

Wolfgang Jenschke, Mathias Ullrich*, Beate Krause und Petra Pötschke

Messanlage zur Untersuchung des Seebeck-Effektes in Polymermaterialien

Measuring apparatus for study of Seebeck effect in polymer materials

<https://doi.org/10.1515/teme-2019-0152>

Eingang 9. Oktober 2019; angenommen 4. Dezember 2019

Zusammenfassung: Der nach dem Physiker Thomas Johann Seebeck benannte thermoelektrische Effekt ist für alle wesentlichen Metalle hinreichend gut erforscht und wird seit langem unter anderem zur Temperaturmessung mittels Thermoelementen genutzt. Weniger bekannt und erforscht ist dieser Effekt in polymeren Werkstoffen, die aber heute auch in der Sensorindustrie immer mehr an Einfluss gewinnen. Im vorliegenden Artikel wird eine Messanlage beschrieben, die speziell für die Untersuchung des Seebeck-Effektes in polymeren Messobjekten mit dem Ziel aufgebaut wurde, maßgeschneiderte Polymere für sensorische technische Anwendungen zu entwickeln, die den Seebeck-Effekt nutzen. Die besonderen Anforderungen an die Messanlage liegen dabei in der Realisierung konstanter genauer Temperaturquellen.

Schlagwörter: Seebeck-Koeffizient, thermoelektrischer Effekt, Temperaturmessung, Temperaturregelung.

Abstract: The thermoelectric effect named after the physicist Thomas Johann Seebeck has been investigated sufficiently well for all technically relevant metals and has been used for a long time, among other things, for temperature measurement by means of thermocouples. Less well known and researched is the Seebeck effect in polymer materials, which are gaining increasing influence in the sensor industry today. This article describes a measuring system designed specifically to study the Seebeck effect in polymeric samples with the aim of developing tailored polymers for sensory engineering applications using the Seebeck effect. The special requirement of the measuring system is the realization of constant accurate temperature sources.

Keywords: Seebeck coefficient, thermoelectric effect, temperature measurement, temperature control.

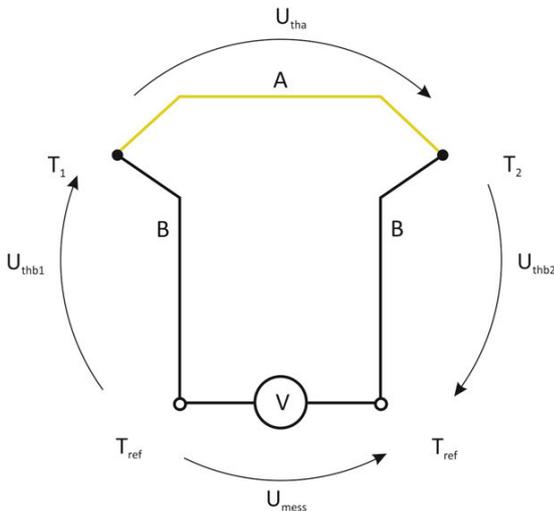
*Korrespondenzautor: Mathias Ullrich, IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069 Dresden, Germany, E-Mail: Ullrich@ipfdd.de

Wolfgang Jenschke, Beate Krause, Petra Pötschke, IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069 Dresden, Germany

1 Einleitung

Bereits 1821 entdeckte der Physiker Thomas Johann Seebeck den später nach ihm benannten thermoelektrischen Effekt, nach dem in einem elektrischen Leiter eine elektrische Spannung induziert wird, wenn seine Enden unterschiedliche Temperaturen aufweisen [1]. Die Größe dieser Thermospannung ist dabei abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Leiterenden und einer materialabhängigen Größe, dem Seebeck-Koeffizienten. Für viele Metalle ist dieser Koeffizient inzwischen bekannt und wurde mehrfach in Lehrbüchern und Veröffentlichungen publiziert. [2, 3]. Er wird in verschiedenen Anwendungen wie z. B. Thermoelementen zur Temperaturmessung genutzt. In neueren Forschungsprojekten werden seit einiger Zeit auch Untersuchungen angestellt, inwieweit an anderen Materialien, wie z. B. speziell präparierten Polymeren, Thermospannungen nachweisbar sind und ob diese für neue Anwendungen wie die Erzeugung geringer Mengen elektrischer Energie auf der Basis thermoelektrischer Generatoren (TEGs) unter Nutzung natürlich auftretender Temperaturdifferenzen oder auch als Temperatursensoren geeignet sind [4, 5].

Im Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. wurden bereits vor einigen Jahren erste Untersuchungen durchgeführt, in denen zunächst mit einem einfachen Messaufbau der Seebeck-Effekt in speziellen polymeren Strukturen prinzipiell nachgewiesen werden konnte. Zur genaueren Untersuchung polymerer Strukturen und Quantifizierung des Effektes bestand darauf aufbauend die Aufgabe, eine Messanlage zu entwickeln, mit der an streifenförmigen Messobjekten der Seebeck-Effekt untersucht und quantisiert werden kann. Die Anlage sollte gegenüber bereits konventionell verfügbaren Messgeräten vor allen Dingen bezüglich der Größe der Messobjekte und der Gestaltung des Messablaufes eine große Variationsbreite aufweisen und schnell an sich ändernde Aufgabenstellungen angepasst werden können. Besonders wichtig waren dabei die Bereitstellung mehrerer aufeinander abgestimmter und genau einstellbarer Temperaturquellen in einem für polymere Werkstoffe interessanten Temperaturbereich sowie eine hochauflösende Messtechnik für die elektrischen Messgrößen.



$$U_{tha} = S_A * (T_1 - T_2) \quad (1)$$

$$U_{mess} = U_{thb1} + U_{tha} + U_{thb2} \quad (2)$$

$$U_{mess} = (S_A - S_B) * (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$S_A = U_{mess} / (T_1 - T_2) + S_B \quad (4)$$

Abb. 1: Thermische Ersatzschaltung und Gleichungen zur Berechnung des Seebeck-Koeffizienten.

