

Physik-Praktikum I  
Sommersemester 2002

# Peltierelement als Generator

von

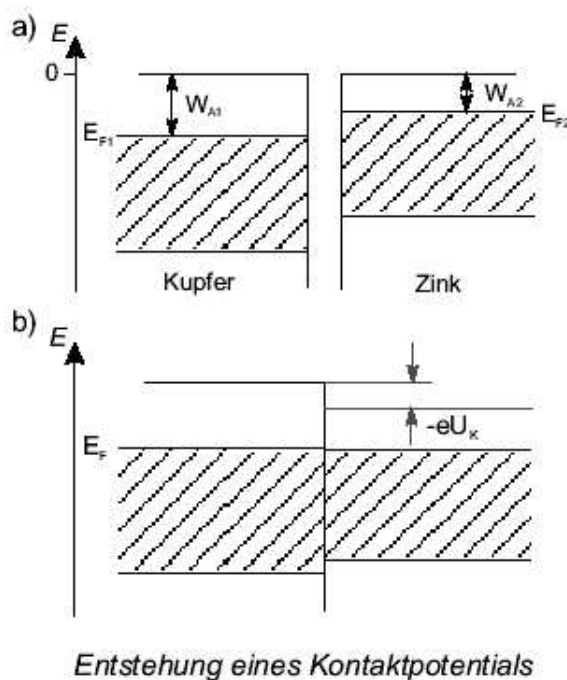
Melanie Ballas  
Thorsten Budde  
David Geib  
Roland Steffen

Um 1821 entdeckte der Physiker Thomas J. Seebeck einen Effekt, bei dem sich zwei unterschiedliche Metalle berühren und an der Kontaktfläche eine Spannung entsteht. Diesen Effekt nutzen wir in unserem Versuch als Generator. In unseren Versuchen haben wir untersucht, wie sich die Spannung mit der Temperaturdifferenz ändert und welche Ströme über einen Verbraucher fließen. Im Folgenden werden wir zuerst den Effekt näher erklären. Anschließend beschreiben wir den Versuchsaufbau und erklären die Messung sowie deren Ergebnisse. Zu Schluss möchten wir noch ein paar Beispiele zur Anwendung in der Praxis geben.

## Thermoelektrische Effekte

Fließt durch einen Festkörper ein Wärmestrom (Temperaturdifferenz), so kann eine Potentialdifferenz in Stromrichtung auftreten. Diese Erscheinung nennt man *Seebeck-Effekt* (Thomas Johann Seebeck, 1770 bis 1831).

Wenn sich zwei Metalle mit *unterschiedlichen Fermi-Grenzen* gemäß folgender Abbildung (a) berühren, erfolgt durch einen Diffusionsstrom ein Ausgleich dieser Niveaus. Das eine Metall (z. B. Zn) mit dem höheren Fermi-Niveau  $E_{F2}$  (geringere Austrittsarbeit  $W_{A2}$ ) gibt Elektronen an das andere Metall (z. B. Cu) mit niedrigerem Fermi-Niveau  $E_{F1}$  ab (höhere Austrittsarbeit  $W_{A1}$ ). Der dabei fließende *Diffusionsstrom* baut eine entgegengesetzt wirkende *Kontaktspannung*  $U_K$  auf, so dass der Diffusionsstrom aussetzt, wenn die Fermi-Niveaus in beiden Bereichen auf gleicher Höhe liegen (b).



Werden verschiedene Metalle an beiden Enden fest verbunden, z. B. durch Löten oder Schweißen, und diese Enden unterschiedlichen Temperaturen  $T_1 < T_2$  ausgesetzt, dann wird eine *Thermospannung*  $U_{th}$  messbar, die proportional zum Temperaturunterschied  $\Delta T$  ist. Die Ursache ist, dass mit einer Temperaturänderung stets eine Umverteilung der Elektronen auf die verschiedenen Energieniveaus erfolgt, so dass die Fermi-Energie verschoben wird. Die Änderung der Thermospannung mit der Temperatur wird *Thermokraft* genannt; diese liegt im Bereich  $10^{-5}$  V/K.

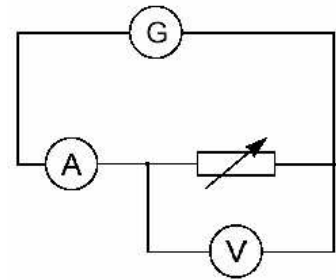
Um aus dieser geringen Thermospannung eine für einen Verbraucher geeignete Spannung zu generieren werden viele dieser Kontaktstellen in Reihe geschaltet. So wird eine

Klemmenspannung im Voltbereich erreicht.

