



**QUICK-COOL**

Einführung  
Thermomanagement





## Vorwort

Wir sind ein kleines mittelständisches Handels-, Beratungs- und Fertigungsunternehmen aus Wuppertal und brennen darauf, Hitze Probleme, wo auch immer sie in Industrie, Forschung und Entwicklung entstehen, zu beseitigen. Unser kompetentes Team entwickelt maßgeschneiderte und optimale Lösungen für Sie und Ihr ganz individuelles Projekt.

Erweitert wird diese Expertise durch unser bestehendes Netzwerk an hochspezialisierten Fachunternehmen und Forschungseinrichtungen. So sind wir in der Lage, Ihnen mit Rat und Tat zur Seite zu stehen.



# Inhalt

<b>1. Einführung in das Thema Thermomanagement</b>	<b>8</b>
1.1. Grundlagen der Wärmeübertragung	9
<b>2. Bauteile und Funktionsprinzipien</b>	<b>16</b>
2.1. Heat Pipes	16
2.1.1. Funktionsprinzip	20
2.1.2. Arbeitsmedien und Materialien	24
2.1.3. Wärmetransportleistung und Grenzen	26
2.1.4. Einbau von Heat Pipes	28
2.1.5. Messung der maximal übertragbaren Leistung	29
2.1.6. Quick Facts: Heat Pipes	35
2.2. Peltier-Elemente / Thermoelektrische Kühler / TEC	36
2.2.1. Funktionsprinzip und physikalische Effekte	37
2.2.1.1. Peltier-Effekt	38
2.2.1.2. Seebeck-Effekt	38
2.2.1.3. Thomson-Effekt	40
2.2.1.4. Joulsche Wärme	40
2.2.2. Aufbau, Dimensionierung und Auswahl	41
2.2.3. Grundlegendes zu Einbau und Montage	49
2.2.4. Berechnung der Klemmkraft	51
2.2.5. Betrieb und Steuerung	53
2.2.6. Regelungsarten	54
2.2.7. PWM-Ansteuerung oder veränderliche Gleichspannung/Gleichstrom?	55
2.2.8. Systemintegration und Kühlkörper	59
2.2.9. Thermocycler-Anwendungen	61
2.2.10. Quick Facts: Peltier-Elemente	63
2.3. Thermoelektrische Generatoren (TEG)	64
2.3.1. Physikalischer Effekt und Aufbau	65
2.3.2. Stromerzeugung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	66
2.3.3. Quick Facts: Thermoelektrische Generatoren	68
2.4. Interface-Material / TIM	70
2.4.1. Bedeutung im System	71
2.4.2. Arten und Eigenschaften	71
2.4.3. Vor- und Nachteile	77
2.4.4. Korrektur einer mangelhaften Kühllösung	78
<b>3. Lösungen und Dienstleistungen von Quick-Cool</b>	<b>82</b>
3.1. Engineering	82
3.1.1. Simulation / Computational Fluid Dynamics (CFD)	82
3.2. Forschung & Entwicklung	83
3.3. Fertigung	84
3.3.1. Umfassende Beratung und Abstimmung	85
3.3.2. Vom Rohstoff zum Produkt	85
3.3.3. Fertigung von Prototypen	86
3.3.4. Serienproduktion	86
<b>4. Glossar / Sachregister</b>	<b>90</b>

A diagrammatic structure consisting of a vertical line on the left side of the red background, a horizontal line extending from its midpoint to the right, and a vertical line extending from the horizontal line's end to the text. Small circles mark the intersections.

## Einführung in das Thema Thermomanagement

# 1. Einführung in das Thema

## Thermomanagement

Eine allgemeingültige Definition des Begriffs *Thermomanagement* existiert nicht. Würde dieser Terminus allerdings auf die technische Thermodynamik projiziert, wird darunter ganz allgemein das Steuern vorhandener Wärmeströme verstanden. Thermomanagement beschäftigt sich in erster Linie mit der gezielten Ableitung von Wärme, um durch konstruktive Maßnahmen die Lebensdauer und Performance von Komponenten zu erhöhen oder deren einwandfreie Funktion sicherzustellen.

Je nach Anwendung findet die Kühlung von Bauteilen entweder aktiv mit Hilfe von Geräten wie Kältemaschinen (z. B. TE-Kühler, Kompressionskältemaschinen, etc.) statt, während die passive Variante über Kühlkörper mit Lüftern, Kühlrippen und Konvektion Wärme abtransportiert.

Allen gemein ist, dass Kühlsysteme bei einer breitgefächerten Palette an Anwendungsfällen zum Einsatz kommen und aus vielen Bereichen nicht wegzudenken sind.

## 1.1. Grundlagen der Wärmeübertragung

Das Prinzip der Wärmeübertragung beruht darauf, dass über mindestens eine thermodynamische Systemgrenze Energie transportiert wird. Konkret betrachtet, wird Wärme dort aufgenommen, wo sie entsteht, über mehrere mögliche Wege - je nach Anwendungsfall - weitertransportiert und abgegeben.

Die Effizienz eines Thermomanagementsystems wird durch verschiedene Parameter, Konstanten und Variablen beeinflusst:

- Einmal durch den **Wärmeübergangskoeffizienten**, der die Intensität des Wärmeübergangs zwischen einer Fläche und einem Fluid oder Gas definiert, beispielsweise von einem Kühlkörper an die Umgebungsluft.
- Ebenso eine Rolle spielt der **Wärmeleitwert**, welcher den Kehrwert des Wärmewiderstands eines Materials, Fluids oder Gases darstellt, auch als K-Wert bezeichnet. Dieser bestimmt die transportierte Wärmeleistung pro Meter und 1K Temperaturdifferenz.
- Unter einer **Temperaturdifferenz** wird die Abweichung der Temperatur zweier Messpunkte, die sich in der räumlichen oder zeitlichen Position unterscheiden können, verstanden.

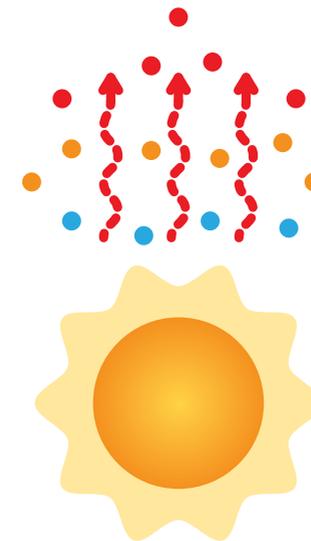
- Die **Wärmekapazität** stellt die Fähigkeit eines Stoffes dar, thermische Energie zu speichern, gemessen in  $J / (kg \cdot K)$ .
- Der **thermische Widerstand** oder Wärmewiderstand ist das Maß für die Temperaturdifferenz, welches an einem Objekt beim Anliegen eines Wärmestromes entsteht. Gemessen wird dieser Wert in  $K / W$ . Diese Größe charakterisiert in der Regel Kühlkörper und Wärmeübergänge. Zu beachten ist, dass der thermische Widerstand immer für eine bestimmte Konfiguration gilt. Gerade bei Kühlkörpern ist eine Verallgemeinerung oder Extrapolation der Daten sehr gefährlich.
- Der **Volumenstrom** bzw. auch die Durchflussrate ist vom Querschnitt eines Körpers - und in Bezug auf das Thermomanagement auch von dessen Wärmeleitwert - abhängig. Er gibt an, welche Menge eines Mediums pro Zeitspanne durch den Querschnitt eines Körpers transportiert wird.

Bei der Entwicklung von Thermomanagementsystemen gilt es, stets alle Parameter im Blick zu behalten, sodass ein System effizient und energieoptimiert arbeiten kann. Zudem muss beachtet werden, dass bestimmte Komponenten nur in einem definierten Temperaturbereich ordnungsgemäß betrieben werden können. Die Sicherstellung einer ausfallsicheren Wärmeabführung ist deshalb als kritisch zu betrachten.

Thermomanagement folgt physikalischen Gesetzen, um Wärme von Bauteilen abzuleiten. Dabei kommen drei verschiedene Wege zum Tragen, die jeweils zwischen zwei verschiedenen Orten eine Wärmeübertragung gewährleisten.

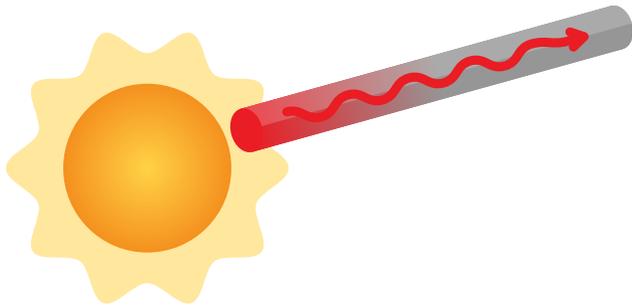
## Konvektion

Konvektion wird durch einen Strom aus Teilchen hervorgerufen, welcher durch unterschiedliche Einflüsse, wie zum Beispiel Temperatur, Druck, Dichte oder Gravitation entsteht. Auf den Wärmeaustausch bezogen bedeutet das, dass sich zum Beispiel Luft an der Oberfläche eines heißen Körpers erwärmt und durch die geringere Dichte aufsteigt. Kühlere Luft strömt nach, weshalb dieses Prinzip auch in Verbindung mit Lüftern für einen höheren Luftdurchsatz optimal für Kühlzwecke genutzt werden kann.

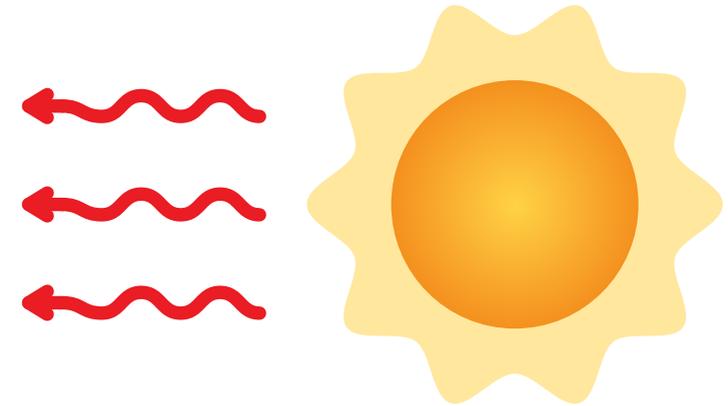


## Wärmeleitung

Bei diesem Prozess wird die Wärme aus dem Bereich mit höherer Temperatur durch ein gasförmiges, flüssiges oder festes Medium an einen kühleren Punkt abtransportiert. Das Prinzip beruht auf der Bewegung und Wechselwirkung benachbarter Teilchen, wie zum Beispiel Elektronen, Ionen, Molekülen oder Atomen im Zwischenraum. Das ist auch der Grund, weshalb ein Feststoff anderen Trägern meist deutlich überlegen ist. Gleichzeitig bedeutet das auch, dass Flüssigkeiten bessere Wärmeleitfähigkeiten besitzen als gasförmige Medien.