2 Physikalische Grundlagen

Die einfache Schaltung zur Messung des Seebeck-Effektes zeigt Abb. 1. Dabei ergibt sich die Thermospannung über dem Messobjekt A aus dem Produkt der Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ und dem materialabhängigen Seebeck-Koeffizienten S_A (Gl. 1). Die Spannung U_{tha} kann jedoch nicht direkt, sondern nur über zwei Zuleitungen gemessen werden. Die messbare Spannung berechnet sich dann nach Gl. 2. Unter der Voraussetzung, dass für beide Zuleitungen das gleiche Material mit bekanntem Seebeck-Koeffizienten S_B benutzt wird, erhält man für die messbare Gesamtthermospannung Gl. 3, aus der sich der unbekannte Seebeck-Koeffizient des Messobjektes A bestimmen lässt (Gl. 4). Wie aus Gleichung (3) ersichtlich wird, spielt die Temperatur T_{ref} an der Stelle des Spannungsmessgerätes dabei keine Rolle.

Wesentlich für die Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten der unbekanntenen Probe sind bei zu erwartenden Werten für Polymere, die sich in der gleichen Größenordnung wie die von Metallen bewegen, eine sehr genaue Messung der Spannung U_{mess} im Sub- μV -Bereich, eine genaue Einstellung und Messung der Temperaturen T_1 und T_2 sowie eine stabile Umgebungstemperatur und ein ruhendes und trockenes Luftvolumen in dem das Messobjekt umgebenden Messraum.

Aus der Literatur ist bekannt, dass der Seebeck-Koeffizient keine absolute Konstante, sondern selbst temperaturabhängig ist. In [2], [7] und [8] wird die Temperaturabhängigkeit des Seebeck-Koeffizienten für verschiedene Metalle angegeben und von verschiedenen Literaturstellen miteinander verglichen. Für Kupfer als übliches Material für Zuleitungen zeigen die beiden Literaturstellen [7] und [8] dabei in dem für Untersuchungen an poly-

meren Materialien interessanten Temperaturbereich zwischen 250 und 400 K bzw. zwischen -20 und 125 °C eine nahezu lineare Abhängigkeit. Neben der in [7] und [8] grafisch dargestellten Temperaturabhängigkeit werden in [2] und [8] mehrere konkrete Werte für den Seebeck-Koeffizienten von Kupfer bei verschiedenen Temperaturen angegeben. Anhand dieser Angaben wurden mittels linearer Regression die Koeffizienten für eine lineare Gleichung (Gl. 5) ermittelt, die die Temperaturabhängigkeit des Seebeck-Koeffizienten für den interessanten Temperaturbereich von polymeren Materialien in guter Näherung beschreibt und die Grundlage für die Bestimmung der unbekanntenen Seebeck-Koeffizienten von polymeren Materialien nach Gl. 4 bildet. (siehe Abb. 2).

$$S_{Cu} [\mu\text{V/K}] = 0,006 * T [^\circ\text{C}] + 1,7 \quad (5)$$

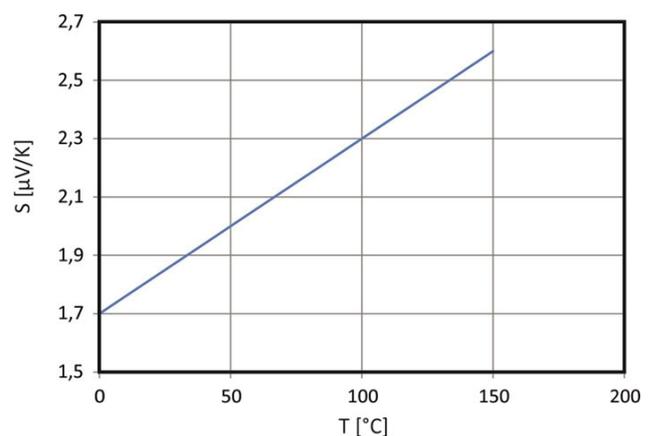


Abb. 2: Mittels linearer Regression aus Literaturangaben [2], [7] und [8] nach Gl. 5 berechneter Seebeck-Koeffizient für Kupfer als Funktion der Temperatur.

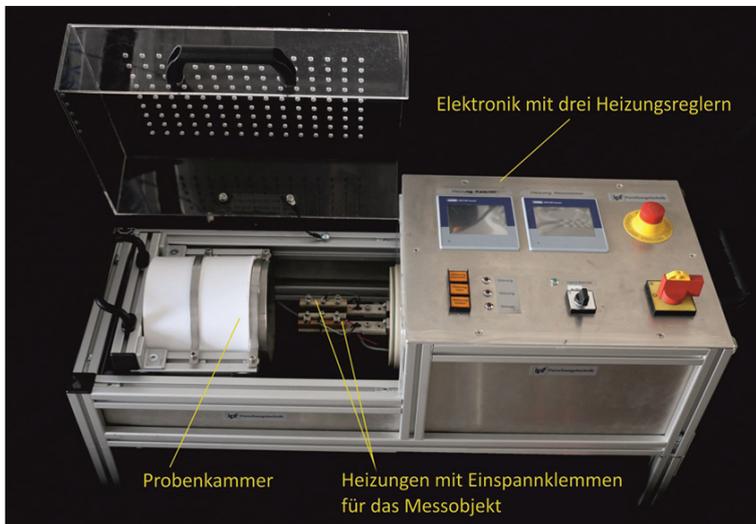


Abb. 3: Messanlage für die Untersuchung des Seebeck-Effektes in polymeren Materialien.