## Versuchsaufbau

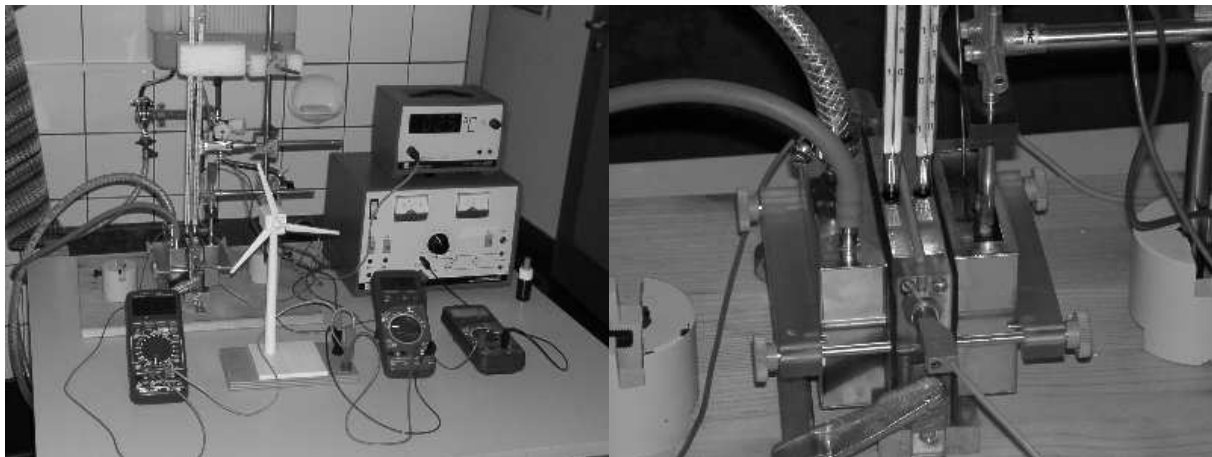
Um eine *konstante Temperaturdifferenz* einzustellen, haben wir eine Seite des Generators mit fließendem Wasser gekühlt und die andere Seite mit Wasser und Tauchsieder erwärmt. Damit wir die Temperatur der heißen Seite besser einstellen konnten, haben wir die Temperatur des

Wassers mit einem Digitalthermometer gemessen. Die resultierende Temperaturdifferenz wurde mit zwei *Thermometern* direkt an den beiden Seiten des Generators gemessen. (Falls jemand auf die Idee kommen sollte eine Seite mit Eis zu kühlen, sollte er sich zuerst eine riesigen Vorrat davon anschaffen, weil es schneller schmilzt als man es nachfüllen kann und es zu großen Temperaturschwankungen kommt.) Die Strom- und Spannungskennwerte des Generators haben wir über einen veränderbaren Widerstand aufgenommen. Das *10-Gang-Potentiometer* konnte im Bereich von 0 bis  $500\Omega$  eingestellt werden. Zu der Schaltung addieren sich die *Innenwiderstände* der Messgeräte mit  $1,3\Omega$  für das Amperemeter und  $10M\Omega$  für das Voltmeter. In nebenstehender Abbildung ist der Aufbau der Messschaltung zusehen.



Für die Aufnahme der Kennlinie, welche die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur zeigt, haben wir das Voltmeter parallel zum Generator geschaltet.

Im Anschluss folgen noch zwei Fotos welche den Versuchsaufbau zeigen.

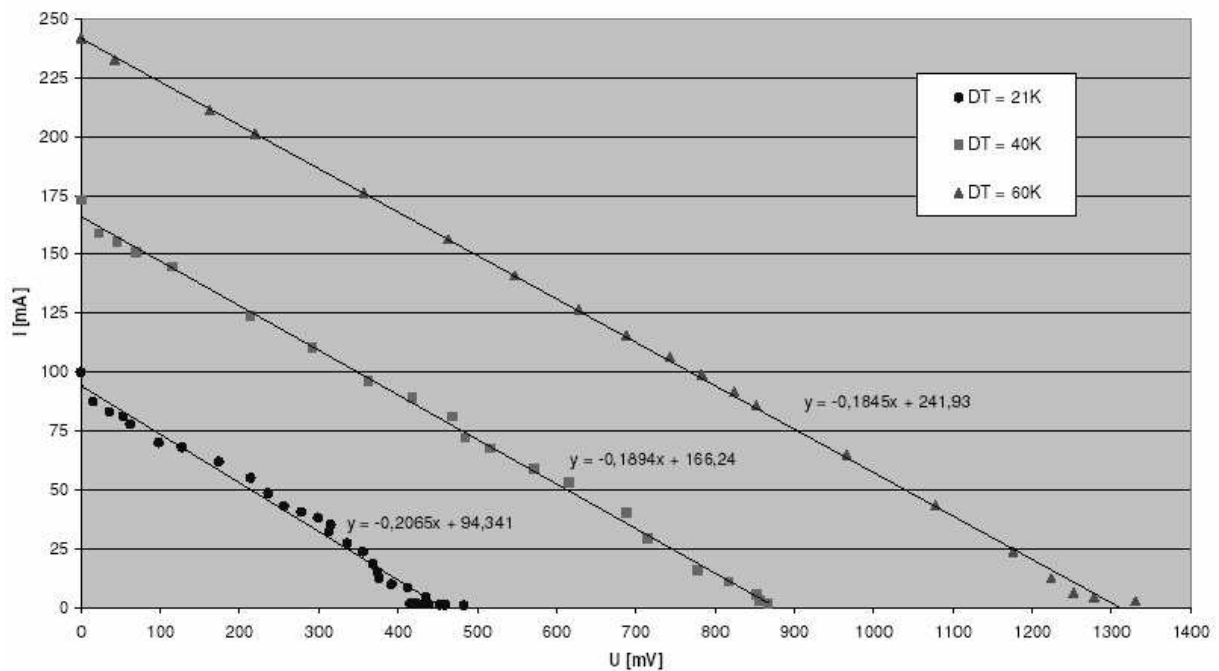


Als *Verbraucher* wurde ein Windrad eingesetzt, an dem wir den Strom und die Spannung bei verschiedenen Temperaturdifferenzen gemessen haben. Zum Vergleich wurde auch noch die Strom-Spannung-Kennlinie des Windrads aufgenommen. Für diese Messung wurde die Messschaltung des Peltierelements benutzt. Statt des Peltierelements wurde jedoch ein Netzgerät als Spannungsquelle verwendet.

