Figuren 15 und 16 ist ebenfalls ersichtlich, dass eine weitere Vergrösserung der Schenkellänge über 1 cm nur noch kleine Verbesserungen für Ausgangsleistung und Wirkungsgrad bringen, die Grösse und somit die Kosten des thermoelektrischen Generators jedoch konstant weiter ansteigen (siehe Figur 18, klein).

In der klassischen Theorie für Thermoelemente nimmt die Gütezahl  $ZT$  als die die Materialeigenschaften vereinende Grösse Einfluss auf den Wirkungsgrad. Bei der Behandlung als TEG in einem Wärmetauscher unter Berücksichtigung von thermischen und elektrischen Kontakteffekten ist dies jedoch anders. Wie beim Vergleich der Figuren 19 und 20 ersichtlich bringt eine Senkung der thermischen Leitfähigkeit gegenüber einer Erhöhung des Seebeckkoeffizienten bei gleichem  $ZT$  eine wesentlich grössere Erhöhung des Wirkungsgrades.

## 6. Schlussfolgerungen

Zum heutigen Zeitpunkt haben thermoelektrische Systeme zur reinen Elektrizitätserzeugung aus thermischer Energie im Bereich von 100°C bis 300°C aufgrund ihres schlechten Wirkungsgrades gegenüber anderen Energieumwandlungstechnologien (ORC-Anlagen\*\*, Kalina-Prozesse\*\*) kein Durchsetzungspotential. Der Grund für den schlechten Wirkungsgrad sind die heute verfügbaren Materialien mit einem Gütefaktor  $ZT$  von maximal 1. Um in diesem Segment konkurrenzfähig zu werden müsste sich die Gütezahl  $ZT$  auf einen Wert von mindestens 3 bis 5 erhöhen.

Für die Nutzung von thermischer Energie mit Temperaturen < 100°C, wie es ein grosser Teil der sogenannten „Abfallwärme“ darstellt sind thermoelektrische Wandler bezüglich der grundsätzlichen Machbarkeit konkurrenzlos. Dies soll heissen, dass es für Temperaturen unter 100°C und speziell für kleine Temperaturdifferenzen in der Nähe der Umgebungstemperatur keine Verfahren zur Konversion von Wärme in elektrische Energie gibt. Eine verbreitete Meinung hierzu ist, dass die thermische Energie hier in den meisten Fällen kostenlos zur Verfügung steht und der schlechte Wirkungsgrad somit eine untergeordnete Rolle spielen würde. Für die Generierung von elektrischer Energie, speziell in grossen Leistungsbereichen (kW-MW), spielen jedoch die spezifischen Investitionskosten (Kosten/kW) eine grosse Rolle. Diese steigen mit fallendem Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Quelle exponentiell an und liegen bei einem vielfachen dessen, was andere Energieerzeugungstechnologien erfordern. Dies bedeutet, dass auch die resultierenden Stromgestehungskosten (35 – 55 Rp./kWh für  $\Delta T = 55-65^\circ\text{C}$  und ca. 100-120 Rp./kWh für  $\Delta T = 15-25^\circ\text{C}$ , bei jeweils 20°C Kühltemperatur, Lebensdauer 30 Jahre) weit über denen von erneuerbaren Energieerzeugungstechnologien, die keine thermischen Quellen nutzen, wie Windenergie oder Photovoltaik, liegen. Dies gilt auch für Anwendungen im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung. Die Stromgestehungskosten sind grobe Abschätzungen ausschliesslich basierend auf den Preisen/Kosten für heute erhältliche thermoelektrische Module unter Berücksichtigung der verminderten Leistungsausbeute bei kleineren Temperaturdifferenzen.

Interessante Anwendungen im Bereich der Nutzung von Abwärmern liegen heute eher im Bereich kleiner Leistungen und dienen maximal zur Deckung des Systemeigenbedarfs (Steuer- und Regeltechnik, Pumpen,...)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass elektrische Energieerzeugung in grossen Leistungsklassen (kW-MW) auf Basis Thermoelektrik nach heutigem Stand der Technik keine machbare Option darstellt. Die Forderung geht ganz klar in Richtung effizientere thermoelektrische Materialien. Mit den verstärkten Anstrengungen in der Materialwissenschaft scheint dies mittelfristig auch durchaus machbar. Die Kosten dieser Materialien sollten jedoch die für heute erhältliche Materialien auf keinen Fall überschreiten.

*\*\* Der Organic Rankine Cycle (ORC) und der Kalina Prozess sind Verfahren für den Betrieb von Dampfturbinen zur elektrischen Energieerzeugung mit anderen Arbeitsmitteln als Wasserdampf. Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten (ORC) mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur bzw. Ammoniak - Wasser Gemische (Kalina) verwendet. Die Verfahren kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke zu niedrig für den Betrieb einer von Wasserdampf angetriebenen Turbine ist. Dies ist vor allem bei der Stromerzeugung mit Hilfe der Geothermie, der Kraft-Wärme-Kopplung sowie bei Solarkraftwerken und Meereswärmekraftwerken der Fall.*

### **Clausius - Rankine Kreislauf mit organischen Arbeitsfluiden (Organic Rankine Cycle, ORC)**

Der ORC Prozess basiert grundsätzlich auf den gleichen Zustandsänderungen wie der klassische Clausius - Rankine Kreislauf. Das Arbeitsmedium wird erwärmt, verdampft und überhitzt. Der überhitzte Dampf wird in einer Turbine, die einen elektrischen Generator antreibt, entspannt und in weiterer Folge im Kondensator durch Wärmeentzug verflüssigt. Mit einer Speisepumpe wird der Druck des flüssigen Arbeitsmediums wieder erhöht. Der wesentliche Unterschied liegt in den Prozessparametern Druck und Temperatur. Beide liegen weiter unter den Werten von Dampfkraftwerken (Arbeitsmedium - Wasser). Zur Zeit werden kurzkettige Kohlenwasserstoffe (wie z.B. Iso-Pentan) und Silikonöle verwendet. Folgende verschiedene Fragestellungen und Probleme treten bei ORC Anlagen auf.

Die benötigten Turbinen sind meist Sondermaschinen: organische Arbeitsmedien unterscheiden sich stark von Wasser (Wärmekapazität, Dichte) und sind oft auch chemisch aggressiv (Oberflächenschutz für alle mit dem Medium in Kontakt kommenden Komponenten). Zusätzlich aufwendige Dichtung der Kreisläufe (Ökologie)

### **Kalina – Kreislauf (Kalina Cycle)**

Der Kalina-Kreislauf ist ein Kraftwerksprozess (unzählige verschiedene Patente), bei dem als Arbeitsmittel ein Ammoniak – Wasser Gemisch eingesetzt wird. Ammoniak ist die leichter flüchtige Komponente, Wasser dient als Lösungsmittel. Die Phasenübergänge der Verdampfung und Kondensation werden im Kalina-Prozess durch eine Desorption bzw. Absorption ersetzt. Die entsprechenden Komponenten werden daher als Absorber (statt Kondensator wie bei Einstoffarbeitsmitteln) und Desorber (statt Verdampfer) bezeichnet. Beide Vorgänge sind nicht isotherm. Im Wesentlichen entsprechen die Kalina Kreisläufe einem Clausius-Rankine - Prozess mit einem hohen Grad an interner Wärmerückgewinnung sowie zusätzlichen Destillations- und Rektifikationseinheiten. Die Verschaltung der internen Wärmeübertrager sowie das Ergänzen bzw. Weglassen der Rektifikationseinheiten soll eine gute Anpassung an einen weiten Temperaturbereich möglicher Wärmequellen erlauben.

## Symbolverzeichnis

Parameter	Beschreibung	Einheit
$q_H, q_L$	Wärmestrom	[J/s] = [W]
$A_0$	Kontaktfläche der Keramik	m <sup>2</sup>
$A_n, A_p$	Kontaktfläche der Halbleiter	m <sup>2</sup>
$h_H, h_L$	Wärmeübertragungskoeffiziente	[W/m <sup>2</sup> K]
$T_H$	Temperatur auf der warmen Seite des TE-Schenkels	[K]
$T_H^{in}$	Einlauftemperatur des Fluids an der warmen Seite des Wärmetauschers	[K]
$T_L$	Temperatur auf der kalten Seite	[K]
$T_L^{in}$	Einlauftemperatur des Fluids an der kalten Seite des Wärmetauschers	
$T_W$	Temperatur der Halbleiter auf der warmen Seite	[K]
$T_C$	Temperatur der Halbleiter auf der kalten Seite	[K]
$\Delta T_{teg}$	Wirksame Temperaturdifferenz an den Schenkeln	[K]
$K$	Wärmefluss durch die Halbleiter (einzelnes Couple)	[W/K]
$A$	Seebeck-Koeffizient	[V/K]
$R$	Innerer Widerstand eines Elements (einzelnes Couple)	[ $\Omega$ ]
$R_L$	Lastwiderstand	[ $\Omega$ ]
$R_C$	Kontaktwiderstand	[ $\Omega$ ]
$R^*$	Effektiver Innenwiderstand eines Elements	[ $\Omega$ ]
$\Delta$	$\delta = RC/R$	[-]
$\lambda_n, \lambda_p$	Wärmeleitfähigkeit der Halbleiter	[W/m/K]
$\rho_n, \rho_p$	Elektrische Leitfähigkeit der Halbleiter	[m]
$D$	Schichtdicke der Halbleiter	[m]
$l_c$	Schichtdicke des Kontaktlayers	[-]
$C_p$	Wärmekapazität des Arbeitsmediums	[J/kgK]
$m_H, m_L$	Masseströme des Arbeitsmediums	[kg/s]
$I$	Strom	[A]
$V$	Spannung	[V]
$P_{el}$	Elektrische Leistung	[W]
$H$	Wirkungsgrad	[-]
$\eta_C$	$\eta_C = 1 - T_L/T_H$ , Carnotwirkungsgrad	[-]
$N$	Anzahl in seriegelgeschalteter Thermoelemente	[-]
$Z$ bzw. $ZT$	Thermoelektrische Gütezahl	[1/K] bzw. [-]
$\beta^*$	Leistungskorrekturfaktor	[-]
$E$	$R^*/R$	[-]



## Referenzen

- [1] A. Bethancourt, R. Echigo, and H. Yoshida. Thermoelectric conversion analysis in a counter-flow heat exchanger. In 12<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics, volume 12, pages 299-304 American Institute of Physics, 1994.
- [2] M. H. Cobble, Analysis of thermoelectric device having contact resistance. In 11<sup>th</sup> International Conference of Thermoelectrics, pages 218-222. IEEE, 1992
- [3] M. H. Cobble, Handbook of Thermoelectrics, chapter 39, pages 489-501, CRC press, Inc. 1995.
- [4] D. T. Crane and G. S. Jackson, Optimization of cross-flow heat exchangers thermoelectric waste heat recovery, Energy Conversion & Management , pages 1565-1582, 2004
- [5] L. H. Dubois, An introduction to the DARPA program in advanced thermoelectric materials and devices. In 18<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics, pages 1-4, 1999
- [6] H. J. Goldsmid, Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, chapter 10 – A New Upper Limit to the Thermoelectric Figure of Merit, pages 10.1-10.10. Taylor & Francis, 2006
- [7] T. E. Humphrey and H. Linke. Reversible thermoelectric nanomaterials; Physical Review Letters, pages 096601-01-096601-1, 2005.
- [8] S. Kilgrow, A. Geirsson, and T. Sigfusson. Harnessing of low temperature geothermal and waste heat using power chips in varmaraf heat exchangers. In International Geothermal Conference, pages 49-56, Reykjavik, 2003.
- [9] Y. Kucherov, P. Hagelstein, and V. Sevastyanenko. Energy Conversion using diode like structures. In 21<sup>st</sup> International Conference on Thermoelectrics, pages 431-434, IEEE, 2002.
- [10] B. Mathiprakasham, T. Sutikno, and J. Beeson. Analytical Model for predicting the performance of thermoelectric generators. In Proceedings of the 4<sup>th</sup> international conference on thermoelectric energy conversion, pages 61-66, 1982.
- [11] K. Matsuura and H. Kinoshita, An improved method in generating thermoelectric power from low-grade heat. In Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on thermoelectric energy conversion, pages 10-17, 1984.
- [12] K. Matsuura and D. M. Rowe. Handbook of Thermoelectrics, chapter 44, pages 573-593, CRC Press, Inc., 1995.
- [13] K. Matsuura, D. M. Rowe, K. Koumoto, G. Min, and A. Tsuyoshi. Design optimisation for a large scale, low temperature thermoelectric generator. In 11<sup>th</sup> International Conference On Thermoelectrics, pages 10-16. IEEE, 1992
- [14] D. M. Rowe and G. Min. Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation, In IEE Proc.-Sci.Meas.Technol., volume 143, pages 351-356. IEE, November 1996.
- [15] R. O. Suzuki and D. Tanaka. Mathematical simulation of thermoelectric power generation with multi-panels. Journal of Power Sources, pages 201-209, February 2003.
- [16] C. Wu. Specific power analysis of thermoelectric otec plants. Ocean Engineering pages:433-442, 1993.

## Anhang

Anhang A: siehe folgende Seiten

Anhang A ist ein Auszug einer Studienarbeit (Damian Schneider) mit dem Titel „Thermoelektrische Energieerzeugung in Wohnhäusern“. Die folgenden Seiten zeigen eine kurze allgemeine Einführung zu thermoelektrischen Generatoren, detaillierte Beschreibungen von möglichen Szenarien und die Ergebnisse von dynamischen Simulationen zweier ausgewählter Applikationen.

## 2 Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren (TEG's) sind Halbleiterelemente die aus Wärme direkt elektrische Energie erzeugen. Dazu wird eine Seite des Elements gekühlt und die andere Seite erwärmt. Durch die Auswirkungen des Seebeck-Effekts wird dadurch eine Spannung und ein Strom erzeugt.

Im Gegensatz zu mechanischen Energiewandlern sind Seebeck-Elemente vergleichsweise einfach aufgebaut und besitzen keinerlei bewegliche Teile. Die elektrische Energie wird so absolut geräuschlos und äusserst zuverlässig produziert, genau wie bei photovoltaischen Zellen. Die grossen Nachteile liegen heute allerdings in den hohen Produktionskosten und im sehr schlechten Wirkungsgrad von maximal 4%.

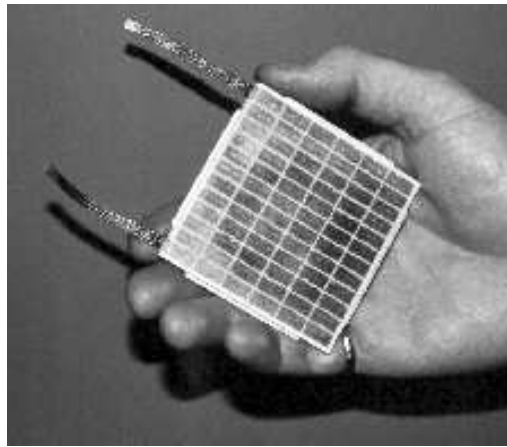


Abbildung 1: 19 Watt Modul der Firma Hi-Z Technology, Inc. [b]

### 2.1 Der Seebeck-Effekt

Wird ein elektrischer Leiter ungleichmässig erwärmt, so dass ein Temperaturgradient entsteht, ist das Fermi-niveau (auch chemisches Potential genannt) entlang des Leiters nicht mehr konstant. Es driften Elektronen vom höher liegenden Leitungsband der warmen Seite zum tiefer liegenden Leitungsband der kalten Seite und bauen dabei ein elektrisches Feld auf [1]. Dieser Effekt wird als Thermodiffusion bezeichnet und ist die Grundlage für den Seebeck-Effekt. Das so entstandene Ungleichgewicht der Elektronenverteilung hat einen Driftstrom in die entgegengesetzte Richtung zur Folge, so dass sich die beiden Ströme zu null addieren. Es bleibt dabei eine messbare Spannung zurück, die nach ihrem Entdecker Thomas Seebeck benannt ist

und sich nach der Formel

$$U_{Seebeck} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

berechnet. Die Richtung der Spannung ist jeweils vom warmen, energetisch höherliegenden zum kalten, energetisch tieferliegenden Teil des Materials, falls Elektronen die Hauptladungsträger sind, wie das in n-dotierten Halbleitern oder Metallen der Fall ist die einen negativen Seebeckkoeffizienten haben. Damit dieser Effekt genutzt werden kann, sind zwei elektrisch leitende Materialien mit unterschiedlichem Fermi-niveau notwendig, damit sich die entgegengesetzten Temperaturgradienten (kalt-warm-kalt) nicht aufheben [2]. Werden die beiden Metalle bzw. Halbleiter wie in Abbildung 2 gezeigt angeordnet und erwärmt, so entsteht eine Spannung von

$$U = \alpha_1(T_A - T_H) + \alpha_2(T_H - T_C) + \alpha_1(T_C - T_A) = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_H - T_C) \quad (2)$$

Die entstehende Spannung ist also nur abhängig von der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen sowie den materialspezifischen Seebeckkoeffizienten  $\alpha_i$ . Damit der Term  $\alpha_2 - \alpha_1$  möglichst gross wird, wird ein Material mit negativem (n-dotierter Halbleiter) und eines mit positivem (p-dotierter Halbleiter) Seebeckkoeffizient eingesetzt.