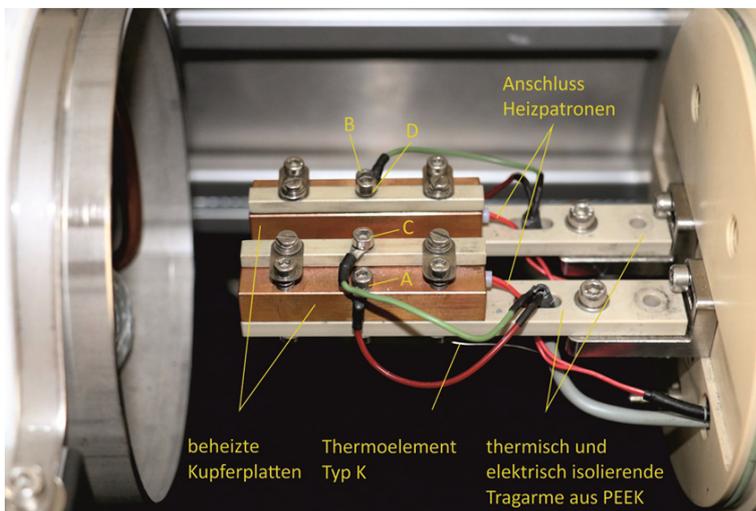


Abb. 4: Messobjektaufnahme mit zwei getrennten Heizungen.

3 Mechanischer und elektrischer Aufbau der Anlage

Unter Berücksichtigung der genannten physikalischen Grundlagen und den sich daraus ergebenden Anforderungen an die Messgenauigkeit und Temperaturkonstanz wurde eine Messanlage für streifenförmige Messobjekte konzipiert und aufgebaut. Die Gesamtanlage zeigt Abb. 3. Links im Bild ist die zylinderförmige beheizbare Probenkammer zu sehen, die für den Probenwechsel auf einem Schlitten hin und her gefahren werden kann. Die Kammer ist nach außen thermisch isoliert und wird mittels eines elektrischen Bandheizkörpers, der sich im Inneren des Kammerolumens befindet, beheizt. Eine zusätzliche an einen Thermostat angeschlossene Kühlschlange in der Kammer fungiert einerseits als Zusatzheizung und dient andererseits zum Abkühlen der Probenkammer beim Übergang

von einer höheren zu einer niedrigeren Messtemperatur. Im geschlossenen Zustand kann die Probenkammer mit einem Schutzgas, z. B. Stickstoff, zur Herstellung einer trockenen Atmosphäre gefüllt werden.

Die Messobjekte werden zwischen zwei separat beheizbaren, Kupferplatten eingespannt, welche elektrisch und thermisch isoliert auf zwei Trägern aus Polyetheretherketon (PEEK) befestigt sind (Abb. 4). Beheizt werden die Kupferplatten jeweils über eine horizontal in die Kupferplatte eingebrachte, elektrisch isolierte Heizpatrone. Die Temperaturmessung der Kupferplatten erfolgt durch je ein Mantelthermoelement Typ K, welches von unten über eine vertikale Bohrung bis kurz unter die Oberfläche der Kupferplatte eingebracht ist (vgl. Abb. 5).

Der Abstand der beiden Kupferplatten kann zwischen 5 mm und 70 mm variiert werden. Die Messung der Thermospannung erfolgt über die Klemmen A und B mittels

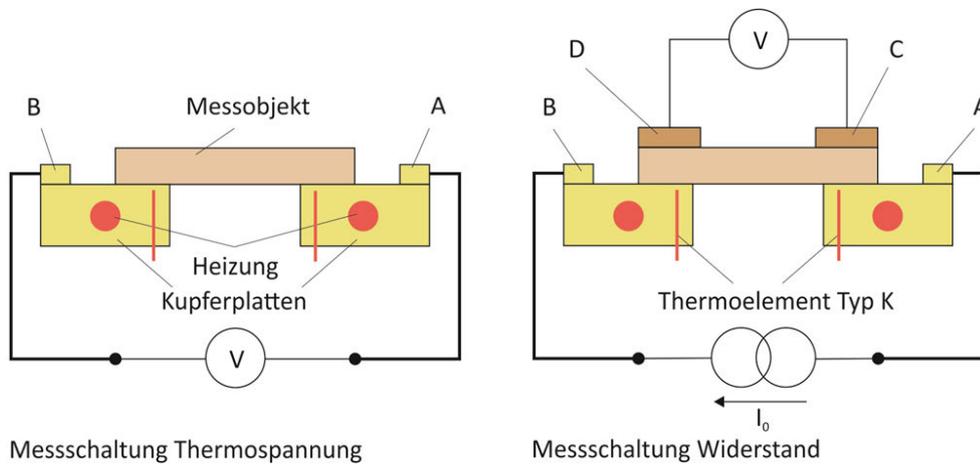


Abb. 5: Messschaltung für Thermospannung und Widerstand.

eines externen konventionellen Digitalmultimeters 2001 von Keithley Instruments. Die Messung des Innenwiderstandes des Messobjektes erfolgt in Vierleiter-Messtechnik ebenfalls mit diesem Multimeter (Abb. 5). Da die beiden Kupferplatten keine aktive Kühlung besitzen und nur über das Gas in der Probenkammer abgekühlt werden können, liegt der für die Untersuchungen nutzbare Temperaturbereich in der gegenwärtigen Ausbaustufe der Anlage zwischen 10°C und 120°C .