## Versuche

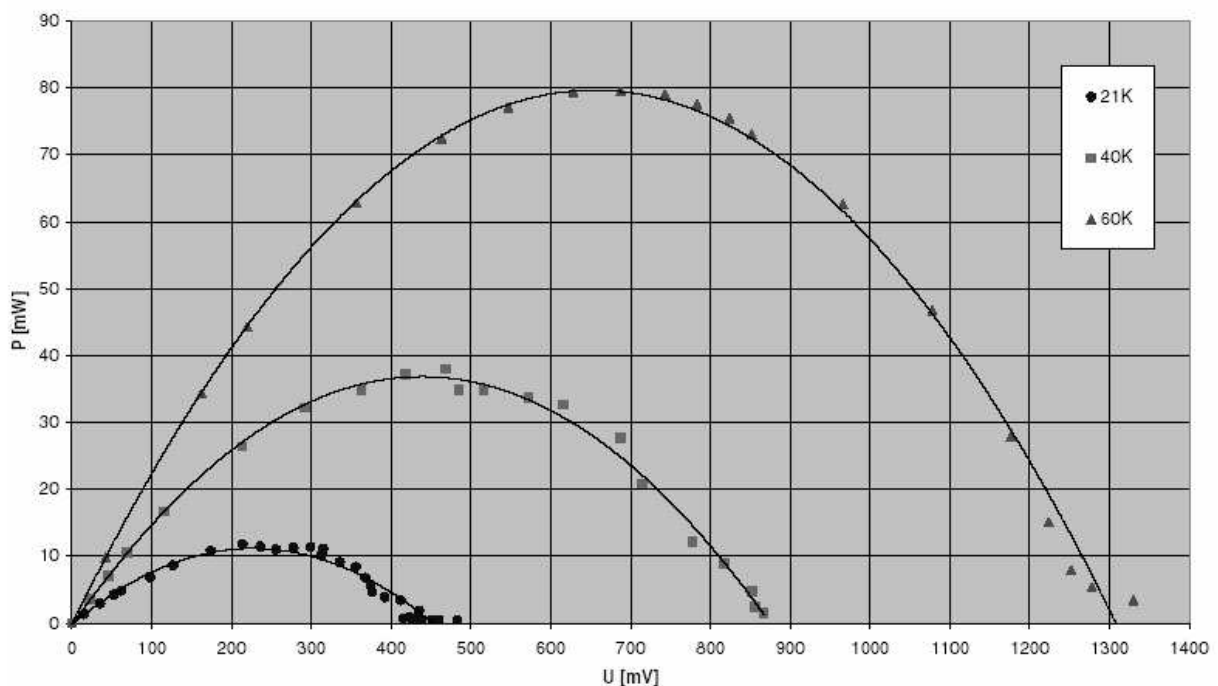
Die ersten drei Messungen die wir am Peltierelement durchgeführt haben zeigen, wie sich Strom  $I$  und Spannung  $U$  bei verschiedenen Lastwiderständen verändern. Es ist dabei eindeutig zu erkennen, dass Strom und Spannung linear zusammenhängen. Aus diesem Grund haben wir die Messwerte mit einer Ausgleichsgeraden verbunden. Die Abweichungen von dieser Geraden lassen sich durch Temperaturschwankungen während der Messungen erklären. Es ist uns während der drei Messungen gelungen die Temperaturschwankungen zu reduzieren, was sich bei der letzten Messung ( $\Delta T = 60K$ ) deutlich zeigt.

