

---

# FlexTEG

## Flexibler thermoelektrischer Generator auf Basis bedruckbarer Vliesstoffstrukturen

M.Sc. Liana Sinowzik

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



1. Motivation
2. Thermoelektrische Grundlagen
3. Zielstellung
4. Lösungsweg
5. Ergebnisse
6. Anwendungen
7. Zusammenfassung
8. Ausblick



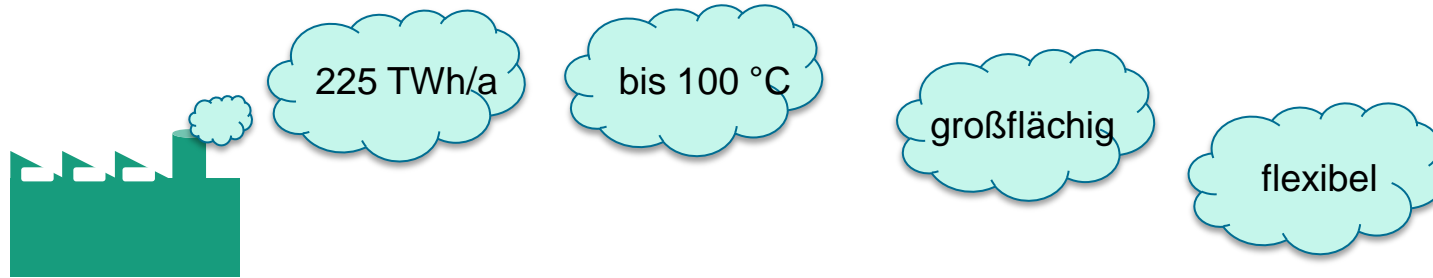
SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



# Motivation

## Motivation - wirtschaftlich

- Energierückgewinnung aus Abwärme → durch thermoelektrische Generatoren (TEG)
- Öffnung neuer Anwendungsfelder → energieautarke Elektronik/Sensorik
- Massenfertigungstaugliche Technologie → Vliesstoffherstellung/Drucktechnologie



## Motivation – technologisch

- Entwicklung von polymeren Materialien für TE → intrinsisch p- und n-leitende Polymere
- Entwicklung eines neuartigen TEG-Konzepts → flexibel durch Vliesstoffe



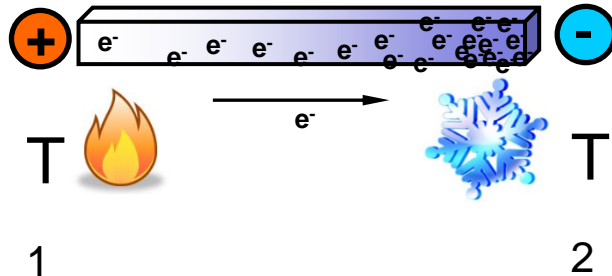
SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



# Thermoelektrische Grundlagen

Die Umwandlung von Wärme in Strom mittels thermoelektrischem Generator basiert auf dem von Thomas Seebeck 1821 entdeckten gleichnamigen **Seebeck-Effekt**, welcher die Erzeugung einer elektrischen Spannung  $U_{\text{therm}}$  zwischen den Kontaktstellen zweier leitenden Materialien beschreibt, sofern diese einer Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_{\text{heiss}} - T_{\text{kalt}}$  unterliegen.

## Seebeck-Effekt



$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T$$

$\sigma$ : spez. el. Leitfähigkeit  
 $\alpha$ : Seebeck Koeffizient  
 $\kappa$ : therm. Leitfähigkeit  
 $T$ : abs. Temperatur

# Thermoelektrische Grundlagen

## Herkömmliche TEGs

- Trägermaterial: vorstrukturierte, starre Keramiken
- Trägermaterial: Polymerfolien
  - + relativ einfach zu verarbeiten, flexibel und ungiftig
  - gedruckten Schichten im  $\mu\text{m}$ -Bereich (Multilagendruck)



