

Thermogeneratorpaneele basierend auf multifunktionalen Abstandsgewirken

Autoren: Anke Golla, Johannes Mersch, Gerald Hoffmann, Chokri Cherif

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden, Dresden

Kurzfassung

Thermoelektrische Generatoren (TEG) bieten das Potenzial Abwärme verschleiß- und wartungsfrei in elektrischen Strom umzuwandeln und damit zur Einsparung von CO₂-Emissionen beizutragen. Die Funktionsweise der TEG beruht auf dem materialinhärenten Seebeck-Effekt. Im Rahmen des IGF-Projektes 21144 BR wurden Thermogeneratorpaneele basierend auf abstandsgewirkten glasfaserverstärkten Paneelen entwickelt. Im Wirkprozess wurde die Integration von Glasfasern und thermoelektrischen Drähte umgesetzt. Dadurch wurden Leichtbaupaneele mit guten strukturmechanischen Eigenschaften (Druck-, Biegefestigkeit) und zusätzlicher Thermogenerator- und Wärmeisolationfunktion realisiert. Diese sogenannten Multithermogeneratorpaneele (MTP) können mit ihrer autarken elektrischen Leistung für den Betrieb von Sensoren oder Kleingeräten genutzt werden.

Einleitung

Der globale Energiebedarf steigt mit den laufenden industriellen Fortschritten und dem Bevölkerungswachstum stetig an. Die Energieversorgung nachhaltig zu gestalten, ist mit der aktuellen Dringlichkeit des Klimaschutzes, zwingend notwendig, um die Wirtschaft und auch die Zukunft nachfolgender Generationen zu sichern. Im Zuge der rasanten Entwicklung des Internet of Things (IoT) und der Digitalisierung besteht außerdem große Nachfrage nach autarken mobilen Stromquellen, mit denen selbstständig und zuverlässig elektronische Sensoren und Kommunikationsgeräte betrieben werden können. Die meisten technischen Prozesse nutzen nur 25 % bis 40 % der eingesetzten Energie zur Umwandlung in mechanische Energie. Der Rest wird in thermische Energie umgewandelt, die in der Regel verloren geht. Ein vielversprechender Ansatz zur Nutzung dieser thermischen Energie ist der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren (TEG).

Die Stromerzeugung mittels TEG wird durch den Seebeck-Effekt beschrieben. Dabei entsteht zwischen der warmen (T_h) und der kalten Kontaktstelle (T_k) der thermoelektrischen Funktionsmaterialpaare A und B, auch Thermoelemente (TE) genannt, eine elektrische Spannung (U). Die erreichbare Leistungsausbeute eines TEG ist neben der Umgebungstemperaturdifferenz (ΔT) von den materialspezifischen Parametern der eingesetzten TE abhängig. Diese Parameter werden durch die Gütezahl (ZT) beschrieben und umfassen die Seebeck-Koeffizienten (α in $\mu\text{V/K}$), die elektrische (σ , möglichst hoch) und die thermische Leitfähigkeit (λ , möglichst gering). Für eine hohe Leistungsausbeute sind Materialien mit einer hohen Differenz im Seebeck-Koeffizienten notwendig. Außerdem ist die Leistungsausbeute eines TEG-Moduls maßgeblich von der Anzahl in Reihe geschalteter TE in einem Modul abhängig. Werkstoffe für einen hohen thermoelektrischen Nutzeffekt basieren auf seltenen Rohstoffen, wie Bismut, Antimon und Tellur, die eine gute elektrische Leitfähigkeit, kombiniert mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Das Vorkommen und die Lebensdauer der Halbleiterelemente ist jedoch begrenzt und das Recycling aufwändig. Sie sind außerdem kostenintensiv und teilweise toxisch.