Strom-Spannungs-Diagramm

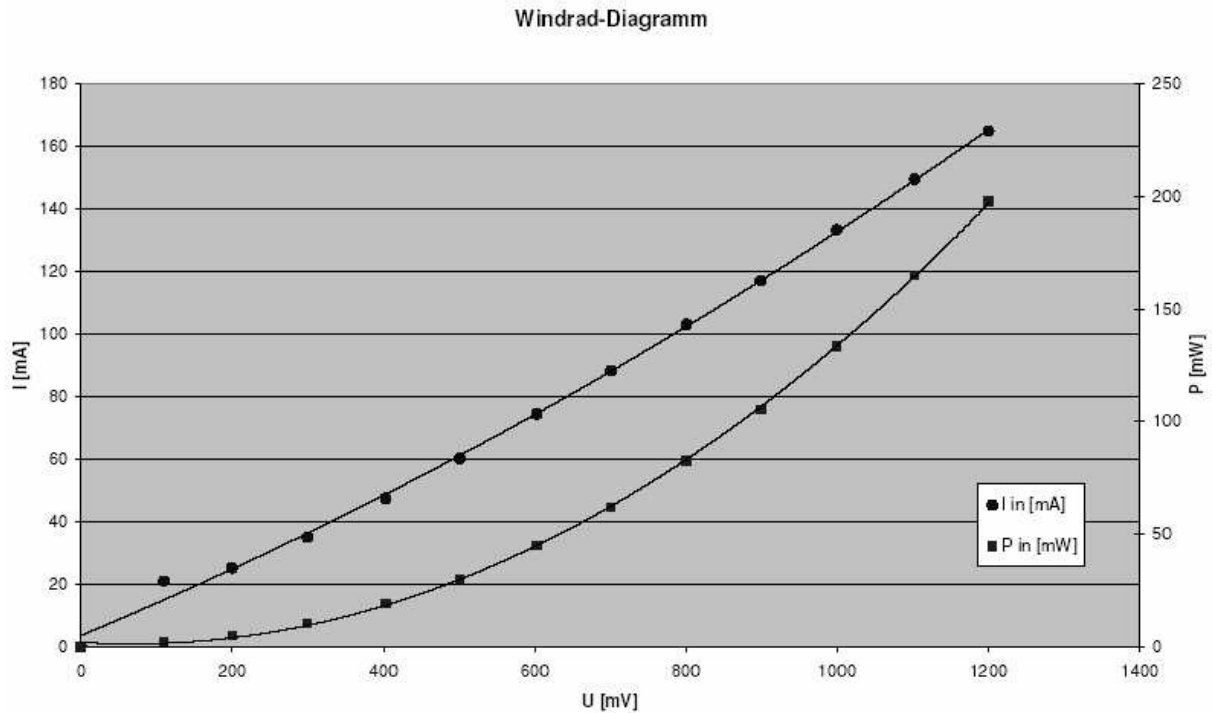


Die im oberen Diagramm eingezeichneten Steigungen der Geraden gibt den Innenleitwert des Generators an, also ist das Reziproke der Innenwiderstand ( $R_i \approx 5,2\Omega$ ). Aus den gemessenen Werten lässt sich mit der Formel  $P = I \cdot U$  die am Verbraucher umgesetzte Leistung  $P$  berechnen. Im folgenden Diagramm ist das Ergebnis dieser Umrechnung zu sehen. Das Maximum der gezeigten Kurven bezeichnet man als Maximum-Power-Point (MPP), dieser entspricht der maximal umgesetzten Leistung am Lastwiderstand. Am MPP ist der Lastwiderstand genauso groß wie der Innenwiderstand, was sich auch aus den Messergebnissen zeigt.

Leistungs-Diagramm

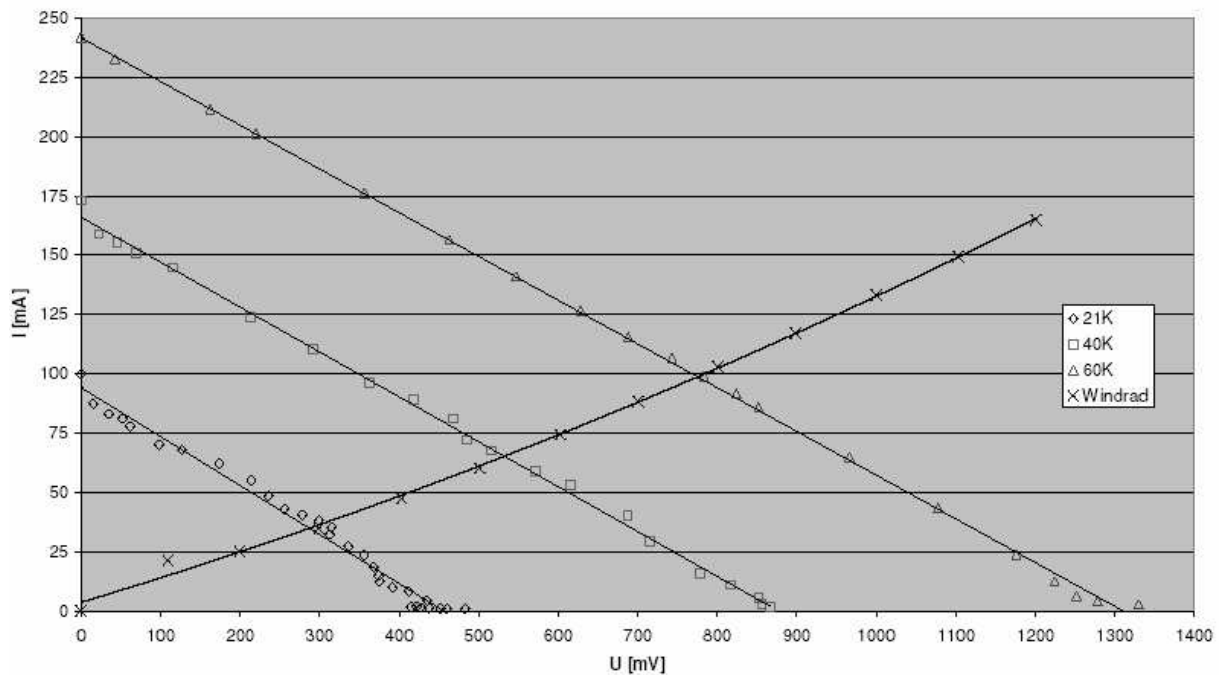


Bei der Windradmessung wird der Strom  $I$  und die Leistung  $P$  in einem Diagramm dargestellt, wobei die Werte für die Leistung aus der oben angegebenen Gleichung berechnet wurden. Um einen besseren Eindruck des Verlaufs der Kurve zu bekommen, wurden die Werte durch eine parabolische Trennlinie miteinander verbunden. Zwischen den Spannungen  $U = 0$  und  $200\text{mV}$  gibt es Abweichungen von den idealen Werten, da sich das Windrad erst ab einer Spannung von ca.  $100\text{mV}$  in Bewegung setzte.