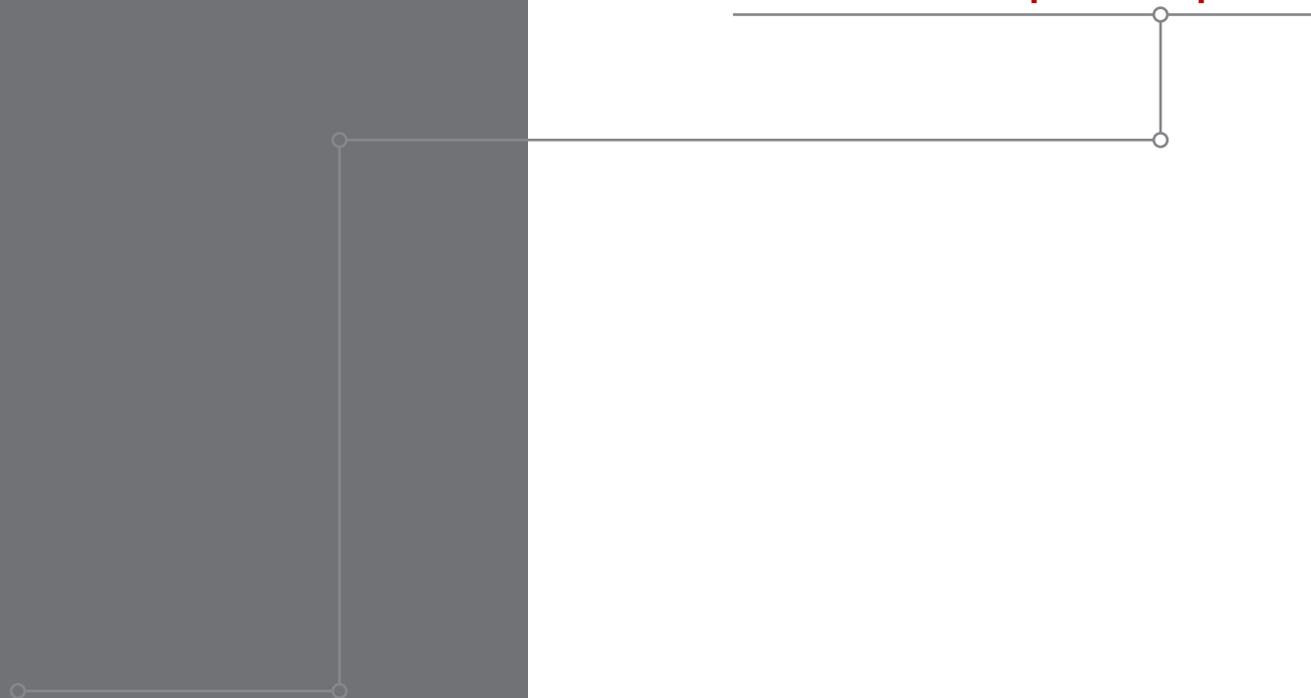
in Form von Wellen auf Objekte, wird die Energie je nach Oberflächenbeschaffenheit absorbiert, reflektiert oder hindurch gelassen.



## Wärmestrahlung

Wärme- oder thermische Strahlung wird durch die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen übertragen. Als tragendes Beispiel kann hier die Sonne herangezogen werden. Die abgegebene Wärme breitet sich selbst im Vakuum aus. Trifft diese Strahlung

## Bauteile und Funktionsprinzipien



## 2. Bauteile und Funktionsprinzipien

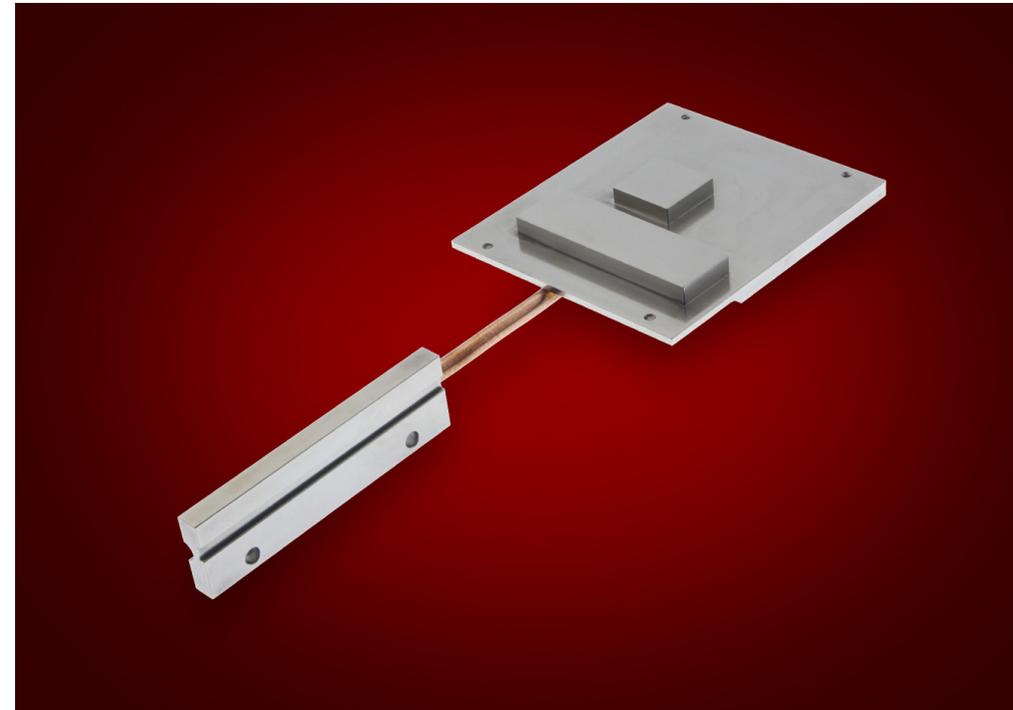
Thermomanagement lässt sich mit einer Reihe verschiedener Lösungen realisieren. Je nach Anforderung, Umgebungsbedingungen und Größenordnung der abzuführenden Wärme werden spezifische Möglichkeiten geboten, um eine effiziente und bedarfsgerechte Kühllösung zu gewährleisten.

### 2.1. Heat Pipes

Heat Pipes, beziehungsweise Wärmerohre und deren spezielle Bauformen sind in der Lage, Wärme sehr effizient von einem Ort zum anderen zu transportieren. Sie nutzen die Verdampfungswärme eines bestimmten Mediums, um im Inneren einen Wärmestrom zu erzeugen. Durch Kapillarwirkung oder Schwerkraft werden Hilfsmittel wie Umwälzpumpen hinfällig, wodurch diese Art von Thermomanagement, auch wegen der hohen Einsatztemperaturen von bis zu 3.000K, für weitläufige Bereiche geeignet ist. So finden sich Heat Pipes zum Beispiel in Satelliten, Sonnenkollektoren, Rechnern, in Schienensystemen zur Beheizung von Weichen sowie in Smartphones und Elektrogeräten wieder.

Historische Herkunft: Der erste Typ des Wärmerohrs, das stop-ped-end steam tube, wurde 1865 vom britischen Maschinenbauingenieur Lofus Perkins entwickelt und patentiert. Der

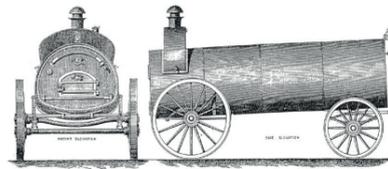
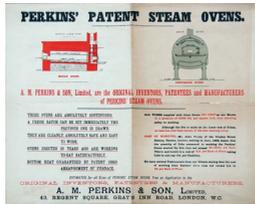
Perkins Steam Oven - ein Dampfbackofen, der vorwiegend in Bäckereien eingesetzt wurde, war der Beginn einer Reihe an Erfindungen, welche sich diese Technik fortwährend zunutze machen. Erst rund ein Jahrhundert später wird der Begriff Heat Pipe in diesem Kontext verwendet. Ein Jahr vor der ersten



Mondlandung wurden Wärmerohre bereits in Satelliten eingesetzt. Kurz darauf wird die erste Loop Heat Pipe erfunden, welche die besonderen Anforderungen in der Luft- und Raumfahrttechnik erfüllt. Diese Art der Heat Pipe ist jedoch nicht wirklich verbreitet.

1839

Familie Perkins entwickelt das Perkinsrohr und den „Perkins Steam Oven“



Loop Heat Pipe wird erfunden

Brücken- und Asphaltenteisung in den USA

Sony setzt Heat Pipes in Verstärkern ein

Philips entwickelt Heatpipe Sonnenkollektor

Xining - Lhasa Bahn

Weichenheizung Hafen Hamburg



NEC Medias X, erstes Smartphone mit Heat Pipe

1974

1976

1980er

1984

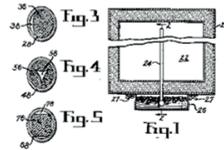
2006

2010

2013

1944

Gaugler greift das Prinzip auf und sieht eine Kapillarstruktur vor



1963

Grover prägt den Namen „Heat Pipe“ und führt erste wissenschaftliche Untersuchungen durch

1965

Erste Versuche zu Variable Conductance Heat Pipe (VCHP)

1967

Erste 0-g Versuche in erdnahen Umlaufbahnen

1968

Erster Einsatz in einem Satelliten

1970er

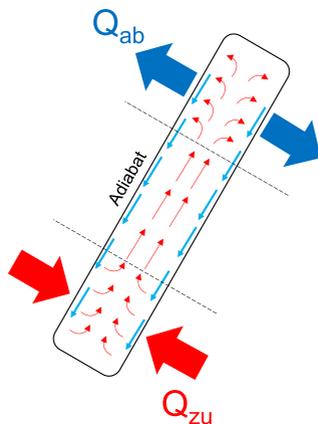
Alaska-Pipeline



## 2.1.1. Funktionsprinzip

**Gravitationswärmerohre oder Thermosiphone** nutzen die latente Wärme oder Verdampfungsenthalpie von Stoffen zum Wärmetransport. Stoffe nehmen bei der Verdampfung Energie auf und geben sie bei der Kondensation wieder ab. Der Sättigungsdruck, bei dem ein Medium zu verdampfen beginnt, ist temperaturabhängig, weshalb Medien bei unterschiedlichen Drucken und Temperaturen verdampfen. (Wasser verdampft bereits bei 20 Grad Celsius bei einem Absolutdruck von 2.335 Pa). Durch Partialdruckdifferenzen wird dieser an beliebiger Stelle des Wärmerohres durch Wärmezufuhr entstandene Dampf zu kälteren Bereichen transportiert, wo er wieder kondensiert und die Wärme abgibt. Den Rücktransport des Kondensates zur Wärmequelle zur Erhaltung des Kreislaufes wird bei Thermosiphonen ausschließlich über Schwerkraft ermöglicht.

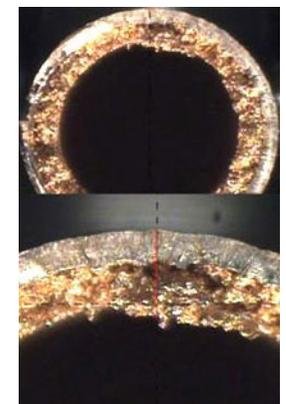
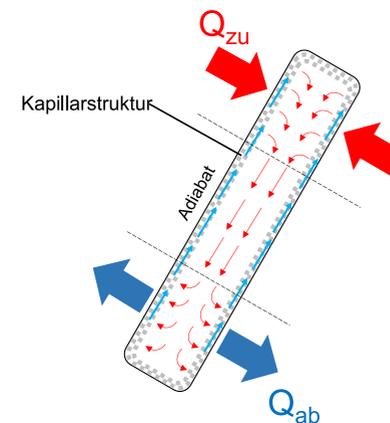
Thermosiphone arbeiten nur mit der Schwerkraft, Heat Pipes arbeiten unidirektional.