Rechts neben der Probenkammer ist die von der Firma Wünschmann Meß- und Regeltechnik OHG Dresden gebaute Steuerelektronik untergebracht, die im Wesentlichen einen Heizungsregler für die Kammerheizung sowie einen kombinierten Heizungsregler für die beiden Kupferplatten – beide vom Typ Jumo DICON touch (Firma Jumo GmbH & Co. KG) – enthält.

Die gesamte Anlage arbeitet PC gestützt. Dabei werden sowohl die Vorgaben der einzelnen Solltemperaturen für die drei Heizungen übermittelt, als auch der externe Thermostat vom Typ IKA CBC5 basic (Firma IKA Werke GmbH & Co. KG) gesteuert sowie die Steuerung und Messwerterfassung der elektrischen Messgrößen mittels des Digitalmultimeters durchgeführt. Das mit Agilent VEE erstellte Steuer- und Messprogramm ermöglicht die automatisierte Durchführung komplexer Messabläufe mit einer großen Variationsbreite der einzelnen Versuchsparameter.

4 Messverfahren

Die Ermittlung des temperaturabhängigen Seebeck-Koeffizienten eines Messobjektes erfolgt wie in Abb. 6 gezeigt nach folgender automatisch ablaufender Mess-

routine. Für die Kupferplatte 1 werden in einem äußeren Messzyklus einzelne Temperaturstufen T_1 eingestellt, deren Gesamtbereich durch eine Start- und eine Endtemperatur vorgegeben wird. Auf jeder Temperaturstufe wird ein kleiner Temperaturstufenzyklus abgearbeitet. Dabei wird die Temperatur T_2 der Kupferplatte 2 schrittweise von einer negativen Differenz zur Temperatur T_1 der Kupferplatte 1 bis zu einer positiven Temperaturdifferenz gefahren. Auf jeder Stufe werden dann nach einer Einschwingzeit mehrere Thermospannungswerte aufgenommen und daraus Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Optional können nach der Spannungsmessung auch ein oder mehrere Werte für den Kurzschlussstrom gemessen werden. Sind die Temperaturen der beiden Platten gleich, dann wird statt der Thermospannung der Innenwiderstand des Messobjektes gemessen. Die Temperatur der Probenkammer wird dabei stets 2K unter den niedrigsten Temperaturwert T_2 der aktuellen Temperaturstufe T_1 geregelt, den die Kupferplatte 2 innerhalb eines kleinen Temperaturzyklus annimmt. Für jede Temperaturstufe der Kupferplatte 1 wird dann aus den Spannungswerten der verschiedenen Temperaturdifferenzen $T_1 - T_2$ mittels linearer Regression der Seebeck-Koeffizient für diese Temperatur berechnet. Zusätzlich kann aus den Thermospannungswerten U_{th} und den gemessenen Kurzschlussströmen I_{thk} die angepasste Leistung P_a ermittelt werden.

Alle Versuchsparameter, zu denen u. a. die Start- und Endtemperatur sowie die Temperaturstufen der Kupferplatte 2, die Anzahl und Temperaturstufen der Kupferplatte 1, die Einschwingzeit und die Anzahl der Messwerte pro Temperaturstufe gehören, können frei eingestellt werden, so dass sich sehr variable Messabläufe gestalten lassen. Alle Messwerte und daraus berechnete Ergebniswerte werden in einer Excel-Tabelle online abgespeichert. Am Ende

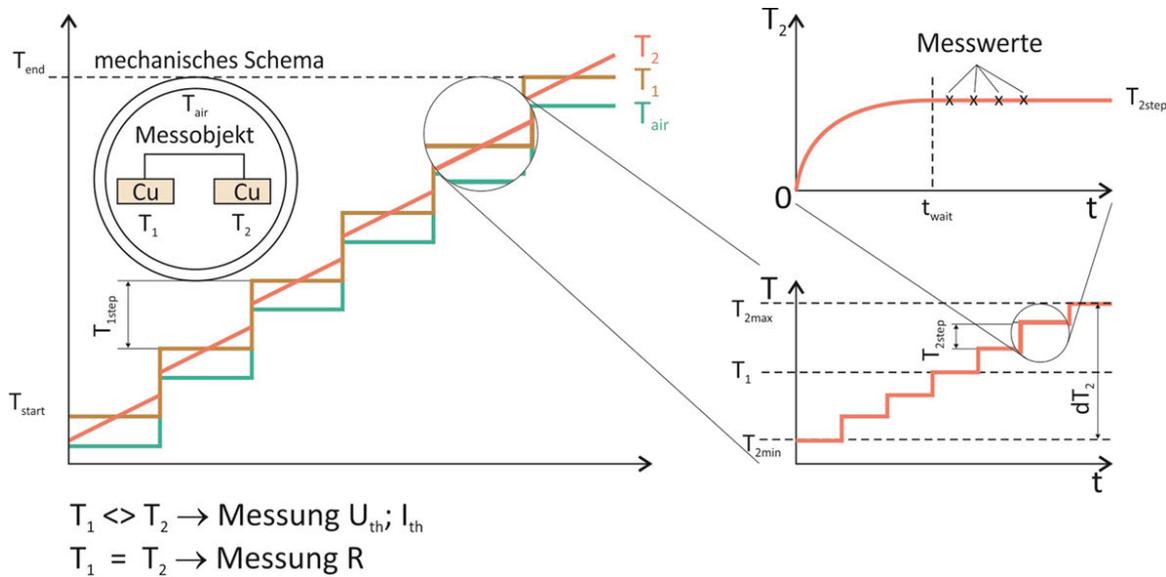


Abb. 6: Messverfahren und Messablauf.

des Versuches liegt damit ein fertiges Messprotokoll mit Messdiagrammen und Messergebnissen vor.