Stellt man den Strom  $I$  und die Spannung  $U$  des Generators und des Verbrauchers in einem Diagramm da, ergibt sich das folgende Bild. Darin sind die drei Schnittpunkte der Funktionen zu erkennen, die grob geschätzt bei  $U = 295$ ,  $535$  und  $775\text{mV}$  liegen. Zur Bestätigung dieser Punkte schlossen wir das Windrad an das Peltierelement an und maßen den Strom  $I$  und die Spannung  $U$ .

### Windrad und Generator



Da die gemessenen Werte offenbar sehr weit von den Schnittpunkten abweichen, ließ uns dies auf einen systematischen Fehler im Aufbau unserer Messung schließen. Wir haben dann, mit den oben angegebenen Werten für den Innenwiderstand, das Amperemeter auf folgendem Weg herausgerechnet.

$$U_{\text{Amperemeter}} = 1,3\Omega \cdot I_{\text{gemessen}}$$

$$U_{\text{ges}} = U_{\text{Amperemeter}} + U_{\text{gemessen}}$$

$$R_{\text{Windrad}} = U_{\text{gemessen}} \cdot I_{\text{gemessen}}$$

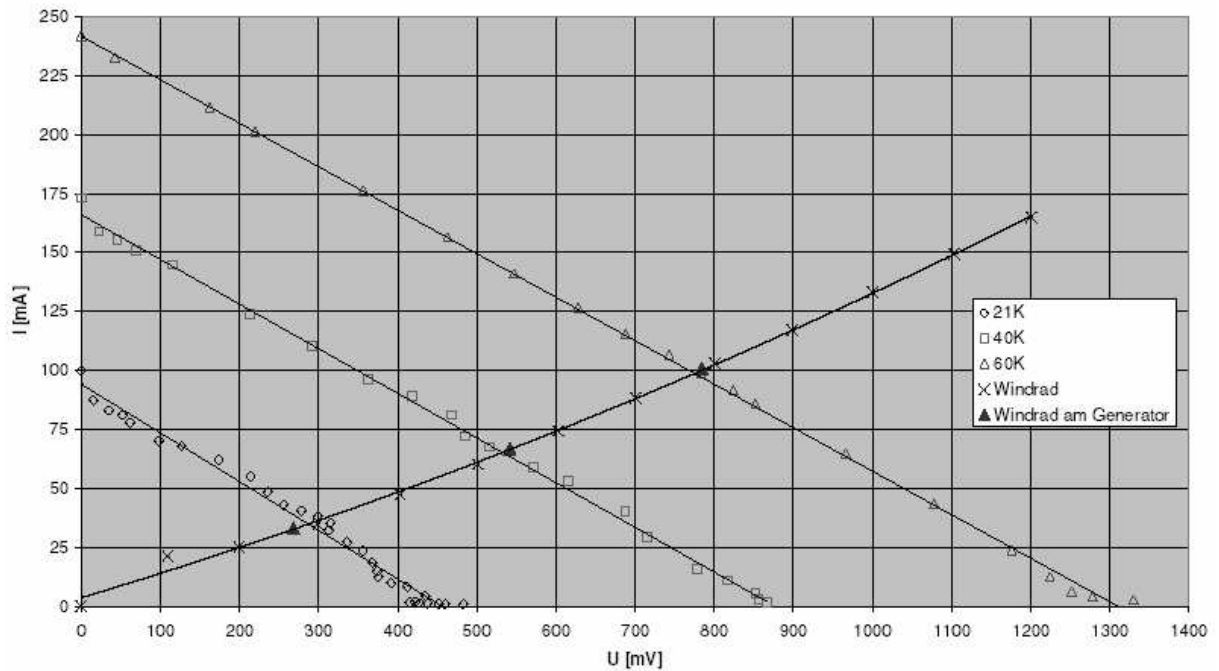
$$I_{\text{ohne Amperemeter}} = U_{\text{gemessen}} / R_{\text{Windrad}}$$

Das Voltmeter ist dabei zu vernachlässigen, da es mit seinem Innenwiderstand von  $R = 10\text{M}\Omega$  keine Rolle spielt. Die untenstehende Tabelle zeigt die gemessenen und korrigierten Werte.