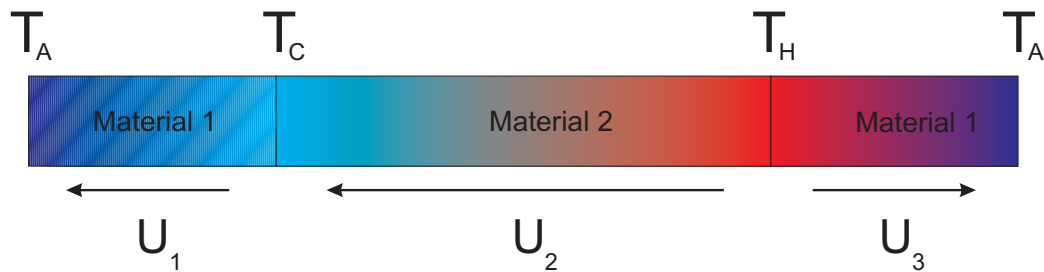


Abbildung 2: Anwendung des Seebeck Effekts als thermoelektrisches Element

## 2.2 Problematik der Materialien

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, müssen die verwendeten Materialien den elektrischen Strom möglichst gut leiten, thermisch aber isolierend wirken - ein physikalischer Gegensatz, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Werden die Elemente allerdings in einem Wärmetauscher eingesetzt um die Verlustwärme zu nutzen, muss auch die thermische Leitfähigkeit hoch sein, damit möglichst viel Wärme übertragen wird, allerdings ist dann mit einem äusserst schlechten elektrischen Wirkungsgrad zu rechnen.

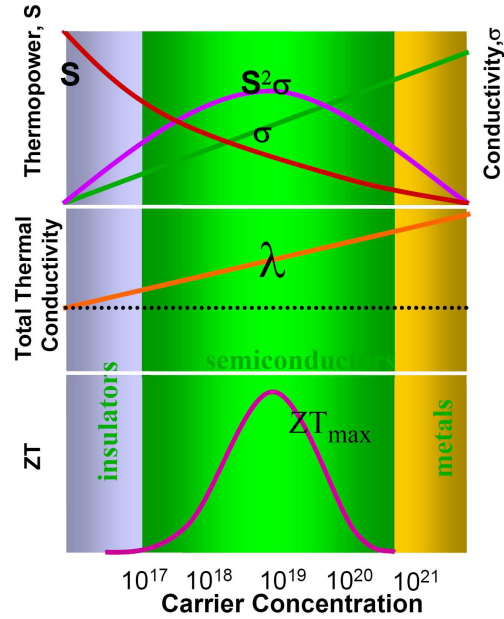


Abbildung 3: Physikalische Eigenschaften der Materie [a].

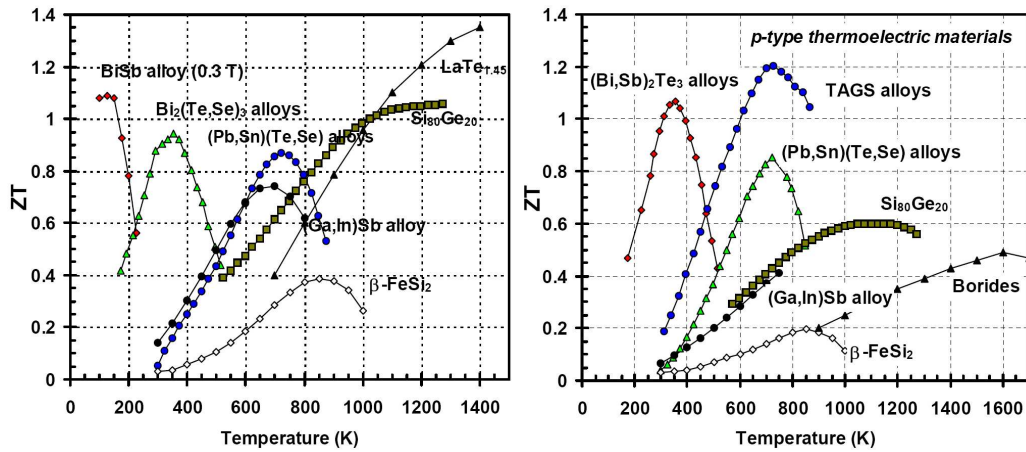


Abbildung 4: Temperaturbereiche in denen die verschiedenen Halbleitermaterialien einsetzbar sind, links n-dotierte und rechts p-dotierte Halbleiter [a].

Die maximale elektrische Leistung eines Generators berechnet sich nach der Formel  $P = \frac{U_0}{4R^*}$ , wobei  $R^*$  den effektiven Innenwiderstand bezeichnet. Man erhält also durch Erhöhung der Spannung eine höhere Leistung. Die Spannung wächst nach Gleichung (2) linear mit dem Temperaturunterschied zwischen kalter und warmer Seite. Für hohe Leistungen ist also ein möglichst

grosses Temperaturgefälle anzulegen. Innerhalb eines grossen Temperaturgefälles müssen allerdings verschiedene Materialien verwendet werden [4], wie die Abbildung 4 verdeutlicht. Eine solche Schichtung verschiedener Materialien macht den Herstellungsprozess komplizierter und verteuert somit das Endprodukt beträchtlich.

Momentan werden die besten Resultate mit Bismuth-Tellurid ( $Bi_2Te_3$ ) erzielt (grosser Seebeckkoeffizient). Sowohl Bismuth als auch Tellur sind seltene Elemente und deshalb teuer. Der Marktpreis von Bismuth ist etwa doppelt so hoch wie der von Kupfer und der von Tellur ist etwa um einen Faktor vier höher und liegt bei 31\$ pro Kilogramm [7]. Der Einsatz dieses Materials beschränkt sich aber auf Temperaturen von maximal 250°C und so sind Anwendungen mit hohem Carnotwirkungsgrad nicht möglich.

## 2.3 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine kann bestenfalls dem Carnotwirkungsgrad entsprechen. Die Gleichung dazu lautet  $\eta_C = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ . In einem Haushalt treten ausser in einem Heizofen oder Kochherd kaum Temperaturen über 80°C auf, was mit einer Umgebungstemperatur von 20°C zu einem Carnotwirkungsgrad von

$$\eta_c = 1 - \frac{293K}{317K} = 7.6\% \quad (3)$$

führt.

Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Elemente liegt allerdings weit unter diesem theoretisch erreichbaren Wert<sup>1</sup>. Bei momentan erhältlichen Generatoren liegt dieser im Bereich von  $\eta_{el} = 0.5\% - 1\%$  [5] und wird aufgrund des weiter oben genannten Problems der Materialien auch in Zukunft kaum mehr als 3% betragen. Bezogen auf den Carnotwirkungsgrad ergibt sich aber immerhin ein Wirkungsgrad von  $\eta_{el}/\eta_C = 10\%$

Mechanische Wärmekraftmaschinen haben im Vergleich dazu einen etwas höheren Wirkungsgrad. Je nach Art der Maschine liegt dieser zwischen 10% (z.B. Dampfmaschine) und 65% (z.B. Dieselmotor) wobei anzumerken ist, dass der Carnotwirkungsgrad bei solchen Maschinen viel höher ist, denn bei der Verbrennung entstehen Temperaturen von bis zu 2500°C und somit ergibt sich ein Carnotwirkungsgrad von 87% [3]. Ein Ottomotor, wie er in den meisten Autos verwendet wird, erreicht einen Wirkungsgrad von 25% [6]. Stehen also hohe Temperaturen zur Verfügung, ist heutzutage der Einsatz einer mechanischen Wärmekraftmaschine sicher sinnvoller als der von thermoelektrischen Elementen.

---

<sup>1</sup>Der Carnotwirkungsgrad kann in der Praxis nie erreicht werden

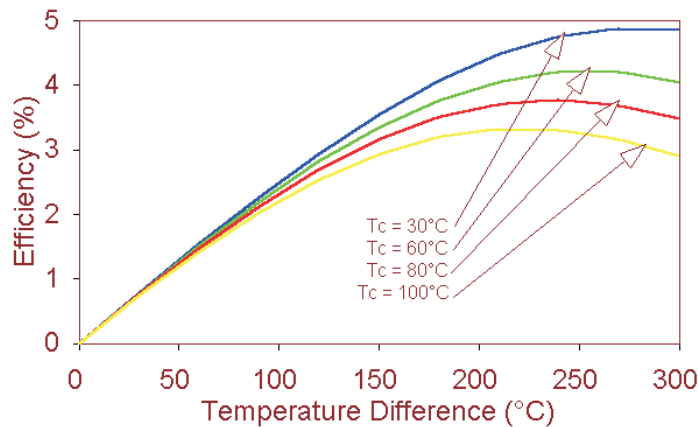


Abbildung 5: Effizienz eines aktuellen Seebeck-Elements der Firma Hi-Z Technology Inc. in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz [b].

Der schlechte Wirkungsgrad macht den Einsatz als Generatoren die aus Primärenergie Elektrizität erzeugen nicht gerade attraktiv. Wird allerdings die Abwärme der Elemente weiter genutzt, so ist der schlechte Wirkungsgrad tragbar, denn der Gesamtwirkungsgrad d.h. Abwärme und Elektrische Leistung beträgt nahezu 100%. Diese Tatsache macht die Verwendung von Seebeck-Elementen überall da sinnvoll, wo ein Wärmestrom zum Aufheizen eines Mediums verwendet wird wie zum Beispiel in Wärmetauschern. Dabei muss man sich aber bewusst sein, dass der Wirkungsgrad des Wärmetauschers verschlechtert wird, wenn die verwendeten Materialien eine niedrige thermische Leitfähigkeit besitzen. Werden allerdings Materialien mit hoher thermischer Leitfähigkeit eingesetzt, sinkt der Wirkungsgrad der Thermoelemente stark ab und es wird kaum elektrische Leistung erzeugt.

## 2.4 Stand der Technik

Seit anfangs der 1960er Jahre Bismuth-Tellurid zur Herstellung von Seebeck-Elementen entdeckt wurde, haben sich keine grossen technischen Veränderungen mehr gezeigt. Zwar wurden verschiedene Aspekte genau untersucht, es wurden jedoch keine neuen guten Materialien gefunden. Die Verwendung liegt deshalb heute im Bereich von Spezialanwendungen, in denen die Vorteile von TEG's den schlechten Wirkungsgrad überbieten.

Der Wirkungsgrad kommerziell erhältlicher Module liegt mit einer Temperaturdifferenz von  $200^\circ\text{C}$  bei 4% (Abbildung 5). Eine höhere Temperaturdifferenz ist mit Bismuth-Tellurid nicht möglich, da sich das Material bei

Temperaturen über 250°C zu zersetzen beginnt [4]. Ein 19-Watt Modul der Firma Hi-Z Technology Inc. (Abbildung 1) kostet momentan 189\$, ein weiterer Grund warum nur Spezialanwendungen möglich sind [5].

## 2.5 Zukunftsaussichten und Prognosen

Durch Verbesserung der eingesetzten Materialien kann der Wirkungsgrad noch gesteigert werden, indem höhere Temperaturen möglich werden und somit ein besserer Carnotwirkungsgrad erzielt wird. Die Produktionskosten sinken aber erst, wenn der Markt grosse Mengen an Thermogeneratoren benötigt und Grossserien produziert werden können.

Eine Verbesserung des Materials heisst ausserdem Steigerung des Z-Werts, der vom Seebeckkoeffizient, der thermischen sowie der elektrischen Leitfähigkeit abhängig ist und nach  $Z = \frac{\alpha^2}{\rho\lambda}$  berechnet wird. Allgemein wird Z noch mit der Temperatur multipliziert und als thermoelektrische Gütezahl  $ZT$  angegeben. Bei heute erhältlichen Materialien liegt der Wert bei  $ZT = 1$ , im Forschungsbereich sind sogar schon Materialien mit  $ZT = 4$  bekannt [8]

Momentan wird mit so genannten "Quantum well materials" experimentiert, die einen hohen Z-Wert besitzen [5]. Ausserdem sind die Rohstoffe zur Herstellung solcher Materialien viel günstiger als Bismut und Tellur. Theoretisch sollen so die Produktionskosten um einen Faktor 10 gesenkt und der Wirkungsgrad um denselben Faktor erhöht werden. Sollten diese hoch gesteckten Ziele erreicht werden, könnten thermoelektrische Elemente mit Wärmekraftmaschinen konkurrenzieren. Ob ein solches Material aber wirklich hergestellt werden kann ist fraglich.

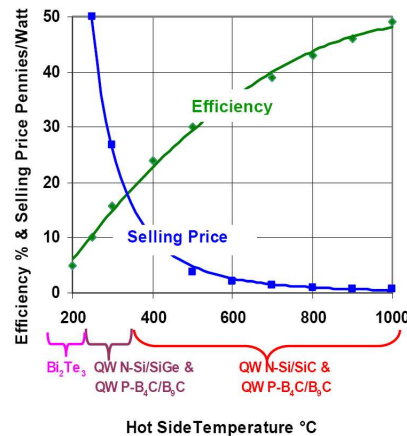


Abbildung 6: Wirkungsgrad und Preis pro Watt bei zukünftigen Materialien mit "Quantum well"-Technologie [b]



In dieser Arbeit wird für eine Zukunftsprognose ein fiktives Material angenommen, indem der Z-Wert von Bismuth-Tellurid um einen Faktor erhöht wird. Dazu wird  $\alpha$  mit einem Faktor 1.3 Multipliziert und die thermische bzw. die elektrische Leitfähigkeit um einen Faktor 2 bzw. Faktor 1.3 verringert. Dadurch wird der Z-Wert um einen Faktor 4.4 erhöht was bei einer Temperatur von 20°C zu einer thermoelektrischen Güteziffer  $ZT = 3$  führt.

tung lag dabei zwischen 5 und 10 Watt, je nach Umgebungstemperatur. Dies ist zwar keine sehr hohe Leistung, dieser Strom wird aber geräuschlos und ohne zusätzliche Brennstoffkosten zuverlässig geliefert und kann beim Einsatz weiterer Thermoelemente noch erhöht werden.

In einer weiteren Studie wurde der Einbau von Thermogeneratoren in einen konventionellen Gasofen für netzunabhängigen Betrieb untersucht [17]. Die eingesetzten Module gaben während der Betriebszeit eine Leistung von 109 Watt bei einem Wirkungsgrad von 0.85% ab, was für eine Eigenversorgung ausreichend war. Der Gesamtwirkungsgrad (thermisch und elektrisch) entsprach mit 86% etwa dem eines Gasofens ohne Generator.

Will man allerdings auch extern nutzbare Leistung erzeugen, muss der Wirkungsgrad der Thermogeneratoren erhöht werden. Dadurch könnte sich aber der Gesamtwirkungsgrad aufgrund der Beeinträchtigung des Wärmetauschers verringern<sup>5</sup>. Für eine grobe Abschätzung dieses Konzepts wird ein Holzofen für die Beheizung eines Einfamilienhauses untersucht. Ein solcher Holzofen hat eine Leistung von ca. 15kW und die Brennkammertemperatur beträgt ungefähr 800°C - 900°C. Über einen Gegenstromwärmetauscher wird das Wasser des Speichers, mit einer Temperatur von 60°C, aufgeheizt. Da der Temperaturunterschied gross ist, könnte ein Wirkungsgrad von bis zu 4% möglich sein. Bei einer thermischen Leistung von 15kW führt dieser Ansatz zu einer maximalen elektrischen Leistung von 600 Watt, was für eine Eigenversorgung der Anlage ausreichend wäre und sogar überschüssige Leistung erzeugen würde. Real kann allerdings niemals die gesamte Energie des heissen Gases auf das Heizwasser übertragen werden und vor allem ist die Wärmeübergangszahl vom heissen Rauchgas auf den thermoelektrischen Generator relativ klein. So ist es fraglich, ob ein Wirkungsgrad von 4% erreicht werden kann, sodass die 600 Watt elektrische Leistung in der Praxis nicht möglich sind. Eine genaue Berechnung ist mit dem in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Modell nicht möglich, denn es werden gleiche Masseströme und vor allem das gleiche Wärmeträgermedium auf beiden Seiten des Wärmetauschers vorausgesetzt.