Im Inneren von **Heat Pipes** befindet sich eine Kapillarstruktur, die einen Flüssigkeitstransport ohne zusätzliche Hilfsenergie auch gegen die Schwerkraft gewährleisten kann. Dieser wesentliche Unterschied zum Thermosiphon ermöglicht der Heat Pipe, auch Wärme entgegen der Schwerkraft und in der Horizontalen zu übertragen, da der Kreislauf durch die Kapillarstruktur in allen Lagen erhalten bleibt. Zudem lassen sich Heat Pipes biegen und damit optimal für den Anwendungszweck anpassen.

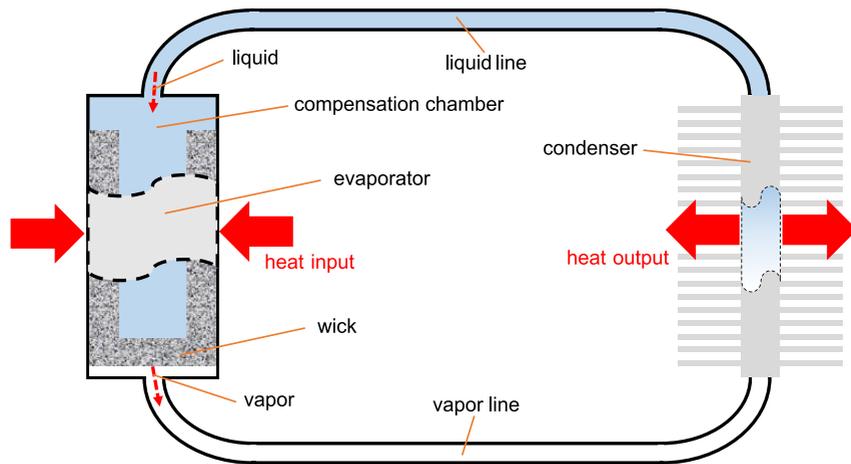


Mesh Heat Pipe



Sinter Heat Pipe

**Loop Heat Pipes** besitzen nur im Verdampfer eine Kapillarstruktur. Im Kreislauf selbst werden Dampf und Flüssigkeitsphase getrennt. Dadurch lassen sich Distanzen von bis zu 10 Metern zwischen Verdampfer und Kondensator realisieren. Eine Loop Heat Pipe ist unempfindlich gegen Vibrationen, flexibel installierbar, benötigt für ihre Funktion keine Schwerkraft und kann sogar in multi-g-Umgebungen eingesetzt werden.



**Pulsating oder Oscillating Heat Pipes** nutzen ein Gemisch aus Dampfblasen und Flüssigkeitspfropfen in einem dünnen Kapillarrohr. Da dieses Gemisch stets im Sättigungszustand ist, führt eine Wärmezufuhr an einer beliebigen Stelle zu spontaner Verdampfung von Flüssigkeit in Dampfblasen, die durch die Expansion einen pulsierenden Kreislauf im geschlossenen mäandrischen Rohrkreislauf auslöst.

**Vapor Chambers** nutzen das Prinzip einer Heat Pipe. Durch ihre flache, meist nur wenige Millimeter dünne Bauweise werden sie in der Regel dazu genutzt, Wärme von einer kleinen Fläche aufzunehmen und diese auf eine größere zu verteilen. Im Inneren befinden sich unter Vakuum ein Arbeitsmedium sowie eine Dochtstruktur. Letztere verteilt die Flüssigkeit vom heißen Bereich in kühlere Areale der Kammer. Je nach Anwendungsfall wird die Wärme entweder direkt auf den darauf sitzenden Kühlkörper weiter- oder per Heat Pipe abgeleitet.

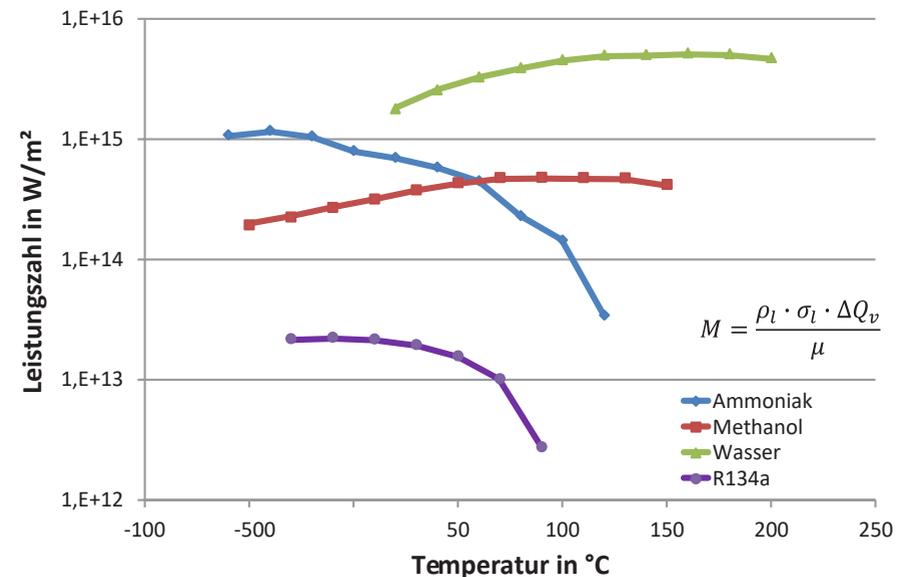
Bei allen Formen von Heat Pipes sollte die Wahl des Arbeitsmittels adäquat zur Temperatur verlaufen. Ist dies nicht der Fall, ist die Wärmeleitfähigkeit auf jene des Materials beschränkt, der Wärmetransport ist nicht mehr gewährleistet. Durch verschiedene Arbeitsmedien, Materialien und Größen lässt sich jedoch sicherstellen, dass Heat Pipes in einem breit abgedeckten Temperaturbereich ihren Dienst verrichten können.

## 2.1.2. Arbeitsmedien und Materialien

Je exakter man die wärmeableitenden Komponenten beschreibt und auslegt (Wärmeverlustpfad), desto erfolgreicher arbeitet das Thermomanagement. Bereits in der Planungsphase müssen Parameter wie Wärmeentwicklung oder Arbeitstemperatur eruiert werden. Entsprechend ist es notwendig, das Arbeitsmedium sowie das Material der Heat Pipe zu wählen, sodass die Heat Pipes stets in einem optimalen Arbeitsbereich betrieben werden können. Zur Bewertung von Arbeitsmedien in einer Heat Pipe wird eine Leistungszahl, basierend auf verschiedenen Stoffeigenschaften, berechnet. Sie ist von der Verdampfungsenthalpie (notwendige Wärme, bis eine bestimmte Menge eines Stoffes verdampft), der kinematischen Viskosität (Zähflüssigkeit) sowie der Oberflächenspannung des Arbeitsmediums abhängig. Die daraus resultierende Zahl (Merit-Zahl  $Me$  oder  $M$ ) dient dabei als Entscheidungshilfe.

In Tieftemperatur-Heat Pipes kommen im Regelfall gasförmige Medien zum Einsatz, die einen tiefen Schmelzpunkt haben. Molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) ist bereits ab Temperaturen zwischen 20 und 30K als Arbeitsmedium nutzbar. Während in Hochtemperatur-Heat Pipes Natrium, Lithium und Silber noch weit jenseits von 1.000K Wärme transportieren können. Anwendungen im Bereich der Elektronik bringen im Normalfall weniger Temperaturextreme mit sich. Für den Bereich zwischen -50 und 150 Grad Celsius in Niedrigtemperatur-Heat Pipes lassen sich, je nach Leistungsbedarf, Tetrafluorethan (R134a), Methanol, Ammoniak oder Wasser als Wärmeträger nutzen. Zudem spielt das Material der Heat Pipe selbst eine tragende Rolle. Im unteren Temperaturbereich findet meist Kupfer, seltener Edelstahl, Verwendung. Ersteres ist leicht kaltverformbar, korrosionsbe-

ständig und langzeitstabil. Darüber hinaus weist Kupfer eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit auf. Im Hochtemperaturbereich dienen warmfeste Stähle oder Nickelbasislegierungen als Heat Pipe-Material. Das Arbeitsmittel selbst befindet sich in Heat Pipes im Bereich des Sättigungsdruckes, sodass der Siedepunkt jederzeit erreicht wird und der Wärmetransport schon bei geringen Temperaturdifferenzen startet und abläuft.



## 2.1.3. Wärmetransportleistung und Grenzen von Heat Pipes

Die Leistung von Heat Pipes wird maßgebend durch eine Reihe von Faktoren bestimmt und betrifft sowohl das Arbeitsmedium als auch das Material der Heat Pipe.

### Leistungsbeeinflussende Größen, Arbeitsmedium

- Die **Verdampfungsenthalpie** eines Arbeitsmediums definiert die notwendige Energie, um eine bestimmte Menge an Flüssigkeit bei bestimmter Temperatur zu verdampfen. Im Gegenteil dazu gibt die **Kondensationsenthalpie** an, wie viel Energie freigesetzt wird, wenn das Gas bei einer bestimmten Temperatur kondensiert.
- Der **Schmelzpunkt** bezeichnet die Temperatur, bei welcher ein Stoff in den flüssigen Zustand übergeht.
- Die **Oberflächenspannung** einer Flüssigkeit beeinflusst zusammen mit dem Radius des Rohrs die Kapillarkräfte. Vorteilhaft sind hier Kapillarstrukturen mit kleineren Radien, beziehungsweise geringerer Maschenweite oder Korngröße. Letzteres betrifft ausschließlich Sinter-Heat Pipes.
- Die **Viskositätsgrenze** bestimmt das Ausmaß der Kondensatströmung innerhalb der Heat Pipe und begrenzt die Wärmestromdichte in der Regel bei niedrigen Arbeitstemperaturen.

- Die **Druckfestigkeit** eines Wärmerohrs erhöht zugleich den darin möglichen Dampfdruck des Arbeitsmediums. So kann zum Beispiel Wasser Temperaturen von bis zu 374 Grad Celsius erreichen, führt damit aber zu einem Druck von 210 bar.
- Ebenso ist die **Dichte** des Arbeitsmediums für die Leistung einer Heat Pipe verantwortlich. Je nach Stoff muss hier eine bestimmte Kapillargröße genutzt werden, um einen Kreislauf zu ermöglichen.

