

Versuch W 7 – Thermoelektrizität und elektrische Temperaturmessung		
Name:	Mitarbeiter:	
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

## 1. Aufgabenstellung

Untersuchen Sie das Temperaturverhalten von zwei Widerständen und einem Thermoelement.

### 1.1. Versuchsziel

Beschäftigen Sie sich mit folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Temperatur und Temperaturmessung, Thermometerarten
- Heiß- und Kaltleiter
- Prinzip des Thermoelements

### 1.2. Messungen

- 1.2.1. Messen Sie an den Bauelementen die Spannungen und die Stromstärke nach der angegebenen Schaltung im Temperaturbereich  $5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 70^{\circ}\text{C}$  alle 5K.
- 1.2.2. Messen Sie die Thermospannung am Thermoelement, wenn sich eine Lötstelle stets im Eiswasser und sich die andere im unter 1.2.1. angegebenen Wärmebad befindet.

### 1.3. Auswertungen

- 1.3.1. Zeichnen Sie für die Widerstände das  $R(T)$ -Diagramm und für das Thermoelement das  $U(T)$ -Diagramm (Eichdiagramme).
- 1.3.2. Bestimmen Sie aus dem  $U(T)$ -Diagramm die Thermokraft des Kupfer-Konstantan-Thermoelements.
- 1.3.3. Bestimmen Sie den Temperaturkoeffizienten des Kaltleiters, den B-Wert des Heißleiters sowie den Temperaturkoeffizienten des Heißleiters bei  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 1.4. Zusatzaufgabe

Ein Kupferbügel und ein Eisenstab - beide mit rundem Querschnitt - sind nach Abb. 1 zusammengelötet.

Wie groß ist der sich ergebende Thermostrom, wenn eine Lötstelle auf  $0^{\circ}\text{C}$  gehalten und die andere auf  $100^{\circ}\text{C}$  erwärmt wird?

Die Anordnung hat folgende thermoelektrische Eigenschaften:  $b = +13,403 \mu\text{V/K}$ ,  
 $c = -0,0275 \mu\text{V/K}^2$ ,  $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ ,  $\rho_{\text{Fe}} = 0,15 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$

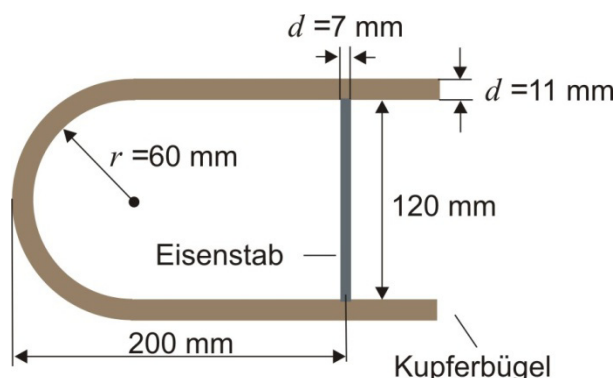


Abb. 1 Kupferbügel mit Eisenstab.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Temperaturmessung

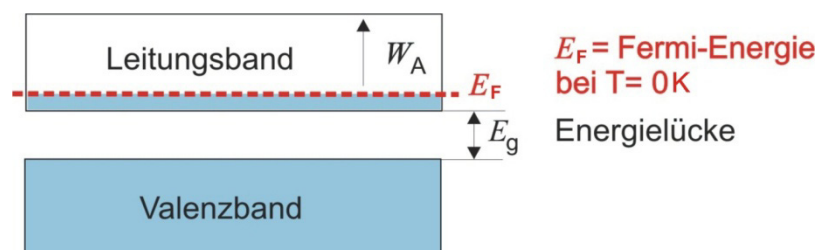
Grundlage einer objektiven Temperaturmessung sind Eigenschaften von Stoffen, die eine Abhängigkeit von der Temperatur zeigen: Volumen, Druck, Länge, elektrischer Widerstand, Thermospannung, thermische Strahlung u.a.m.

Als Temperaturskalen werden u.a. die Celsius- und die Kelvinskala (absolute Temperatur) verwendet. Bezüglich der Definition der verschiedenen Temperaturskalen und der Wirkungsweise der verschiedenen Thermometerarten wird auf die Lehrbuchliteratur verwiesen.