Quelle: TU Dresden, 2016

## Übliche Prozesskette für die Fertigung von TEGs



1 Ausgangsmaterial:  
Pulver aus z.T.  
toxischen Materialien



2 Sintern des Pulvers

Quelle: TU Dresden, 2016



3 Sägen in Quader



4 Montage der Quader  
auf eine Keramikplatte  
und Kontaktierung



5 Verbindung mit den  
Deckkontakten und der  
oberen Platte

## Vorteile von ...

### ...Polymeren für die Thermoelektrik

- Ungiftiges Material
- Keine seltenen Elemente (Preis)
- Geringe Wärmeleitfähigkeit
- Flexibel (normal sind meist sehr spröde Legierungen)
- Gute Prozessierbarkeit (Verarbeitung als Paste / Flüssigkeit)

### ... Vliesstoffen als Basismaterial

- Flexibilität, z.B. Einsatz von TEGs an Rohrleitungen
- hohe Toleranz gegenüber mechanischen Schwingungen
- hohe Toleranz gegenüber thermischen Zyklen
- Konfektionierbarkeit
- Massenfertigungstaugliches Herstellungsverfahren



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



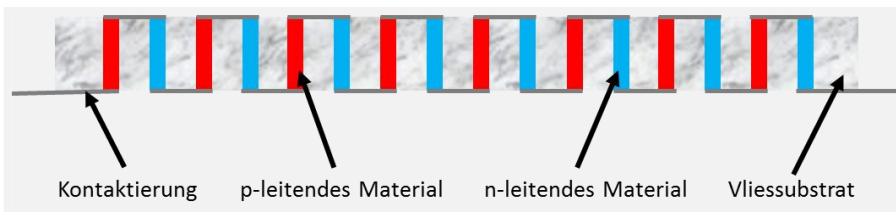
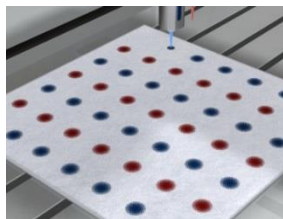
## (1) Entwicklung eines bedruckbaren textilen Materials -

Vliesstoff, welcher von einem thermoelektrischen Polymer benetzt und in Dickenrichtung durchtränkt wird (Stützstruktur für das TE-Material)

## (2) Entwicklung von elektrisch leitfähigen Pasten und einem geeigneten Auftragssystem



Quelle: TU Dresden, 2016



Quelle: TU Dresden, 2016



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.

Thermoelektrisches Material

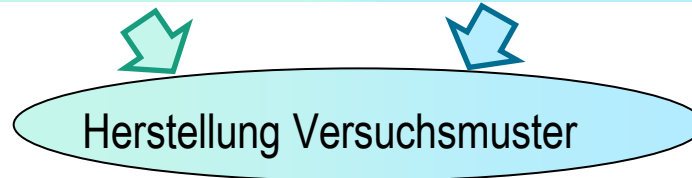
Druck- und Trocknungsprozess

Thermoelektrischer Generator

Herstellung Strukturvliesstoffe

Untersuchung zur Verfestigung

Vor-/ Nachbehandlung Stoffe



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.





## Anforderungen an den Vliesstoff

<b>Merkmal</b>	<b>Anforderung</b>
Material	Polyester
Struktur	offenporig
Oberfläche	glatt, unversiegelt/offenporig
Dicke	<b>≥ 5 mm</b>
Lösungsverhalten	hydrophil, polar
Lösemittelbeständigkeit	p-Polymer gegen Dimethylsulfoxid (DMSO) n-Polymer gegen Methanol
Temperaturbeständigkeit	p-Polymer bis 150 °C n-Polymer bis 160 °C
Luftdurchlässigkeit	Optimum zwischen Luftdurchlässigkeit/Porengrößenverteilung und Ein-/Durchdringen der Druckpasten



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



## Vliesbildung Airlaid

Vliesbildung Airlay  
Laroche

Vliesbildung Airlaid  
Neumag

Thermofusionsofen  
Fleissner



AD\_03 ; AD\_04 ; AD\_05

- 70 % PES 1,7 dtex / 6 mm  
30 % PES-Biko 3 mm

Muster	Flächenmasse in g/m <sup>2</sup>	Dicke in mm
AD 03	268	4,75
AD 04	277	5,01
AD 05	374	5,12