5 Anagentest und Fehlerdiskussion

Um später die an dieser Anlage gewonnenen Messwerte hinsichtlich ihrer Messunsicherheit beurteilen zu können, sollen an dieser Stelle mögliche Fehlerquellen genannt und ihr Einfluss auf die Messsicherheit diskutiert werden. Prinzipiell wird dabei zwischen systematischen Messfehlern, die einen absoluten oder einen relativen Messfehler erzeugen, und stochastischen Messfehlern unterschieden. Als wesentlicher systematischer Messfehler muss der in die Bestimmung des unbekanntenen Seebeck-Koeffizienten eingehende Seebeck-Koeffizient der Kupfermessleitungen angesehen werden. Entsprechend der aus der Literatur bekannten differierenden Angaben beträgt dieser Fehler bis zu $0,2\mu\text{V/K}$ zu der hier verwendeten Funktion. Dieser Fehler geht in alle ermittelten Werte für den Seebeck-Koeffizienten als additiver Fehler ein. Eine weitere systematische Fehlerquelle, die jedoch nicht quantitativ abgeschätzt werden kann, ist die Kontaktspannung zwischen Messobjekt und Kupferplatten. Zu den stochastischen Messfehlern zählen alle zeitlich veränderlichen Größen. In unserer Anlage sind das konkret der Messfehler der Thermospannung, der Messfehler der Temperaturmessung sowie die von der Temperaturregelung hervorgerufenen Temperaturschwankungen.

Mit dem verwendeten Digitalmultimeter 2001 von Keithley wurden mehrere Messreihen der Thermospannung bei konstanter Temperatur durchgeführt und dabei eine Messunsicherheit $u(U_{mess})$ von 50 nV unabhängig vom Absolutwert der Thermospannung ermittelt. Daneben ist für die Messung der Thermospannung vor allen Dingen eine hohe Temperaturkonstanz der einzelnen Heizungen notwendig. Durch Verwendung mehrerer an verschiedene Temperaturbereiche angepasste Regler-Parametersätze, die in den verwendeten Reglern JUMO DICON touch automatisch entsprechend der aktuell vorgegebenen Solltemperatur eingestellt werden, kann über den gesamten Temperaturbereich von 10 °C bis 120 °C jeweils eine Messunsicherheit $u(T_i)$, hervorgerufen durch die Temperaturschwankungen der Regelung, von 0,1K eingehalten werden. Die Temperaturmessung erfolgt mittels eines USB-Messmoduls DT9812 von Data Translation. Die ADUs erfassen einen Temperaturmessbereich von 0 bis 120 °C linear mit einer Auflösung von 12 Bit. Damit kann die Messunsicherheit der Temperaturmessung gegenüber den Temperaturschwankungen des Reglers vernachlässigt werden. Da die Messunsicherheiten der einzelnen Messgrößen stochastisch unabhängig voneinander sind, gilt für die Messunsicherheit des Seebeck-Koeffizienten nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung Gl. 6

$$u(S) = \sqrt{\left(\frac{u(U_{mess})}{T_1 - T_2}\right)^2 + \left(\frac{U_{mess}}{(T_1 - T_2)^2} * u(T_1)\right)^2 + \left(\frac{U_{mess}}{(T_1 - T_2)^2} * u(T_2)\right)^2} \quad (6)$$

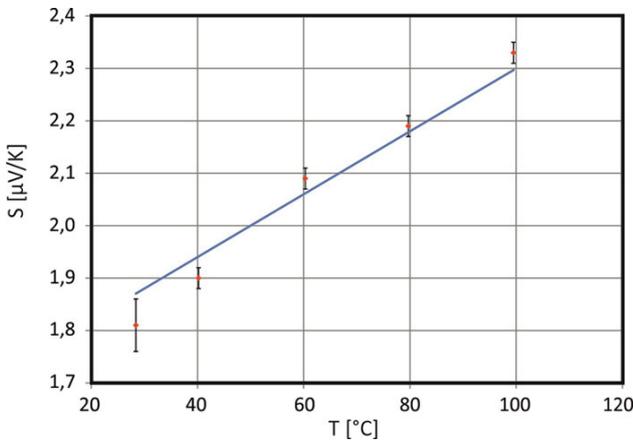


Abb. 7: Seebeck-Koeffizient von Kupfer (blaue Linie: nach Gl. 5 berechneter Verlauf; rote Punkte: Messwerte).

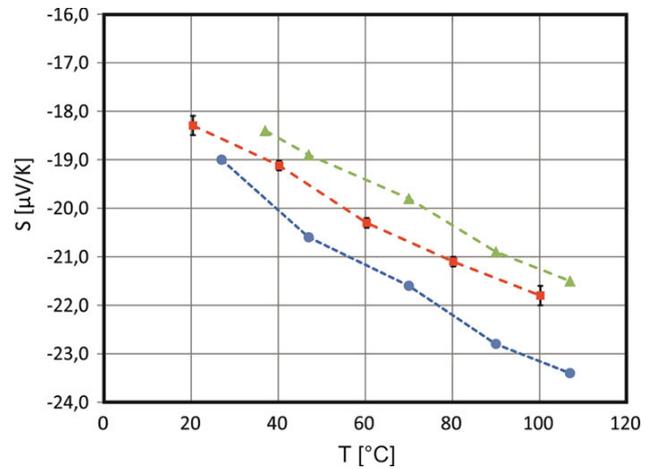


Abb. 8: Seebeck-Koeffizient von Nickel (rot: eigene Werte, blau: nach Burkov [8], grün: nach Ponnambalam [6]).