Daher werden von der Wirtschaft und der Forschung Entwicklungen neuer Materialien oder die Steigerung der Leistung der TEG sowie kostengünstigere Herstellverfahren vorangetrieben. Allerdings bestehen diese entwickelten Verfahren zumeist aus aufwändigen kombinierten Gieß- und Sinterprozessen sowie einer kostenintensiven notwendigen Nachbearbeitung. Zur Schaffung eines effizienten Herstellverfahrens für TEG mit einer produktiven Integrationsmöglichkeit einer hohen Anzahl an TE bietet die Abstandswirktechnik großes Potenzial. Mit dem Einsatz von Funktionsmaterialien und Hochleistungsgarnen in den Abstandsgewirken, wie Glasfasergarne, und

einer späteren Infiltrierung und Konsolidierung mit Harzsystemen lassen sich großflächige Faserverbundstrukturen (z. B. Leichtbaupaneele) mit geschlossenen Deckschichten generieren, die neben der TEG-Funktion sehr gute strukturmechanische Eigenschaften aufweisen und auch als tragende Strukturen im Fahrzeug- oder Anlagenbau mit Wärmeisolation einsetzbar sind [1]. Im Rahmen des Forschungsprojektes IGF 21144 BR wurden Leichtbaupaneele als tragende Bauteile mit multifunktionalen Eigenschaften, Multifunktionsthermogeneratorpaneele (MTP), realisiert, die durch die Umwandlung industrieller Abwärme in elektrischen Strom mit gleichzeitigem Kühleffekt zur Effizienzsteigerung von Batterien oder Elektromotoren in der Elektromobilität und von Hybridsystemen beitragen.

Entwicklung der Multithermogeneratorpaneele (MTP)

Der Grundaufbau der MTP besteht aus einem glasfaserverstärkten Abstandsgewirke, welches schlussendlich verharzt das Substrat des TEG darstellt. Die Thermoelemente (TE) werden in Form von Funktionsdrähten aus Eisen und Konstantan als Polfadensystem in der RR-Raschelwirkmaschine in den Abstand integriert, wie in Abbildung 2 veranschaulicht. Weiterhin gewährleisteten Polfäden aus Monofilamenten, sowie Glasfasern (EC9-68x2) die Stabilität gegenüber mechanischer Beanspruchung. In den Deckflächen stellen je zwei Maschenfadensysteme aus PES (100/40 dtex) die Fixierung der Schuss- und Stehfäden sowie der TE sicher. Die Kontaktierung und Verschaltung der TE erfolgt durch die übereinanderliegende Anordnung und Verbindung der Funktionsdrähte in den Maschen der Gewirkebindung.

Zur Entwicklung und Auslegung der thermoelektrischen Struktur der MTP wurde ein elektrisches Modell entwickelt, in welchem die Anzahl und Geometrie der TE, ihre elektrische Kontaktierung, sowie die Art der Verschaltung der TE (Reihen-, Parallel- oder Mischschaltung) variabel ist. Für das Modell wurden gekoppelte multiphysikalische Ersatzschaltungsmodelle unter Ausnutzung der mathematischen Analogien der elektrischen/thermischen/mechanischen Domäne angewendet, in LT-Spice implementiert und im Hinblick auf die zuvor beschriebenen Parameter untersucht (Abbildung 1). Mittels des Modells kann die Schaltung der TE an den Lastwiderstand des Anwendungsfalls angepasst werden, sodass die maximale Leistung des TEG erreicht wird. Das vorhandene Modell wurde weiterhin durch das thermische Verhalten hinsichtlich Wärmeleitung und Wärmekapazität der Struktur erweitert.