### Leistungsbeeinflussende Größen, Einbau

- Obwohl sich Heat Pipes durch eine **Kapillarstruktur** auszeichnen, die einen Betrieb gegen die Schwerkraft ermöglicht, funktionieren sie immer besser mit Schwerkraftunterstützung. Anschaulich formuliert sollte die Wärmequelle im bestmöglichen Fall immer unterhalb der Wärmesenke sein.
- Bei der Auswahl von Heat Pipes ist zu beachten, dass die Effizienz bei steigendem **Durchmesser** zunimmt. Es wird empfohlen, immer einen möglichst großen Rohrdurchmesser zu wählen. Auch senkt der parallele Einbau mehrerer Heat Pipes den thermischen Widerstand analog zur Ersatzwiderstandsberechnung in der Elektrotechnik.
- Normale rohrförmige Heat Pipes können Wärmeenergie nicht über unbegrenzte **Distanzen** transportieren. Sowohl der Druckverlust der Dampfströmung im Rohr

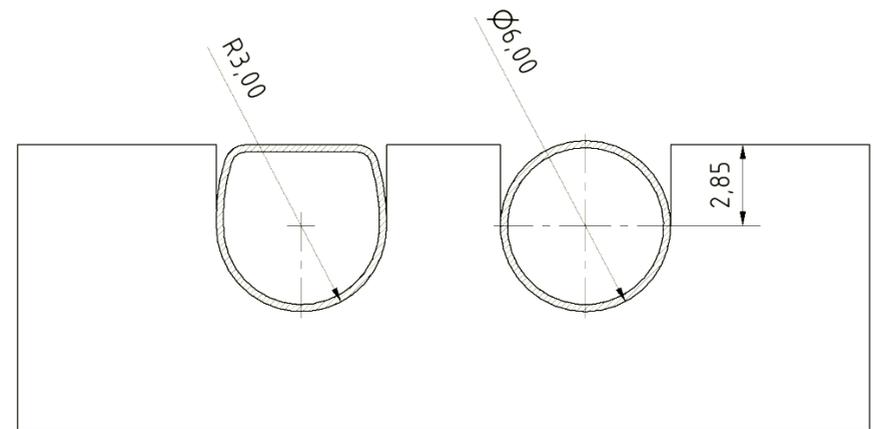
als auch die begrenzte Kapillarkraft verhindern einen Transport über weite Strecken. Für größere Distanzen (>30% der Gesamtlänge der Heat Pipe) können andere Bauformen wie Loop Heat Pipes oder Loop Thermosiphone geeigneter sein.

- **Biegungen und Querschnittsänderungen** sind bis zu einem bestimmten Grad - je nach Typ - möglich, jedoch verringern zu große Winkel oder markante Änderungen am Querschnitt die mögliche Wärmeübertragung signifikant.

## 2.1.4. Einbau von Heat Pipes

Heat Pipes in technischen Anwendungen können auf mehrere Arten integriert werden. Die einfachste, aber zugleich schlechteste Möglichkeit stellt die Montage in einer Bohrung dar. Eine Entlüftungsbohrung sowie Wärmeleitpaste oder -kleber sind in diesem Fall notwendig. Zusätzlich müssen die Toleranzmaße beachtet werden.

Als weitere Möglichkeit kann eine Heat Pipe in eine Nut gepresst werden, wodurch ein D-Querschnitt (Rundung mit flacher Oberkante) erreicht wird. Das sorgt für ebene und damit einhergehende leistungsfähige Kontaktflächen. Zudem kann die Installation in zwei symmetrische Halbschalen erfolgen. Eine Verlotung stellt die thermisch beste Option dar. Jedoch ist hier eine kontinuierliche Temperaturüberwachung nötig. Bei Quick-Ohm werden Heat Pipes mit Kühlfinnen und Montage-teilen verlötet.

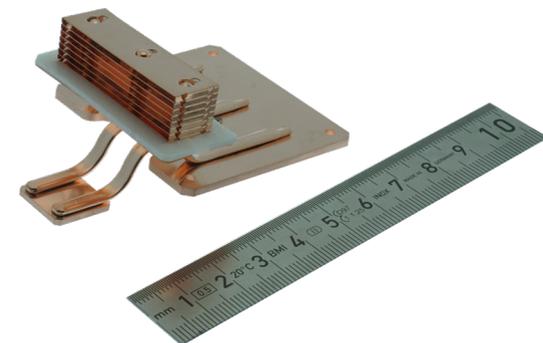


## 2.1.5. Messung der maximal übertragbaren Leistung

Die Wärmetransportleistung einer Heat Pipe ist nicht über die gesamte Länge linear, sondern nimmt in Abhängigkeit von Durchmesser und Gesamtlänge ab. Ebenso beeinflussen Biegungen die Leistung einer Heat Pipe.

Die Messung findet für folgende Beispiele unter jeweils konstanten Bedingungen und Messpunkten statt.

**Prüfbedingung:**  $T_3 = 60^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$   
 $\Delta T(T_1 - T_4) \leq 5\text{K}$

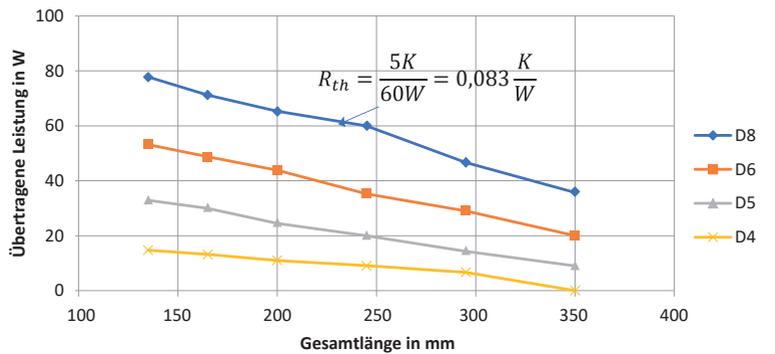


# Sinter Heat Pipe

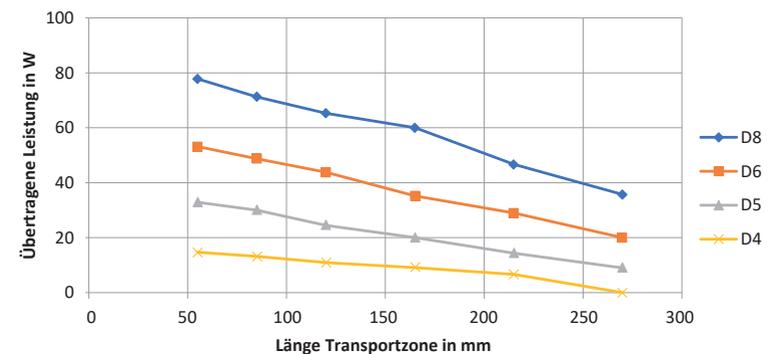


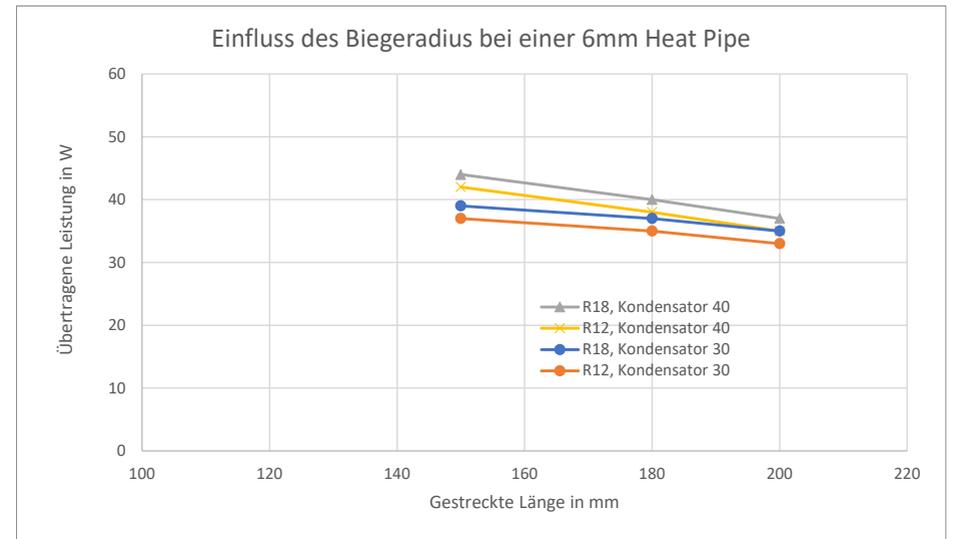
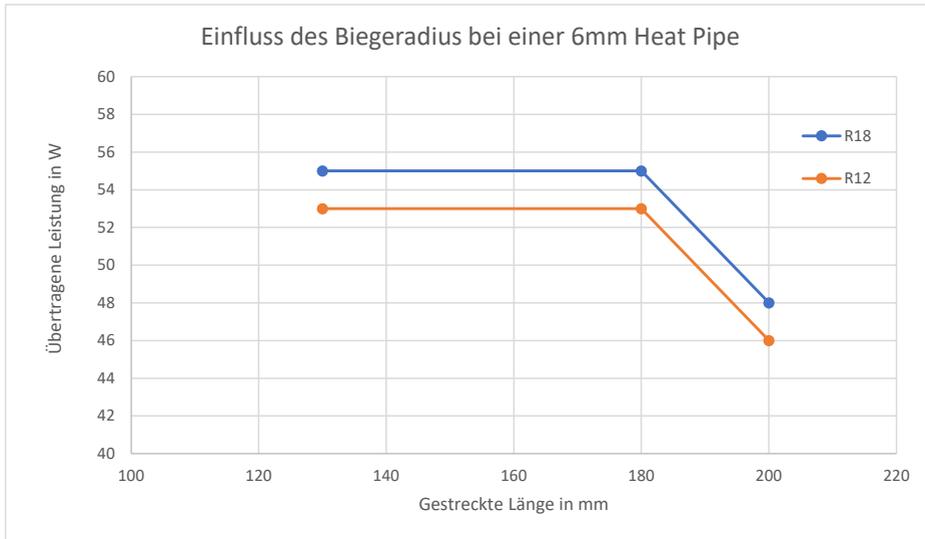
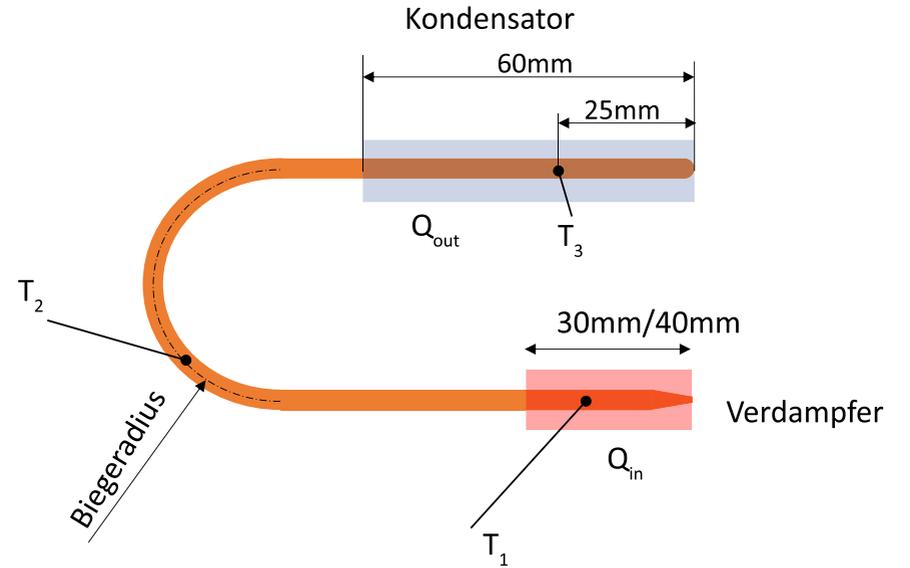
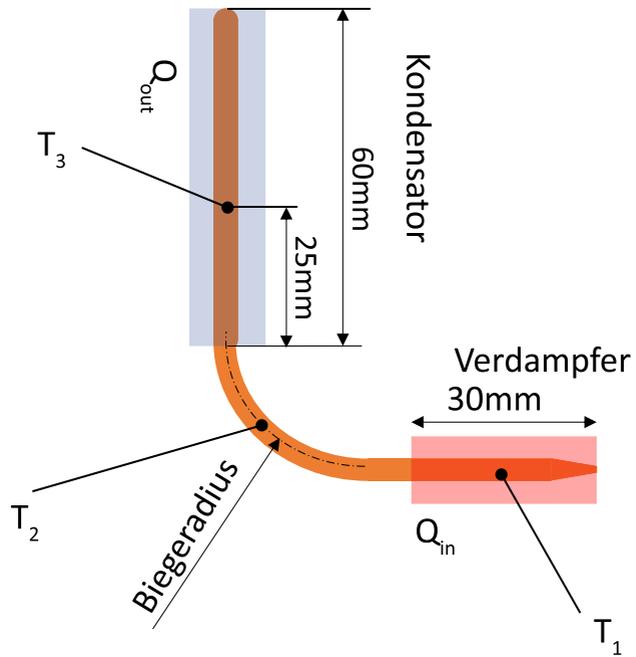
Transportleistung in Abhängigkeit von Durchmesser und Länge (horizontal)