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Messapparatur wurden unter den genannten Randbedingungen Messungen an Messobjekten zweier bekannter Materialien durchgeführt. Abb. 7 zeigt den gemessenen temperaturabhängigen Seebeck-Koeffizienten eines dünnen Kupferstreifens im Vergleich zur in Abschnitt 2 aus Werten verschiedener Literaturstellen berechneten Kurve. Die Messwerte entsprechen Mittelwerten aus 4 kompletten Temperaturzyklen. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, konnte mit der Messanlage geringe Messunsicherheiten erreicht werden. Allerdings weicht die Steigung der Vergleichskurve geringfügig von den Messwerten ab. Als zweites Prüfobjekt wurde ein Nickelstreifen untersucht. In verschiedenen Literaturstellen wird der Seebeck-Koeffizient für Nickel über einen großen Temperaturbereich dargestellt. Ein Vergleich der eigenen Messwerte mit Werten von Burkov [8] und Ponnambalam [6] im für polymere Materialien interessanten Temperaturbereich ist in Abbildung 8 dargestellt. Auch hier repräsentieren die dargestellten Messwerte Mittelwerte aus 4 kompletten Temperaturzyklen. Dabei konnten wie auch beim Kupferstreifen sehr reproduzierbare Werte erreicht und damit die Funktionsfähigkeit der Anlage nachgewiesen werden.

6 Messergebnisse für ausgewählte Polymermaterialien

Seit Inbetriebnahme der Messanlage wurden mehrere Messreihen an verschiedenen Polymerstrukturen durchgeführt [9–13]. Dabei konnten mit der Messanlage nicht nur Thermospannungen an streifenförmigen Messobjekten gemessen, sondern auch speziell präparierte pulver-

förmige Objekte untersucht werden. An dieser Stelle sollen stellvertretend drei Ergebnisse als Beispiele vorgestellt werden, die mit dieser Anlage erzielt wurden.

Am Beispiel eines Polybutylenterephthalat (PBT)-Kompositen, der mit 4 Ma% Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) gefüllt ist, und einem CNT-Pulver (Nanocyl® NC3150™) wird die thermoelektrische Messung beschrieben. Beim Komposit wurde ein Materialstreifen von ca. 3 cm Länge, einer Breite von 0,5 cm und einer Dicke von 0,5 mm an beiden Enden mit Leitsilber bestrichen, um die Kontaktierung zu den Kupferelektroden zu optimieren. Das Pulver wird in ein Kunststoffröhrchen gefüllt, das beidseitig von einem Kupferstöpsel verschlossen ist, und zwischen die Kupferelektroden geklemmt. In Abb. 9 sind die gemessenen Thermospannungen bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zu einer Bezugstemperatur von 40 °C dargestellt. Für jede Temperaturdifferenz wurden dabei 10 Einzelspannungswerte im Sekundentakt aufgenommen. Die Standardabweichungen der Einzelwerte zum Mittelwert waren dabei so klein, dass sie im Diagramm nicht sichtbar sind. Aus den Thermospannungen mit Temperaturdifferenzen von ± 8 K, ± 6 K, ± 4 K und ± 2 K zu dieser Bezugstemperatur wurde mittels linearer Regression ein Seebeck-Koeffizient berechnet. Die Kurven in Abb. 9 zeigen eine sehr schöne lineare Abhängigkeit zwischen Thermospannung und Temperaturdifferenz. Im konkreten Fall wurden daraus Seebeck-Koeffizienten von $69,7 \mu\text{V/K}$ (PBT/4 % CNT) bzw. $11,1 \mu\text{V/K}$ (CNT-Pulver) errechnet. Insgesamt wurde dieser Zyklus fünfmal wiederholt. Der Mittelwert des Seebeck-Koeffizienten aus diesen fünf Zyklen betrug $69,8 \mu\text{V/K}$ (PBT/4 % CNT) bei einer Standardabweichung von $0,15 \mu\text{V/K}$ bzw. $11,2 \mu\text{V/K}$ (CNT-Pulver) bei einer Standardabweichung von $0,23 \mu\text{V/K}$.

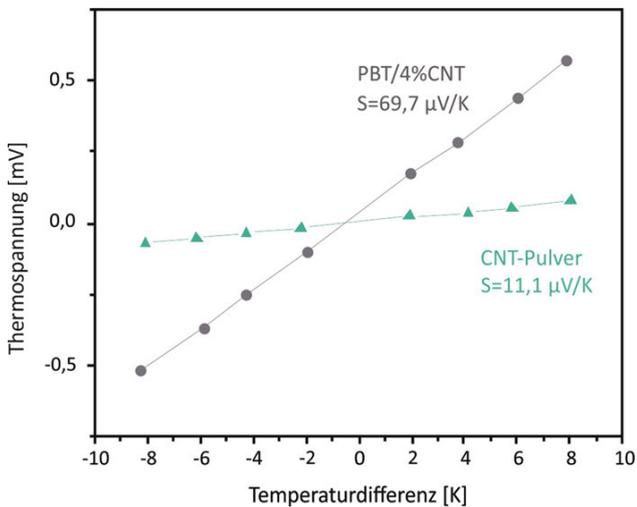


Abb. 9: Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz für PBT/4 Ma% CNT-Komposite (grau) und CNT-Pulver (grün) bei einer Bezugstemperatur von 40 °C für einen Temperaturzyklus (Die typische Messunsicherheit beträgt für beide Materialien 1,5 μV).