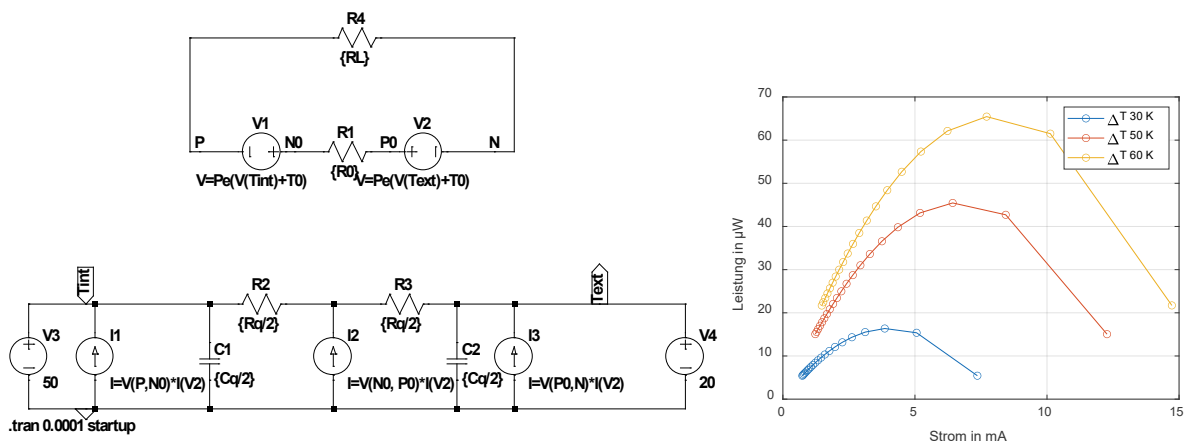


Abbildung 1: Modell der MTP in LT-Spice und Simulation der elektrischen Leistung

Um die angestrebte thermoelektrische Struktur in eine Gewirkebindung für die RR-Rascheltechnologie zu überführen, wurden mehrere Bindungsvarianten für die Funktionsdrähte im Abstand des Panels erarbeitet, umgesetzt und analysiert [2]. Weiterhin wurden unterschiedliche elektrische Verschaltungen der Funktionsdrähte entwickelt. Dabei ermöglicht eine kombinierte Reihen- und Parallelschaltung die maximale Einbindung von TE pro Fläche von bis zu 150.000 TE/m² und eine bessere Ausfallsicherheit im Vergleich zur Reihenschaltung. Der Innenwiderstand und die elektrische Leistung kann direkt über die Abmaße des Panels angepasst

werden. Die Struktur des Abstandsgewirkes mit dieser Verschaltung ist im Modell in Abbildung 2 dargestellt.

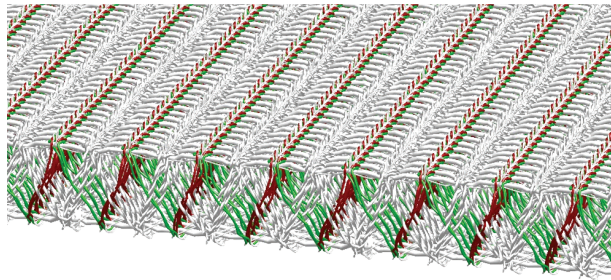


Abbildung 2: Gewirkmodell des MTP-Halbzeugs

Zur Herstellung des thermoelektrischen Abstandsgewirkes als Halbzeug für die MTP wurde eine RR-Raschelwirkmaschine MiniTronic 808 von RIUS Comatex S.A. eingesetzt. Mit dem Ziel die Funktions- und Hochleistungsmaterialien schädigungsarm zu verarbeiten, wurde eine Nadelbestückung mit der Feinheit E12 verwendet. Für die Maschineneinstellung und die technologisch-konstruktive Weiterentwicklung der Abstandswirktechnik wurde zunächst der Bauraum der RR-Raschelmaschine und der Einzug der Drähte in den vorhandenen Garnlauf analysiert. Der Fadenlängenausgleich für die Maschenbildung, die Fadenwippe, ist kommerziell als Fadenwippe mit Stahlfedern umgesetzt. Dadurch wird die für die Fadensysteme benötigte Fadenzugkraft erreicht. Bei ebendieser Fadenzugkraft entstehen für die Funktionsdrähte aus Eisen- und Konstantan jedoch irreversible Knicke an den Umkehrpunkten der Lochnadeln. Diese Knicke verhindern das Gleiten der Drähte durch die Lochnadeln, sodass ein Drahtbruch entsteht. Die Drähte benötigen eine sehr niedrige Fadenzugkraft sowie einen Längenausgleich mit niedriger Federkonstante, da materialbedingt nur eine geringe elastische Dehnung (0,1 %) vorhanden ist.