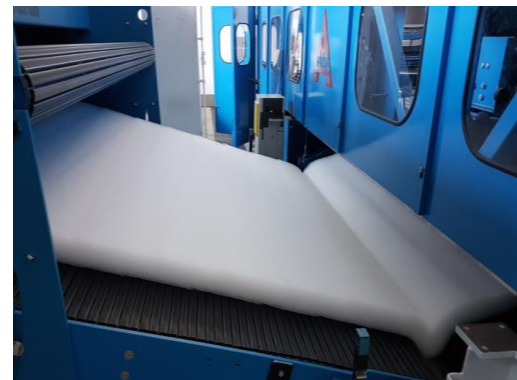
## Vliesbildung Krepeltechnik und Vernadelung



# Ergebnisse

- Spezifikation Nadeln 18x18x40x3,5 R222 G3037 (Groz-Beckert KG)
- 2 Nadelbretter alternierend betrieben (Einlauf von oben, Auslauf von unten)

Muster	Art	Fasern		FG	Dicke	Nadellänge	Einstich -dichte	Einstichtiefe	
		Feinheit in dtex	Länge in mm					in g/m <sup>2</sup>	in mm
NV 24	PES	1,7	38	382	5,10	3,5"	100	6	6
SB 135	PES	1,7	38	311	5,35	3,5"	100	6	5
SB 136	PES	1,7	38	308	5,05	3,5"	200	4	3
SB 137	PES	1,7	38	312	6,85	3,5"	100	4	4
SB 138	PES	3,3	60	461	7,55	3,5"	100	6	5
SB 139	PES	3,3	60	337	6,75	3,5"	100	6	5
SB 140	PES	3,3	60	343	6,35	3,5"	200	4	3
SB 141	PES	3,3	60	336	7,75	3,5"	100	4	4

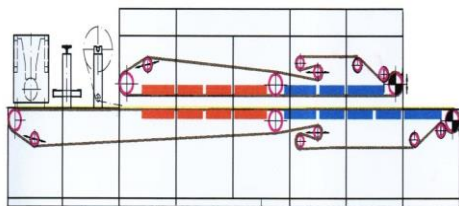


SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



## Vliesstoffkalibrierung

### Thermofix-Kontaktheizofen (Fa. Schott & Meissner)



Quelle: Fa. Schott & Meissner

Muster	Fasern			Flächen- masse in g/m <sup>2</sup>	Dicke unkalibriert in mm	Dicke kalibriert in mm	Dicken- reduzierung in %
	Art	Feinheit in dtex	Länge in mm				
NV 24	PES	1,7	38	382	5,10	4,93	3
AD 03	PES (70/30)	1,7	6/3	268	4,75	4,75	0
AD 04	PES (70/30)	1,7	6/3	277	5,01	4,98	1
AD 05	PES (70/30)	1,7	6/3	374	5,12	4,88	5
SB 135	PES	1,7	38	311	5,35	4,29	20
SB 136	PES	1,7	38	308	5,05	4,48	11
SB 137	PES	1,7	38	312	6,85	4,95	28
SB 138	PES	3,3	60	461	7,55	5,46	28
SB 139	PES	3,3	60	337	6,75	5,06	25
SB 140	PES	3,3	60	343	6,35	5,22	18
SB 141	PES	3,3	60	336	7,75	5,10	34

# Ergebnisse

## Entwurf eines TEG-Designs

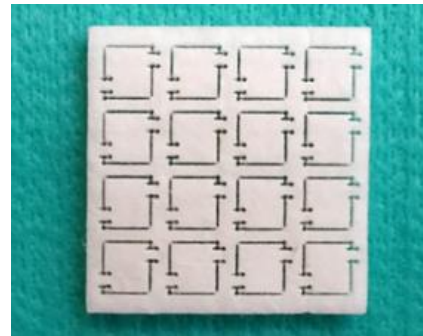
- Laserstrukturierung
- optimale Flächenausnutzung
- geringere Widerstände