Im Bereich der Nutzung des Heizofens zur Elektrizitätsgewinnung gibt es momentan vielversprechende Ansätze mit Stirlingmotoren. Diese werden mit Erdgas betrieben und produzieren eine elektrische Leistung von bis zu 1kW. Eine detailliertere Ausführung davon ist im Anhang in Abschnitt B zu finden.

## 4.2 Solaranlagen

Thermische Solaranlagen versprechen grundsätzliches Potential in Kombination mit thermoelektrischen Generatoren. Der Wärmestrom fliesst bei Son-

---

<sup>5</sup>siehe Abschnitt TEG's in einem Wärmetauscher

nenschein bis zu acht Stunden am Tag. Die Wassertemperaturen um die 100°C sind zu niedrig, um damit konventionelle, mechanische Wärmekraftmaschinen zu betreiben. Wird ein Kollektorfeld mit höheren Temperaturen betrieben, sinkt der Wirkungsgrad von Flachkollektoren auch mit einer so genannten selektiven Beschichtung<sup>6</sup> unter 10% und der Betrieb wird unwirtschaftlich [19]. Vakuumröhrenkollektoren haben zwar einen höheren Wirkungsgrad und auch einen höheren Arbeitsdruck, bei Temperaturen von über 120°C geht aber auch bei solchen Kollektoren der Wirkungsgrad stark zurück. Bei Solaranlagen zur Warmwassererzeugung und zur Heizungsunterstützung wird für Einfamilienhäuser typischerweise eine Gesamtkollektorfläche von 15-30m<sup>2</sup>, je nach individuellen Anforderungen, vorgesehen. Eine solche Anlage wird direkt auf das Hausdach montiert, welches im Normalfall einen Neigungswinkel von 25°-30° hat. Dies ist für unsere Breitengrade suboptimal. Besser wäre ein Anstellwinkel von 50°-60°, um im Winter bei niedrigerem Sonnenstand und kalten Aussentemperaturen maximalen Energieeintrag zu haben. Eine zusätzliche Konstruktion, die eine so steile Montage auf dem Schrägdach ermöglichen würde, ist aber kostspielig und wird deshalb kaum eingesetzt. Bei einer Montage im 25° Winkel ist der Energieeintrag im Hochsommer am grössten, wenn am wenigsten Wärmeleistung benötigt wird [18]. So muss häufig ein Erdregister oder ein Abdeckungsmechanismus zur Kühlung der Anlage vorgesehen werden, damit der Speicher nicht überhitzt. Denn werden die Pumpen der Anlage ausgeschaltet, befindet sie sich im Stillstand und es können Temperaturen von bis zu 200°C auftreten [22]. Das Kühlmittel, ein Wasser-Tyfocon-Gemisch, verdampft, was zu einer Drucküberhöhung führt. Viele Anlagen reagieren trotz Überdruckbehälter sehr empfindlich auf einen solchen Druckanstieg und altern dadurch wesentlich schneller. So ist es besser, den Stillstand zu vermeiden, indem die Anlage auch bei Überkapazität in Betrieb gehalten wird. So wird auch elektrische Hilfsenergie benötigt, obwohl nur ein beschränkter Nutzen daraus entsteht.

Beim Aufheizen eines Schichtspeichers wird die Solaranlage an die unterste und kälteste Schicht angeschlossen, um die Kollektoren auf einer möglichst tiefen Temperatur zu betreiben. Der Wirkungsgrad einer Solaranlage lässt sich mit folgender Gleichung approximativ beschreiben [19]

$$\eta_{coll} = \eta_0 - \frac{C_1 \cdot (T_{coll} - T_{amb})}{\dot{G}_G} - \frac{C_2 \cdot (T_{coll} - T_{amb})^2}{\dot{G}_G} \quad (36)$$

Der Kollektor wird dabei durch die drei kollektorspezifischen Parameter  $\eta_0$ ,  $C_1$  und  $C_2$  beschrieben.  $T_{coll}$  ist die Temperatur des Kollektors,  $T_{amb}$  dessen

---

<sup>6</sup>Eine Selektive Beschichtung bringt einen hohen Absorptionsgrad im sichtbaren Bereich und einen niedrigen Emissionsgrad im Infrarotbereich.

Umgebungstemperatur und  $\dot{G}_G$  die Globalstrahlung, die sich aus Direktstrahlung und Diffusstrahlung zusammensetzt. Der Wirkungsgrad ist also um so höher, je tiefer die Temperatur der Kollektoren ist, wie die Abbildung 10 verdeutlicht. Deshalb wird ein grosser Massestrom  $\dot{m}$  verwendet, normaler-

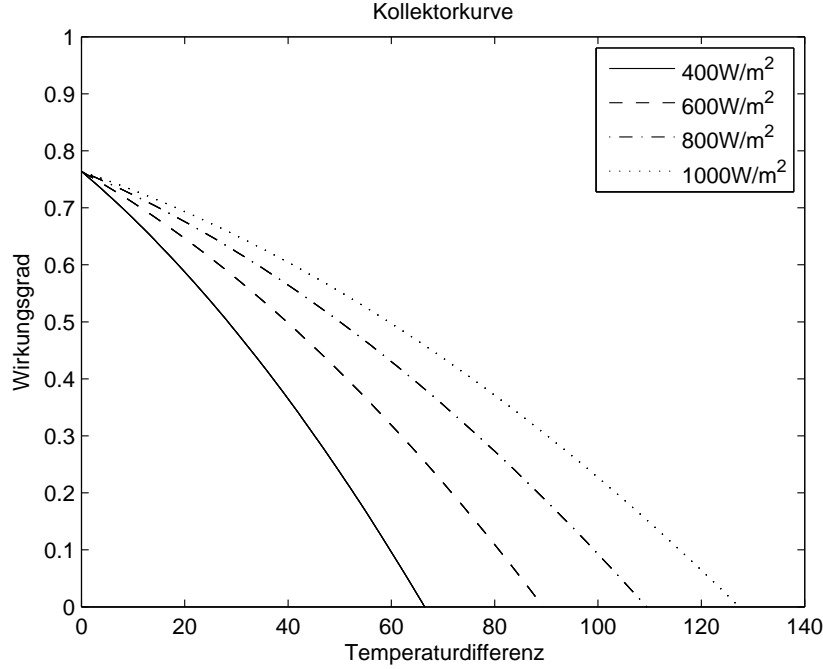


Abbildung 10: Wirkungsgrad eines Flachkollektors (Typ Wagner LB76,  $\eta_0 = 0.76$ ,  $C_1 = 3.07$ ,  $C_2 = 0.02$ ) für Verschiedene Globalstrahlungen in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung.

weise gegen 15 Liter pro Minute [19]. Rechnet man mit einem Wirkungsgrad der Kollektoren von  $\eta_k = 50\%$ <sup>7</sup> und einem solaren Leistungseintrag von  $P_{solar} = 900W/m^2$  erhöht sich die Temperatur des Wassers bei einer Kollektorfläche von  $A_k = 25m^2$  um

$$\Delta T = A_k \frac{\eta_k P_{solar}}{\dot{m} C_p} = 10.8K. \quad (37)$$

Der an einer realen Anlage<sup>8</sup> gemessene Wert beträgt ca.  $15K$  und übertrifft den Wert dieser Überschlagsrechnung, wahrscheinlich wegen eines geringeren

<sup>7</sup>Im Sommer erreichter Durchschnittswert bei einer Flachkollektoranlage mit selektiver Beschichtung bei einer Betriebstemperatur von  $70^\circ C$

<sup>8</sup>Anlage von Leo Schneider in Rieden, St. Gallen

Massestroms. Für den Einsatz von Thermogeneratoren ist dieses Temperaturgefälle sehr niedrig. Der Massestrom der Solaranlage kann aber kaum weiter gesenkt werden, da eine turbulente Strömung garantiert werden sollte damit die Leistung nicht zusammenbricht.

Mit der oben berechneten Temperaturdifferenz ergibt sich ein Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 0.16\%$  bei maximaler elektrischer Leistungsabgabe<sup>9</sup>. Bei einer thermischen Leistung der Solarkollektoren von  $P_{th} = 12kW$  führt dies auf eine elektrische Leistung von nur gerade  $P_{el} = P_{th}\eta_{el} = 19W$ , was nicht einmal für die Pumpe ausreichend wäre. Ausserdem wird durch die thermisch isolierende Wirkung des thermoelektrischen Generators der Wirkungsgrad des Wärmetauschers beeinträchtigt, wie es in Abschnitt A im Anhang erläutert wird. Ein guter Wärmetauscher ist jedoch essentiell für einen hohen Gesamtwirkungsgrad der Solaranlage. Bei Überkapazität könnte die Anlage allerdings auf einer höheren Temperatur betrieben werden, da ein möglichst grosser Energieeintrag nicht von einer so grossen Bedeutung ist. Wählt man dazu eine Kollektorausgangstemperatur auf  $90^\circ C$  und rechnet mit einem Kollektorstromwirkungsgrad von  $35\%$  so ergibt sich bei denselben Bedingungen wie Oben eine thermische Leistung von fast  $8kW$ . Wird eine Speichertemperatur von  $60^\circ C$  angenommen, so muss die dimensionslose Grösse  $X$  auf einen Wert von  $0.34$  gesetzt werden, um bei einem Massestrom von  $0.25kg/s$  diese Leistung zu übertragen. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt dann  $0.6\%$  und es wird eine Leistung von  $45$  Watt erzeugt. Die Wärmespeicherkapazität eines Wasserspeichers ist beschränkt und er heizt sich deshalb innerhalb von einigen Stunden auf, womit die erzeugte Leistung absinkt. Deshalb ist die Einspeisung in ein Erdregister oder eine Erdsonde sinnvoller (siehe Abschnitt 4.4).

## 4.3 Heizungssystem

Ein weiterer Wärmestrom der im Winter und in den Übergangszeiten oft fliesst befindet sich im Heizsystem eines Hauses. Bekannterweise existieren zwei Konzepte um ein Haus mit Wärme zu versorgen: Radiatoren, die viel Wärme über eine relativ kleine Fläche abgeben und die Fussbodenheizung welche die Wärme grossflächig abgibt. Die beiden Systeme unterscheiden sich aber nicht nur in diesem Punkt, wie die folgende Ausführung zeigt.

### 4.3.1 Radiatorheizung

Ein Radiator tauscht die Wärme des Heizwassers mit der kühleren Umgebungsluft. Da ein solches Heizsystem auf relativ kleiner Fläche installiert

---

<sup>9</sup>Maximale Leistungsabgabe erfolgt bei  $X = 1$

ist, werden hohe Wassertemperaturen von über  $60^{\circ}\text{C}$  benötigt, um genügend Energie übertragen zu können, um so den Raum aufzuheizen. Die Luftkühlung hat einen schlechten Wärmeübergang zur Folge und somit auch eine geringe Kühlleistung. Es wird also ein kleiner Massestrom an Heizwasser benötigt. Die thermische Leistung pro Quadratmeter ist wegen der geringen Wärmeübergangszahl vom Radiator auf die Umgebungsluft beschränkt. Der Einsatz von Thermogeneratoren ist deshalb nicht lohnend, denn es müsste eine verhältnismässig grosse Fläche damit ausgestattet werden, was sowohl heute wie auch in Zukunft zu einem extrem hohen Kostenaufwand führt.

#### 4.3.2 Fussbodenheizung

Bei heutigen Neubauten werden bereits 50% der Einfamilienhäuser mit einer Fussbodenheizung anstelle einer Radiatorheizung ausgestattet. Sie bringt ausgeglichene Raumtemperaturen und eine geringere Schichtung der Lufttemperatur [24]. Ausserdem fühlt man sich bei Raumtemperaturen von  $20^{\circ}\text{C}$  etwa gleichwohl, wie bei einem mit Radiator beheizten Raum mit  $22^{\circ}\text{C}$ . Aber nicht nur die niedrigere Raumtemperatur bringt eine Energieersparnis, sondern auch die Tatsache, dass eine Fussbodenheizung mit tieferen Wassertemperaturen betrieben wird: im Gegensatz zu Radiatoren wird nur gerade  $30^{\circ}\text{C}$  bis  $40^{\circ}\text{C}$  warmes Wasser eingesetzt [23]. Vor allem bei Häusern die mit einer thermischen Solaranlage zur Heizungsunterstützung ausgestattet sind, ist diese Einsparung besonders interessant. Die Mehrkosten beim Einbau werden durch den zusätzlichen Komfort und die niedrigeren Jahresenergiekosten in Kauf genommen. Der einzige energetische Nachteil liegt im höheren elektrischen Hilfsenergieverbrauch, da die langen, im Boden verlegten Heizschlangen einen grösseren Druckabfall erzeugen und somit mehr Pumpleistung benötigen.

Das Heizwasser für eine Fussbodenheizung kann entweder aus der untersten und kühlersten Schicht des Warmwasserspeichers oder, falls genügend heisses Wasser zur Verfügung steht, auch über einen mit Thermoelementen ausgestatteten Wärmetauscher aus dem wärmsten Teil des Speichers entnommen werden. Mit der gewonnenen elektrischen Leistung könnten bei genügend Leistung die Zirkulationspumpen betrieben werden.

Die nachfolgende Berechnung zeigt, wieviel Leistung mit Thermoelementen gewonnen werden könnte.

An kalten Tagen benötigt ein Einfamilienhaus zwischen  $5\text{kW}$  und  $10\text{kW}$  Heizleistung [18], deshalb wird hier mit einem Wert von  $7\text{kW}$  gerechnet<sup>10</sup>. Bei einer Vorlauftemperatur von  $35^{\circ}\text{C}$  und einer Rücklauftemperatur von  $30^{\circ}\text{C}$

---

<sup>10</sup>Wert für ein durchschnittlich isoliertes Einfamilienhaus bei einer Aussentemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$

wird ein Massestrom von  $\dot{m} = 0.34 \text{ kg/s}$  benötigt. Wird nun das Wasser im Rücklauf mit einem Wärmetauscher aufgeheizt, so kann die dabei erzeugte elektrische Leistung in Abbildung 11 abgelesen werden. Dabei sind die

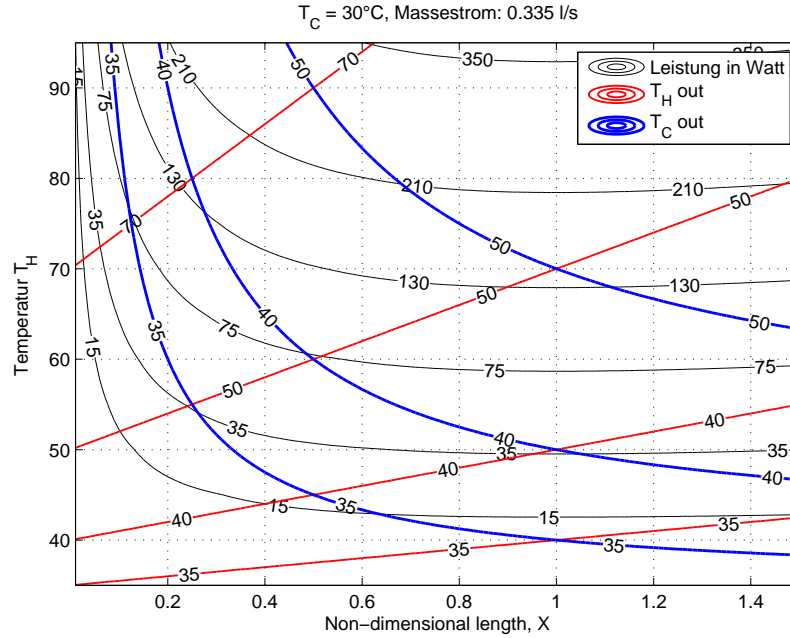


Abbildung 11: Elektrische Leistung in  $W$  in Abhängigkeit von  $X$  und  $T_H$  bei  $T_C = 30^\circ\text{C}$ , einem Massestrom von  $0.34 \text{ kg/s}$  und einem Wärmeübergangskoeffizienten  $h = 4000 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Masseströme der kalten und der warmen Seite gleich, deshalb wird die Grösse  $X$ , welche die Geometrie des Generators und somit die Fläche und auch Güte des Wärmetauschers repräsentiert, angepasst. Die grösste elektrische Leistung erhält man wie bereits erwähnt bei  $X = 1$ , ist die Temperatur des Speichers aber bei  $80^\circ\text{C}$ , so muss  $X$  einen Wert von 0.1 haben, damit die Ausgangstemperatur der kalten Seite  $35^\circ\text{C}$  beträgt, was einem viel kleineren TEG entspricht. Die elektrische Leistung beträgt dann  $80 \text{ W}$  bei einem Wirkungsgrad von 1.1%. Somit wäre eine Eigenversorgung der Pumpe möglich. Bei geringeren Heizleistungen fällt aber auch die erzeugte elektrische Leistung und eine Eigenversorgung ist kaum mehr gewährleistet. Dies ist aber abhängig von der benötigten Pumpleistung und dem Wirkungsgrad der Pumpe. Die Wärme aus dem wärmsten Teil des Speichers zu nehmen bringt einen zusätzlichen Vorteil: die oberste Speicherschicht wird abgekühlt und die Speicherverluste dadurch reduziert. Ist der Massestrom, welcher dem Speicher entnommen wird regelbar, so kann bei Absinken der Speichertemperatur der



Massestrom erhöht werden, um dieselbe Heizleistung der Fussbodenheizung zu gewährleisten, ohne den Speicher wieder aufheizen zu müssen.