Im vorliegenden Versuch sollen für elektrische Thermometer (Widerstandsthermometer, Thermoelement) durch Vergleich mit einem geeichten Thermometer eines Kryostaten Eichkurven aufgenommen werden. Sowohl der elektrische Widerstand eines Leiters (Metall, Halbleiter oder Elektrolyt) als auch die Thermospannung eines Thermoelementes sind temperaturabhängig. Eine Berechnung der Temperaturabhängigkeit in großen Temperaturintervallen ist oft sehr schwierig, weil oft kein einfacher Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand bzw. Spannung besteht, so dass eine experimentelle Kalibrierung des Widerstandsthermometers oder des Thermoelementes notwendig wird. Die Temperaturmessung mittels kalibrierter Widerstandsthermometer oder kalibrierter Thermoelemente ist vorteilhaft, weil diese Thermometerarten geringe Wärmekapazitäten des Temperatursensors zulassen, was sich in einer geringen Anzeigetragheit des Thermometers äußert; außerdem ist die Verfälschung der Temperatur des Messobjektes gering. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei diesen elektrischen Temperaturmessverfahren die nichtelektrische Größe Temperatur in eine leicht messbare elektrische Größe umgewandelt wird, die u. a. eine einfache Fernmessung oder eine Erfassung durch einen Computer ermöglicht.

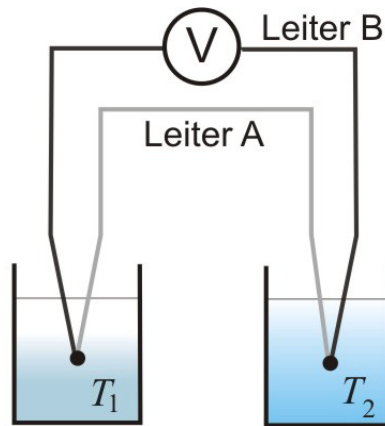
### 2.2. Thermoelement

Statt eines einzelnen Atoms mit diskreten Energieniveaus in der Atomhülle betrachten wir das Kristallgitter eines Metalls. Die diskreten Energieniveaus einzelner Atome entarten zu Energiebändern. Dabei ist das obere Band bei Metallen nur halb belegt (vgl. Abb. 2). Bis zur FERMI-Energie  $E_F$  ist dieses Band im Grundzustand besetzt. Den oberen Rand der FERMI-Energie nennt man FERMI-Kante. Diese Kante besitzt bei unterschiedlichen Metallen unterschiedliche Energien  $E_F$ . Durch Temperaturänderungen wird diese Kante verschoben.



**Abb. 2** Bändermodell eines Metalls.

Verbindet man durch Verschweißen oder Verlöten zwei unterschiedliche Metalle zu einem Stromkreis, so kann man nach Abb. 3 eine Spannung messen (Thermospannung), wenn beide Enden unterschiedliche Temperaturen ( $T_1 \neq T_2$ ) besitzen. Dieser Effekt wird nach dem Physiker SEEBECK benannt, der 1821 das Thermoelement beschrieb.



**Abb. 3** Temperaturmessung mittels Thermoelement.

In Thermoelementen treten Kontakt- und Thermodiffusionsspannungen auf. Beide Phänomene sind auf energieabhängige Diffusionsprozesse zurückzuführen, so dass die entsprechenden Spannungen Funktionen der Temperatur und der Fermieenergien der Materialien sind. Die Thermospannung ist aber allein auf das Phänomen der Thermodiffusion von Ladungen entlang der Leiter zurückzuführen. Daher hängen die gemessenen Thermospannungen empfindlich von den intrinsischen Transporteigenschaften der verwendeten Materialien ab.

In Metallen nehmen auch die Leitungselektronen an der Wärmeleitung teil. Da diese im Metall relativ frei beweglich sind, können sie wie Gasmoleküle in der kinetischen Gastheorie aufgefasst werden. Die Elektronen am kalten und heißen Ende des Thermoelements haben unterschiedliche Energien (d.h. unterschiedliche mittlere freie Weglängen). Dadurch setzt eine Thermodiffusion der Elektronen ein, da sich eine Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen vom heißen zum kalten Ende einstellt, bis das entstehende elektrische Feld ein Gleichgewicht ergibt. Die Elektronen, die sich entgegen des Temperaturgradienten bewegen, transportieren mehr Energie als diejenigen Elektronen, die sich in Richtung dieses Gradienten bewegen.