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{5K}{Q}$$



Transportleistung in Abhängigkeit von Durchmesser und Transportzonenlänge (horizontal)







## 2.1.6. Quick Facts: Heat Pipes

1. Die Heat Pipe ist ein geschlossenes System, in dem an einer beliebigen Stelle bei Wärmezufuhr Flüssigkeit verdampft (Wärmequelle) und am kühleren Ende kondensiert. Der Flüssigkeitsdampf bildet das eigentliche Transportmedium.
2. Die Temperaturverteilung innerhalb des Systems ist vergleichsweise gering. Der Temperaturgradient wird näherungsweise durch den thermischen Widerstand der Heat Pipe bestimmt.
3. Mit Heat Pipes lässt sich Wärme schnell und effizient vom warmen zum kälteren Ort transportieren. Verglichen mit reinem Kupfer ermöglichen Wärmerohre eine 100- bis 10.000-fache Wärmeübertragungsleistung.
4. Mit Hilfe von Heat Pipes lassen sich homogen temperierte Arbeitsräume und -flächen realisieren.
5. Die Wärmeübergänge zwischen Wärmequelle, Heat Pipe und Kühlsystem sind für die volle Leistung entscheidend.
6. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Anschluss- und Übergangsstellen zu optimieren oder Heat Pipe-Systeme mit bereits integrierten Anschlussflächen zu nutzen.
7. Der Wärmetransportvorgang kann nur gewährleistet sein, wenn die Heat Pipe im Rahmen ihres Leistungs- und Temperaturbereichs betrieben wird.

8. Auch bei Kapillar-Heat Pipes hat die Einbaulage Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Bauteils. Sie ist jedoch geringer als bei anderen Typen.
9. Bei nicht-kapillaren Varianten reduziert sich bei Annäherung an die Horizontallage der Wirkungsgrad.
10. Durch zu kleine Biegeradien kann das Innenleben von Heat Pipes beschädigt werden, zu große Winkel können die Funktion bis zur Wirkungslosigkeit beeinträchtigen.

## 2.2. Peltier-Elemente / Thermoelektrische Kühler / TEC

Peltier-Elemente oder auch Thermoelektrische Kühler (TEC) genannt, sind thermoelektrische Wärmepumpen. Das bedeutet, dass durch die Zuführung elektrischer Energie Wärme entgegen ihres natürlichen Gefälles transportiert werden kann. So ist es möglich, mit diesen Bauteilen, je nach Anwendungsfall, zu kühlen oder zu heizen. Dieses Verhalten wird durch die Stromrichtung definiert. Dabei wird der Umgebung auf einer Seite Wärme entzogen, zur anderen Seite des Elements transportiert und dort über die Fläche abgegeben. Dabei kann der Temperaturunterschied theoretisch bis zu 73K bei einem einfachen Element und bis über 100K bei mehrstufigen Elementen betragen.

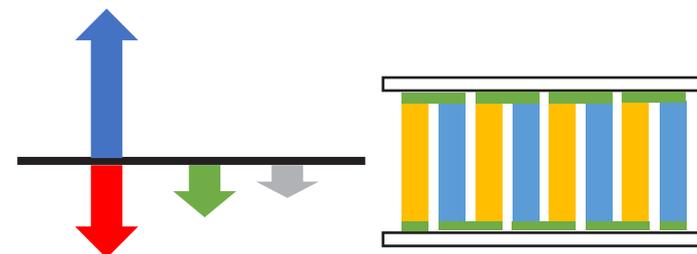
Die Anwendungsgebiete von Peltier-Elementen sind sehr vielfältig. Generell werden sie überall dort eingesetzt, wo eine Kühlung mit geringem Temperaturunterschied, präziser Regelung

und dynamischem Verhalten notwendig ist. Angefangen bei komplexer Analysetechnik im Bereich der Medizin über lichtempfindliche CCD-Sensorik bis hin zu mobilen Kühllösungen sind thermoelektrische Heiz- und Kühlsysteme weit verbreitet.

### 2.2.1. Funktionsprinzip und physikalische Effekte

Namensgeber und Funktionsweise von Peltier-Elementen ist der sogenannte Peltier-Effekt und dieser ist Teil der Thermoelektrizität. Darunter werden diverse physikalische Effekte zusammengefasst, bei denen sich thermische und elektrische Phänomene gegenseitig beeinflussen. Die vier wichtigsten Effekte in Bezug auf die Thermoelektrizität sind

- **Peltiereffekt**  
Energieaufnahme durch Stromfluss
- **Seebeckeffekt**  
Stromquelle durch Temperaturdifferenzen
- **Thomson Effekt**  
Wärmeleitung im stromdurchflossenen Leiter
- **Joulesche Wärme**  
Wärmeerzeugung im stromdurchflossenen Leiter



### 2.2.1.1. Peltier-Effekt

Der Peltier-Effekt wurde erst 1834, 13 Jahre nach der Entdeckung des Seebeck-Effekts vom französischen Physiker und Namensgeber Jean Charles Athanase Peltier nachgewiesen.

Wird ein Strom durch eine Anordnung unterschiedlicher Leitermaterialien geleitet, so besitzt das Elektron, welches sich quasi durch den Leiter bewegt, in den verschiedenen Leitermaterialien ein unterschiedliches Energieniveau. Trifft das Elektron auf eine Grenzfläche zwischen zwei Leitern, so muss für die Aufrechterhaltung des Stromflusses entweder Energie aufgenommen oder abgegeben werden. Eine Energieaufnahme wird über Wärmeentnahme aus dem Material der Grenzfläche bewirkt. Eine Energieabgabe erwärmt das Material der Grenzschicht.

Der Peltiereffekt ist verantwortlich für den Wärmetransport im stromdurchflossenen Peltierelement.

### 2.2.1.2. Seebeck-Effekt

Der Physiker und Erfinder Thomas Johann Seebeck entdeckte bereits 1821 durch Zufall, dass in zwei verschiedenen Stangen aus Metall eine elektrische Spannung entsteht, wenn zwischen den Enden der beiden Stäbe ein Temperaturunterschied besteht. Sobald die beiden Enden miteinander verbunden sind, fließt ein elektrischer Strom, dessen Magnetfeld er mit Hilfe einer Kompassnadel nachweisen konnte.

Die Ursache dieses thermoelektrischen Effekts liegt in der Bindung und im Zuge dessen insbesondere am freien Elektro-

nenfluss im Metall. Wird ein Metalldraht nur an einem Ende erwärmt, nehmen die Schwingungen des Gitters sowie die Bewegung der freien Elektronen zu. Aufgrund dessen beginnen sich diese praktisch auszudehnen und diffundieren immer mehr in Richtung des kalten Endes. Dort ist die kinetische Energie der Elektronen geringer und infolgedessen werden sie nicht durch starke Stoßvorgänge wieder abgestoßen. Das bedeutet, dass im Draht eine ungleichmäßige Verteilung der Ladung vorliegt. Die erwärmte Seite weist demnach einen Elektronenmangel und die kalte einen Elektronenüberschuss auf. Die dadurch entstandene elektrische Spannung wird auch als Thermospannung bzw. Seebeck-Spannung bezeichnet. Die Größe dieser Spannung wird durch den Seebeck-Koeffizienten bestimmt.

Der Versuch, diese Spannung abzugreifen, scheitert daran, dass die Spannungsabgriffe den physikalischen Zustand derart beeinflussen, dass sich in Summe die Spannungen aufheben. Um die Spannung jedoch nutzbar zu machen, verwendet man zwei unterschiedliche Materialien, die möglichst unterschiedliche Spannungen generieren. Dieser Unterschied kann nun tatsächlich abgegriffen und zur Stromerzeugung genutzt werden. Zudem kann dieser Materialwechsel beliebig oft wiederholt werden, sodass beachtliche Spannungen erreicht werden können.

Der Seebeck-Effekt schmälert den Peltiereffekt, da hier eine Gegenspannung aufgebaut wird, die den Innenwiderstand vergrößert.

### 2.2.1.3. Thomson-Effekt

Benannt wurde der Thomson-Effekt nach dem britischen Physiker William Thomson (1. Baron Kelvin 1856). Er beschreibt eine Veränderung des Wärmetransports entlang eines unter Strom stehenden Leiters, in dem ein Temperaturverlauf besteht.

Liegt an einem stromdurchflossenen Leiter eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten, wird, je nach Metallart, entweder mehr oder weniger Wärme transportiert. Zwar wird diese ebenso durch die Wärmeleitfähigkeit des Materials übertragen, jedoch sorgt der entstehende Widerstand für weitere Erwärmung. Dadurch lässt sich der Effekt nur bedingt nachweisen. Für die Berechnung der Kühlleistung von Peltierelementen kann der Thomson-Effekt vernachlässigt werden.

### 2.2.1.4. Joulische Wärme

Die Joulische Wärme beschreibt die Erwärmung eines stromdurchflossenen Leiters aufgrund seines inneren Leitungswiderstands. Im Grunde basieren alle elektrischen Heizelemente und Glühlampen auf diesem Prinzip.

Die Joulische Wärme ist beim Kühlbetrieb unerwünscht. Fügt sie der Seite, der über den Peltiereffekt Wärme abgetrotzt wurde, doch wieder Wärme zu. Dadurch ist die Joulische Wärme maßgeblich dafür verantwortlich, dass der Gesamteffekt nur bis zum Wert  $I_{\max}$  zu steigern ist. Oberhalb dieses Stromes wird mehr Wärme eingetragen als abgeführt.