$\Delta T$ [°K]	$U_{\text{gemessen}}$ [mV]	$I_{\text{gemessen}}$ [mA]	$U_{\text{Amperemeter}}$ [mV]	$U_{\text{ges}}$ [mV]	$R_{\text{Windrad}}$ [ $\Omega$ ]	$I_{\text{ohne Amparemeter}}$ [mA]
57,8	672,0	86,4	112,32	784,3	7,78	100,84
40,0	467,0	57,5	74,75	541,8	8,12	66,70
20,0	231,1	28,5	37,05	268,2	8,11	33,07

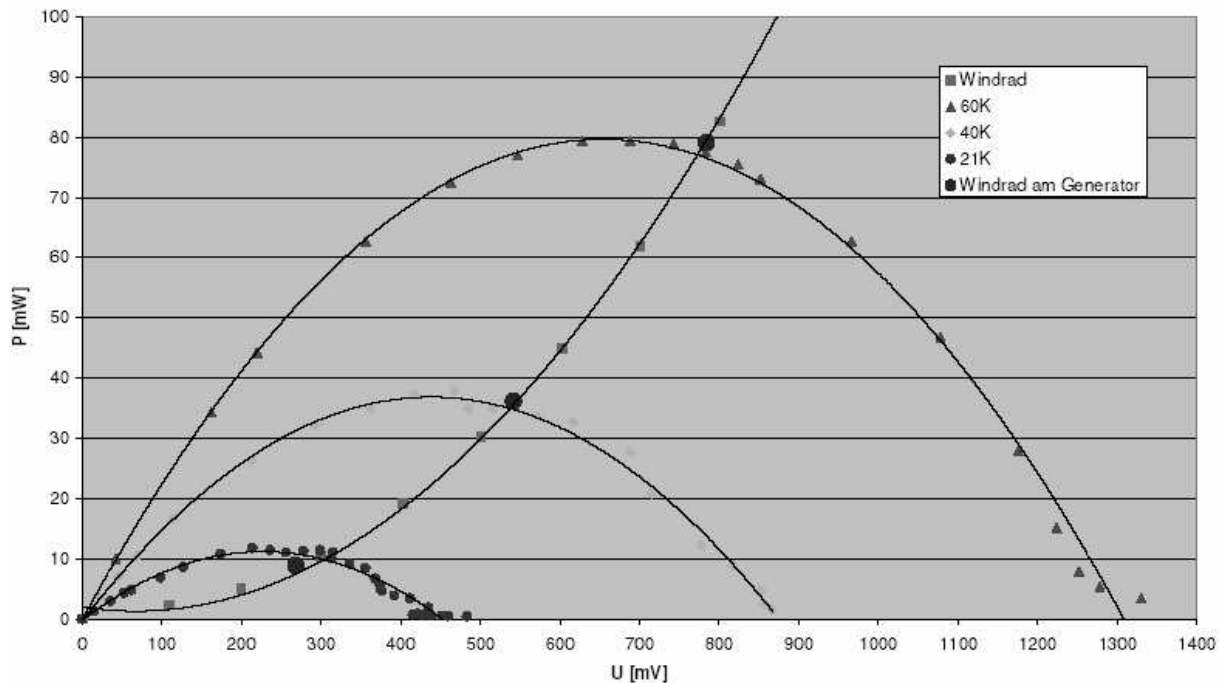
Wie in der Tabelle zu erkennen ist liegen die neuen Werte wesentlich näher an den vorher geschätzten Werten. Am deutlichsten ist dies bei der Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 40\text{K}$  zu erkennen. Das der Wert bei  $\Delta T = 20\text{K}$  etwas unterhalb des Schnittpunkts liegt ist dadurch zu erklären, dass die Generatorkurve bei  $\Delta T = 21\text{K}$  gemessen wurde. Eigentlich müsste der dritte Messwert ( $\Delta T = 57,8\text{K}$ ) auch unterhalb der Generatorkurve liegen, diese Ungenauigkeit liegt wohl an einem Messfehler.

Windrad am Generator



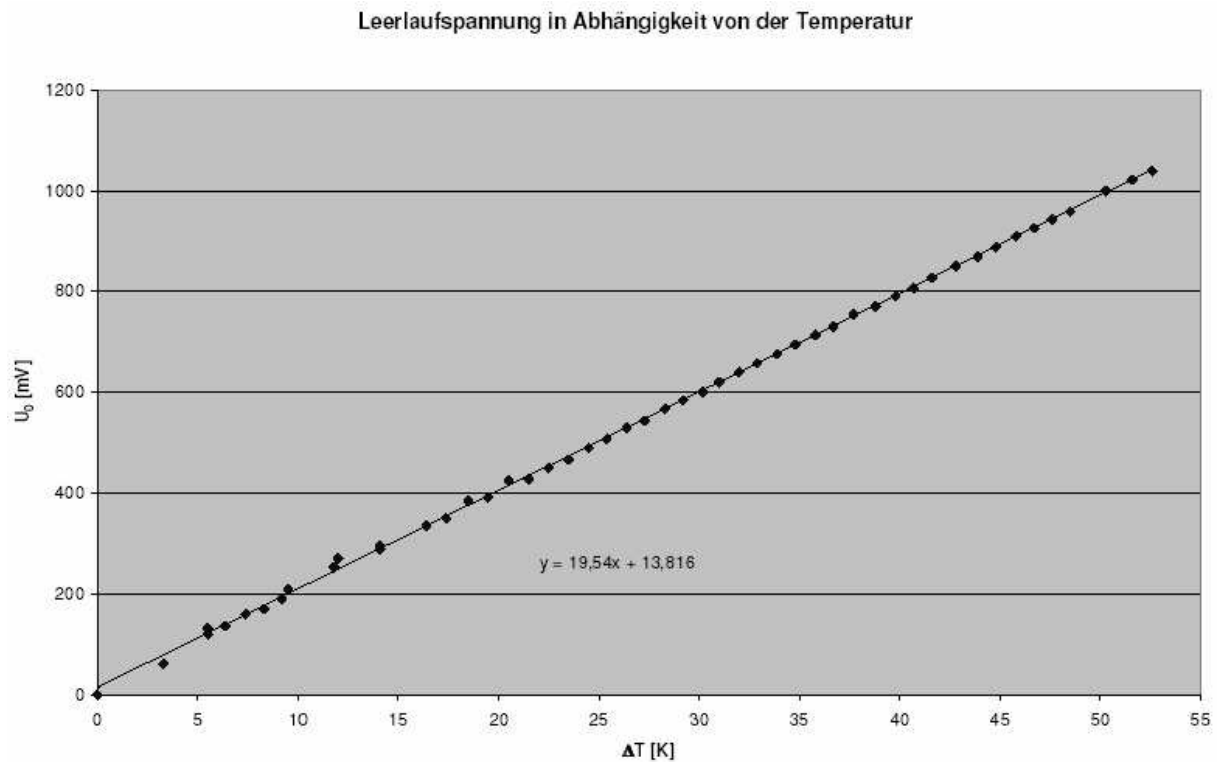
Im Leistungsdiagramm zeigt sich ein entsprechendes Bild. Wie auch gut zu erkennen ist liegen die Schnittpunkte der beiden Kurve fast im Maximu-Power-Point (MPP) des Genrators.