Double-Leg TEG:  
einfache Beinchenstruktur



Uni-Leg TEG:  
Beinchenstruktur mit Schlitz



## Druckpasten-Entwicklung

- Für Aufbau TEGs: zwei aktive Materialien, p- und n-leitende Halbleiter
- PEDOT:PSS (p-leitend) und Poly(Kx[Ni-ett]) (n-leitend) zeigten die besten elektrochemischen Eigenschaften
- PEDOT:PSS: Zugabe eines Zusatzlösungsmittels DMSO (Dimethylsulfoxid) in einer Zumischung von jeweils 1-10 m% zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit (3 fach)
- Poly(Kx[Ni-ett]): relativ hohe Stabilität gegenüber Sauerstoff und Luftfeuchte, Polymer weist relativ hohe elektrische Leitfähigkeit und hohe Seebeck-Koeffizienten auf → Monomerstruktursynthese FS 1
- beide Polymere waren äußerst flexibel (biegsam nach Druck)

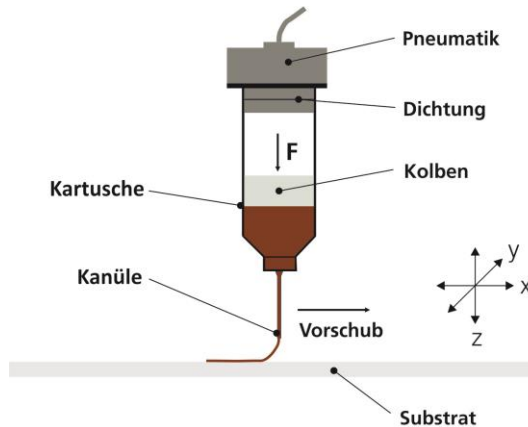


SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



## Druckprozess

- Druck von PEDOT:PSS und Poly(Kx[Ni-ett])-Paste mit einem Dispenser-Drucker (Fa. Musashi)



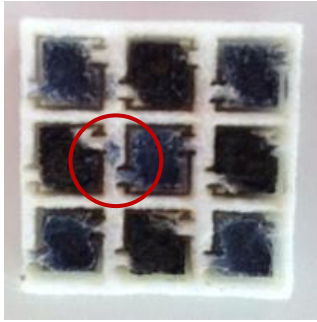
Quelle: Diplomarbeit Ulrich, T. [TU Dresden, 2016]

### Geeignete Parameter:

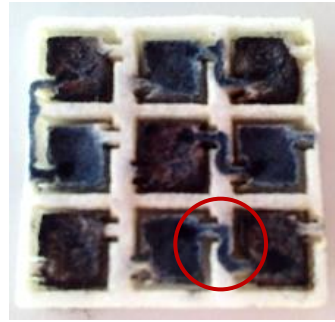
- Druck: 500 kPa
- Druckgeschwindigkeit: 10 mm/s
- Druckhöhe: 0,24 mm
- Nadeldurchmesser: 0,254 mm
- Trocknung 5-10 min bei 130 °C



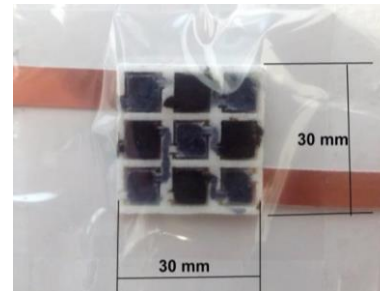
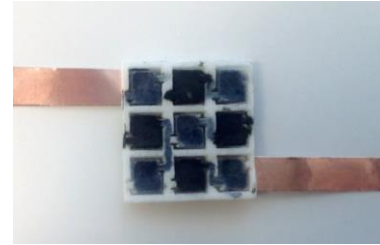
## Herstellung eines TEG-Moduls