Temperaturabhängige Kontaktspannungen an den Grenzflächen der Materialien sind auf Unterschiede des chemischen Potentials zurückzuführen. In einem Thermoelement summieren sich allerdings alle Änderungen des chemischen Potentials zu Null, d.h. diese tragen zwar zum Verlauf des elektrischen Feldes entlang der Leiter bei, liefern aber keinen Beitrag zur gemessenen Thermospannung!

Die Thermospannung hängt außer vom Temperaturunterschied noch von den Materialien, die sich berühren, ab. Jeder elektrische Leiter besitzt einen stoffspezifischen Materialkoeffizienten (SEEBECK-Koeffizient, gemessen in V/K bzw.  $\mu\text{V}/\text{K}$ ), der wiederum von der Temperatur selbst abhängig ist.

Für kleinere Temperaturbereiche ist die Thermospannung linear von der Temperatur abhängig.

$$U = b \cdot \Delta T \quad (1)$$

Bei größeren Temperaturunterschieden muss ein quadratischer Ausdruck hinzugefügt werden.

$$U = b \cdot \Delta T + c(\Delta T)^2 \quad (2)$$

(mit  $\Delta T$  – Temperaturdifferenz;  $b$  – Thermokraft;  $c$  – Entwicklungskoeffizient 2. Ordnung).

Die zu messenden Spannungen liegen im mV- bzw.  $\mu\text{V}$ -Bereich, bezieht man diese Spannung auf den Temperaturunterschied von  $\Delta T = 1\text{K}$ , so ergibt sich für ein

bestimmtes Paar von Metallen die sogenannte **Thermokraft**  $b$ , gemessen in  $\mu\text{V}/\text{K}$ . Hält man den Leiterwiderstand gering, ergeben sich große Stromstärken. Bei bestimmten Anwendungen schaltet man eine größere Anzahl von Thermoelementen in Reihe, man spricht dann von einer **Thermosäule**. Für häufig benutzte Thermoelemente sind Werte in der folgenden Tabelle angegeben:

Thermopaar	Thermokraft	nutzbarer Temperaturbereich
Eisen-Konstantan	53,7 $\mu\text{V}/\text{K}$	-200°C bis 800°C
Kupfer-Konstantan	42,5 $\mu\text{V}/\text{K}$	-200°C bis 500°C
Platin-Platin/Rhodium	6,4 $\mu\text{V}/\text{K}$	0°C bis 1700°C

Die Metalle bzw. deren Legierungen lassen sich in eine thermoelektrischen Spannungsreihe anordnen, folgend ein Auszug:

+	Selen	Tellur	Antimon	Eisen	Messing	Zinn	Kupfer	Silber	
	Platin mit 10% Rhodium	Gold	Zink	Blei	Quecksilber	Platin	Nickel	Konstantan	-

Bei einem Thermoelement, hergestellt aus zwei der oben aufgeführten Stoffe, wird jenes positiv, das voran steht (beim Kupfer-Konstantan-Element die Kupferseite). Zum Zwecke der elektrischen Temperaturmessung wird eine Lötstelle auf bekannter konstanter Temperatur gehalten (z.B. 0°C).

### 2.3. Widerstandsthermometer

Beim Widerstandsthermometer wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leiters oder Halbleiters ausgenutzt.

Es gibt zwei entgegengesetzte Effekte, die die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes bewirken:

a) Bei Temperaturerhöhung schwingen die Ionen des Festkörperkristallgitters stärker um ihre Gleichgewichtslagen, wodurch es zu einer Behinderung der Bewegung der den Strom tragenden Elektronen kommt, d.h. die Elektronenbeweglichkeit sinkt.

b) Die Anzahl der Leitungselektronen wächst bei Erhöhung der Temperatur, weil Elektronen aus dem Valenzband in das energetisch höher liegende Leitungsband übertreten.

Der Effekt b) tritt bei Metallen nicht auf, weil sich die Elektronen bereits bei Raumtemperatur im Leitungsband befinden. Es bleibt somit nur der Effekt a), der Widerstand steigt bei Metallen mit zunehmender Temperatur.