## 4.4 Erdregister

Unter einem Erdregister versteht man im Erdboden (meist unterhalb des Hauses) verlegte Heizschlangen. Im Gegensatz zu einer Erdsonde<sup>11</sup> wird diese aber grossflächig und nur zwei bis drei Meter unter der Erdoberfläche verlegt. Ein Teil der gespeicherten Wärme kann mit Hilfe einer Wärmepumpe im Herbst wieder zurückgeholt werden, oder man benutzt die gespeicherte Wärme, um die Zuluft einer Aktivlüftung vorzuwärmen [25].

Das Erdregister kühlt den untersten Teil des Speichers, wo auch die Solaranlage angeschlossen ist, um eine Überhitzung des Speichers und des Kollektorfeldes zu verhindern. Entnimmt man dem Speicher Wasser bei einer Temperatur von  $80^{\circ}\text{C}$  und kühlt dieses mit der Erdregistertemperatur von  $15^{\circ}\text{C}$ , so entsteht eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 65\text{K}$ . Um den Speicher bei gleichzeitigem Leistungseintrag der Solaranlage abzukühlen, muss eine höhere Leistung entnommen werden. In diesem Beispiel wird mit einer eingetragenen Leistung von  $5\text{kW}$  (bei einem Kollektorwirkungsgrad von 20%) und einer entnommenen Leistung von  $10\text{kW}$  gerechnet. Diese Leistungsdifferenz von  $5\text{kW}$  würde eine kalte Speicherschicht von 800 Litern in 5 Stunden um  $27^{\circ}\text{C}$  abkühlen.

Der Arbeitspunkt dieses Szenarios kann theoretisch frei gewählt werden, denn es ist weder eine feste thermische Leistung noch ein Massestrom vorgegeben. Es ist aber wünschenswert, die thermische Leistung zu begrenzen und damit die Zeitspanne der Leistungsentnahme festzulegen. Nach unten ist die gewonnene elektrische Leistung limitierend. Es sollten wenigstens  $50\text{W}$ <sup>12</sup> erzeugt werden, damit eine Umwälzpumpe betrieben werden kann. Diese Einschränkungen ergeben somit einen Arbeitspunktbereich in dem der Betrieb technisch sinnvoll ist. Die hier gewählten  $10\text{kW}$  thermischer Leistung über eine Zeitspanne von 5 Stunden entsprechen einer Annahme an der oberen Leistungsgrenze, denn eine Abkühlung in 5 Stunden ist relativ hoch gegriffen. Wird bei dieser thermischen Leistung ein Massestrom von  $0.5\text{kg/s}$  gewählt, führt die Berechnung auf eine dimensionslose Grösse  $X$  von 0.08 und eine benötigte TEG-Fläche von  $0.22\text{m}^2$ . Dabei wird ein elektrischer Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 1.5\%$  erreicht und eine elektrische Leistung von  $155\text{W}$  erzeugt. Damit wäre es möglich, die Pumpen des Solarkreislaufs sowie des Erdre-

---

<sup>11</sup>Siehe Abschnitt 4.7

<sup>12</sup>Grobe Abschätzung

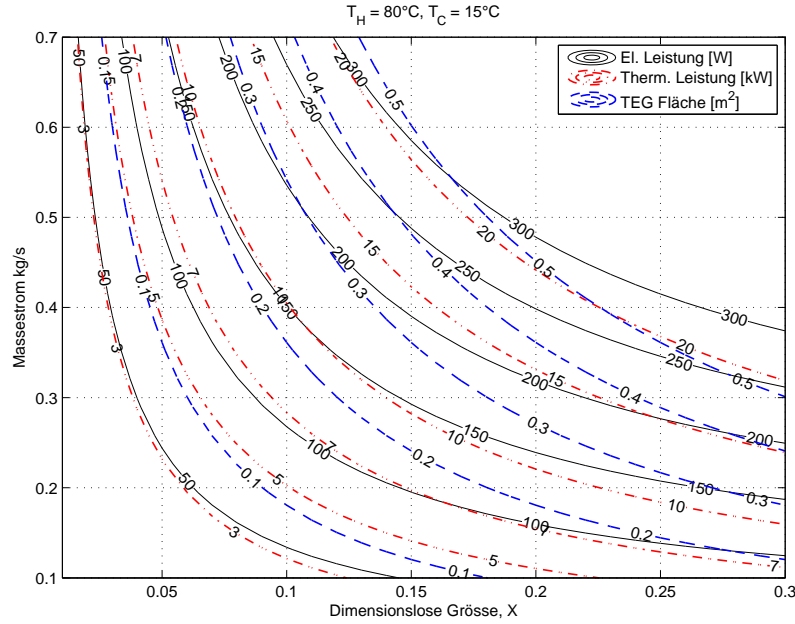


Abbildung 12: Mögliche Arbeitspunkte: Elektrische Leistung und thermische Leistung in Abhängigkeit von  $X$  und dem Massestrom  $\dot{m}$  bei  $T_H = 80^\circ\text{C}$  und  $T_C = 15^\circ\text{C}$

gisterkühlkreislaufts zu betreiben. Es bleibt allerdings anzumerken, dass bei Abkühlung des Speichers auch die erzeugte elektrische Leistung sinkt. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, das Kollektorfeld über einen Wärmetauscher direkt ans Erdregister zu koppeln. Dadurch bleibt die Energie im Speicher erhalten und die Anlage könnte sich trotzdem selber mit Elektrizität versorgen, vorausgesetzt dass genügend Leistung erzeugt wird. Die Dimensionierung ist in diesem Fall aber einiges schwieriger, da die Temperatur des Kollektorkreislaufs nichtlinear von mehreren Grössen abhängig ist, nämlich vom Massestrom, von der Einstrahlleistung und von der Grösse der TEG-Fläche im Wärmetauscher. Um den optimalen Arbeitspunkt zu finden, wird die erzeugte elektrische Leistung sowie der benötigte Massestrom und die Kollektorausgangstemperatur in Abhängigkeit von  $X$  und der TEG-Fläche sowie der Einstrahlleistung und den Kollektorparametern berechnet. Dabei wurde die quadratische Approximation der Kollektorkurve verwendet. Die Berechnungen dazu sind im Anhang in Abschnitt C.2 zu finden. Anhand von Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die maximale elektrische Leistung im Bereich einer TEG-Fläche von  $0.008\text{m}^2$  pro Quadratmeter Kollektorfläche

liegt. Dieses Resultat ist abhängig vom gewählten Kollektortyp<sup>13</sup> und der Einstrahlleistung, die mit  $700\text{W}/\text{m}^2$  nicht auf einen Spitzenwert gesetzt wurde, um eine gute Auslegung für einen gemittelten Sommertag zu haben. Man erkennt auch, dass die Leistung mit kleinerem  $X$  zunimmt und somit bei

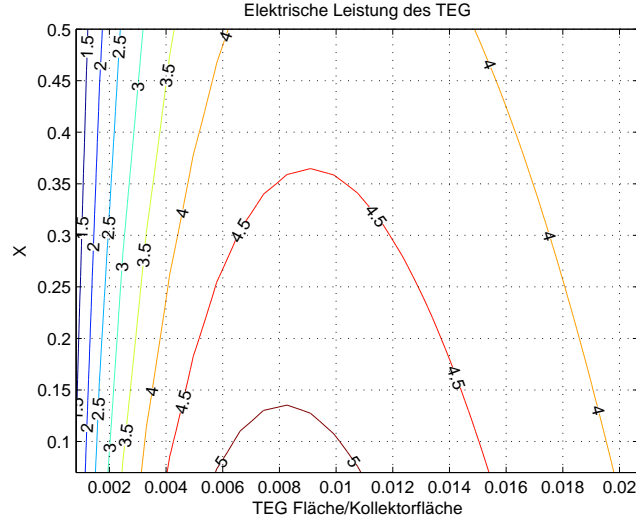


Abbildung 13: Elektrische Leistung des TEG pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche abhängig von  $X$  und der TEG-Fläche pro Kollektorfläche

einem unendlichen Massestrom am grössten wäre. Der Massestrom realer Kollektoren liegt im Bereich von  $0.01\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$ , deshalb wird hier dieser Wert gewählt. Mit Hilfe von Abbildung 14 kann herausgelesen werden, dass dazu  $X = 0.14$  gewählt werden muss, um die vorher bestimmte TEG-Fläche auszunutzen. Wird der Massestrom verdoppelt, auf  $0.02\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$ , kann noch ein wenig mehr Leistung erzeugt werden, allerdings wird so die Pumpe einiges mehr an Leistung verbrauchen und so ist der Arbeitspunkt mit  $0.01\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$  sicher effizienter. In Abbildung 15 kann jetzt die zu erwartende Kollektortemperatur bei einer Globalstrahlung von  $700\text{W}/\text{m}^2$  abgelesen werden. Man sieht, dass diese etwas über  $80^\circ\text{C}$  liegt, der Kollektor befindet sich also in einem guten Arbeitspunkt und das Kühlmittel wird auch bei einer hohen Einstrahlung von  $900\text{W}/\text{m}^2$  noch nicht verdampfen.

Wird hier wieder mit einer Kollektorfläche von 25 Quadratmetern gerechnet, ergibt sich ein Massestrom von  $0.25\text{kg}/\text{s}$ . Daraus errechnet sich ein elektrischer Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 1.5\%$ . Es wird eine Leistung von  $120\text{W}$  erzeugt, was auch hier ausreichend für eine Selbstversorgung der Anlage wäre.

<sup>13</sup>Typ Wagner LB76 mit den Parameterwerten  $\eta_0 = 0.76$ ,  $C_1 = 3.07$ ,  $C_2 = 0.02$ , siehe Abbildung 10

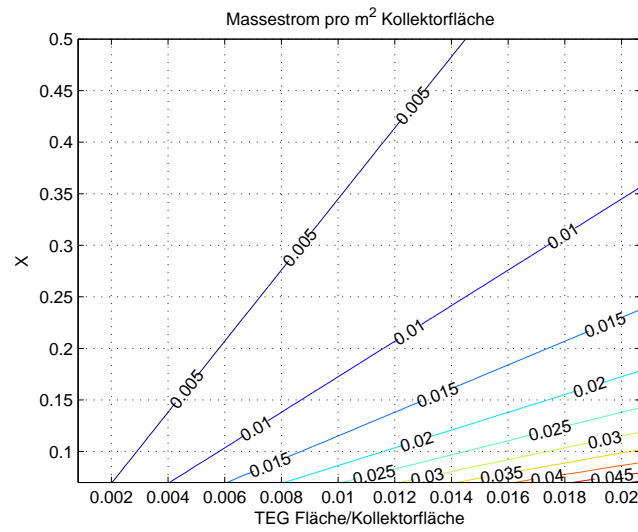


Abbildung 14: Massestrom pro  $m^2$  Kollektorfläche abhängig von X und der TEG-Fläche pro Kollektorfläche

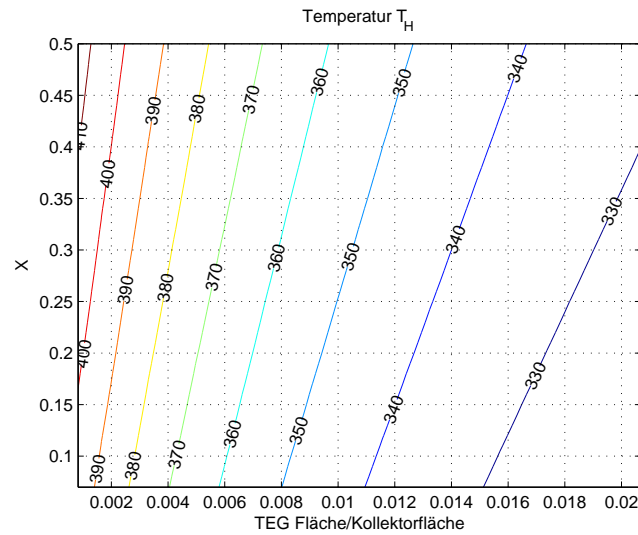


Abbildung 15: Ausgangstemperatur des Kollektors abhängig von X und der TEG-Fläche pro Kollektorfläche

## 4.5 Schichtspeicher

Moderne Wasserspeicher sind so ausgeführt, dass eine Temperaturschichtung entsteht. Dies wird vor allem durch eine hohe, schlanke Bauform erreicht [20]. Das warme Wasser hat eine geringere Dichte und befindet sich deshalb im obersten Teil des Speichers. Aus dieser Schicht wird Wasser für die Versorgung des Haushalts entnommen. Das kalte Leitungswasser fliesst in der untersten Schicht nach [21].

Ist, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, bereits ein mit TEG's ausgestatteter Wärmetauscher vorhanden, kann dieser auch dazu verwendet werden, die Wärme der obersten Schicht mit der untersten zu tauschen und dadurch Elektrizität zu erzeugen. Praktisch ist dies aber nur im Sommer, bei ausreichendem Energieeintrag sinnvoll. Wird aber sowieso schon zuviel Wärme geliefert, ist der Speicher normalerweise vollständig aufgeheizt und es gibt nur minimale Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Schichten.

Wurde der Speicher aber tagsüber, wie beschrieben, mit dem Erdregister gekühlt, kann in den Abendstunden auch ohne Sonnenlicht noch elektrische Energie produziert werden, indem die Temperaturunterschiede im Speicher ausgeglichen werden. Dabei können auch grössere Volumenströme gewählt werden, so dass ein kompletter Wärmeausgleich innerhalb von wenigen Stunden stattfinden würde. Diese benötigen aber wieder eine gewisse Pumpleistung und so ist fraglich, ob zusätzliche elektrische Energie gewonnen werden kann.