Druck des Kontaktierungs-  
materials auf die „Beinchen“



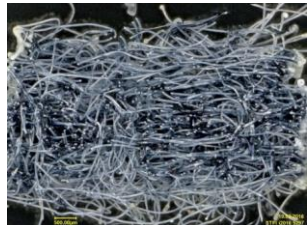
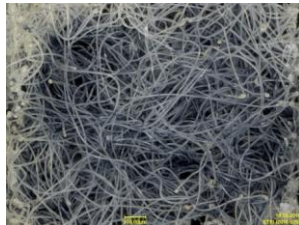
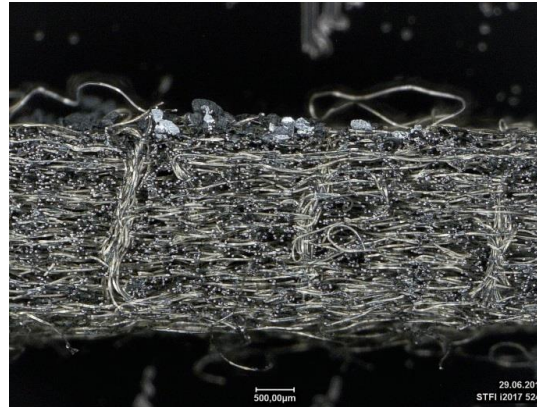
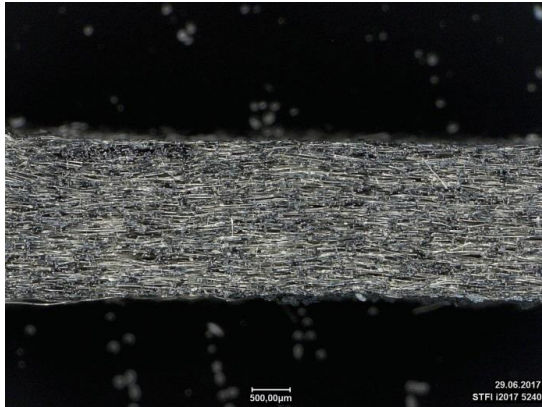
Druck des Kontaktierungs-  
materials auf die Steg



Verkleben der Edelstahlbänder für den  
Messgerätkontakt und Verkapselung des TEG

# Ergebnisse

- REM-Aufnahmen von Vliesstoffen mit Polymerpasten
- Beurteilung Tintenverteilung entlang der Nadelkanäle, den Zwischenräumen und an Fasern

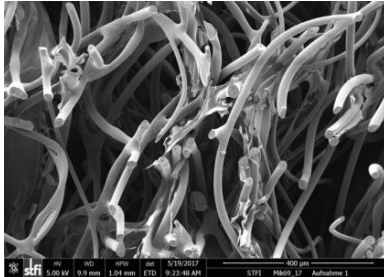


SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.

