

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

Problem: Prozessbedingte Abwärme in verschiedenen energieintensiven Prozessen, wie in der Stahl- und Glasherstellung sowie in Großbäckereien bleibt häufig ungenutzt und geht an die Umgebung verloren. Mit Thermoelektrischen Generatoren (TEG) lässt sich Wärme direkt in elektrische Energie umwandeln. Thermoelektrische Abwärmenutzung könnte den Primärenergieverbrauch senken, und damit signifikant zum Klimaschutz beitragen.

Ziel: In diesem Projekt soll der Gesamtwirkungsgrad der thermoelektrischen Abwärmenutzung mit verfügbaren Komponenten unter realistischen Bedingungen ermittelt und verbessert werden. Hierzu soll ein Mehrkammer-Kalorimeter aufgebaut werden, um den thermischen Wirkungsgrad der Wandlung zu messen. Die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrads soll durch einen angepassten Umrichter mit Maximum Power Point Tracking (MPPT) erreicht werden. Im Rahmen des Projektes soll exemplarisch eine Schaltung entwickelt werden, die die Leistung von TEG, betrieben bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen, in eine maximale elektrische Ausgangsleistung umwandelt. Außerdem wird das langfristige Ziel verfolgt, thermoelektrische Hochtemperatur-Generatoren zu entwickeln.

Stand der Technik: Die am häufigsten verwendeten Materialien für TEG sind die Bismutellurid-Verbindungen. Fast alle kommerziell verfügbaren TEG sind aus diesen Halbleitern aufgebaut. Der erreichte ZT-Wert (Effektivitätszahl) liegt bei ca.1 zwischen Raumtemperatur und 100 °C. Ein wesentlicher Aspekt thermoelektrischer Energiewandlung ist die Tatsache, dass der Wirkungsgrad nicht nur mit den Eigenschaften des Halbleiters selbst, sondern vor allem mit dem thermodynamischen Carnot-Wirkungsgrad skaliert. Dieser Zusammenhang wird oft unzureichend diskutiert. Die verwendete Aufbautechnik beruht bisher auf konventioneller Lot-Technik und begrenzt daher den nutzbaren Temperaturbereich. Temperaturwechselbelastungen führen häufig zum Ausfall, beispielsweise durch Adhäsionsbruch der Lot-Metallisierung am Halbleiter.

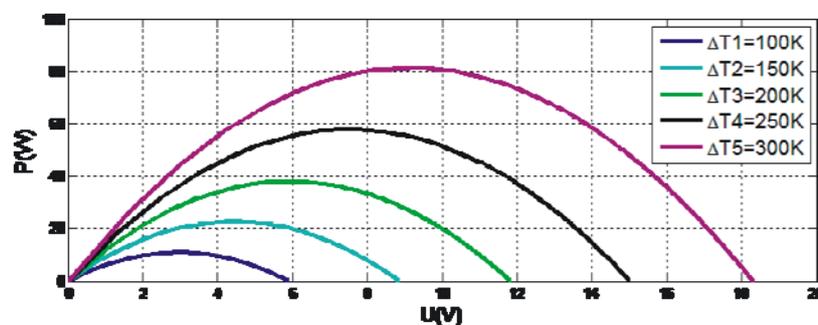


Abbildung 1: berechnete Leistungskennlinie eines kommerziellen Bismutellurid-Thermogenerators bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

Da die Ausgangsspannung der Thermogeneratoren mit der Temperaturdifferenz schwankt, ist es notwendig, eine Übertragerschaltung zur Leistungsanpassung zwischen Thermogeneratornetzwerk und Verbraucher einzusetzen (die simulierte Leistungskennlinie eines Thermogenerators ist in Abbildung 1 dargestellt). Ein wichtiger Designfaktor der TEG-Schaltung ist die Anordnung der thermoelektrischen Module. Da für Leistungsanwendungen mehrere Module verwendet werden müssen, können diese in Serie, parallel oder gemischt in seriellen oder parallelen Ketten angeordnet werden.