Die Temperaturdifferenz von der wärmsten zur kühlgsten Schicht beträgt nicht mehr als  $40^{\circ}\text{C}$  und somit ist mit einem geringen Wirkungsgrad zu rechnen. Es wird in der obersten Schicht eine Temperatur von  $80^{\circ}\text{C}$  und in der untersten eine Temperatur von  $40^{\circ}\text{C}$  angenommen. In Abbildung 16 sind für diese Annahme mögliche Arbeitspunkte dargestellt, der auch in diesem Szenario frei gewählt werden kann. Da es in diesem Fall darum geht, zusätzliche elektrische Energie zu erzeugen und nicht um eine Selbstversorgung von Pumpen, soll eine Leistung von  $200\text{W}$  erzeugt werden, wovon natürlich ein Teil für die Umwälzpumpe gebraucht wird. Wie in Abschnitt 3.1.1 bereits erwähnt wurde, ist ein möglichst grosser Massestrom zu wählen, damit der elektrische Wirkungsgrad des Wärmetauschers mit TEG möglichst gross wird. Ein grosser Massestrom heisst aber auch grössere Pumpleistung. Um hier ein Optimum zu finden, müssten verschiedene Pumpen und deren Leistungskurven mit Abbildung 16 verglichen werden, was aber über diese Semesterarbeit hinausgeht. Wird hier ein Arbeitspunkt so gewählt, dass die Fläche des Thermogenerators  $0.22\text{m}^2$  beträgt, was der Fläche aus Abschnitt 4.4 entspricht, ist nur eine Leistung von ca.  $50\text{W}$  möglich. Um eine Leistung von  $200\text{W}$  zu erreichen, ist eine TEG-Fläche von  $0.8\text{m}^2$  und ein Massestrom von  $1.3\text{kg/s}$

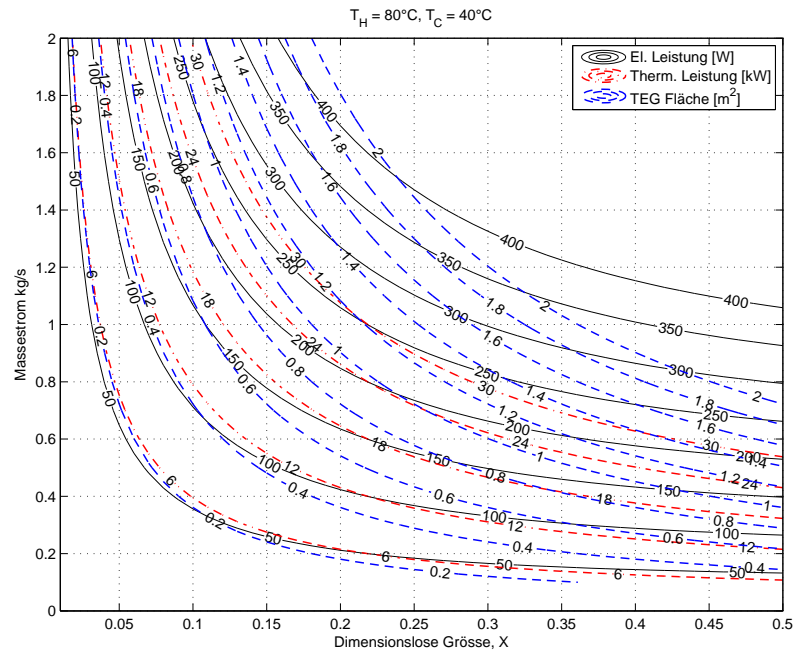


Abbildung 16: Mögliche Arbeitspunkte: Elektrische Leistung und thermische Leistung in Abhängigkeit von  $X$  und dem Massestrom  $\dot{m}$  bei  $T_H = 80^\circ\text{C}$  und  $T_C = 40^\circ\text{C}$

notwendig. Dabei würde aber eine thermische Leistung von über 22kW übertragen und somit wäre der Speicher innerhalb sehr kurzer Zeit ausgeglichen. Wird wieder mit einem Schichtinhalt von 800 Litern gerechnet, so dauert der Ausgleichsvorgang höchstens 50 Minuten. Die Leistung sinkt zudem während dem Wärmeausgleich und liegt bald unter der benötigten Leistung für die Pumpe.

## 4.6 Lüftungswärmetauscher

Immer mehr wird in Wohnhäusern eine sogenannte kontrollierte Lüftung eingebaut. Darunter versteht man, im Gegensatz zur konventionellen Frischluftzufuhr durch zeitweises oder permanentes Öffnen von Fenstern, eine Frischluftzufuhr über ein Lüftungssystem. Dieses sorgt zu jedem Zeitpunkt für eine ausreichende Belüftung der Räumlichkeiten und ist so auch wirksam gegen eine Überfeuchtung und Schimmelpilzbildung [26].

In den kalten Wintermonaten und in der Übergangszeit wird dank diesem System zusätzlich Heizenergie gespart, da die warme Raumluft nicht direkt

ins Freie abgelassen wird, sondern beim Ausströmen die kalte Ansaugluft in einem Wärmetauscher vorwärmt. Den Temperaturunterschied im Wärmetauscher könnte man auch hier ausnutzen, um Strom für den Lüfter zu erzeugen. In einem Haushalt mit vier Personen ist mit einer Frischluftmenge von  $30\text{m}^3/\text{h}$  zu rechnen, was einen Massestrom von  $155\text{kg}/\text{h}$  ergibt. Bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer Aussentemperatur von  $2^\circ\text{C}$  besteht nur ein geringer Temperaturunterschied und der abgehende Volumenstrom besitzt dabei eine potentielle thermische Leistung von 780 Watt. Um maximale Leistung aus diesem Abwärmestrom zu gewinnen, wird  $X = 1$  gewählt. Dabei fließt aber nur die Hälfte der verfügbaren thermischen Leistung durch den TEG, der Rest bleibt ungenutzt<sup>14</sup>. Der errechnete Wirkungsgrad beträgt nur gerade 0.0016%. Dabei wurde mit einem Wärmeleitwiderstand von  $60\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  gerechnet, der viel geringer ist als bei der Wärmeübertragung von Wasser auf einen Festkörper. Die dabei gewonnene elektrische Leistung beträgt  $6.4\text{mW}$ . Wie man aus dieser analytischen Rechnung sieht, ist die erzielbare Leistung viel zu gering, als dass es dafür eine sinnvolle technische Anwendung gäbe.

## 4.7 Geothermie

Unter dem Begriff Geothermie versteht man die praktische Nutzung von Erdwärme. Die Nutzung gespeicherter, oberflächennaher Wärme<sup>15</sup> wie das in Erdsonden oder Erdregistern der Fall ist, kann wegen den tiefen Temperaturen von unter  $20^\circ\text{C}$  nur mit einer Wärmepumpe genutzt werden [19], also kommt eine thermoelektrische Nutzung schon gar nicht in Frage.

Um in der Schweiz auf eine Temperatur zu kommen, die ohne Wärmepumpe zum Betrieb einer Bodenheizung genügen würde, wäre eine Tiefenbohrung von über  $1000\text{m}$  notwendig. Eine solch tiefe Bohrung ist aber so aufwändig, dass sie nur für Grossanlagen wirtschaftlich vertretbar ist, aber für einzelne Einfamilienhäuser keinen Sinn macht. Es gibt allerdings Regionen, zum Beispiel in Island, wo hohe Temperaturen schon in viel geringerer Tiefe existieren oder in Thermalquellen sogar an der Oberfläche vorhanden sind. In einem solchen Fall wäre der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren interessant. Darauf wird hier aber nicht weiter eingegangen.

---

<sup>14</sup>Siehe dazu auch Abschnitt A im Anhang.

<sup>15</sup>damit ist aktiv eingespeiste Wärme in einem Erdregister oder die natürlich eingespeiste Sonnenenergie in Erdsonden gemeint



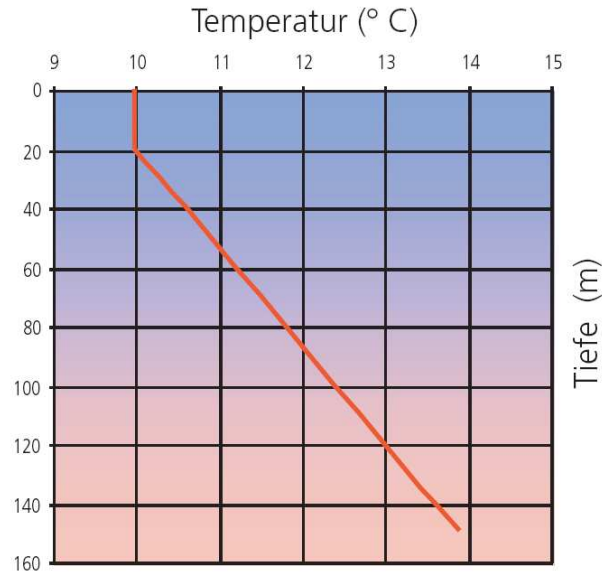


Abbildung 17: Oberflächennaher Temperaturverlauf des Erdbodens in der Schweiz [d].

## 4.8 Szenarienbewertung

Die oben beschriebenen Möglichkeiten werden nun zusammenfassend in einer Tabelle gegenübergestellt und anhand verschiedener Kriterien bewertet. Die vielversprechendsten Szenarien werden mittels einer numerischen Simulation genauer untersucht.

Die Werte in dieser Tabelle stammen aus den Abschätzungen und Berechnungen der letzten Abschnitte. Im Falle des Holzofens handelt es sich um eine sehr grobe Abschätzung, da Berechnungen nicht möglich waren, siehe Abschnitt 4.1. Die Berechnungen der übrigen Szenarien sind im Anhang in Abschnitt C.1 aufgeführt.

Allgemein kann aus den Resultaten in Tabelle 5 geschlossen werden, dass sich nach heutigem Stand der Technik der Einsatz von Seebeck-Thermogeneratoren auf die Produktion von Elektrizität zur Eigenversorgung des Systems beschränkt bleibt. Die beiden Szenarien für die Kühlung mittels Erdregister weisen dabei die höchste Temperaturdifferenz und deshalb auch die grösste Leistungsdichte auf. Aus diesem Grund wurden diese beiden für eine genauere Untersuchung mittels numerischer Simulation ausgewählt. Können die Wirkungsgrade in Zukunft weiter gesteigert werden, ist auch ein Einsatz zur Erzeugung von Elektrizität für den Verbrauch im Haushalt möglich. In beiden Fällen müssen aber die Kosten massiv gesenkt werden, um mit me-

chanischen Systemen oder Photovoltaik konkurrenzieren zu können.

## 4.9 Zukunftsprognose zu den Szenarien

In Abschnitt 2.5 wurde bereits beschrieben, dass für eine abschätzende Zukunftsprognose ein fiktives Material basierend auf Materialeigenschaften von Bismuth-Tellurid verwendet wurde. Die Werte in Tabelle 5 wurden berechnet, indem dieselben Randbedingungen wie für die Berechnung mit Bismuth-Tellurid genommen wurden. Dies heisst insbesondere derselbe Massestrom, dieselbe dimensionslose Grösse  $X$  und dieselben geometrischen Parameter als auch Temperaturen. Durch die Verringerung der thermischen Leitfähigkeit des Materials erhöht sich dabei die benötigte TEG-Fläche im Wärmetauscher. Dies folgt daraus, dass die Materialeigenschaften die Grösse  $X$  nicht beeinflussen und damit die thermische Leistung, die durch den Generator fliesst, dieselbe bleibt.

Die Leistungen, die mit zukünftigen Materialien erzeugt werden könnten, gehen über die Leistung für eine reine Eigenversorgung des Systems hinaus und es wird zusätzliche elektrische Energie erzeugt, die im Haushalt genutzt werden könnte. Da diese Leistung aber nur für relativ kurze Zeiträume zur Verfügung steht, wäre es sinnvoller, die TEG's nur für die Versorgung der Pumpen und der Elektronik des Systems auszulegen. Dadurch kann die benötigte TEG-Fläche verringert werden, was mit einer Kostensenkung einhergeht.

Bezeichnung	Szenarienbeschreibung
HoOf	Einbau in den Holzofen
SoSp	Solaranlage → Speicher
SoEr	Solaranlage → Erdregister
SpEr	Speicher → Erdregister
BoHe	Bodenheizung mit Wärmetauscher
LWt	Einbau in Lüftungswärmetauscher

Tabelle 3: Abkürzungen für die Szenarien in Tabelle 5

1)	Quellentemperatur $T_H$
2)	Senktemperatur $T_L$
3)	Temperaturdifferenz $\Delta T$
4)	Wärmeleistung Quelle
5)	Zu erwartender Wirkungsgrad
6)	Heute mögliche Elektrische Leistung $P_{el}$
7)	Leistungsdichte ( $P_{el}/A_{TEG}$ )
8)	Maximale Verfügbarkeit in Stunden pro Tag
9)	Leistung bei fiktivem Zukunftsmaterial

Tabelle 4: Bewertungskriterien der Szenarien in Tabelle 5

	HoOf	SoSp	SoEr	SpEr	UmSp	BoHe	LWt
1)	900°C	90°C	80°C	80°C	80°C	80°C	20°C
2)	60°C	60°C	15°C	15°C	40°C	30°C	2°C
3)	840K	30K	65K	65K	40K	50K	18K
4)	15kW	8kW	8.5kW	10kW	22kW	7kW	780W
5)	~ 4%	0.6%	1.4%	1.5%	0.9%	1.1%	0.0016%
6)	200W	45W	120W	155W	200W	80W	6mW
7)	k.A.	95 $\frac{W}{m^2}$	700 $\frac{W}{m^2}$	700 $\frac{W}{m^2}$	245 $\frac{W}{m^2}$	390 $\frac{W}{m^2}$	30 $\frac{mW}{m^2}$
8)	4h/d	6h/d	6h/d	6h/d	< 1h/d	16h/d	24h/d
9)	k.A.	115W	320W	410W	535W	210W	25mW

Tabelle 5: Übersichtstabelle über die gefundenen Szenarien

## 5 Numerische Simulation

In der Szenarienbewertung wurden die beiden Szenarien "Speicher­kühlung mit Erdregister" und "Kollektorkühlung mit Erdregister" ausgewählt, die nun mittels numerischer Simulation analysiert werden sollen. Eine genaue Beschreibung dieser Szenarien ist in Abschnitt 4.4 zu finden. Zur Simulation wurde das Simulationswerkzeug SMILE verwendet, welches im folgenden Abschnitt genauer beschrieben wird. Ausserdem wird nachfolgend erläutert, aus welchen Komponenten sich das Simulationsmodell zusammensetzt, wo Modellungenauigkeiten vorhanden sind und welche Resultate gefunden wurden.

### 5.1 Die Simulationsumgebung SMILE

SMILE ist ein von der technischen Universität Berlin entwickeltes Simulationswerkzeug für wissenschaftliche Berechnungen [28]. Es handelt sich dabei um eine textbasierte Programmierungsumgebung mit einer objektorientierten, C-ähnlichen Programmiersprache. Objektorientiert bedeutet, dass die einzelnen Komponenten jeweils Schnittstellen besitzen und so miteinander interagieren können. Ausserdem ist es möglich, eine Komponente als Unterkomponente einer anderen zu definieren, um deren Eigenschaften zu erweitern oder anzupassen. Dabei gilt das Prinzip der Vererbung. Das heisst: eine untergeordnete Komponente besitzt alle Eigenschaften der übergeordneten, kann aber auch noch weitere Eigenschaften besitzen. So ist es möglich, auf relativ einfache Art komplexe Simulationsmodelle zu programmieren, ohne die Übersicht zu verlieren. Es können auch Komponenten aus einer Datenbank geladen werden, sodass bereits vorhandene Modelle nicht immer wieder neu programmiert werden müssen. Allerdings sollten solche Komponenten genau überprüft werden, ob sie auch die erwarteten Anforderungen erfüllen oder ob sie noch erweitert oder abgeändert werden müssen. Die einzelnen Teilsysteme, die in der Simulation verwendet wurden, waren alle bereits vorhanden. Deshalb war eine solch umfangreiche Simulation in dieser Arbeit überhaupt erst möglich.

### 5.2 Szenario "Speicher­kühlung mit Erdregister"

Für die Simulation dieses Szenarios wurde das in Abbildung 18 dargestellte Schema verwendet. Die Sonnenstrahlung, die sich aus Direkt- und Diffusstrahlung zusammensetzt, wird von einem Kollektorfeld mit einer Fläche von  $25m^2$  aufgenommen. Die Wetterdaten für die Strahlung sowie die Umgebungstemperatur stammen aus der Datenbank der Meteonorm für Zürich Kloten.

Die einzelnen Kollektoren sind nach der quadratischen Approximation einer Kollektorkurve implementiert. Das Kollektorfeld ( $5 \times 5$  Kollektoren à  $1\text{m}^2$ ) ist über eine  $20\text{m}$  lange, isolierte Leitung an den Schichtspeicher mit einem Volumen von drei Kubikmetern, unterteilt in vier Schichten, angeschlossen. Die unterste Schicht wird über einen Gegenstromwärmetauscher mit thermoelektrischem Generator mit dem Erdregister verbunden und so gekühlt. Das Erdregister ist dabei als gut gekühltes Rohr mit einer Umgebungstemperatur von  $15^\circ\text{C}$  ausgeführt. Die eingesetzten Pumpen sind sehr simpel gehalten und geben lediglich einen Massestrom vor. Auf dem Schema nicht eingetragen sind die Zweipunkt-Steurelemente, welche die Temperaturen des Speichers und des Kollektors überwachen und entsprechend die Pumpen ein- und ausschalten.

