



Thermoelektrizität

Unter Thermoelektrizität versteht man die Gesamtheit der Erscheinungen, die in elektrischen Leitern mit der Wechselwirkung zwischen elektrischem Strom und Wärmestrom bzw. Wärmeerzeugung verbunden sind.

Es sind drei thermoelektrische Effekte definiert: der Seebeck-Effekt, der Peltier-Effekt und der Thomson-Effekt. Neben der Nutzung der thermoelektrischen Effekte zur Temperaturmessung (Seebeck-Effekt) und der Temperierung mit Peltierelemente (Peltier-Effekt) wird auch die Energiegewinnung mit Thermogeneratoren betrieben, hier ist der Wirkungsgrad bei metallischen Legierungen jedoch sehr gering. Für die Erklärung der Wirkungsweise von Thermoelementen ist in erster Linie der Seebeck-Effekt erforderlich.

Thermoelement:

Ein Thermoelement besteht aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern, die zu einem Stromkreis verbunden werden. Liegen die Verbindungsstellen der zwei verschiedenen Leiter auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, so entsteht eine **thermoelektrische Spannung**. Diese Thermospannung ist ein direktes Maß für die Temperaturdifferenz, der die Verbindungsstellen ausgesetzt sind. Ein Thermoelement ist ein Instrument (**Messwandler**), mit dessen Hilfe Wärmeenergie in elektrische Energie konvertiert werden kann. Es ist also ein Strom- bzw. Spannungsgenerator. Als Messsignal wird die Spannung verwendet. Die erzeugte Spannung ist ausschließlich vom Material und dem Temperaturgradienten, dem das Thermoelement ausgesetzt ist, abhängig. Sie ist somit unabhängig von Leiterform und Abmessung. Die in einem thermoelektrischen Kreis erzeugte thermoelektrische Leistung ist ein Produkt aus **Thermostrom** und **Thermospannung**, d. h. mit sinkendem Thermostromfluss steigt die Thermospannung. Wenn man die entstehende Spannung möglichst stromlos misst (mit Reglern oder DVMs, die einen sehr hohen Eingangswiderstand haben), ist diese ein direktes Maß für die Temperaturdifferenz, der das Thermoelement ausgesetzt ist (aufgrund der hohen Eingangswiderstände der modernen Regler und Messgeräte spielt heute der in früheren Zeiten wichtige Schleifenwiderstand praktisch keine Rolle mehr).

Thermoleitung:

Da es aus Kosten- bzw. Handhabungsgründen schwierig bzw. nicht möglich ist, das Thermoelement bis zum Messwertempfänger zu führen, wird häufig eine sogenannte Thermo- bzw. Ausgleichsleitung als Verlängerung zwischen dem Thermoelement und dem Messwertempfänger geschaltet. Die Thermoleitung liefert in dem eingesetzten Temperaturbereich die gleiche Thermospannung und hat die gleiche nominale chemische Zusammensetzung wie das Thermoelement. Allerdings ist der Bereich der Einsatztemperatur beschränkt. Die von der Messkette gelieferte Gesamthermospannung ergibt sich also aus der Thermospannung des Thermoelementes im Temperaturbereich von der Messstelle bis zur Kontaktstelle Thermoelement/Thermoleitung und der von der Thermo- bzw. Ausgleichsleitung gelieferten Thermospannung zwischen der Kontaktstelle Thermoelement/Thermoleitung und der Kontaktstelle Thermoleitung/Messwertempfänger.



Ausgleichsleitung:

Eine Ausgleichsleitung ist von der Funktion her eine Thermoleitung. Allerdings hat eine Ausgleichsleitung eine komplett andere chemische Zusammensetzung. Auch hier ist der Bereich der Einsatztemperatur beschränkt. Beim Einsatz der Ausgleichsleitung sind die möglichen Fehlerquellen größer als bei der Thermoleitung (siehe auch Fehlermöglichkeiten und deren Vermeidung). Da wie oben beschrieben die Summe der Thermospannungen in einem Thermomesskreis gleich der Summe vieler in Reihe geschalteter Thermoelemente ist, kann ein solcher Messkreis auch aus einem Thermoelement und einer Ausgleichsleitung gebildet werden.