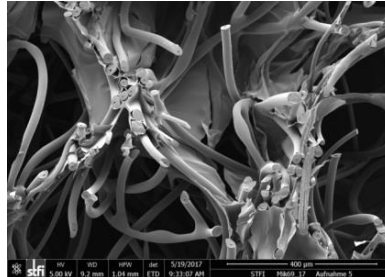


## REM-Aufnahmen von Vliesstoffen mit untersch. Polymer-Massen-Anteil

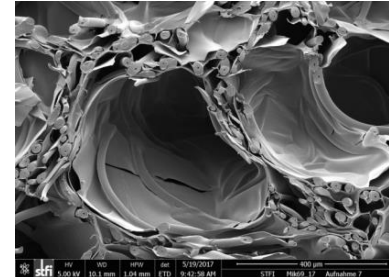
p-Polymer



**20 % PEDOT:PSS**

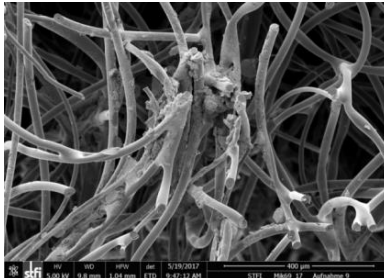


**32 % PEDOT:PSS**

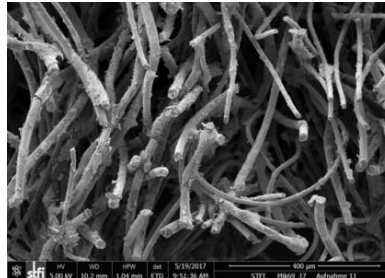


**54 % PEDOT:PSS**

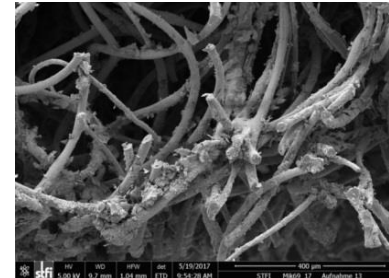
n-Polymer



**35 % Poly[K<sub>x</sub>(Ni-ett)]**

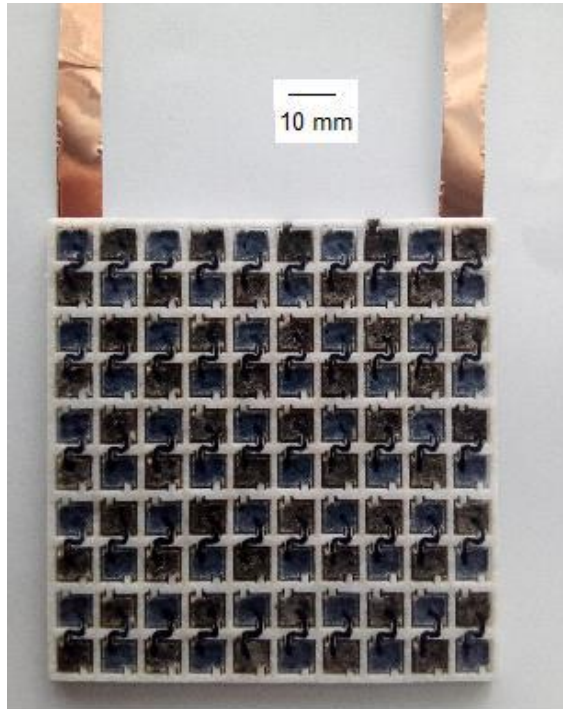


**41 % Poly[K<sub>x</sub>(Ni-ett)]**



**61 % Poly[K<sub>x</sub>(Ni-ett)]**

## TEG-Demonstrator 100 x 100 mm



- Erhalt der Flexibilität der bedruckten TEGs
- Materialverbund beständig gegenüber DMSO, MeOH, N-Methylformamid
- TEG-Double-Leg-Modul (30 x 30 mm<sup>2</sup>) → bei  $\Delta T = 140$  K gemessener Widerstand von 5 k $\Omega$  und Ausgangsleistung von 9 nW
- TEG-Uni-Leg-Modul (30 x 30 mm<sup>2</sup>) → bei  $\Delta T = 120$  K gemessener Widerstand von 200 k $\Omega$  und gemessene Ausgangsleistung von 0,29  $\mu$ W
- Extrapoliertes Ergebnis Modul (300 x 300 mm<sup>2</sup>) → Leistung von 29  $\mu$ W → kleine LED-Lampe

# Ergebnisse

Nr.	Typ/ Substrat	Innenwiderstand des Moduls vor/ nach dem Test in Ohm	Temperatur Differenz $\Delta T$ in K	Spannung (bei $\Delta T = 20$ ) in mV	Leistung im Temperatur- intervall 10 °C – 70 °C in mW	Beste Leistung in mW
1	Double-Leg/ Kapton	106.900 / 110.000	20-130	3,9	3,5E-07 (20°C-70°C)	1,5E-06 (bei $\Delta T = 100$ )
2	Double-Leg/ Vliesstoff	21.110 / 73.110	20-140	0,73	1,4E-07	3,3E-07 (bei $\Delta T = 140$ )
3	Double-Leg/ Vliesstoff	25.100 / 27.100	20-140	1,1	4,4E-07	2,6E-06 (bei $\Delta T = 140$ )
4	Double-Leg/ Vliesstoff	5.720 / 8.520	20-140	1,62	1,5E-06	8,4E-06 (bei $\Delta T = 140$ )
5	Uni-Leg/ Vliesstoff	68,4 / 70,2	20-125	-0,7	3,1E-05	2,9E-04 (bei $\Delta T = 120$ )
6	Double- Leg/Vliesstoff	2.140 / 2.670	20-140	1,2	5,8036E-06	5,0013E-0,5 (bei $\Delta T = 140$ )