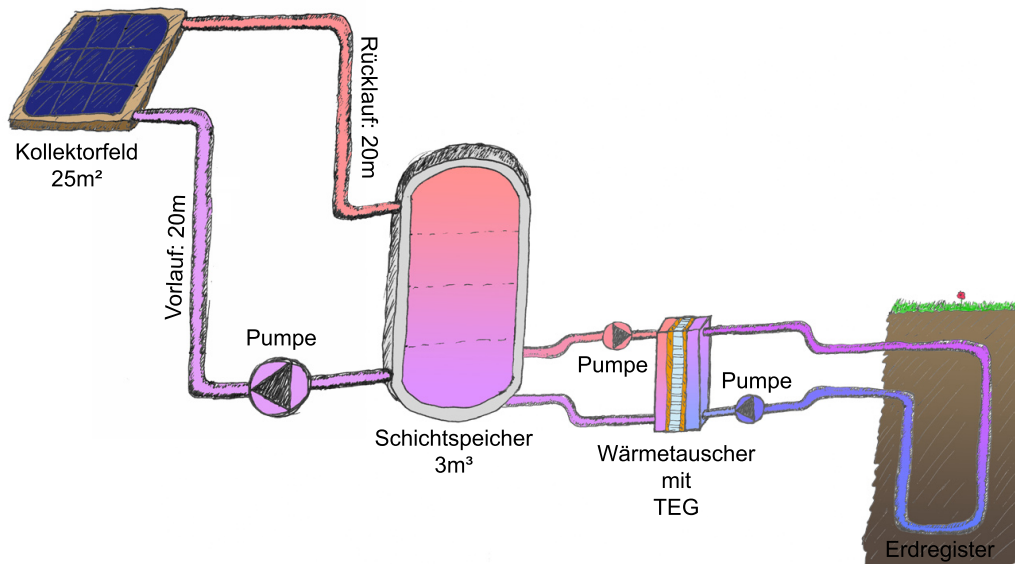


Abbildung 18: Schema des Simulationsmodells für die Schichtspeicherkühlung mittels Erdregister.

Der grosse Schwachpunkt dieser Simulation ist der Schichtspeicher, denn es gibt innerhalb des Speichers keine realistische Wärmekonvektion. Wird die unterste Schicht aufgeheizt, so steigt die Wärme also nicht in obere Schichten auf, sondern wird hauptsächlich durch Wärmeleitung an die darüberliegende Schicht abgegeben. Wird die Solaranlage, wie in der Praxis üblich, an einen Wärmetauscher im untersten Teil des Speichers angeschlossen, so ist die unterste Schicht immer wärmer als darüberliegende Schichten, was einer Inversion der Temperaturverteilung entspricht und real niemals auftreten kann, da

warmes Wasser nach oben aufsteigt. Deshalb mussten Vor- und Rücklauf wie im Schema dargestellt angeschlossen werden, um eine korrekte Schichtung zu erhalten. Dadurch wird der Speicher aber stark durchmischt und unter bestimmten Voraussetzungen kann dennoch eine falsche Temperaturschichtung auftreten (siehe Abbildung 20). Aus diesem Grund musste das ursprüngliche Vorhaben, ein komplettes Kalenderjahr zu simulieren, aufgegeben werden, denn die Simulationsergebnisse waren nicht mit dem Praxisbeispiel<sup>16</sup> vereinbar. Leider konnten so auch die zusätzlich programmierten Modelle eines realistischen Erdregisters und eines dynamischen Warmwasserverbrauchers nicht eingesetzt werden.

Stattdessen wurden einige Sommertage gegen Ende Juli simuliert und jegliche zusätzliche Verbraucher deaktiviert. Damit überhitzt der Speicher bei hoher Einstrahlleistung fast täglich und die Speicherkühlung kommt zum Einsatz.

### 5.2.1 Simulationsergebnisse

Damit die Ergebnisse der Simulation mit denen der analytischen Rechnung übereinstimmen können, müssen dieselben Randbedingungen gelten. In der numerischen Simulation wird die TEG-Fläche aus einzelnen Thermoelementen mit je 127 Thermo-Couples zusammengesetzt. Eine reine Couple-Fläche von  $0.22m^2$  entspricht dabei 478 Elementen. Die Massenströme wurden ebenfalls auf beiden Seiten des Wärmetauschers auf  $0.5kg/s$  gesetzt, obwohl in der Simulation verschieden grosse Massenströme möglich gewesen wären. Ausserdem wurden alle Geometrie- und Materialparameter identisch zur analytischen Rechnung gewählt.

In der Simulation waren zusätzlich noch einige Parameter festzulegen, wie zum Beispiel die Ausrichtung der Kollektoren, die Isolation der Leitungen und des Speichers oder die verwendete Flüssigkeit im Kollektorkreislauf. Die Kollektoren wurden nach der Annahme der Montage auf einem Schrägdach mit einem Winkel von  $30^\circ$  geneigt, genau gegen Süden ausgerichtet. Sie werden mit einem Wasser-Tyfocon-Gemisch mit 40% Tyfocon betrieben.

Während der Simulation werden die Pumpen des Erdregisterkreislaufs eingeschaltet, sobald der unterste Teil des Speichers eine Temperatur von  $80^\circ C$  überschreitet. Danach wird solange gekühlt, bis die Temperatur um  $27^\circ C$  gefallen ist, um zu überprüfen ob sich die Schätzung der Kühlzeit in Abschnitt 4.4 bestätigt. In Abbildung 19 kann man sehen, dass die aktuelle Kühlzeit über 6 Stunden beträgt und somit den geschätzten Wert von 5 Stunden übertrifft, da der Energieeintrag der Solaranlage höher ist. In Abbildung 20 sind die Temperaturen der einzelnen Schichten des Speichers während dieses

---

<sup>16</sup>Praktische Erfahrungen von Leo Schneider in Rieden, St. Gallen

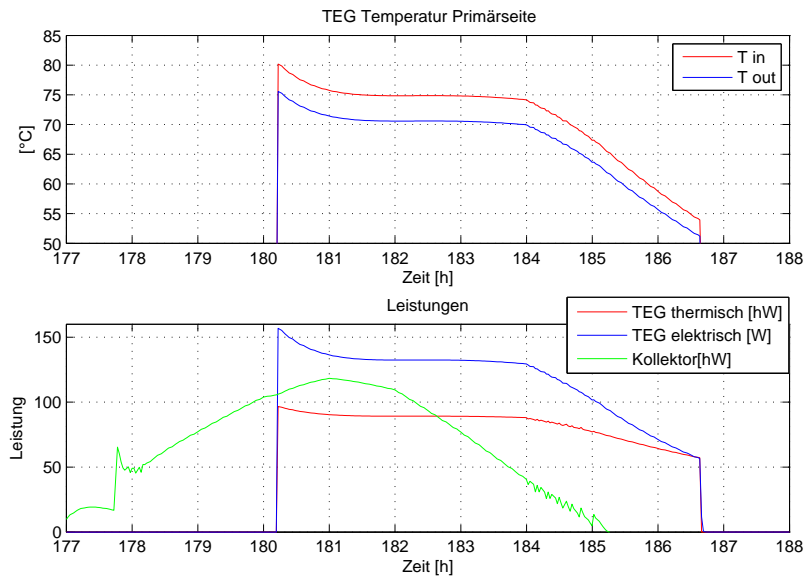


Abbildung 19: Temperaturen und Leistungen bei der Kühlung des Speichers mit dem Erdregister. TEG-Fläche:  $0.22m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

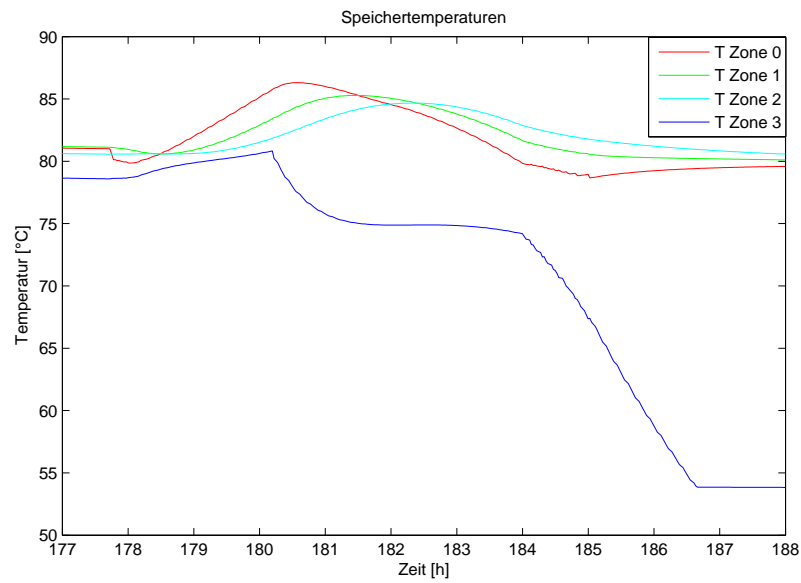


Abbildung 20: Speichertemperaturen bei der Aufheizung und Kühlung von Abbildung 19. Zone 0 ist dabei die oberste Schicht und Zone 3 die unterste.



Kühlvorgangs dargestellt. Man erkennt, dass diese Schichtung unrealistisch ist. Sie folgt daraus, dass bei Kühlung der untersten Schicht über den Solar-kreislauf auch die oberste Schicht gekühlt wird. Dieser Mangel kann mit dem vorhandenen Speichermodell nicht behoben werden.

Für das fiktive Zukunftsmaterial wurden zwei Arbeitspunkte simuliert. Der Massestrom beträgt nach wie vor  $0.5\text{kg/s}$ , die TEG-Flächen werden jedoch angepasst: im ersten Fall (Abbildung 21) fließt dieselbe thermische Leistung wie für Bismuth-Tellurid durch den TEG, im zweiten Fall (Abbildung 22) wird dieselbe elektrische Leistung erzeugt. Im ersten Fall ist zu erkennen, dass die erzeugte elektrische Leistung von bis zu 400 Watt weit über der Leistung liegt, welche für den Verbrauch der gesamten Anlage abgeschätzt wurde. Deshalb wurde für den zweiten Fall die Leistung reduziert um so die Energie über einen längeren Zeitraum abgeben zu können. Es wird so über einen Zeitraum von fast neun Stunden Elektrizität erzeugt.

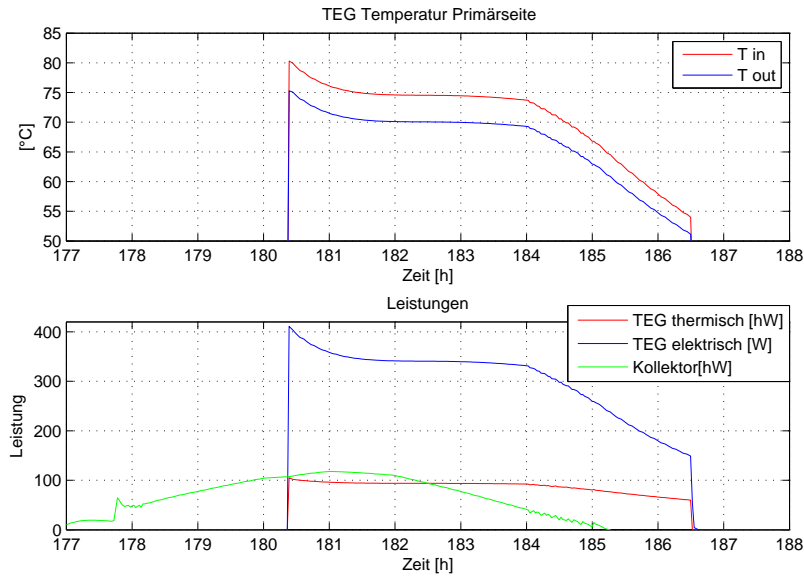


Abbildung 21: Kühlung des Speichers über den TEG mit fiktivem Zukunftsmaterial. TEG-Fläche:  $0.24\text{m}^2$ ,  $\dot{m} = 0.5\text{kg/s}$ .

Erfolgt die Kühlung des Speichers in den Abendstunden wie in Abbildung 23, so ist der Speicher innerhalb von drei Stunden abgekühlt da kaum Energie in den Speicher nachgeliefert wird. Diese Betriebsart könnte als Ergänzung zur Photovoltaik genutzt werden, da auch ohne Sonneneinstrahlung Strom produziert wird. Die elektrische Leistung ist aber höchstens mit dem fiktiven Zukunftsmaterial (Abbildung 24) gross genug, um Haushaltsgeräte zu ver-

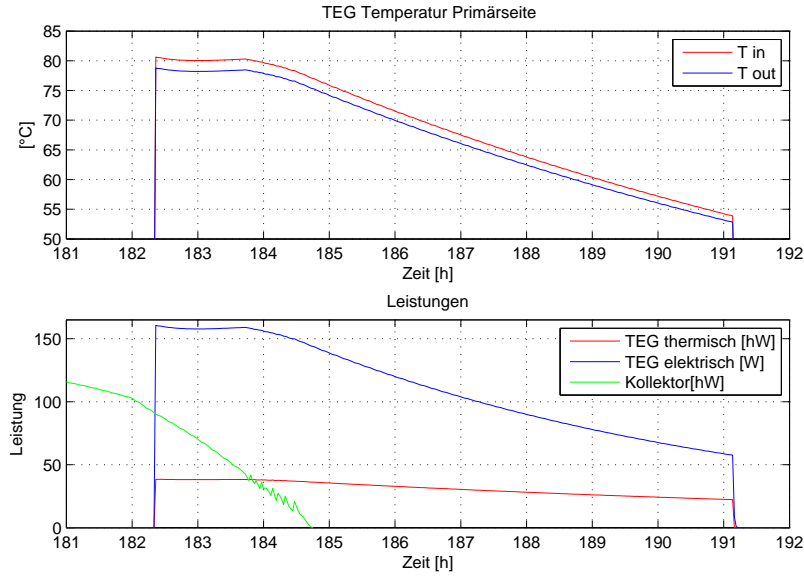


Abbildung 22: Kühlung des Speichers über den TEG mit fiktivem Zukunftsmaterial. TEG-Fläche:  $0.09m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

sorgen.