Grundlagen der Thermoelektrizität:

Im Folgenden werden an einem einfachen physikalischen Modell die im elektrischen Leiter ablaufenden Vorgänge erklärt. Wir weisen darauf hin, dass die tatsächlich ablaufenden physikalischen Vorgänge wesentlich komplexer sind als in diesem Modell dargestellt.

Jeder elektrisch leitende Werkstoff (lässt man die Supraleitung außer Acht) zeigt thermoelektrische Effekte. Die Größe der jeweiligen Effekte ist von Material zu Material unterschiedlich.

In Anlehnung an den „nullten“ Hauptsatz der Thermodynamik wird sich in einem Objekt, in dem ein Temperaturgradient herrscht, ein Wärmestrom von warm nach kalt einstellen. Ebenso sind Objekte mit unterschiedlichem elektrischen Potential bestrebt, wenn sie in Kontakt gebracht werden, so lange Ladungsträger auszutauschen, bis sich ein elektrisches Gleichgewicht einstellt.

Die zum Ladungstransport zur Verfügung stehenden Valenz(-freien) Elektronen sind die Ursache für elektrische und teilweise auch thermische Leitfähigkeiten, resultierend aus der Tatsache, dass das Elektron Träger sowohl der elektrischen Ladung als auch kinetischer Energie ist. Vereinfacht gesagt, ist der elektrische Strom ein Fluss der Ladung und der Wärmefluss der Transfer von kinetischer Energie.

Stellt man sich einen elektrischen Leiter vor, der einseitig erwärmt wird, wird nach dem nullten Hauptsatz der Thermodynamik solange ein Wärmefluss in Richtung der kälteren Seite bestehen, wie ein Temperaturgradient zwischen der wärmeren und kälteren Seite aufrechterhalten wird. Dieser Fluss der Wärme hat folgende Ursache: Die infolge der höheren Temperatur mit kinetischer Energie angereicherten Teilchen (Elektronen/Photonen/Atomrümpfe/u.a.) kollidieren mit ihren energieärmeren Nachbarn und geben somit einen Teil ihrer kinetischen Energie in Richtung der kälteren Seite des Leiters weiter (Ursache für die Wärmeleitung). Freie (Valenz-)Elektronen verhalten sich bezüglich ihrer individuellen Geschwindigkeiten nach Fermi ähnlich wie Atome in einem Gas. Die Ladungsträger an der warmen Seite verfügen in Folge der Zuführung von Wärmeenergie über ein höheres Energieniveau als die Ladungsträger an der kalten Seite. Da ein Bestreben im Leiter vorliegt, ein ausgeglichenes Energieniveau zu erreichen, setzt sich eine sogenannte Elektronenwolke in der Richtung von der warmen (energiereicheren) zur kalten (energieärmeren) Seite in Bewegung.



Sobald die Elektronenwolke anfängt zu wandern, erzeugt sie ein negatives Potential an der kälteren Seite und ein positives Potential an der wärmeren Seite. Auf Grund der sich bildenden Potentialdifferenz wird ein elektrisches Feld erzeugt, welches der Wanderung der Wolke entgegenwirkt. Diese Effekte bauen sich bis zu einem Gleichgewicht der herrschenden Kräfte zwischen dem elektrischen Feld und der Wanderbewegung der Elektronenwolke auf. Dieser Prozess ist bekannt als Seebeck-Effekt. Er beschreibt eine Balance zwischen a) der Tendenz der Elektronen, in einem thermischen Feld zu wandern, b) dem an dem Leiter anliegenden Temperaturgradienten und c) dem sich in Folge der Elektronenwanderung aufbauenden elektrischen Feld. Da die Parameter, die Einfluss auf den Wärme- und elektrischen Transport nehmen (z. B. die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ladungsträger und deren Bindungsenergien sowohl untereinander als auch zu den zugehörigen Atomkernen, die Störstellenanzahl, Korngrenzen, u. a.), zwischen den verschiedenen Leitermaterialien unterschiedlich sind, entstehen natürlich auch verschiedene Seebeck-Koeffizienten. Der Seebeck-Effekt ist somit eine Konsequenz aus der Art, wie die Ladungsträger eines elektrischen Leiters den Wärmefluss regeln. Daraus folgt, dass in einem elektrischen Leiter eine Thermospannung überall dort generiert wird, wo Wärme fließt.