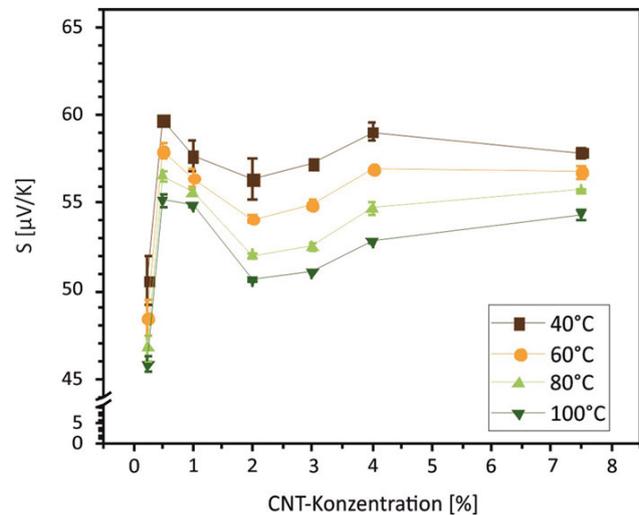


Abb. 11: Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten für PP/CNT-Komposite [11] in Abhängigkeit vom CNT-Gehalt bei verschiedenen Temperaturen.

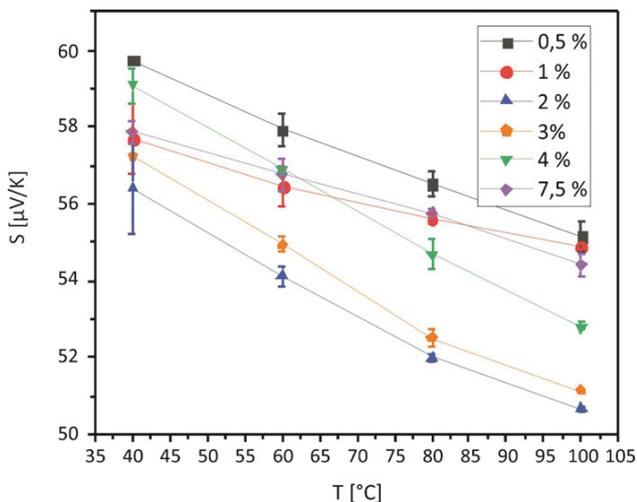


Abb. 10: Bestimmung des temperaturabhängigen Seebeck-Koeffizienten für PP/CNT-Komposite mit verschiedenen CNT-Gehalten.

Als weiteres Beispiel sind in Abb.10 Seebeck-Koeffizienten für Polypropylen (PP)/CNT-Komposite mit verschiedenen CNT-Gehalten [11] als Funktion der Temperatur im Bereich von 40 – 100 °C dargestellt. In Abb. 11 sind die Seebeck-Koeffizienten der gleichen Messungen als Funktion des CNT-Gehaltes mit 4 verschiedenen Temperaturen als Kurvenschar dargestellt. Beide Diagramme zeigen, dass der Seebeck-Koeffizient unabhängig vom CNT-Gehalt des Komposites mit steigender Temperatur sinkt, während er vom CNT-Gehalt bei dieser Probe stark nichtlinear abhängt. Die Werte stellen Mittelwerte über

jeweils fünf durchgeführte komplette Temperaturzyklen dar. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichungen.

7 Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Apparatur wurde eine Messanlage aufgebaut, die es ermöglicht, in einem eingeschränkten, aber für polymere Versuchsobjekte ausreichenden Temperaturbereich Untersuchungen zur Quantifizierung des Seebeck-Effektes durchzuführen. Die Anlage bietet im Vergleich zu konventionellen Geräten auf Grund einer großen Variationsbreite der einzelnen Versuchsparameter eine schnell an spezielle wissenschaftliche Aufgabenstellungen anpassbare Gestaltung des Messablaufes. Mit den durchgeführten Vergleichsmessungen an zwei bekannten Materialien konnte eine der Zielstellung entsprechende Messgenauigkeit erreicht werden, so dass nicht nur quantitative Aussagen über die Größe des Seebeck-Koeffizienten in verschiedenen Polymeren, sondern auch über deren Temperaturabhängigkeit getroffen werden können. Stellvertretend für eine ganze Reihe bereits durchgeführter Messungen wurden im Beitrag Ergebnisse für PBT/CNT-Komposite, CNT-Pulver und PP/CNT-Komposite vorgestellt.

Danksagung: An dieser Stelle möchten wir Dank sagen an Herrn Enno Stündel für die gründliche Überarbeitung der Elektronik hinsichtlich EMV und Entstörung, durch die erst die hohe Auflösung der Thermospannungen und die stabile Temperaturregelung erreicht werden konnte. Ein weiterer Dank gilt Frau Dr. Jinji Hofmann für die fachmännische Beratung beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Anlage sowie Frau Ulrike Jentsch-Hutschenreuther für die Durchführung eines Großteils der Messungen, und nicht zuletzt möchten wir uns bei der Werkstatt des Institutes für den mechanischen Aufbau der Anlage bedanken.