Die analytisch berechnete Leistung von  $155W$  bei einer Eingangstemperatur des Wärmetauschers von  $80^\circ C$  wird erreicht (siehe Abbildungen 19 & 23). Somit stimmt das numerische mit dem analytischen Modell recht genau überein. Diese Anfangsleistung fällt aber wie zu erwarten war mit sinkender Temperatur auf einen Wert von knapp unter  $60W$ . Deshalb wurde in einer weiteren Simulation die Regelung des Kühlkreislaufs mit der Regelung des Kollektorkreislaufs gekoppelt. So wird die Kühlung nur solange eingeschaltet, wie auch Energie in den Speicher eingetragen wird. Mit einer solchen Kopplung sinkt die erzeugte elektrische Leistung nicht so stark ab und der Speicher kühlt sich auch bei wenig Sonnenschein um weniger als  $10K$  ab (Abbildung 25). Reduziert man die TEG-Fläche, so wird weniger thermische Leistung übertragen und auch weniger elektrische Leistung erzeugt (Abbildung 26). Die thermische Leistung des Kollektorfelds liegt so bei guter Sonneneinstrahlung fast den ganzen Tag über der thermischen Leistung des Generators. Der Speicher müsste sich dabei sogar noch aufwärmen, was hier aber aufgrund des schlechten Speichermodells nicht zu sehen ist. Die Temperatur des Speichers bleibt aber über den Tag gesehen ungefähr gleich und damit ist auch die erzeugte elektrische Leistung nahezu konstant. Um eine Zukunftsprognose zu ermöglichen, wird auch in diesem Fall wieder das fiktive Material einge-

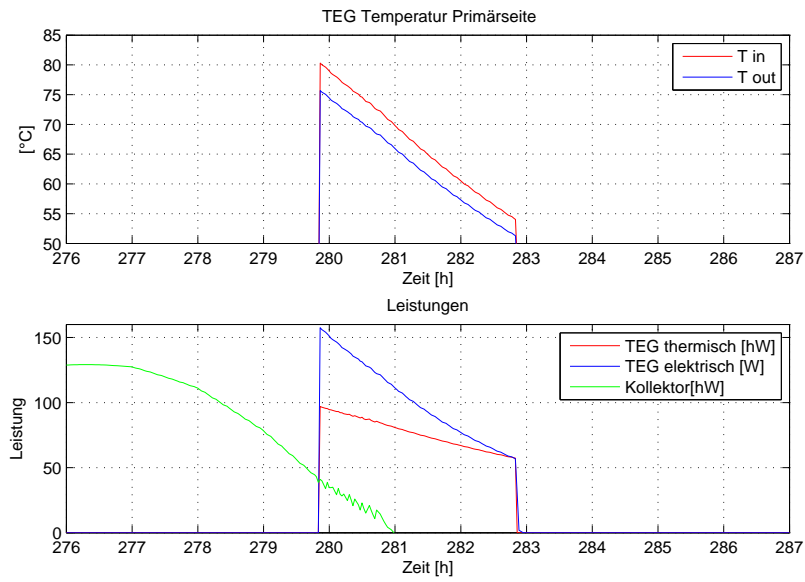


Abbildung 23: Temperaturen und Leistungen bei der Kühlung des Speichers in den Abendstunden. TEG-Fläche:  $0.22m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

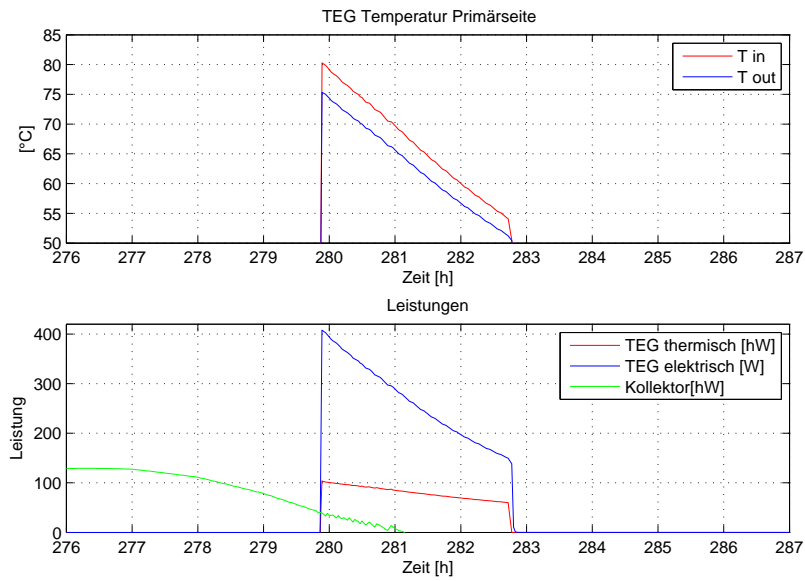


Abbildung 24: Temperaturen und Leistungen der Speicherkühlung über den TEG mit fiktivem Zukunftsmaterial. TEG-Fläche:  $0.24m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

setzt (Abbildung 27). Die thermische Leistung des Wärmetauschers wurde dabei noch einmal reduziert. Dazu wurde eine TEG-Fläche von  $0.11m^2$  gewählt, womit eine elektrische Leistung von knapp 200 Watt erzeugt wird. Auch diese Leistung bleibt über den ganzen Tag beinahe konstant. Da die in den Speicher eingetragene thermische Leistung wieder einiges höher ist als die Kühlleistung des Wärmetauschers, könnte bei einem solchen Betrieb im Sommer auch bei zusätzlichem Warmwasserverbrauch des Haushalts eine konstante Speichertemperatur möglich sein.

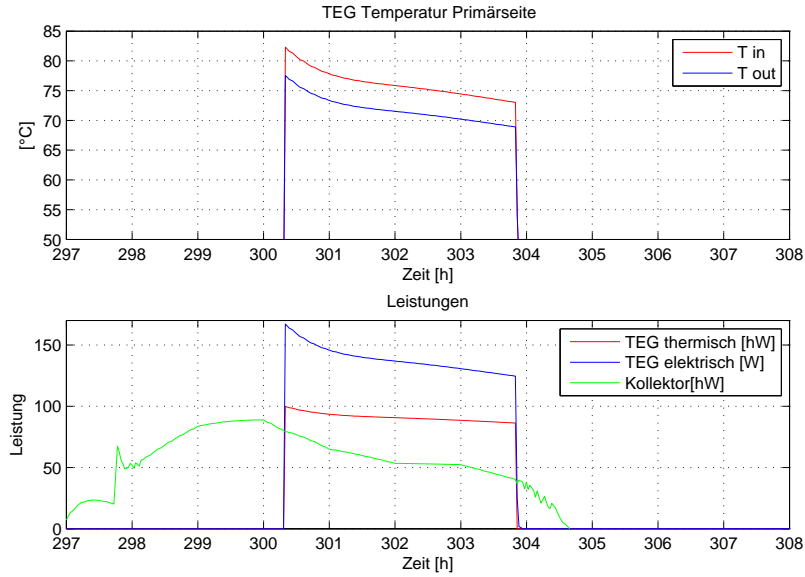


Abbildung 25: Temperaturen und Leistungen der Speicherkühlung mit Koppelung an Solar-Regler. TEG-Fläche:  $0.22m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

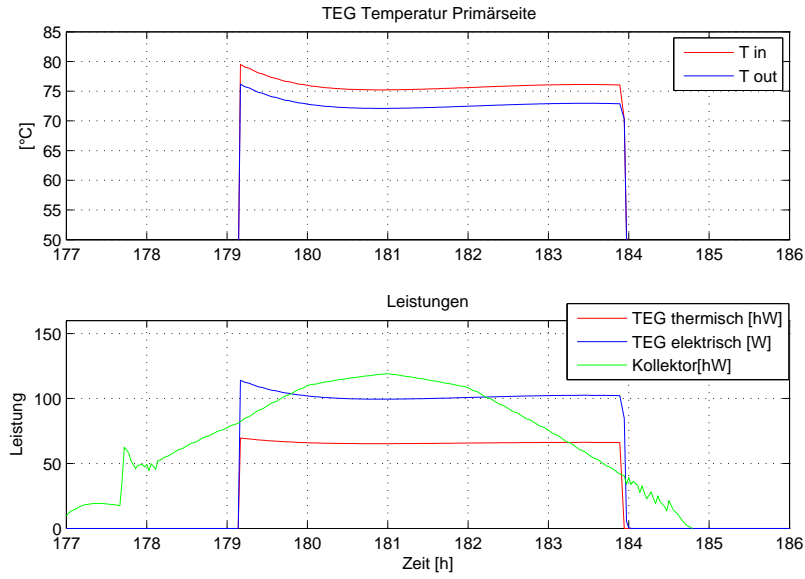


Abbildung 26: Temperaturen und Leistungen der Speicherkühlung mit Koppelung an Solar-Regler. TEG-Fläche:  $0.16m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

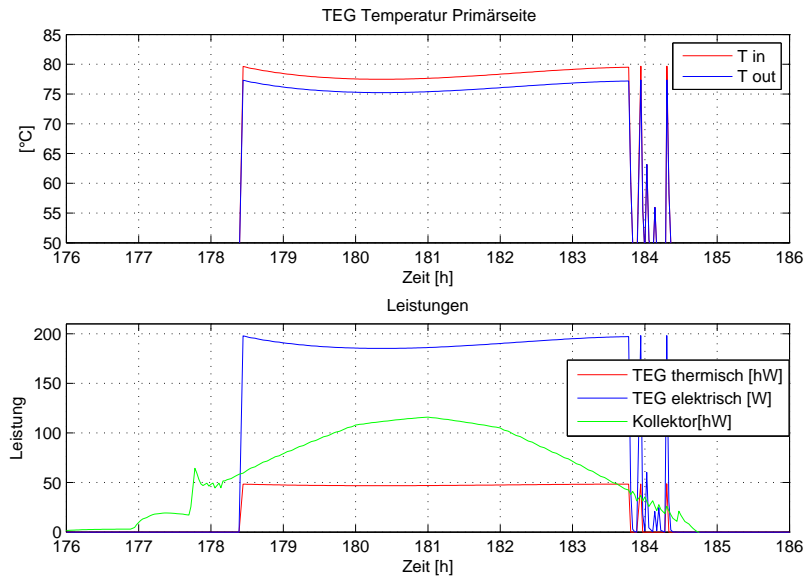


Abbildung 27: Temperaturen und Leistungen der Speicherkühlung mit Koppelung an Solar-Regler und fiktivem Zukunftsmaterial. TEG-Fläche:  $0.11m^2$ ,  $\dot{m} = 0.5kg/s$ .

### 5.3 Szenario "Kollektorkühlung mit Erdregister"

Die verwendeten Komponenten in diesem Szenario sind bis auf den Gegenstromwärmetauscher mit thermoelektrischem Generator identisch mit den Komponenten im Obigen Szenario. Es wurde aber mit dem Weglassen des Schichtspeichers die grösste Unsicherheit aus der Simulation entfernt (Abbildung 28) und so sind die Ergebnisse aussagekräftiger. Ausserdem wurde auf eine Regelung verzichtet und so sind die Pumpen rund um die Uhr eingeschaltet. Die Dimensionen des Gegenstromwärmetauschers sind auch hier dieselben wie in Abschnitt 4.4 für dieses Szenario beschrieben.

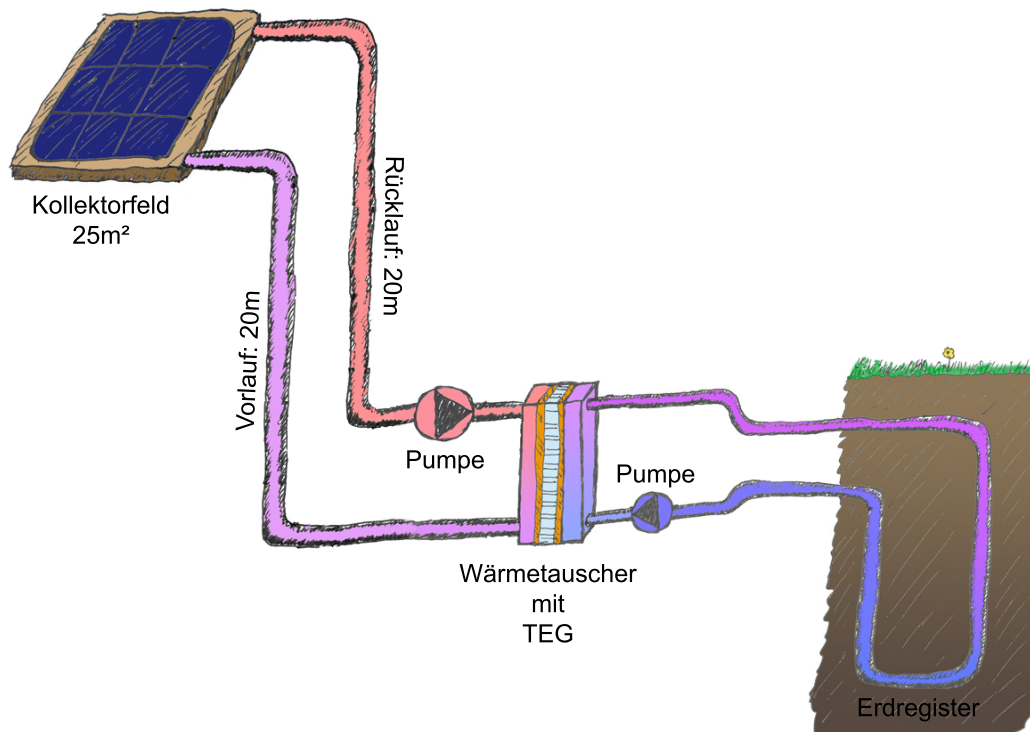


Abbildung 28: Schema des Simulationsmodells für die direkte Kollektorkühlung mit dem Erdregister.

#### 5.3.1 Simulationsergebnisse

Die Simulation umfasst einige typische, schöne Sommertage anfangs Juli in Zürich Kloten. Der Massestrom wurde wie in der analytischen Rechnung auf einen Wert von  $0.25\text{ kg/s}$  gesetzt, sowohl für den Solarkreislauf wie auch für den Kühlkreislauf. Das Kollektorfeld wurde wieder mit einem Anstellwinkel von  $30^\circ$  gegen Süden ausgerichtet.

Mit einer TEG-Fläche von  $0.2m^2$  sollte laut der analytischen Rechnung bei einer Eingangstemperatur des Wärmetauschers von  $80^\circ C$  eine elektrische Leistung von 120 Watt erzeugt werden. In Abbildung 29 ist zu sehen, dass diese Temperatur während der Mittagszeit des vierten Tages genau erreicht wird und es wird dabei exakt eine elektrische Leistung von 120 Watt erzeugt. Vergleicht man Abbildung 29 mit Abbildung 30, so kann festgestellt werden, dass für die meiste Zeit der Sonnenscheindauer die elektrische Leistung über 60 Watt liegt. Damit könnte eine Elektrizitätsversorgung der Pumpen bei reinem Kühlbetrieb bereits mit heutigen Materialien möglich sein.

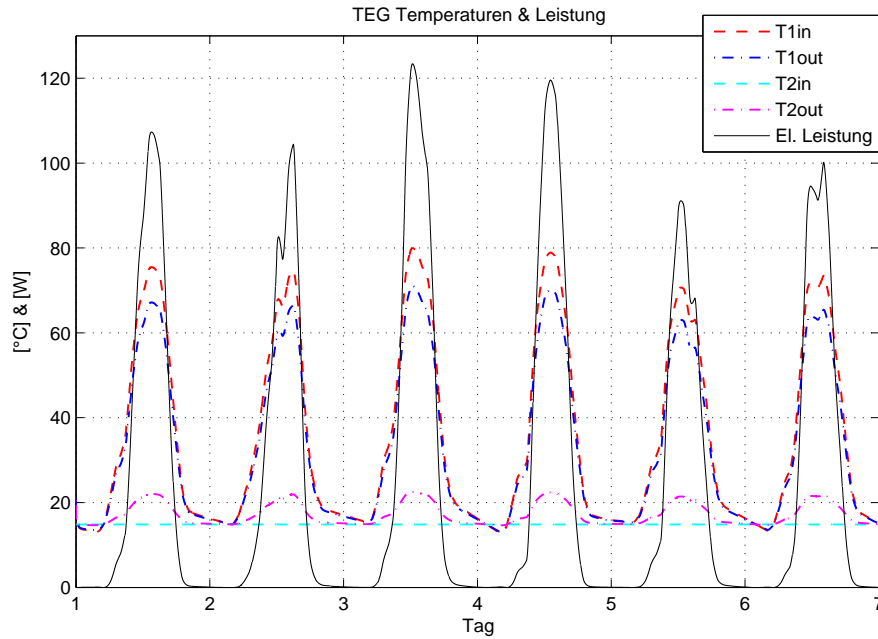


Abbildung 29: Simulationsergebnis der direkten Kühlung der Kollektoren mit dem Erdregister. TEG-Fläche:  $0.2m^2$ ,  $\dot{m} = 0.25 kg/s$

In Abbildung 31 ist die thermische Leistung des Kollektorfelds und die thermische Leistung, die durch den Generator fließt angegeben. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven ergibt sich aus den Verlusten der Vor- und Rücklaufleitung. Die Kollektoren liefern mit  $8-10kW$  also auch bei hohen Temperaturen eine durchaus akzeptable thermische Leistung die mit Thermogeneratoren genutzt werden kann. Betrachtet man die Zukunftsprognose in Abbildung 32 wird dieses Potential noch deutlicher. Bei elektrischen Leistungen von über 200 Watt über mehrere Stunden pro Tag könnte mit Hilfe eines Batteriespeichers die Anlage möglicherweise den ganzen Hochsommer ohne zusätzliche Hilfsenergie betrieben werden.