Bei Halbleitern (und bei Elektrolyten) überwiegt der Effekt b), der Widerstand sinkt bei Temperaturerhöhung deutlich, da der energetische Abstand der Bandlücke vom Leitungsband nur etwa 1eV beträgt. Dieses ist auch ein Grund dafür, dass in elektronischen Schaltungen mit Halbleiterbauelementen auf die Einhaltung der Betriebstemperatur geachtet werden muss bzw. dass schaltungstechnische Maßnahmen zur Kompensation dieser Temperaturabhängigkeit angewendet werden müssen.

Bei Isolatoren ist der energetische Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband so groß (mehr als 5eV), dass durch die herrschende Temperatur die Bandlücke durch die Elektronen nicht überwunden werden kann.

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur wird durch den Temperaturkoeffizienten  $\beta$  beschrieben. Dieser Koeffizient wird definiert durch die Gleichung

$$\beta = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (3)$$

Dabei ist  $R_0$  ein (willkürlicher) Bezugswiderstand. Er wird oft auf  $T_0 = 0^\circ\text{C}$  bezogen.  $R$  bezeichnet den Widerstand bei der Temperatur  $T$ . Ist  $\beta > 0$ , dann steigt der Widerstand mit wachsender Temperatur (diese Art von Widerstand nennt man Kaltleiter), bei  $\beta < 0$  sinkt er (Heißleiter).

Da sich bei vielen Leitern mehrere Temperatureinflüsse überlagern, ergeben sich für größere Temperaturbereiche komplizierte funktionale Zusammenhänge, d. h. der Wert des Temperaturkoeffizienten ist ebenfalls temperaturabhängig. Bei diesem Versuch untersuchen wir die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes in der Nähe der Zimmertemperatur. Für Kaltleiter gilt hier mit guter Näherung ein linearer Zusammenhang:

$$R = R_0(1 + \beta \Delta T), \quad (4)$$

mit  $\beta$  als Temperaturkoeffizienten. Für Metalle liegt er in der Größenordnung  $10^{-3}\text{K}^{-1}$ . Werden größere Temperaturbereiche betrachtet, gilt dieser lineare Zusammenhang nicht mehr, da auch andere Gegebenheiten (z.B. Kristallstrukturänderungen, Reinheit) eine Rolle spielen. Dann gilt:

$$R = R_0(1 + \beta \Delta T + \gamma \Delta T^2) \quad (5)$$

Für den verwendeten Heißleiter lässt sich die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes in vielen Fällen durch die Gleichung (6) annähern,

$$R = R_0 e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (6)$$

wobei  $B$  der sogenannte B-Wert (Thermistorkonstante) und  $R_0$  der Widerstand bei der Bezugstemperatur  $T_0$  ist. Der B-Wert bildet die Grundlage der formelmäßigen Beschreibung des Widerstands-Temperatur-Verhaltens bei Heißleitern und liegt in der Größenordnung von einigen tausend Kelvin. Der Temperaturkoeffizient  $\beta$ , der sich aus Gleichung (6) nach Gleichung (3) berechnen lässt, liegt für Heißleiter in der Größenordnung von  $-10^{-2}\text{K}^{-1}$  und ist selbst auch temperaturabhängig. Da die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes vom Betrag her um eine Größenordnung größer ist als bei Kaltleitern, lassen sich empfindlichere Widerstandsthermometer herstellen. Die verwendeten Widerstände nennt man NTC-Widerstände (engl.: negative temperature coefficient). Diese NTC-Widerstände lassen sich auch in mechanisch kleinen Abmessungen herstellen, d.h. sie haben dann auch eine kleine eigene Wärmekapazität und reagieren bei Temperaturänderungen schneller als andere Thermometerarten.