## 2.2.2. Aufbau, Berechnung der Dimensionierung und Auswahl

Peltier-Elemente bestehen aus zwei meist quadratischen Platten, in der Regel aus Aluminiumoxid-Keramik, welche in einem Abstand von 3-5 Millimetern übereinandergelegt werden. Diese Platten dienen dazu, das komplexe Gebilde mechanisch zusammen zu halten. Das Material muss einerseits thermisch leitfähig sein, um den Wärmefluss zu gestatten und andererseits elektrisch isolieren, damit die Reihenschaltung der Materialpaarungen nicht kurzgeschlossen wird. Dazwischen befinden sich kleine Quader, genannt Schenkel oder Dices, aus einem Halbleitermaterial wie Bismutellurid oder Siliziumgermanium. Durch p- und n-Dotierung des Materials entstehen zwei unterschiedliche Leiterwerkstoffe, die durch eine Bestromung die oben beschriebenen Effekte hervorrufen.

In einem Peltierelement wird eine Vielzahl elektrischer Leiter aus zwei unterschiedlichen Materialien elektrisch betrachtet in Reihe geschaltet, sodass wiederholt Wärme aufgenommen und abgegeben wird. Die räumliche Anordnung der einzelnen Leiter wird nun so gewählt, dass sich die energieaufnehmenden Übergänge ausschließlich auf der einen Peltierseite, die energieabgebenden Übergänge auf der anderen Seite befinden. Der Strom läuft also mäandernd zwischen den beiden Keramikplatten hin und her. Folglich ist die Anordnung elektrisch betrachtet eine Reihenschaltung, aus thermischer Sicht liegen die Leiter alle parallel.

Die thermischen und elektrischen Eigenschaften eines Peltiermoduls werden über die Schenkellanzahl und deren Geometrie definiert.

Wie bereits beschrieben, überlagern sich die verschiedenen Effekte und beeinflussen so den angestrebten Wärmetransport des Peltierelementes. Ab einem Strom  $I_{\max}$  bzw. ab einer Spannung  $U_{\max}$  überwiegen die unerwünschten Effekte und eine weitere Steigerung der Energiezufuhr bewirkt eine Abnahme der Transportleistung. Bei Bismuttellurid wird dieser Effekt bei etwa 0,12V je Schenkelpaar und 25 Grad Celsius Warmseitentemperatur erreicht.

Die Wärmeleistung auf der Kaltseite errechnet sich wie folgt:

$$\dot{Q} = S \cdot I \cdot T_c - R \cdot I^2 - G_{th} \cdot \Delta T$$

### Peltier-Effekt

### Joulesche Wärme

natürlicher Wärmefluss von warm nach kalt

Wie bei der Beschreibung der einzelnen Effekte erwähnt, wird der Widerstand  $R$  über den Seebeckeffekt beeinflusst. Zudem sind alle Materialeigenschaften temperaturabhängig. Die Temperatur eines einzelnen Halbleiterschenkels beschreibt eine Kurve über die räumliche Ausdehnung und übersteigt im Inneren sogar die Temperatur der Warmseite.

Eine korrekte mathematische Beschreibung ist daher extrem komplex.

Ein Modul mit 127 Schenkelpaaren besitzt in etwa ein  $U_{\max}$

von 15V, wohingegen ein Modul mit 241 Schenkelpaaren entsprechend ca. 28V aufweist. Die überwiegende Mehrheit der Peltiermodule basiert herstellerübergreifend auf dem gleichen Raster mit 17, 31, 63, 71, 127, 161, 241 Schenkelpaaren. Je nach Bauweise sind es jeweils ein Paar mehr oder weniger, je nachdem, wie die Schenkelpaare zwischen den Keramiken angeordnet sind und wie der elektrische Anschluss erfolgt. Die Leistungsstärke wird bei Peltier-Elementen gleicher Schenkellanzahl über die maximale Stromstärke eingestellt. Je dünner die Module sind, desto leistungsstärker werden sie. Durch flachere Schenkel sinken Innenwiderstand, Joulesche Wärme und der thermische Widerstand, während die Kühlleistung steigt.

Es gibt unterschiedliche Bauformen von Peltiermodulen. Die gängigste Form ist eine quadratische Form, ein augenscheinlich kleines Plättchen mit elektrischen Anschlüssen, über die ein Gleichstrom zugeführt werden kann. Mit dem Verändern der Stromstärke und Richtung kann die Temperatur angrenzender Objekte gesteuert werden. Diese Bauform ist am weitesten verbreitet.

Da leistungsstarke Module, wie beschrieben, flacher sind als Module geringer Leistung, kann hier oftmals keine Leitung mehr in den Zwischenraum eingefügt werden. Dann wählt man die Keramikseite, auf die der elektrische Anschluss angebracht wird, etwas größer und kontaktiert die Anschlüsse auf dem entstehenden Überstand. Diesen Überstand nennt man Porph (Vorbau). Der Porph ermöglicht auch eine Integration ohne Leitungen, zum Beispiel mit Push-Pins oder Klemmen, da die freiliegenden elektrischen Anschlüsse direkt abgegriffen werden können. Bei sehr kleinen Modulen ist es auch geläufig, dass die heiße Seite auf zwei Seiten über die kalte Keramik hinaussteht.

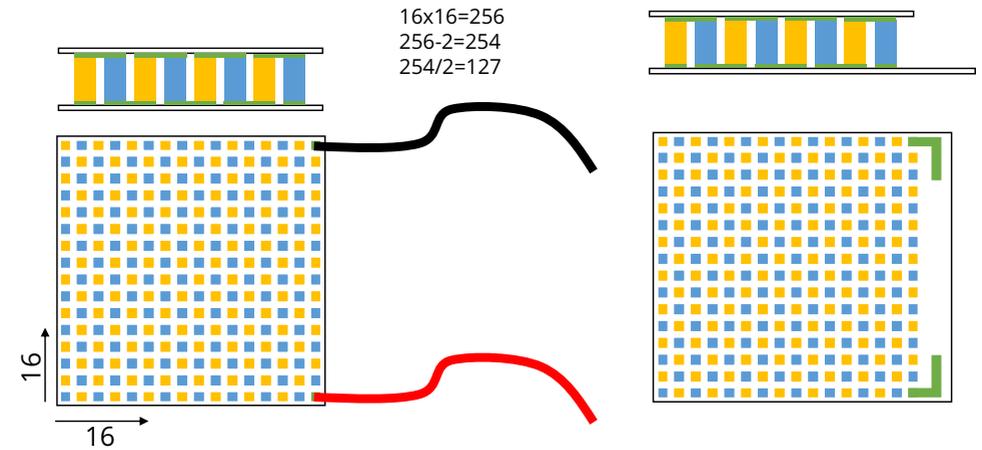
Hierbei wird auf einer Seite der + -Pol angeschlossen und auf der anderen Seite der - -Pol.

Der technische Aufbau zum Kühlen eines Objekts mit Hilfe von Peltier-Technik besteht in der Regel aus einem Peltier-Element, einem Kühlkörper sowie dem Objekt selbst. Sind diese Komponenten sinnvoll aufeinander abgestimmt, kann dadurch die Objekttemperatur in etwa zwischen Minus 40 Grad Celsius und Plus 200 Grad Celsius gesteuert werden.

Diese Abstimmung sinnvoll vorzunehmen, macht allein die Schwierigkeit dieser Technik aus. Das Peltierelement erzeugt schließlich keine definierte Temperatur, sondern eine Temperaturdifferenz. Dieser Temperaturunterschied ist abhängig von der zugeführten Leistung, die den Peltiereffekt antreibt, und der zu transportierenden thermischen Leistung. Hinzu kommen die Temperaturen im Material, die alle elektrischen und thermischen Effekte beeinflussen. Die Temperatur des zu kühlenden Objektes ist dann eine Funktion aus dieser Temperaturdifferenz und der Temperatur auf der Warmseite. Diese Warmseitentemperatur wiederum wird über den Kühlkörper bestimmt.

Die Ingenieure im Hause Quick-Ohm sind in der Lage, die Zusammenstellung der Komponenten auf die gewünschten Anforderungen abzustimmen und gegebenenfalls einen Aufbau herzustellen, auf dessen Grundlage ein Produkt zur Serienreife gebracht werden kann.

Fälschlicherweise wird die Nennleistung des Peltierelementes gerne als fixe Größe angenommen. Tatsächlich beschreibt dieser Wert jedoch nur einen bestimmten Arbeitspunkt, der zum



relativen Vergleich unterschiedlicher Peltierelemente dient. So wie ein Auto nicht weiter beschleunigen kann, wenn es seine Maximalgeschwindigkeit erreicht hat, kann das Peltierelement keine Wärme mehr abführen, wenn es seine maximale Temperaturspreizung erreicht hat. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die notwendige Nennleistung des Peltierelementes immer größer sein muss als die Leistung, die abzuführen ist, um eine Kühlung zu erreichen. Hierbei ist es besonders wichtig, dass der gesamte Wärmeverlustpfad zu berücksichtigen ist. Als Temperaturdifferenz ist nicht der Gradient zwischen „kaltem“ Bauteil und Wärmesenke anzusetzen, sondern der tatsächliche Hub des Peltiers, inklusive Wärmeübergänge und Kühlkörper auf der heißen Seite. Die beiden aktiven Oberflächen des Peltierelementes sind durch thermische Übergänge mit dem zu temperierenden Objekt einerseits und dem für die Kühlung verwendeten Medium andererseits verbunden. Darum wird bei einer Kühlung das Objekt immer wärmer sein als die Kaltseite des Peltierelementes. Die Warmseite des Peltierelementes wird immer wärmer sein als das für die Kühlung verant-

wortliche Medium. Um diesem Punkt gerecht zu werden, kann als Faustwert eine Differenz von jeweils 10 Kelvin pro Seite herangezogen werden. Hieraus ergibt sich, dass in einem sinnvoll dimensionierten System die Temperaturdifferenz des Peltier-elementes 20 Kelvin größer sein muss als die zu erzeugende Temperaturdifferenz zwischen Zielobjekt und Kühlmedium.

Bei der Auslegung des Systems ist auf die Dimensionierung des Kühlkörpers/Kühlsystems ein besonderes Augenmerk zu richten. Wie anfangs gezeigt, ist die Abwärme des Peltiers stets größer als die Kühlleistung.