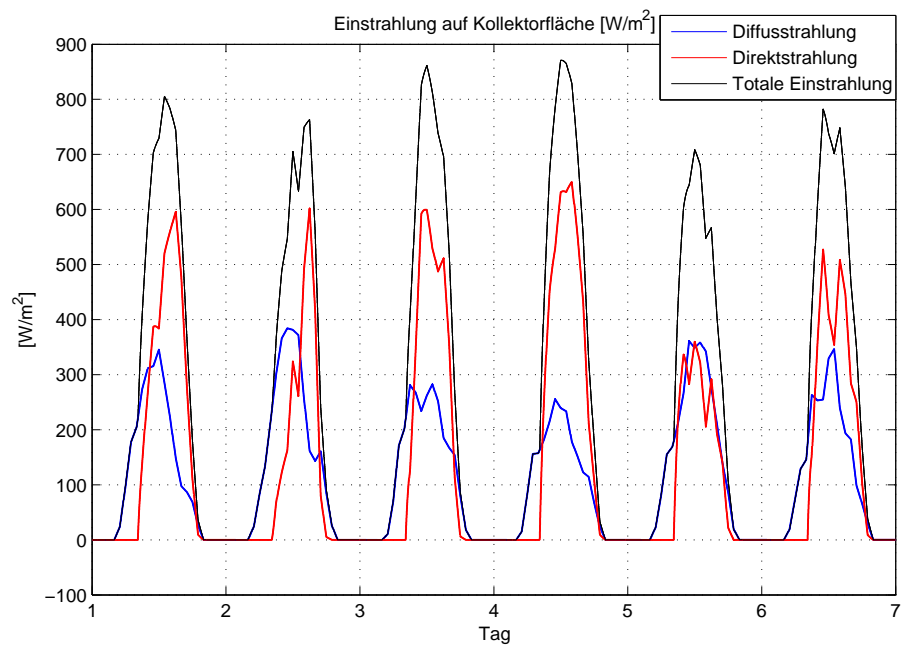


Abbildung 30: Einstrahlung der Sonne: Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung.

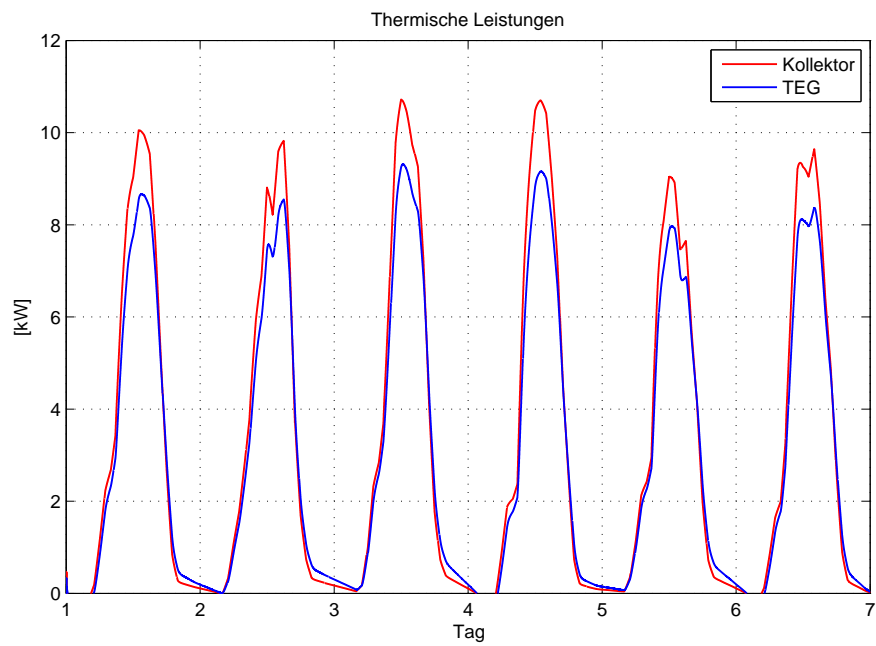


Abbildung 31: Thermische Leistung des Kollektorfelds und des Generators.

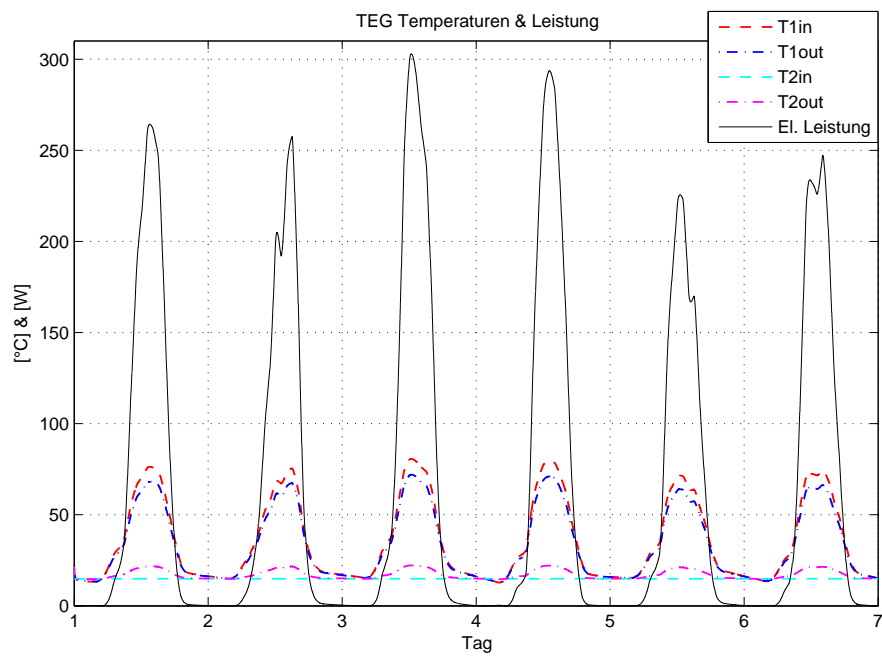


Abbildung 32: Simulationsergebnis der Kollektorkühlung für das fiktive Zukunftsmaterial. TEG-Fläche:  $0.2\text{m}^2$ ,  $\dot{m} = 0.25\text{ kg/s}$

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit hat gezeigt, dass durchaus Möglichkeiten zur thermoelektrischen Energiewandlung in Wohnhäusern vorhanden sind. Dabei sind aber nicht alle gefundenen Konzepte in gleichem Masse geeignet und es gibt grosse Unterschiede in den erreichbaren Leistungen. Alle Berechnungen haben aber gezeigt, dass lediglich eine Eigenversorgung des Systems, das heisst eine elektrische Versorgung der Pumpen und der Steuerelektronik, möglich ist und darüberhinaus kaum zusätzliche Elektrizität gewonnen werden kann. Am vielversprechendsten waren dabei die Szenarios mit Erdregisterkühlung, da diese die grösste Temperaturdifferenz aufweisen und der Generator somit auch die höchste elektrische Leistungsdichte erbringt. Würde ein solches Konzept realisiert, wird der mit Thermogeneratoren ausgestattete Wärmetauscher nur im Sommer benötigt. Im Winter könnte er deshalb wie beschrieben in den Kreislauf der Bodenheizung eingebaut werden, denn die benötigte TEG-Fläche der beiden Szenarien ist fast identisch. So wäre die jährliche Gesamtauslastung um einiges höher.

Um die hier gefundenen Ergebnisse zu bestätigen, wäre ein Test an einer realen Anlage der nächste Schritt. Ein solcher Versuch würde zusätzliche Erkenntnisse vor allem über die Möglichkeiten einer technischen Realisierbarkeit bringen. In naher Zukunft ist davon aber abzusehen, da eine Konkurrenzfähigkeit zu Photovoltaik und anderen Energiewandlern, die in Wohnhäusern Anwendung finden, noch nicht besteht. Thermoelektrische Energiewandlung wird in Wohnhäusern erst eine gewisse Bedeutung erlangen, wenn die Preise für Elektrizität aus dem Netz massiv erhöht werden.

## Anhang

### A TEG's in einem Wärmetauscher

Bei der Nutzung eines Abwärmestroms in einem Gegenstromwärmetauscher mit thermoelektrischem Generator wird die maximale elektrische Leistung nicht bei der maximalen Effizienz des Thermogenerators abgegeben [29]. Die Wärmeenergie steht bei der Abwärmenutzung gratis zur Verfügung und so ist es offensichtlich, dass der Generator im Punkt maximaler Leistungsabgabe betrieben werden sollte. Nach [9] ist dies bei einer dimensionslosen Länge von  $X = 1$  der Fall (Abbildung 7). Ist aber die vom Wärmetauscher übertragene thermische Leistung auch von Bedeutung, so sollte  $X > 1$  gewählt werden. Die folgende Rechnung soll diese Behauptung erläutern. Der thermische Wirkungsgrad eines Wärmetauschers berechnet sich nach [15] folgendermassen:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta T_H}{\Delta T} = \frac{T_H^{out} - T_H^{in}}{T_H - T_C}. \quad (38)$$

Nach [12] beträgt der Temperaturanstieg in einem Gegenstromwärmetauscher mit TEG in Abhängigkeit von  $X$

$$\Delta T_H = \frac{X}{X + 1} (T_H - T_C). \quad (39)$$

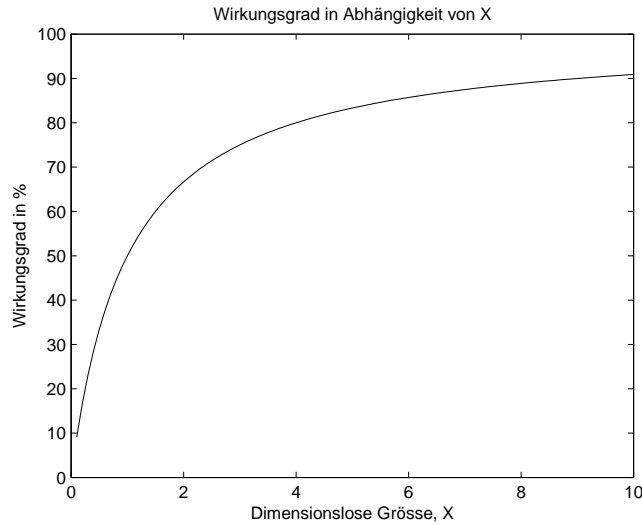


Abbildung 33: Wirkungsgrad eines Wärmetauschers in Abhängigkeit von  $X$ .

Damit ist der thermische Wirkungsgrad des Wärmetauschers gegeben durch

$$\eta_{th} = \frac{X}{X + 1}. \quad (40)$$

Für  $X = 1$  wird also nur noch die Hälfte der möglichen thermischen Energie übertragen. Mit grösserem  $X$  steigt der Wirkungsgrad des Wärmetauschers, wie die Abbildung 33 verdeutlicht.

Wird aber nicht ein Abwärmestrom sondern ein zirkulierender Massestrom verwendet, verliert der Wirkungsgrad des Wärmetauschers etwas an Bedeutung, da die ungenutzte Wärmeenergie nicht verloren ist. Im Allgemeinen ist aber auch in solchen Fällen, wie zum Beispiel einer Solaranlage, ein hoher Wirkungsgrad des Wärmetauschers wünschenswert. Im Falle eines zirkulierenden Massestroms sind für  $X$  also auch Werte kleiner als eins interessant, da so die Effizienz des Generators gesteigert wird.

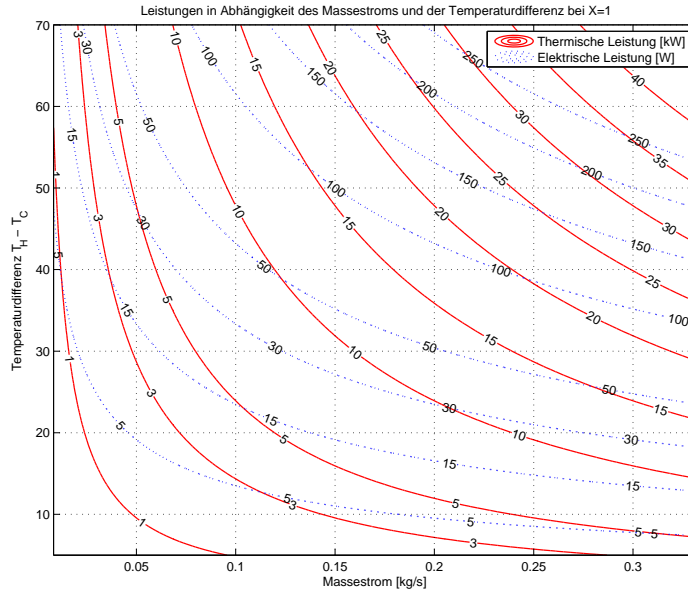


Abbildung 34: Thermische Leistung in  $kW$  und elektrische Leistung in  $W$  in Abhängigkeit des Massestroms und der Temperaturdifferenz bei  $X = 1$ .

Für einen festgelegten Wert  $X$  ist die erzeugte elektrische Leistung nur noch vom Massestrom, der die TEG-Fläche festlegt und der Temperaturdifferenz abhängig. In Abbildung 34 ist sowohl die thermische als auch die elektrische Leistung für verschiedene Arbeitspunkte eines Wärmetauschers mit  $X = 1$  zu sehen.

## B Stirlingmotor

Das Prinzip des Stirlingmotors ist, wie das der Thermoelektrizität, schon seit fast 200 Jahren bekannt. Auch hier hat die Forschung und Entwicklung aus Mangel an geeigneten Materialien bis jetzt kaum brauchbare Produkte geliefert. Dabei ist der Stirlingmotor vor allem im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung interessant, da dank externer Beheizung beinahe beliebige Brennstoffe eingesetzt werden können und so auch Biogas- oder sogar Holzbeheizung möglich ist. So könnten Haushalte nachhaltig mit Wärme und Elektrizität aus Eigenproduktion versorgt werden.

Als ein Beispiel wird hier der Stirlingmotor der Firma AW-TEC AG betrachtet. Dieser befindet sich noch in der Entwicklung, es wurden jedoch schon einige Prototypen gebaut (Abbildung 35).



Abbildung 35: Prototyp eines Stirlingmotors der Firma AW-TEC mit einer elektrischen Leistung von  $1\text{kW}$

Dieser Stirlingmotor hat eine thermische Nennleistung von  $4\text{kW}$  und erzeugt dabei eine elektrische Leistung von  $1\text{kW}$ . Der elektrische Wirkungsgrad liegt mit 17% weit über dem von Thermogeneratoren, was aber auch mit dem viel

höheren Carnotwirkungsgrad zusammenhängt, denn die Brennkammertemperatur beträgt 900°C. In Abbildung 36 sind die Messdaten eines Prototypen beim Test für einen Feldversuch zu sehen.

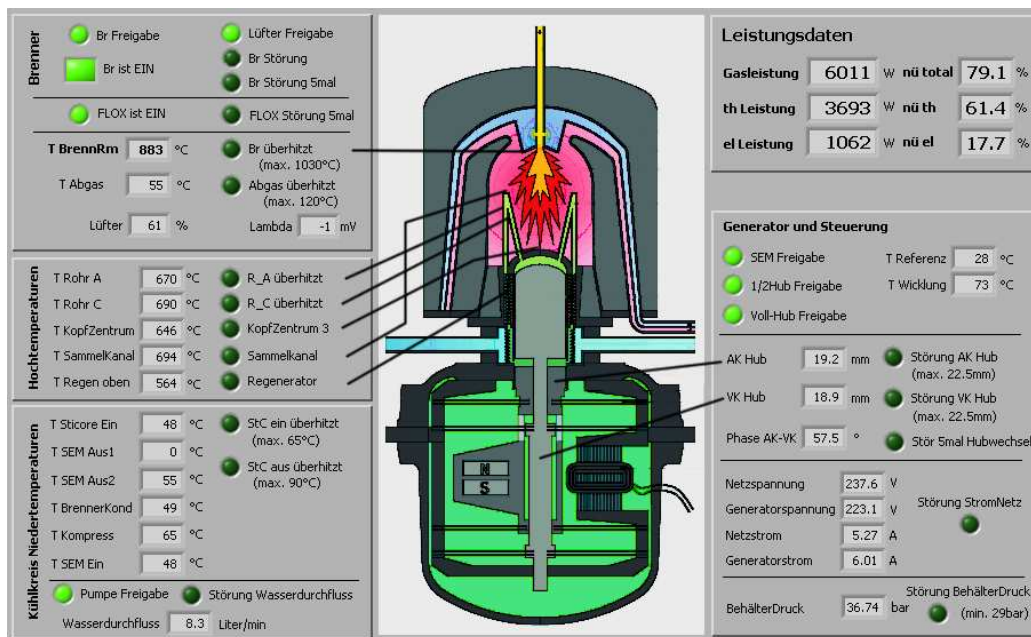


Abbildung 36: Messdaten des Stirlingmotors beim Test

Speziell an dieser Ausführung eines Stirlingmotors ist der Brenner und die Umwandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie. In der Brennkammer findet während dem Betrieb eine hocheffiziente Oxidation des Gases statt, was eine sehr saubere, flammenlose Verbrennung zur Folge hat. Die mechanische Energie des Kolbens wird nicht in eine Rotation umgesetzt, sondern direkt in elektrische Energie, indem starke Permanentmagnete in einer Kupferspule hin und her bewegt werden und so direkt eine Wechselspannung erzeugen.