Leistungsdiagramm Windrad am Generator



Um abschließend noch einen Eindruck darüber zu bekommen, wie sich die Leerlaufspannung mit steigender Temperaturdifferenz ändert, haben wir noch das folgende Diagramm aufgenommen. Darin ist wieder, wie im Strom-Spannungs-Diagramm des Peltierelements, eine lineare Abhängigkeit zu erkennen. Wie weiterhin zu sehen ist liegen die Punkte sehr genau auf der Ausgleichsgeraden, was für eine genaue Messung der Werte spricht. Die

Steigung der Ausgleichsgeraden gibt den *Seebeckkoeffizienten* unseres Elements an ( $\epsilon \approx 0,02$  V/K).



### Anwendung in der Praxis

In der Praxis gibt es aufgrund des geringen Wirkungsgrads eigentlich nur zwei sinnvolle Einsatzgebiete des Seebeckeffekts, die Temperaturmessung und als Generator in der Raumfahrt.

Für die Temperaturmessung mit dem Seebeckeffekt nimmt man Materialpaare, bei welchen die Spannungsdifferenzen über den zu messenden Bereich annähernd linear zunehmen. Mit diesen sogenannten Thermoelementen können Temperaturen bis 3300 K gemessen werden. Ihre Vorteile liegen auf der Hand: Sie sind äußerst kompakt und beeinflussen so das Messobjekt kaum, reagieren rasch und sind gut zu applizieren.

Die durch den Seebeckeffekt erzeugte Spannung wird auch zur Stromerzeugung in der Raumfahrt genutzt. Ein sogenannter Thermogenerator (in Reihe geschaltete Materialpaare, gleich aufgebaut wie Peltier - Kühlmodule) wird in Kontakt mit einer radioaktiven Quelle gebracht, welche durch den Zerfall Wärmeenergie liefert. Auf der anderen Seite ist das Weltall mit einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt. Dieser Generator wird hauptsächlich in Satelliten eingesetzt, welche sich weit von der Sonne entfernen und so der Einsatz von Solarzellen schwierig macht.

### Messerwerte

Strom-Spannungs-Messung bei  $\Delta T = 21\text{K}$

U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	P [mW]	$U_{\text{Ampereometer}}$ [mV]	$U_0$ [mV]
483,0	0,9	510,0	0,43	1,17	484,17
460,0	1,0	450,0	0,46	1,30	461,30



452,0	1,1	400,0	0,50	1,43	453,43
438,0	1,2	350,0	0,53	1,56	439,56
427,0	1,4	300,0	0,60	1,82	428,82
415,0	1,6	250,0	0,66	2,08	417,08
422,0	2,0	200,0	0,84	2,60	424,60
435,0	4,3	100,0	1,87	5,59	440,59
412,0	8,3	50,0	3,42	10,79	422,79
392,0	9,9	40,0	3,88	12,87	404,87
376,0	12,5	30,0	4,70	16,25	392,25
374,0	15,0	25,0	5,61	19,50	393,50
368,0	18,4	20,0	6,77	23,92	391,92
356,0	23,6	15,0	8,40	30,68	386,68
336,0	27,2	12,5	9,14	35,36	371,36
313,0	32,2	10,0	10,08	41,86	354,86
315,0	35,2	9,0	11,09	45,76	360,76
299,0	38,1	8,0	11,39	49,53	348,53
278,0	40,5	7,0	11,26	52,65	330,65
256,0	43,0	6,0	11,01	55,90	311,90
236,0	48,5	5,0	11,45	63,05	299,05
214,0	55,0	4,0	11,77	71,50	285,50
174,0	62,0	3,0	10,79	80,60	254,60
127,0	68,0	2,0	8,64	88,40	215,40
98,0	70,0	1,5	6,86	91,00	189,00
61,8	77,7	1,0	4,80	101,01	162,81
52,7	81,2	0,8	4,28	105,56	158,26
35,5	83,0	0,6	2,95	107,90	143,40
15,1	87,4	0,4	1,32	113,62	128,72
0,0	100,0	0,0	0,00	130,00	130,00