Weiterhin waren technologische Modifikationen zur Verarbeitung von Glasfasergarnen als Schuss-, Steh- und Polfaden auf der RR-Raschelwirkmaschine erforderlich. Die Glasfaserrovings (350 tex) wurden bei der Verarbeitung als Polfadensystem aufgrund der Querkräftenfälligkeit bereits vor der Maschenbildung durch die kleinen Umlenkradien in der Lochnadel abgeschert. Daher wurden verzwirnte Glasfaserrovings als Verstärkungsfaser eingesetzt. Zur Verarbeitung dieser Glasfaserzwirne wurde ein Fadenliefersystem mit einer passiven Fadenzufuhr und einer konstanten Fadenzugkraft von 20 cN entwickelt und umgesetzt. Mittels angetriebener Spulenaufnahme für Glasfasern und Tänzerwalze zur Zugkraftregelung lässt sich dieses Prinzip automatisieren und auf ein System für hohe Produktionsgeschwindigkeiten übertragen.

In einem mehrstufigen Handlaminierverfahren wurden die hergestellten MTP-Halbzeuge mit hochtemperaturbeständigem Harz infiltriert und als MTP Demonstrator verarbeitet (Abbildung 3).

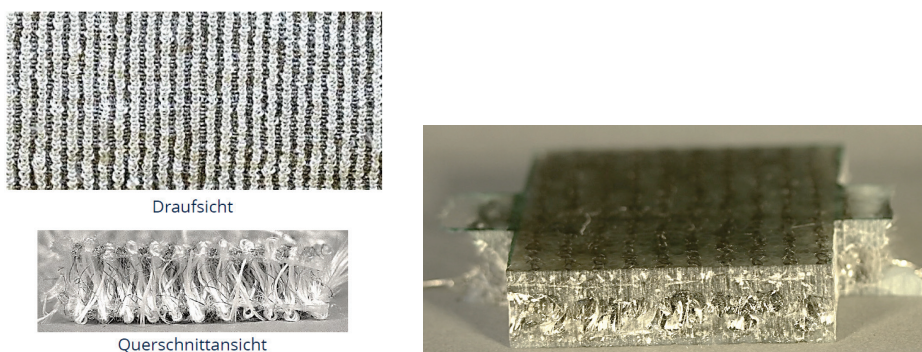


Abbildung 3: links: MTP Halbzeug, rechts: MTP Demonstrator

Elektrische Leistung der MTP

Zur Auswertung der thermoelektrischen Leistung der MTP wurde ein gekoppelter elektrisch-thermischer Versuchsstand entwickelt, der durch jeweils ein Peltier-Element an der Ober- und Unterseite eine aktive Erwärmung bzw. Kühlung realisiert. Damit sind Temperaturdifferenzen von

bis zu 80 K erreichbar. Zwischen den Peltierelementen und der Probe sind Platten aus Aluminium eingeschraubt. Diese erfüllen zwei Funktionen. Erstens homogenisieren sie die Wärmeverteilung. Zweitens sind in den Platten jeweils Pt100-Temperaturfühler (Präzisionsklasse A) eingebracht. Die Temperaturfühler wurden dabei in Bohrungen platziert und mit Wärmeleitpaste verklebt, sodass eine gute Wärmeleitung zwischen Peltierelement, Probe und Temperatursensoren gewährleistet ist und die Temperaturabweichung zwischen Sensor und TEG-Oberfläche minimal ist. Die Widerstände der Pt100-Fühler wurden mit einem Keithley DAQ 6500 Präzisionsmultimeter aufgenommen. Die Ansteuerung des Multimeters erfolgte durch Matlab-Simulink. Anhand der gemessenen Temperaturen wurde die Spannungsquelle über SCPI-Befehle und einen PID-Regler geregelt, um eine präzise und stabile Kontrolle der Temperaturdifferenz zu erreichen. Gleichzeitig ermöglichte das Präzisionsmultimeter die Messung der vom TEG erzeugten Spannung, des durch den Lastwiderstand fließenden Stroms sowie des Innenwiderstands des TEGs. In Abbildung 4 sind der Prüfstand mit dem das Temperaturprofil während eines Versuchs mit 60 K Temperaturdifferenz und die aufgenommene Strom-Spannungs-Kennlinie abgebildet.