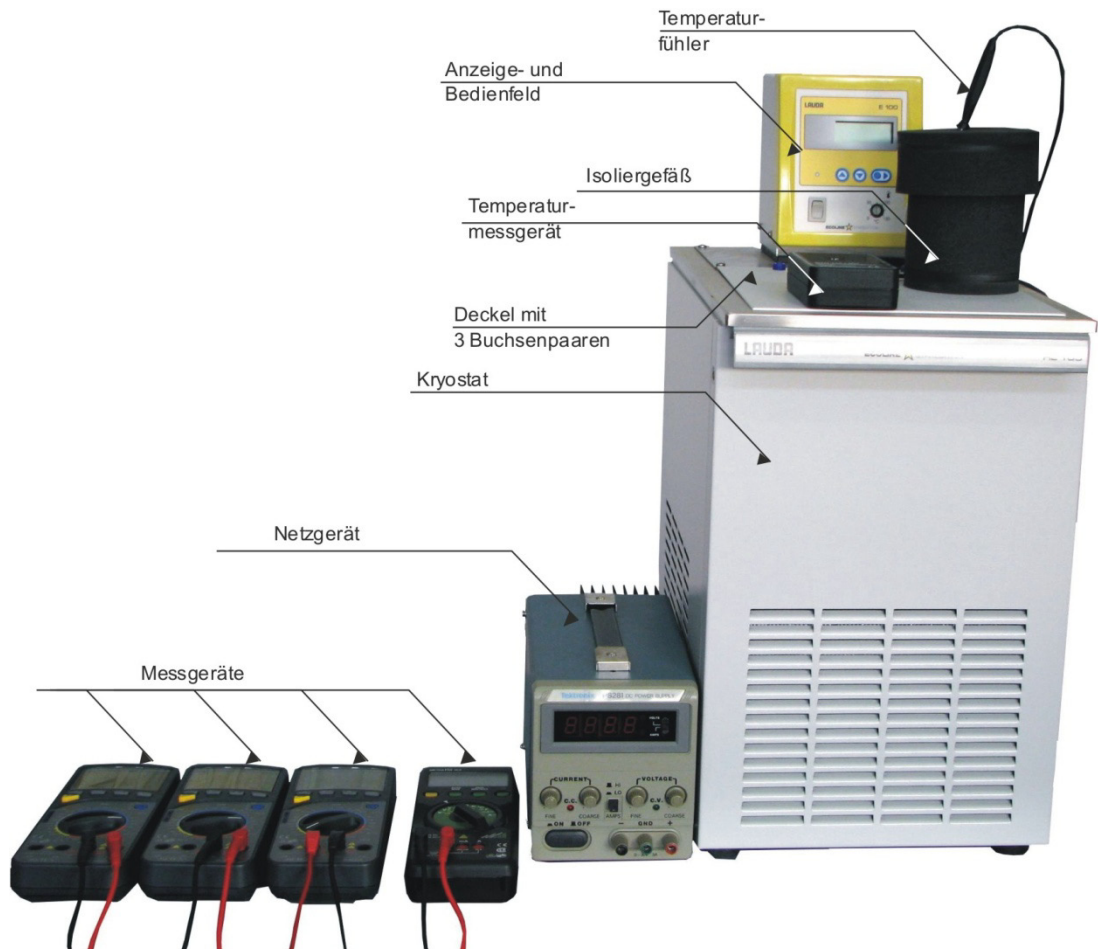
### 3. Experiment

#### 3.1. Versuchsanordnung

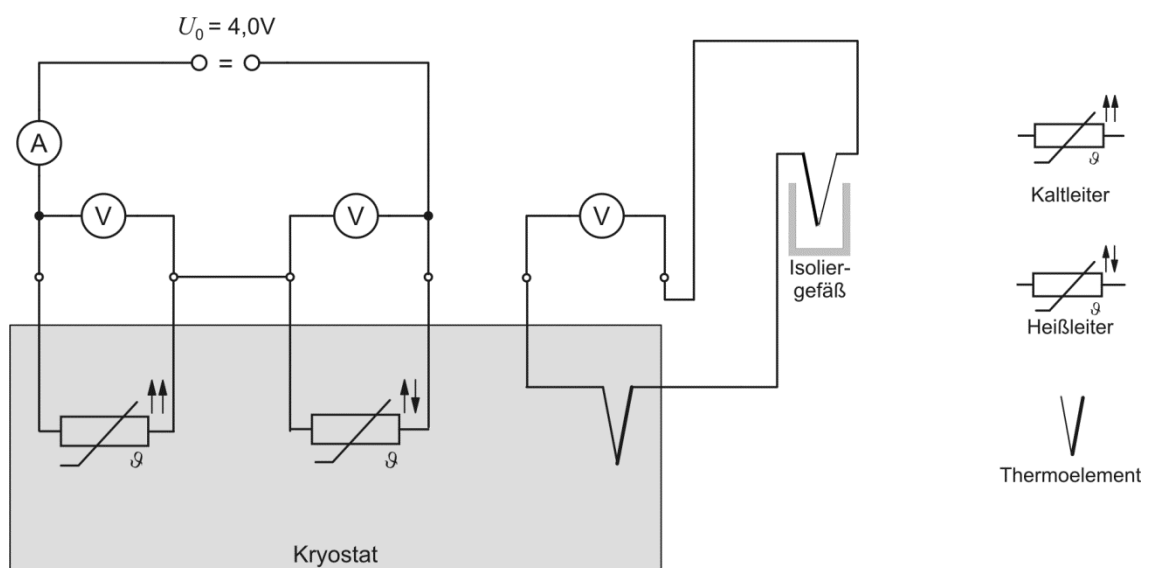
Die auszumessenden Bauelemente hängen elektrisch isoliert im Wasserbad eines Kryostaten (vgl. Abb. 4). Das Wasserbad wurde vor Versuchsbeginn auf  $5^\circ\text{C}$  heruntergekühlt. Die elektrische Schaltung wird gemäß Abb. 5 aufgebaut, an das Buchsenpaar 3 (Bu 3) wird der Spannungsmesser für das Thermoelement angeschlossen. In das Isoliergefäß wird ein Eis-Wasser-Gemisch eingefüllt und dessen Temperatur mit einem elektrischen Temperaturmessgerät überwacht. Die Temperatur sollte durch leichtes Bewegen immer in der Nähe von  $0^\circ\text{C}$  gehalten werden. In dieses Gefäß wird die eine (noch sichtbare) Seite des Thermoelements gesteckt. Nach Kontrolle des Aufbaus können das Netzgerät auf die in Abb. 5 angegebene Spannung ( $U_0 = 4,0\text{V}$ ) eingestellt und die Messungen begonnen werden.

Für beide Widerstände kann man aus der Messung der Spannung und des Stromes bei verschiedenen Temperaturen den temperaturabhängigen Widerstand berechnen. Trägt man im Diagramm  $R(T)$  ab, erhält man die sogenannten Eichkurven. Mit gemessenem Widerstand kann wiederum die Temperatur aus dem entsprechenden Diagramm