Für das Schaltungsdesign und die Modulanordnung lassen sich aus anderen Bereichen der elektrischen Energietechnik vorhandene Erfahrungen nutzen. So sind Erfahrungen aus dem Bereich der Photovoltaik und der Brennstoffzelle von Nutzen, weil dabei ebenfalls zahlreiche Zellen in Gruppenschaltung zur Leistungsanpassung erforderlich sind. Die Verschaltung vieler thermoelektrischer Module hat aber den Nachteil dass die wirksame Temperaturdifferenz nicht an allen Modulen gleich ist, was zu unterschiedlicher Leistung und innerem Widerstand und damit zur Fehlanpassung führt. Hierzu soll ein sogenannter „distributed MPPT“ erforscht werden.

Die Effizienz von elektronischen Spannungswandlern konnte in den letzten Jahren durch Miniaturisierung und Bauelementintegration immer weiter gesteigert werden. Darüber hinaus trug die Reduktion des Durchlasswiderstandes von Leistungshalbleitern zur Verbesserung bei. Weitere Verbesserungen z.B. durch aktive Kompensation von Schaltverlusten sind zu erforschen.

Lösungsweg: Für die Entwicklung der Hochtemperaturgeneratoren wird eine neue Verbindungstechnik erprobt. Es handelt sich dabei um ein Versintern einer nanoporösen Silber-Zwischenschicht bei relativ niedrigen Temperaturen von ca. 250°C und Drücken bis zu 30 MPa. Es ergibt sich eine kompaktierte Silber-Schicht zwischen 2 Verbundpartnern, die hervorragende elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften aufweist und mittlerweile auch als Lot-Ersatz in der Produktion von Leistungselektronik-Bauelementen angewandt wird. Da der Schmelzpunkt von Silber bei über 900°C liegt, kann die Verbindung auch oberhalb der Prozess-temperatur von 250°C eingesetzt werden.

Für die Energiekonditionierung wird ein effizienter Wandler (Tief-/Hochsetzsteller) entwickelt. Es werden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads (z.B. durch aktive Kompensation von Schaltverlusten mit Resonanzwandlern, Auslegung und Dimensionierung von Bauelementen, mehrphasige Schaltung) untersucht. Für eine maximale Energieausbeute wird auch ein maximaler dynamischer MPPT-Wirkungsgrad angestrebt und dafür ein stabiler Regelungsalgorithmus des Wandlers entworfen und erprobt.

Um verschiedene Versuchsreihen durchzuführen, ist es nötig, eine genau kontrollierte Temperaturdifferenz an die Module anzulegen. Dafür wird ein Mehrkammerkalorimeter mit Wärmequelle, Modulnetzwerk, Wärmesenke und entsprechender Messtechnik aufgebaut. Damit ist es

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

möglich, den Wärmefluss in den Thermogenerator, die Temperaturdifferenz und die aus dem System abfließende Wärmemenge zu messen. So lässt sich der Gesamtwirkungsgrad der (Ab-)Wärmeverstromung bestimmen.

Projektstand: Für die Versuchsdurchführungen wurde ein Mehrkammerkalorimeter aufgebaut, mit dem unterschiedliche Temperaturdifferenzen eingestellt werden können und die zu- und abfließende Wärmemenge genau gemessen werden können. Der Aufbau einer Kammer ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