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



# Ergebnisse

Nr.	Typ/ Substrat	Innenwiderstand des Moduls vor/ nach dem Test in Ohm	Temperatur Differenz $\Delta T$ in K	Spannung (bei $\Delta T = 20$ ) in mV	Leistung im Temperatur- intervall 10 °C – 70 °C in mW	Beste Leistung in mW
1	Double-Leg/ Kapton	106.900 / 110.000	20-130	3,9		
2	Double-Leg/ Vliesstoff	21.110 / 70				
3	Double-Leg/ Vliesstoff	25.1				
4	Double-Leg/ Vliesstoff	5.72		1,62	1,5E-06	8,4E-06 (bei $\Delta T = 140$ )
5	Uni-Leg/ Vliesstoff	68,4 / 70,2	20-125	-0,7	3,1E-05	2,9E-04 (bei $\Delta T = 120$ )
6	Double- Leg/Vliesstoff	2.140 / 2.670	20-140	1,2	5,8036E-06	5,0013E-0,5 (bei $\Delta T = 140$ )

TEG-Effekt  
TEG-Effizienz  
Top ↑  
Flop ↓



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



## ... bisher

- Raumsonden (in Kombination mit Radioisotopenbatterien)
- energieautarke Sensornetzwerke zum Betrieb von Messsensoren
- Petroleumlampen, Holzkohlegrills

## ... neue Anwendungsfelder

- in Autositze integrierte Temperaturregelungen
- Kraftwerke, Rechenzentren und industrielle Fertigungseinrichtungen
- an Rohrleitungssystemen
- an Innenseiten konkav geformter Kühlturmwänden
- Smart Textiles (z.B. Mobilladegeräte, Sensoren zur Gesundheitsüberwachung)



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



# Zusammenfassung

- Weiterentwicklung intrinsisch leitfähiger Polymere als thermoelektrisches Drucksubstrat
- Entwicklung geeigneter Vliesstoffstrukturen für Tiefendruck:
  - thermisch verfestigter Airlaid-Vliesstoff
  - vernadelter Krempelvliesstoff
- Voluminösität des Vliesstoffes unter Beibehaltung der Materialflexibilität
- Materialverbund ermöglicht hohe Toleranz
  - gegenüber mechanischen Schwingungen
  - gegenüber thermischen Zyklen
- Anpassung Auftragsverfahren (Dispenserdruck) für gleichmäßiges Druckergebnis
- Erfolgreiche Kontaktierung der n- und p-leitenden Tinten
- Entwurf eines geeigneten TEG-Designs
- funktionstüchtiger Demonstrator → Nachweis thermoelektrischer Effekt



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.





# Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18165 BR / 1 der Forschungsvereinigung DECHEMA e.V. Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.

Forschungskuratorium  
textil



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

## Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.

Annaberger Straße 240  
09125 Chemnitz

Telefon: +49 371 5274-0  
Telefax: +49 371 5274-153

Geschäftsführender Direktor:  
Dipl.-Ing.-Ök. Andreas Berthel

E-Mail: [stfi@stfi.de](mailto:stfi@stfi.de)  
Internet: [www.stfi.de](http://www.stfi.de)



Der Inhalt dieser Präsentation gehört dem Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI). Das STFI übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für eventuelle Schäden, die aus der Weitergabe und/oder Nutzung der Informationen aus dieser Präsentation entstehen.



SÄCHSISCHES  
TEXTIL  
FORSCHUNGS  
INSTITUT e.V.



Copyright: STFI

[www.stfi.de](http://www.stfi.de)