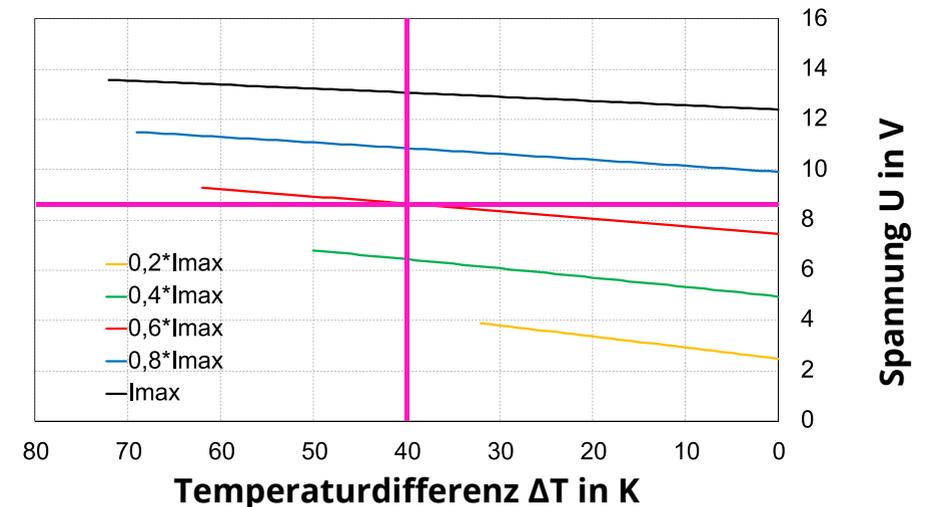
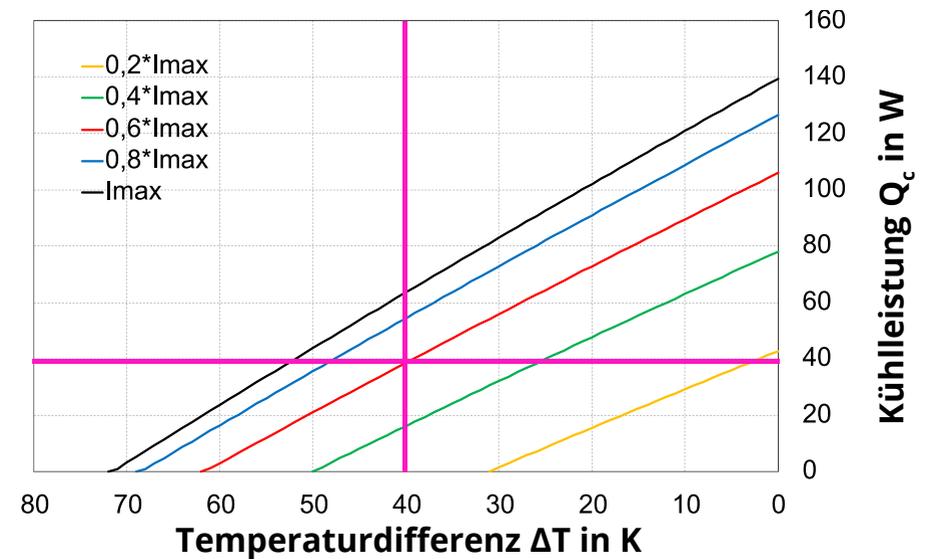
Sind alle Größen bekannt, kann mit folgender Formel eine erste grobe Vorauswahl eines Peltiermoduls gemacht werden. Mit dem berechneten  $Q_{c,max}$  kann dann ein entsprechendes Modul ausgewählt werden, das eine ähnliche Leistung hat.

$$Q_{c,max} = \frac{Q_c \cdot \Delta T_{max}}{\Delta T_{max} - \Delta T}$$

Gesucht, TEC für 40W Kühlleistung bei einer Temperaturdifferenz von 40K

$$Q_{c,max} = \frac{40W \cdot 71K}{71K - 40K} = 91,6W$$

Mit den von uns bereitgestellten Datenblättern und den darauf abgebildeten Performance Curves können die ersten Annahmen geprüft und über Iteration gegebenenfalls angepasst werden.



Beispielhaft ist hier die Dimensionierung eines Peltiers gezeigt, welches eine Kühlleistung von 40W bei einer Temperaturdifferenz von 40K transportieren soll. Die 40K sind in diesem Fall der Gradient auf dem Modul und nicht der Gradient zwischen zu kühlendem Teil und der Wärmesenke. Die oben berechneten 92W finden sich nicht 1:1 wieder, deshalb wird ein Modul mit ca. 20% mehr Leistung gewählt (QC-127-2.0-15.0M). Im Performance-Diagramm findet man bei einem Wert von 40K auf der Abszisse und 40W Kühlleistung auf der Ordinate einen Strom von  $0,6 \cdot I_{\max}$ , also in diesem Fall 9A. Weiterhin findet man im zweiten Diagramm bei 9A und 40K auf der Abszisse etwa 9,5V Betriebsspannung. Das Modul hat also in diesem Betriebspunkt eine Kühlleistung von 40W bei einer Temperaturdifferenz von 40K und einer Leistungsaufnahme von ca. 86W. Der Kühlkörper auf der warmen Seite muss demnach die Leistung von 126W abführen können.

### Anmerkung

Es gibt sehr viele Kühlkörper, die 130W abführen können, allerdings wird in diesem Zusammenhang selten von der Temperaturdifferenz gesprochen. Diese Temperaturdifferenz lässt sich im thermischen Widerstand  $R_{th}$  ausdrücken. Der  $R_{th}$  charakterisiert einen Kühlkörper und trägt die Einheit K/W.

Er drückt aus, wie groß die Temperaturdifferenz zwischen dem heißesten Punkt auf dem Kühlkörper und der Wärmesenke, in der Regel Luft, ist. Ein Kühlkörper mit einem  $R_{th}$  von 1 hat bei einer Verlustleistung von 10W einen Gradienten von 10K. Das bedeutet, dass die heißeste Stelle des Kühlkörpers 10K wärmer ist als die Umgebung.

Übertragen auf unsere thermische Aufgabe würde das bedeuten, dass der Kühlkörper an der heißesten Stelle, also auf der heißen Seite des Peltiers eine Temperatur von 130K über der Umgebung aufweist. Das Peltier erzeugt jedoch nur einen Temperaturhub von 40K, also ist die kalte Seite immer noch 90K über der Umgebung.

Wir empfehlen, einen Kühlkörper so zu wählen oder zu gestalten, dass er im Betriebszustand nicht heißer als 10K über der Wärmesenke ist. Bei dem skizzierten Fall wird also ein Kühlkörper mit einem  $R_{th}$  von  $10K/130W = 0,077$  K/W benötigt.

### 2.2.3. Grundlegendes zu Einbau und Montage

In der Regel werden Peltier-Elemente zwischen zwei nicht beweglichen und festen Kontaktflächen - einem Kühlkörper und einer Kühlplatte - mit Hilfe von Schrauben eingespannt. Dabei können einige Trägermaterialien, wie zum Beispiel:

- Wärmeleitpaste
- spezielle leitende Folien aus Graphit
- Phasenwechselmaterialien (Phase Change Material, kurz: PCM)
- PCM, druckbar
- Gap Pads

zum Einsatz kommen, um die Zwischenräume der Verbindung so luftdicht wie möglich zu verschließen. Nur so kann eine effiziente Wärmeabgabe gewährleistet werden, da Luft als hervor-

ragender Isolator den Wärmefluss erheblich bremst.

Es besteht aber auch die Möglichkeit, eine Verbindung durch Fügeverfahren wie Kleben oder Löten zu schaffen. Jedoch müssen dafür einige Voraussetzungen und Eigenschaften in Bezug auf das verwendete Material und anliegende Temperaturschwankungen erfüllt und gegeben sein.

Vor dem Einbau sollte also darauf geachtet werden, ein geeignetes Interfacematerial, wie beispielsweise Wärmeleitpaste, auf die Kontaktflächen aufzutragen. Hier gilt die Devise: Weniger ist immer mehr. Der Grund dafür ist, dass Wärmeleitpasten ihrem Namen nur zum Teil gerecht werden. Da wärmeleitende Pasten die Wärme schlecht, aber immer noch effektiver als Luft leiten, werden sie vor allem zur Verdrängung der Luft in Rautiefen eingesetzt.

Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen von Kühlkörpern und Wärmetauschern zu der des Peltier-Elements identisch ist.

Die Kontaktflächen sollten mindestens eine Oberflächengüte mit folgenden Werten aufweisen:

Parallelität	< 20 µm
Welligkeit	< 20 µm
Rauheit	< 20 µm

Dabei gilt jedoch: Je kleiner diese Messwerte, desto höher die Wärmeleitfähigkeit. Bei Werten von unter 0,010 mm kann ge-

gebenenfalls auf den Einsatz von Zwischenraum-füllenden Materialien verzichtet werden.

## 2.2.4. Berechnung der Klemmkraft

Für eine intakte Verbindung zwischen dem zu kühlenden Objekt, Peltier-Element und Kühlkörper ist eine Klemmschraubenverbindung mit gleichmäßiger Kräfteverteilung von allerhöchster Bedeutung. Werden Schrauben unterschiedlich stark angezogen, kann es zu mechanischen sowie im späteren Verlauf zu thermisch-bedingten Schäden der Peltier-Elemente führen.

Dabei sollte außerdem beachtet werden, dass die Schrauben, die für die Verbindung zum Einsatz kommen, thermisch zu isolieren sind, um zu verhindern, dass eine Kältebrücke zwischen der kalten und warmen Seite entsteht. Dafür können beispielsweise thermische Isolierscheiben verwendet werden. Außerdem spielt auch das Material eine entscheidende Rolle. Schrauben aus Edelstahl haben nicht nur eine gute Festigkeit, sie besitzen zudem einen niedrigen Wärmeleitwert von ca. 15 W/mK. Ebenso sollten Federn, die eine konstante Klemmkraft ermöglichen, genutzt werden.

Beim Anziehen der Schrauben ist darauf zu achten, die Schrauben gleichmäßig anzuziehen. Bei diesem Vorgang sollte folgendes Schema berücksichtigt werden:

- Befinden sich die Schrauben alle in einer Reihe, ist es am besten, in der Mitte zu beginnen und sich nach außen vorzuarbeiten.

- Handelt es sich um zwei Reihen, eignet sich der Weg von der Mitte über Kreuz nach außen.

Damit das Drehmoment der Schrauben nicht auf einmal mit voller Kraft auf die Verbindungen einwirkt, sollte jede Schraube in kleinen Schritten mehrmals in der richtigen Reihenfolge angezogen werden. Dieser Vorgang wird dann so oft wiederholt, bis bei jeder Verschraubung das richtige Drehmoment erreicht ist.

Dabei sollte die Klemmkraft auf das Peltier-Element zwischen 1,3 bis 1,5 N/mm<sup>2</sup> liegen. Je größer das Bauteil, desto höher die benötigte Anpresskraft. Beispielsweise wäre bei einem Peltier-Element mit der Größe 40 x 40 mm eine gesamte Andruckkraft von 2.100 bis 2.400 N notwendig.

Bevor das System dauerhaft in Betrieb genommen wird, ist es jedoch erforderlich, die Klemmkräfte mittels Drehmoments noch einmal zu überprüfen. Sollten die Werte abweichen, wird eine Korrektur fällig. Hier helfen Druckfedern, z. B. Spiralfedern oder Tellerfedern.

### **Fett- und staubfrei**



Selbstredend, aber wichtig zu erwähnen ist, dass alle Kontaktflächen vor dem Verbinden fachgerecht und ordentlich von eventuellen Rückständen befreit werden sollten.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass über die Verschraubung ein thermischer Schluss zwischen den beiden Seiten verursacht wird. Durch Minimierung der Schraubenanzahl, des Gewinde-

durchmessers und der Leitfähigkeit des verwendeten Schraubenmaterials sowie Maximierung der Schraubenlänge, kann dieser Effekt maximal klein gehalten werden. Durch Kleben der Komponenten wird dieser Thermo-Schluss verhindert. Wenn die Komponenten verklebt werden, so dürfen hier keine nennenswerten Zug- oder Scherkräfte auftreten, die das Peltierelement leicht zerstören können. In der Regel ist ein Verkleben als endgültige Montage nicht zulässig.