### Strom-Spannungs-Messung bei $\Delta T = 40K$

U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	P [mW]	U <sub>Amparemeter</sub> [mV]	U <sub>o</sub> [mV]
867,0	1,7	500,0	1,47	2,21	869,2
856,0	2,8	300,0	2,40	3,64	859,6
852,0	5,6	150,0	4,77	7,28	859,3
817,0	10,9	75,0	8,91	14,17	831,2
778,0	15,7	50,0	12,21	20,41	798,4
715,0	29,1	25,0	20,81	37,83	752,8
688,0	40,3	17,5	27,73	52,39	740,4
616,0	53,0	12,0	32,65	68,9	684,9
572,0	59,0	10,0	33,75	76,7	648,7
516,0	67,5	8,0	34,83	87,75	603,8
485,0	72,0	7,0	34,92	93,6	578,6
468,0	81,2	6,0	38,00	105,56	573,6
418,0	89,1	5,0	37,24	115,83	533,8
362,5	96,1	4,0	34,84	124,93	487,4
292,0	110,3	3,0	32,21	143,39	435,4
213,3	123,7	2,0	26,39	160,81	374,1
115,1	144,9	1,0	16,68	188,37	303,5
69,5	150,8	0,8	10,48	196,04	265,5
45,8	155,4	0,6	7,12	202,02	247,8
22,5	159,0	0,4	3,58	206,7	229,2
0,0	173,0	0,0	0,00	224,9	224,9

Strom-Spannungs-Messung bei  $\Delta T = 60K$

$U_{\text{Verbraucher}}$ [mV]	$I$ [mA]	$R$ [ $\Omega$ ]	$P$ [mW]	$U_{\text{Ampereometer}}$ [mV]	$U_0$ [mV]
1330,0	2,6	500,0	3,458	3,38	1333,4
1278,0	4,2	300,0	5,3676	5,46	1283,5
1252,0	6,3	200,0	7,8876	8,19	1260,2
1224,0	12,3	100,0	15,0552	15,99	1240,0
1176,0	23,7	50,0	27,8712	30,81	1206,8
1078,0	43,3	25,0	46,6774	56,29	1134,3
966,0	64,9	15,0	62,6934	84,37	1050,4
852,0	85,7	10,0	73,0164	111,41	963,4
824,0	91,6	9,0	75,4784	119,08	943,1
783,0	99,0	8,0	77,517	128,7	911,7
743,0	106,3	7,0	78,9809	138,19	881,2
688,0	115,5	6,0	79,464	150,15	838,2
628,0	126,4	5,0	79,3792	164,32	792,3
547,0	140,9	4,0	77,0723	183,17	730,2
463,0	156,4	3,0	72,4132	203,32	666,3
356,3	176,2	2,0	62,78006	229,06	585,4
219,7	201,3	1,0	44,22561	261,69	481,4
162,4	211,3	0,7	34,31512	274,69	437,1
42,3	232,7	0,4	9,84321	302,51	344,8
0,0	241,8	0,0	0	314,34	314,3

### Windrad an Netzgerät

$U_{\text{Windrad}}$ [mV]	$I$ [mA]	$P$ [mW]	$U_{\text{Amparmeter}}$ [mV]	$U_{\text{ges}}$ [mV]	$P_{\text{ges}}$ [mW]
0,0	0,0	0,00	0	0,0	0,00
109,5	21,0	2,30	27,3	136,8	2,87
199,8	25,2	5,03	32,76	232,6	5,86
299,5	35,0	10,48	45,5	345,0	12,08
403,0	47,4	19,10	61,62	464,6	22,02
501,0	60,2	30,16	78,26	579,3	34,87
603,0	74,4	44,86	96,72	699,7	52,06
701,0	88,3	61,90	114,79	815,8	72,03
801,0	103,1	82,58	134,03	935,0	96,40
899,0	117,1	105,27	152,23	1051,2	123,10
1000,0	133,3	133,30	173,29	1173,3	156,40
1103,0	149,5	164,90	194,35	1297,4	193,95
1201,0	164,9	198,04	214,37	1415,4	233,39

### Windrad an Peltierelement als Generator

$\Delta T$ [K]	$U_{\text{gemessen}}$ [mV]	$I_{\text{gemessen}}$ [mA]	$P$ [mW]	$U_{\text{Amparmeter}}$ [mV]
57,8	672,0	86,4	58,06	112,32
40,0	467,0	57,5	26,85	74,75
20,0	231,1	28,5	6,59	37,05

$U_{\text{ges}}$ [mV]	$P_{\text{ges}}$ [mW]	$R_{\text{Windrad}}$ [ $\Omega$ ]	$I_{\text{ohne Amparmeter}}$ [mA]	$P_{\text{ohne}}$ [mW]
784,3	67,77	7,78	100,84	79,09
541,8	31,15	8,12	66,70	36,14
268,2	7,64	8,11	33,07	8,87

### Quellenangaben

Hering – Martin – Stohrer, Physik für Ingenieure, Springer  
 Bockhaus Enzyklopädie