Literatur

1. Seebeck-Effekt – Lexikon der Physik – Spektrum der Wissenschaft; <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/seebeck-effekt/13090>.
2. K.-H. Gresslehner, Die physikalischen Grundlagen der thermoelektrischen Effekte, Energietag, 31. August 2015, http://www.ak-energie.at/pdf/ET2015/SET2015_Gresslehner.pdf.
3. M. Cürsoy, Synthese, Charakterisierung und thermoelektrische Eigenschaften ausgewählter Metallboride, Borcarbide und Carbaboride, Dissertation, Darmstadt 2015, D17.
4. B. McGrall, A. Sehirlolu, E. Pentzer, Polymerkomposite für thermoelektrische Anwendungen, *Angewandte Chemie*, 127(6), 1730–1743 (Februar, 2015).
5. B. Plochmann, Polymer-Oxid-Verbundwerkstoffe für neuartige thermoelektrische Generatoren mit großer Designfreiheit, Reihe: Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen, Bd. 4, Herausgeber: Ralf Moos und Gerhard Fischerauer Verlag: Shaker, Verlag, Aachen (2014), ISBN: 978-3-8440-3033-4.
6. V. Ponnambalam, S. Lindsey, N. S. Hickman, and Terry M. Tritt; Sample probe to measure resistivity and thermopower in the temperature range of 300–1000 K; *Review of Scientific Instruments* 77, 073904 (2006).
7. L. Abadlia, F. Gasser, K. Khalouk, M. Mayoufi, and J. G. Gasser; New experimental methodology, setup and LabView program for accurate absolute thermoelectric power and electrical resistivity measurements between 25 and 1600 K: Application to pure copper, platinum, tungsten, and nickel at very high temperatures; *Review of Scientific Instruments* 85, 095121 (2014).
8. T. Burkov, A. Heinrich, P. P. Konstantinov, T. Nakama, and K. Yagasaki, *Meas. Sci. Technol.* 12, 264–272 (2001).
9. Minoj Gnanaseelan, Yian Chen, Jinji Luo, Beate Krause, Jürgen Pionteck, Petra Pötschke, Haisong Qi, Cellulose-carbon nanotube composite aerogels as novel thermoelectric materials, *Composites Science and Technology*, 163, 133–140 (2018).
10. Minoj Gnanaseelan, Sumanta Samanta, Jürgen Pionteck, Dieter Jehnichen, Frank Simon, Petra Pötschke, Brigitte Voit, Vanadium salt assisted solvothermal reduction of graphene oxide and the thermoelectric characterisation of the reduced graphene oxide in bulk and as composite, *Materials Chemistry and Physics*, 229 (2019), 319–329, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.03.002.
11. Beate Krause, Viktor Bezugly, Vyacheslav Khavrus, Liu Ye, Gianarelio Cuniberti, Petra Pötschke, Boron doping of SWCNTs as way to enhance thermoelectrical properties of melt mixed polypropylene/SWCNT composites, *Energies*, in preparation (Submission bis Nov 2019).
12. Beate Krause, Ioannis Konidakis, Mohammad Arjmand, Robert Fuge, Marco Liebscher, Silke Hampel, Petra Pötschke, Nitrogen-doped carbon nanotubes/polypropylene composites with negative Seebeck coefficient, *Journal of Composites Science*, in preparation (Submission bis 16.12.2019).
13. Beate Krause, Carine Barbier, Juhasz Levente, Maxim Klaus, Petra Pötschke, Screening of different carbon nanotubes in melt-mixed polymer composites with different polymer matrices for their thermoelectrical properties, *Journal of Composites Science*.

Autoreninformationen



Wolfgang Jenschke

IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069
Dresden, Germany
wjke@ipfdd.de

Wolfgang Jenschke hat an der TU Dresden in der Sektion Informatikstudien studiert. Von 1979–1983 war er dort als wiss. Assistent im Bereich Technische Akustik tätig und promovierte auf dem Gebiet der piezoresistiven Druckmesstechnik. Von 1983 bis 1989 arbeitete er im ZFTM Dresden auf dem Gebiet der Entwicklung von Miniaturdrucksensoren für den medizinischen Einsatz. Seit 1989 ist er als wiss. Mitarbeiter im Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. im Bereich Forschungstechnik auf dem Gebiet der Mess- und Automatisierungstechnik tätig.



Mathias Ullrich

IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069
Dresden, Germany
Ullrich@ipfdd.de

Mathias Ullrich hat an der TU Dresden Maschinenbau studiert. Seit 2007 arbeitet er als wiss. Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. im Bereich Forschungstechnik. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt auf der mechanischen Entwicklung und Konstruktion von Messgeräten.



Beate Krause
IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069
Dresden, Germany
Krause-Beate@ipfdd.de

Beate Krause studierte an der TU Dresden Lebensmittelchemie und absolviert das Staatsexamen zum Staatlich geprüften Lebensmittelchemiker an der CVUA Stuttgart, Sitz Fellbach. Sie promovierte 2005 auf dem Gebiet der strahlenchemischen Modifizierung von Polypropylen an der TU Dresden. Seit 2005 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. Ihr Arbeitsschwerpunkt ist die Materialentwicklung mit nanoskaligen Kohlenstoffadditiven und deren Charakterisierung.



Petra Pötschke
IPF Dresden e.V., Hohe Str. 6, 01069
Dresden, Germany
poe@ipfdd.de

Petra Pötschke hat an der TU Dresden in der Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik studiert. Von 1982–1988 war sie dort als wissenschaftliche Assistentin im Bereich Papiertechnik tätig und promovierte auf dem Gebiet der festkörperrheologischen Charakterisierung von papiernen Flächengebilden. Seit 1999 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin und Gruppenleiterin am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. und dessen Vorgängereinstitutionen. Seit 2013 leitet sie die Abteilung Funktionale Nanokomposite und Blends mit dem Schwerpunkt der Materialentwicklung mit nanoskaligen Kohlenstoffadditiven.