abgelesen werden. Beim Kaltleiter kann aus dem Anstieg der Geraden der Temperaturkoeffizienten  $\beta_K$  bestimmt werden. Um den B-Wert des Heißleiters zu bestimmen, zeichnen Sie ein Diagramm, bei dem Sie auf der x-Achse  $T^{-1}$  und auf der y-Achse  $\ln(R)$  abtragen. Den Temperaturkoeffizienten  $\beta$  bei der Temperatur  $T$  [K] erhält man dann näherungsweise aus  $\beta \approx -B/T^2$ .



**Abb. 4** Benötigte Geräte.



**Abb. 5** Elektrischer Aufbau.

### 3.2. Hinweise zur Versuchsdurchführung

Mit den Messgeräten Typ Metex M4640A misst man die Stromstärke im Messbereich 200mA= und die beiden Spannungen an den Widerständen im Messbereich 20V=. Mit dem Messgerät MetraHit 18S misst man die Spannung des Thermoelements. Es wird auf die Messart V= gestellt, der Messbereich stellt sich selbst ein.

Die Temperatur des Kryostaten wird mittels Folientaste ▲ im Bedienfeld erhöht. Zuerst ist im Anzeigefeld die Soll-Temperatur sichtbar, die nach einigen Sekunden wieder auf die Ist-Temperatur wechselt.

## 4. Literatur

[1] DEMTRÖDER; Experimentalphysik 2; Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2006; Abschn. 2.2.4

[2] EICHLER, KRONFELDT, SAHM; Das Neue Physikalische Grundpraktikum; Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2006; Themenkreis 19

[3] HOLLIDAY, RESNICK, WALKER; Physik; Verlag Wiley-VCH; Weinheim 2003; Abschn. 27-2

[4] ILBERG; Physikalisches Praktikum; B. G. Teubner Verlagsgesellschaft; Stuttgart Leipzig 1994

[5] BERGMANN, SCHÄFER; Experimentalphysik

[6] Pelster R, Pieper R und Hüttl I, PhyDid 1/4 (2005) S. 10-22