



Drucktechnologien zur Herstellung thermoelektrischer Generatoren

Prof. Dr.-Ing. Marcus Reichenberger, M.Sc. Kristina Grunewald, Dr. Jens Helbig
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Thermoelektrische Generatoren (TEG) können nicht mehr wirtschaftlich nutzbare Abwärme in elektrische Energie umwandeln. Im Projekt sollten TEG drucktechnisch mit umweltfreundlichen Nanomaterialien prototypisch realisiert werden. Die Anwendungspotentiale derartiger TEG liegen im Bereich der Sensorik und weiterer Low-Power-Anwendungen.



Abbildung: Drucktechnische Herstellung eines dreischenkigen TEG (rechts) mittels Inkjetdruck- (links) und Jet-Dispense-Verfahren (Mitte)

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine Literaturrecherche und Marktanalyse zu umweltfreundlichen Nanomaterialien, welche für die verfügbaren Druckprozesse geeignet sind. Es wurde das organische Nanomaterial PEDOT:PSS (intrinsisch leitfähiges Polymer) in pastöser Form ausgewählt, mit dem in Kombination mit Silberpaste und Silbernanotinte erste TEG - Grundstrukturen mit unterschiedlichen Drucktechniken realisiert werden konnten. Nach Durchführung der elektrischen Charakterisierung (Zielgrößen: erzielbare Thermospannung und Widerstand) erfolgte eine Festlegung auf eine geeignete Material- und Druckverfahrenskombination auf dem Zielsubstrat Polyimid (PI). PI wurde aufgrund seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit und seiner thermischen Stabilität im Vergleich zu anderen flexiblen Substraten ausgewählt. Insbesondere die thermische Stabilität ist wichtig für die Verdichtung der Silberstrukturen bei bis zu 300 °C.

Es konnte für alle untersuchten Druckprozesse eine Thermospannung von 2 mV für einen dreischenkigen TEG bei einer Temperaturdifferenz von ca. 65 K erzielt werden. Die Festlegung auf geeignete Herstellungsprozesse bzw. deren Kombination erfolgte aufgrund der sich ergebenden Widerstände. Es wurde erkannt, dass sich lediglich zwei Prozesse eignen, da sie die niedrigsten Widerstände aufwiesen. Der reine Jet-Dispense-Prozess wurde aufgrund von Rissbildungen in den Silberstrukturen nicht weiter optimiert. Es erfolgte eine Festlegung auf rein digitale, werkzeuglose Druckverfahren:

- Inkjetdruck für das Applizieren der Silbernanotinte
- Jet-Dispense-Verfahren für die PEDOT:PSS Paste

Nach Parameteroptimierung des Jet-Dispense-Prozesses erfolgten geometrische Anpassungen an den vorliegenden Strukturen unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften. Weiterhin wurden Trocknungsuntersuchungen in Abhängigkeit von den Leitfähigkeiten der Strukturen für unterschiedliche Temperaturen durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung der Trocknungstemperatur und somit auch eine Reduzierung der

Trocknungszeit keinen negativen Einfluss auf die Widerstände der PEDOT:PSS Strukturen hat, weshalb eine Trocknung bei 120 °C von 20 Minuten ausgewählt wurde.

An geeigneten bzw. angepassten TEG-Grundstrukturen sind Leistungskurven in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz aufgenommen worden (siehe folgende Abbildung). Die Grundstrukturen verhalten sich wie aktive, lineare Zweipole.

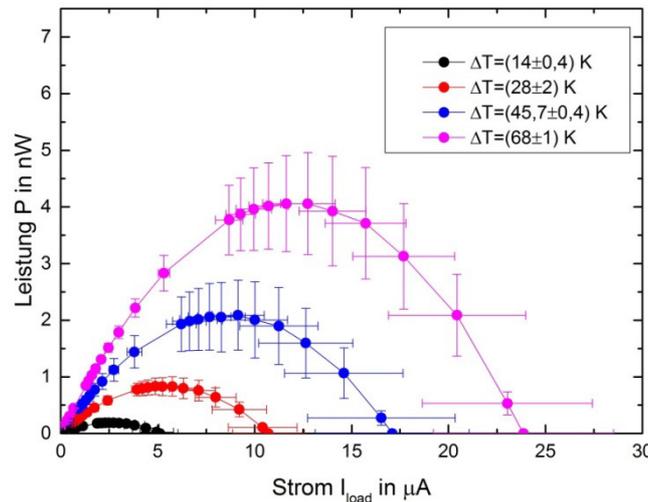


Abbildung: Leistungskurven von TEG-Grundstrukturen

Im dargestellten Beispiel ergab sich ein Innenwiderstand von 29 Ω bei einer Temperaturdifferenz von ca. 68 K und somit eine maximale Leistung von 4,1 nW für eine TEG-Grundstruktur. Werden die Werte für einen TEG mit 1000 Schenkelpaaren in Reihe skaliert, wird rechnerisch eine Leistung von 4,1 µW mit einem Innenwiderstand von 29 kΩ erreicht, was im Hinblick auf die Anwendung in einem mobilen System von der Leistung (zwischen 1,5 µW und 100 µW) her ausreicht. Allerdings muss dazu der Innenwiderstand noch reduziert werden, weshalb weitere Optimierungsanstrengungen erforderlich sind.

Deshalb wurde ein Konzept entwickelt, in dem der Innenwiderstand reduziert und ein DC/DC Wandler verwendet werden soll, um den notwendigen Strom und die notwendige Spannung zu erreichen. Die Stromerhöhung und somit die Reduzierung der Innenwiderstände können über eine Flächenstruktur realisiert werden. Für die Spannungserhöhung ist eine Reihenschaltung der Flächen notwendig. Gleichzeitig müssen diese Strukturen, um wiederum der resultierenden Widerstandserhöhung entgegenzuwirken, noch parallel geschaltet werden. Für die Ansteuerung des DC-DC Wandlers und das erfolgreiche Betreiben der LED muss eine Leistungsanpassung durch geeignete Parallel- und Reihenschaltung der Strukturen erfolgen und ein Konzept entwickelt werden, wie eine adäquate Verschaltung realisiert werden kann.

In der Projektlaufzeit konnte gezeigt werden, dass die eingesetzten umweltfreundlichen Nanomaterialien im Druckprozess nach Optimierung der Parameter reproduzierbar verarbeitet werden konnten. Es erfolgten Geometrieanpassung und Leistungsbestimmungen optimierter TEG-Grundstrukturen, die zeigen, dass diese für die bisher geplante Anwendung in mobilen Systemen zwar geeignet erscheinen, allerdings deren Innenwiderstände noch zu hoch sind. Dahingehend ist ein Demonstrator-Konzept entwickelt worden, welches die elektrischen Eigenschaften verbessern soll und eine LED mit Hilfe eines DC-DC Konverters ansteuert.