Die Thermospannung ist somit das Produkt aus dem relativen Seebeck-Koeffizienten (allgemein als Seebeck-Koeffizient oder Thermokraft bezeichnet) und der Temperaturdifferenz.

Betrachtet man nun einen elektrischen Leiter aufgeteilt in viele kleine Abschnitte, so erzeugt jeder Abschnitt eine Thermospannung, die proportional ist zu dem Maß, in dem Wärme durch ihn fließt. Daraus resultierend ergibt sich, dass sich die Thermospannung in Bereichen großer Temperaturgradienten konzentriert, wogegen in Bereichen homogener Temperaturen die erzeugte Thermospannung verschwindend gering ist. Mit sich verschiebenden Temperaturgradienten verschiebt sich auch die Thermospannung der einzelnen Segmente innerhalb eines Leiters. Da sich die Gesamtthermospannung aus der Summe der Einzelspannungen ergibt, bleibt die Gesamtspannung zwischen dem kalten und dem warmen Ende des Leiters konstant. Das generierte Signal ist charakteristisch für das Material und einzig eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Enden des Leiters. Somit ist jeder elektrische Leiter gleichzeitig ein Thermospannungs-Temperaturfühler. Das Messen der Thermospannung dieses Metalls ist jedoch in der Praxis nicht direkt möglich, da wir zur Kontaktierung des Thermospannung liefernden Metalls eine elektrische Verbindung zwischen Metall und Messgerät benötigen. Diese Verbindung wiederum geschieht durch ein Metall, das seine eigene Thermospannung in Abhängigkeit von dem Temperaturgradienten liefert, dem es ausgesetzt ist. Man kann über den Umweg der Messung des Thomson-Effekts und mit einer nachgehenden Berechnung den absoluten Seebeck-Koeffizienten ermitteln. Diese Messung ist sehr aufwendig, und der absolute Seebeck-Koeffizient ist nur von wissenschaftlicher Bedeutung. Somit brauchen wir für die Nutzung des Seebeck-Effekts zur Temperaturmessung immer zwei Leiter, die unterschiedliche absolute Seebeck-Koeffizienten aufzeigen. Was wir nun messen, ist die Differenz (Thermospannung) zwischen den in den jeweiligen Leitern entstehenden Produkten aus absolutem Seebeck-Koeffizienten und herrschenden Temperaturgradienten.



Der Seebeck-Koeffizient und damit auch die Thermospannung eines Leiters sind in der Praxis immer nur in Relation zu einem Gegenschenkel zu bestimmen. In der Regel sind diese Gegenschenkel reines Platin (Pt67) oder reines Kupfer, oder aber der jeweilige dem Element entsprechende Gegenschenkel. Der relative Seebeck-Koeffizient bzw. die Thermospannung eines Elementes ist somit die Summe der Einzelschenkel-Seebeck-Koeffizienten bzw. Thermospannungen gegen Pt67 oder Cu.

Es ist also zu erkennen, dass eine Thermospannung nicht – wie häufig behauptet – an den Kontaktstellen der beiden Leiter entsteht, sondern über die Länge des gesamten Thermoelementes erzeugt wird.

Aus diesem Wissen heraus lassen sich viele Probleme, die bei der Messung mit Thermoelementen entstehen, erklären.

Zusammengefasst ist zu sagen:

Die in einem Thermoelement erzeugte Thermospannung ist eine Folge der Elektronenwanderung aufgrund einer Temperaturdifferenz innerhalb der Leiter des Thermoelementes. Die Thermospannung ist somit abhängig von der Differenz der Einzelspannungen der Leiter und der Größe des Temperaturgradienten, dem das Element ausgesetzt ist.

Mitglied des
Deutschen
Kalibrierdienstes

DKD



ISABELLENHÜTTE

ISABELLENHÜTTE Heusler GmbH & Co. KG
Eibacher Weg 3 - 5 · D - 35683 Dillenburg
PO Box 1453 · D - 35664 Dillenburg

Telefon +49 (0)27 71/934-0 · Telefax +49 (0) 027 71/23030
www.isabellenuette.de · thermo@isabellenuette.de

Mitglied
der AMA

AMA
Fachverband für Sensorik e.V.

ISO/TS 16949:2002 und
DIN EN ISO 9001:2000
zertifiziert