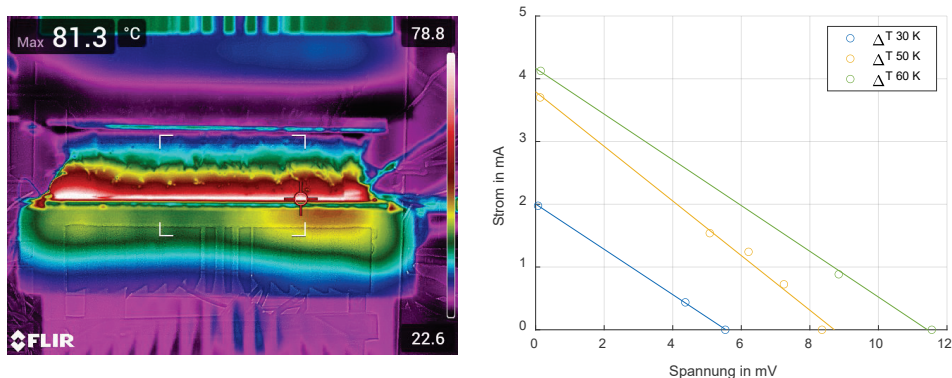


Abbildung 4: Thermoelektrischer Prüfstand und aufgenommene Strom-Spannungs-Kennlinie

Mittels Präzisionsmultimeter wurden außerdem die Kontaktpunkte der Funktionsgarne in der gewirkten TEG-Struktur auf ihre Übergangswiderstände hin überprüft sowie der Gesamtwiderstand der TEG-Module ermittelt. Die Kontaktwiderstände zwischen den Funktionsdrähten lagen konstant unter $0,1 \Omega$. Entgegen der Erwartungen war dies auch nach der Faserverbundbildung der Fall, sodass der Innenwiderstand des finalen Demonstrators $0,9 \Omega$ beträgt. Auch der thermoelektrische Effekt des MTP wurde durch das Harz nicht nachteilig beeinträchtigt. Dies wurde durch Vergleichsmessungen der MTP am Leibniz Institut für photonische Technologien (ipht) und bei der itp GmbH ebenfalls bestätigt.

Die Projektergebnisse zur Herstellung und zu den Eigenschaften von abstandsgewirkten MTP aus Eisen und Konstantan bilden eine Basis für die zielgerichtete Weiterentwicklung einer effizienten Fertigung von vertriebsreifen TEG. Die Ausnutzung der Produktivität der RR-Raschelwirkmaschine trägt dazu bei, die sonst kostenintensiven alternativen Energiekonzepte für Bevölkerung und Wirtschaft zugänglich und profitabel zu gestalten, sodass zum Erhalt der Umwelt beigetragen wird.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 21144 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden (ITM) dankt den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Der Abschlussbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden vorhanden [3].

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literaturverzeichnis

- [1] HOFFMANN, Gerald ; FRANZ, Christian ; CHERIF, C.: *Entwicklung von Leichtbaupaneelen auf Basis von Abstandskettengewirkestrukturen aus Hochleistungsfilamentgarnen für Verbundwerkstoffe - Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben 17835 BR.* 12.11.2015
- [2] DALLMANN, Anke ; FRANZ, Christian ; HOFFMANN, Gerald ; CHERIF, Chokri: *Development of spacer warp knitted thermoelectric generators.* In: *Smart Materials and Structures* 30 (2021), Nr. 3, S. 35034
- [3] HOFFMANN, Gerald ; GOLLA, Anke ; CHERIF, C.: *Entwicklung von integral gewirkten Abstandsstrukturen mit integrierten thermoelektrischen Generatoren (Textile Multithermogeneratorpaneele [MTP]) - Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben 21144 BR.* 20.12.2022