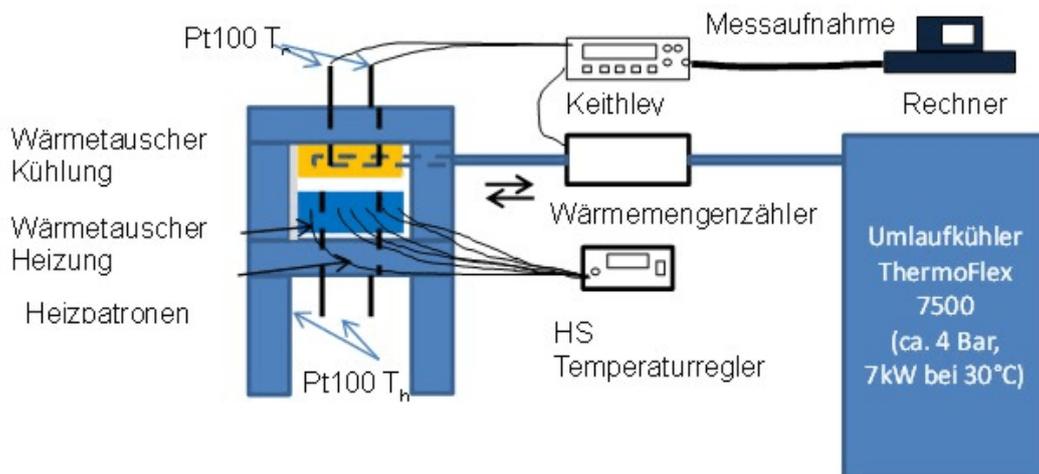


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Kammer des Kalorimeters

Für die Energiekonditionierung wurde ein DC/DC Wandler in verschiedenen Topologien zum Vergleich und Optimierung realisiert. Abbildung 3 zeigt die Platinen von drei entwickelten Prototypen.

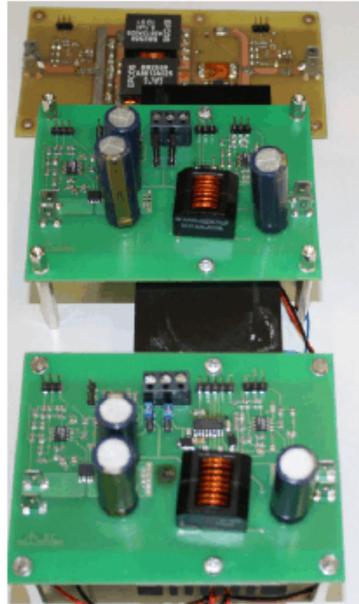


Abbildung 3: (oben) zweiphasiger Hochsetzsteller als Synchronwandler, (Mitte) Tief-/Hochsetzsteller als B2-Vollbrückenwandler, (unten) Tief-/Hochsetzsteller als Vollbrücke mit Schottky-Dioden anstatt des Synchronschalters

Der zweiphasige Synchronwandler hat sich für eine Nennleistung von 90 W pro Thermogeneratorkonzept bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen ($\Delta T = T_h - T_c = 0,50 \text{ K} \dots 200 \text{ K}$) als das energieeffizienteste Schaltungskonzept ergeben. Abbildung 4 zeigt den gemessenen Wirkungsgrad der entwickelten Prototypen bei unterschiedlichen Eingangsleistungen.

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

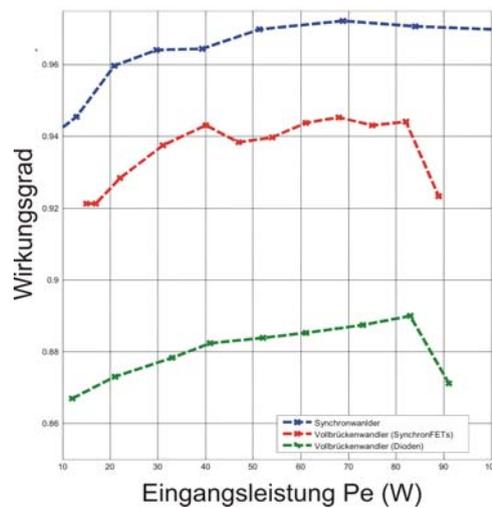


Abbildung 4: gemessener Wirkungsgrad der entwickelten Wandler bei unterschiedlichen Eingangsleistung

Durch den zweiphasigen Aufbau ergibt sich eine deutliche Verringerung der Strombelastung der Bauelemente wodurch ein großer Anteil der Leitverluste reduziert wird. Durch das gezielte Abschalten einer Phase ist auch der erreichte Teillastwirkungsgrad über 94 % deutlich besser. Für die Regelung wurden unterschiedliche MPP-Tracking Verfahren entwickelt und implementiert. Die Einstellung des Arbeitspunktes kann über eine modellbasierte Berechnung aus der gemessenen Temperaturdifferenz oder über die Verfolgung des Leistungsgradienten über die Zeit erfolgen. Die Schrittweite mit der sich das Tastverhältnis des Wandlers ändert, kann auch variabel eingestellt werden um eine bessere Dynamik bei einem Lastwechsel zu erhalten. Abbildung 5 zeigt den gemessenen dynamische MPPT-Wirkungsgrad bei zwei erprobten MPPT-Verfahren.

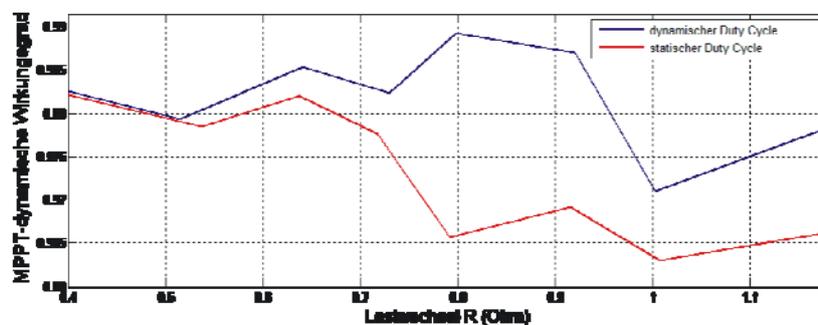


Abbildung 5: Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad des Wandlers bei einem Lastwechsel

Das in dem Mehrkammerkalorimeter aufgebaute Netzwerk aus 12 Thermogeneratoren wurde am Eingang des entwickelten Wandlers (mit MPPT-Regelung) angeschlossen. Durch das optimierte MPPT-Regelverfahren und ein innovatives Schaltkonzept aus dem zentralen DC/DC-Wandler und ergänzend gesteuerten Ladungspumpen an einzelnen Strängen des Thermogeneratortnetzwerks konnte in einem heterogenen Temperaturfeld ein MPPT-Wirkungsgrad von 98 % bis 99 % erreicht werden.

Für eine weitere Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades ($\eta_{\text{elek}} = \eta_{\text{DC/DC}} \eta_{\text{MPPT}}$) wurde die simulationsgestützte Analyse einer aktiven Kompensation von Schaltverlusten an den Leistungsschalter des DC/DC Wandlers untersucht. Abbildung 6 zeigt eine Beispielschaltung des Resonanzwandlers als Tiefsetzsteller.

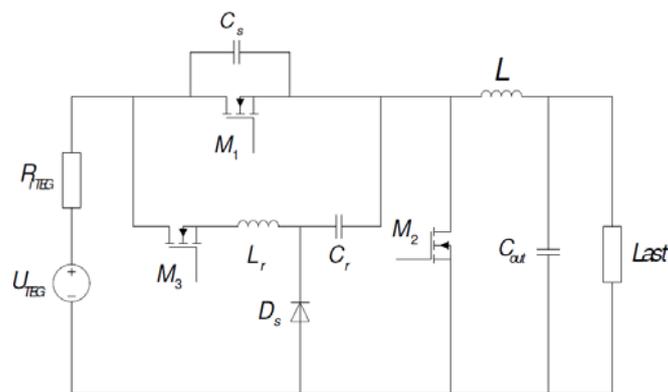


Abbildung 6: Tiefsetzsteller mit aktiver Kompensation der Schaltverluste durch einen Resonanzkreis und einen Hilfshalter

Mit Hilfe einer genauen modellbasierten Ansteuerung eines Hilfsschalters S1 und einem Resonanzkreis, bestehend aus der Spule L_r und dem Kondensator C_r , lässt sich der MOSFET M_1 spannungsfrei ein- und ausschalten. Durch eine genaue Ansteuerung erfolgt das Schalten des MOSFETs genau zu dem Zeitpunkt zu dem durch die Eigenschwingung des Resonanzkreises eine Spannung von Null am MOSFET erzwungen wird (ZVS: Spannungsloses Schalten). Die Strombegrenzung an der Spule L_r ermöglicht, dass der Hilfsschalter S1 auch schaltverlustfrei betätigt wird (ZCS: Stromloses Schalten). Die im Kondensator C_r gespeicherte Energie wird nutzbringend über die Schottky Diode D_s an die Last zurückgespeist. Die Analyse zeigt, dass durch diesen Ansatz eine Erhöhung des Wirkungsgrades des Wandlers um mindestens 1 % möglich ist.

Projektpartner: Das Projekt wird in Kooperation mit dem Institut für Halbleitertechnik (TU Braunschweig) durchgeführt.

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

Fördernde Stelle: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Laufzeit d. Vorhabens: 01.09.2011 - 28.02.2016

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb
abdelhamid.bentaleb@tu-clausthal.de (Tel:72-2593)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
info@iee.tu-clausthal.de