## **2.2.5. Betrieb und Steuerung**

Ein Peltier-Element muss stets mit Gleichstrom betrieben werden. Die Polarität steuert den Wärmefluss, hierbei gilt, dass die obere Seite des Moduls die kalte Seite ist, wenn die Anschlussleitungen zum Betrachter weisen und sich der rote Anschluss (+) rechts befindet. Die Spannung kann hierbei beliebig klein sein, wobei mit abnehmender Spannung die Leistung des Elements sinkt. Eine Spannungsumkehr kehrt ebenso den Wärmefluss innerhalb des Elements um. Werden mehrere Elemente in einer Anwendung genutzt, lassen sich diese wahlweise parallel oder seriell schalten. Parallel geschaltet bleibt die notwendige Spannung gleich, wobei die Stromstärken entsprechend der Anzahl der Elemente multipliziert werden. Bei der Reihenschaltung bleibt die notwendige Stromstärke gleich, jedoch wird ein der Anzahl der Elemente entsprechendes Vielfaches der Spannung benötigt. Wichtig hierbei ist jedoch, dass die Module einen möglichst gleichen inneren Widerstand haben. Bei der Parallelerschaltung sind die Kabelquerschnitte bei großen Strömen zu berücksichtigen.

Bei der Auslegung des Regelkreises sollte unbedingt die Regel-

strecke beachtet und analysiert werden. Thermische Systeme sind in der Regel träge, da sich Wärmekapazitäten erst ausgleichen und, verglichen mit einer Motorsteuerung, sehr langsam einschwingen. Eine große Distanz zwischen Peltier-Element und Ist-Wert-Sensor kann zu einer sehr großen Zeitkonstante führen, was ein langsames Einregelverhalten nach sich zieht. Der Ist-Wert-Sensor sollte für gute Regelergebnisse sehr nah am Peltier-Element sein.

## 2.2.6. Regelungsarten

Eine Regelung stellt, vereinfacht dargestellt, einen Vorgang dar, der einen vorbestimmten Zustand herstellt. Dabei werden Ist- und Sollwerte miteinander verglichen und auf Änderungen reagiert. Für verschiedene Anwendungsfälle existiert eine Reihe diverser Regelungsarten, zum Beispiel:

### **Zweipunkt-Regler**

Dieser stellt die einfachste Form einer Regelung dar. Weicht ein Wert vom eingestellten Soll ab, wird geschaltet, um gegenzusteuern.

### **Proportionalregler oder P-Regler**

Dieser Regler regelt sanfter als ein Zweipunkt-Regler, indem kurz vor Erreichen des Sollwerts ein fließender Übergang herabgeregelt wird.

### **PI-Regler**

Mit einem implementierten Integralteil wird hier sichergestellt, dass der Sollwert sicher erreicht werden kann. Ein PI-Regler än-

dert nicht nur proportional zur Regelabweichung die Steuergröße, sondern beobachtet diese über eine Zeitspanne  $x$ . Dadurch ist die Genauigkeit mit diesem Regelsystem höher.

### **PID-Regler**

Zusätzlich zur Regelabweichung beobachtet dieser Regler die Dynamik, mit der sich der Ist-Wert dem Sollwert nähert. Wenn bei gegebener Regelabweichung keine Temperaturänderung erkannt wird, erhöht der PID-Regler den Stellwert. Dieser Regler kann nicht nur auf vorhandene oder gar dauerhafte Regelabweichungen reagieren, sondern ebenso auf eine sich erst ankündigende.

### **Fuzzy-Logik**

Bei dieser Ansteuerung reagiert der Regler auf diverse Kenngrößen und Datenquellen. Die Regeldynamik ist hier ausschließlich von der Kompetenz des Programmierers abhängig.

## 2.2.7. PWM-Ansteuerung oder veränderliche Gleichspannung/Gleichstrom?

Die Regelung eines Peltiermoduls kann entweder über eine in ihrem Wert veränderte oder pulsierende Gleichspannung durch PWM (Pulsweitenmodulation), die in regelbaren Proportionen ein- und ausgeschaltet wird, erfolgen. Die Frequenz letzterer bewegt sich mehrheitlich im Kilohertz-Bereich. Energetisch betrachtet, ergibt sich daraus ein erheblicher Unterschied, welche der beiden Ansteuerungsformen genutzt wird.

In unserem Beispiel wird ein Peltier-Element mit einem Nenn-

strom von 6A und einer Nennspannung von 15V eingesetzt, um einen optimal isolierten Aluminiumquader herunterzukühlen. Die Ausführung erfolgt zweifach. Beide Regler werden auf die minimal erreichbare Temperatur von -45 Grad Celsius eingestellt.

**Regelung 1** gibt eine glatte 15V-Gleichspannung aus und der Aluminiumkörper erreicht nach einer bestimmten Zeit -45 Grad Celsius. Der Regler hält die Spannung fortlaufend auf 15V, um einen Temperaturanstieg zu verhindern.

**Regelung 2** gibt ein PWM-Signal von 100 Prozent ab, was bedeutet, dass die Gleichspannung nicht unterbrochen wird. Es liegen permanent 15 Volt Gleichspannung an, der Körper erreicht ebenfalls nach einer unbestimmten Zeit -45 Grad Celsius.

Weicht die gewünschte Temperatur von der minimal erreichbaren ab, ergibt sich ein klar erkennbarer Unterschied zwischen beiden Varianten. Wird nun die Solltemperatur auf -15 Grad Celsius eingestellt, müssen beide Peltier-Elemente eine Temperaturdifferenz von 35K leisten, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Auch hier erzielen beide nach einer unbestimmten Zeit die eingestellte Zieltemperatur - die Hälfte des Werts aus dem vorherigen Beispiel.

**Regelung 1** riegelt nun den Strom beziehungsweise die Spannung ab und stellt durchgehend etwa 7,5V Gleichspannung bei einer Stromstärke von 3A bereit.

**Regelung 2** drosselt seine PWM auf etwa 50 Prozent, wobei die Gleichspannung pulsierend ein- und ausgeschaltet wird, während Ein- und Ausschaltzeit gleich lange dauern. Dabei liegen

zur halben Dauer 15V am Peltier-Element an, welche einen Strom von 6A hervorrufen. Während der restlichen Dauer bezieht das Element keinen Strom. Daraus kann folgender Schluss gezogen werden:

Im ersten Fall werden Strom bzw. Spannung halbiert. Die Leistungsaufnahme beträgt hier:

$$7,5V \cdot 3A = 22,5W$$

Im zweiten Fall beträgt die Leistungsaufnahme:

$$50\% \cdot 15V \cdot 6A = 45W$$

Daraus lässt sich schließen, dass eine Peltieranwendung, die den Energieverbrauch minimieren soll, eine geglättete Gleichstromquelle als Stellgröße benötigt. Bei einer PWM-Ansteuerung wird mehr Energie benötigt, die ebenfalls in Form von Wärme abgeführt werden muss.

Folgende Punkte sollten bei der Nutzung von PWM-Reglern beachtet werden:

- Peltier-Elemente mit einer maximalen Nennspannung von 12V dürfen nicht mit einer 50 Prozent PWM-Größe angesteuert werden, deren Amplitude 24V beträgt. In der Zeit, in der die 24V durchgeschaltet werden, fließt doppelt so viel Strom wie maximal zulässig, einhergehend mit einem 4-Fachen an Energie. Diese Übersteuerung sorgt dafür, dass das Element nicht mehr kühlt, sondern sich aufheizt.

- Die Eingangsspannung für einen PWM-Regler gilt dann als optimal, wenn der Regler bei maximaler Anforderung ein 100-Prozent-Signal abgibt. Bei einem  $\Delta T$  von maximal 20K kann, je nach abzuführender Wärmeenergie bereits eine Spannung von  $0,5 \cdot U_{\max}$  oder gar weniger ausreichend sein, wodurch der Energieverbrauch reduziert wird und die Anforderung an den nachgeschalteten Kühler sinkt.
- Eine PWM-Regelung erreicht die gleiche Tiefst- oder Höchsttemperatur wie die Regelung über eine glatte Gleichgröße. Soll die maximal mögliche Dynamik in der Regelung erreicht werden, ist der maximale Strom des Peltier-Elements zur Verfügung zu stellen.
- Bei einer PWM-Frequenz größer als 1kHz wird nicht mehr von Schaltzyklen gesprochen, da ab dieser Frequenz keine Schädigung mehr nachgewiesen werden kann. Zyklische Belastungen hingegen bewegen sich im Sekunden- bis Minutenbereich.
- Eine Zweipunktregelung wird üblicherweise bei trägen Systemen genutzt, in denen sich Temperaturen nur langsam ändern. Die Objekttemperatur schwankt hier im Sekunden- oder Minutentakt um wenige Kelvin.

Quick-Ohm Premium-Peltier-Elemente sind hoch zyklenfest. Im beschriebenen Fall ist eine Lebensdauer von vielen Millionen Zyklen zu erwarten.

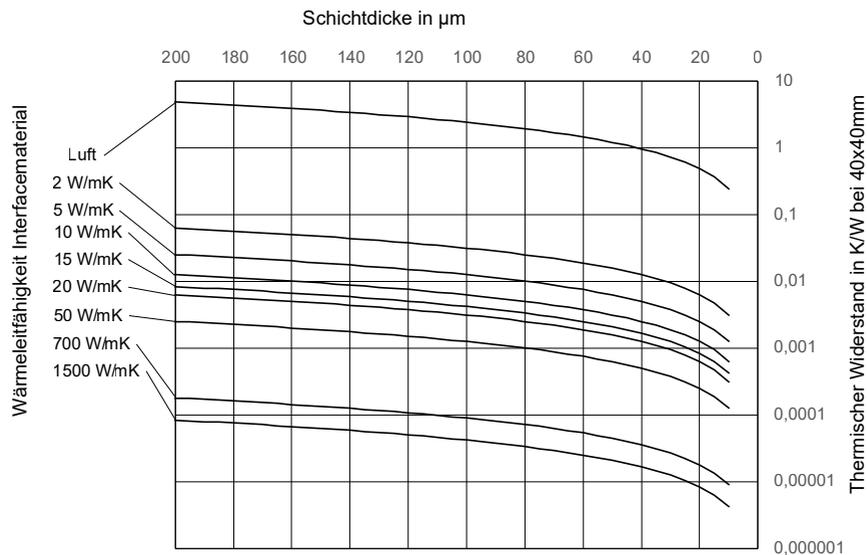
## 2.2.8. Systemintegration und Kühlkörper

Kühlkörper benötigen für die korrekte Funktion eine möglichst große Schnittstelle zum Kühlmedium, in der Regel Luft oder Wasser. Das richtige Modell kann durch die Festlegung einiger Parameter relativ einfach bestimmt werden. In den meisten Fällen wird eine Wärmeabfuhr an die Umgebung angestrebt, da das eine größere Unabhängigkeit ermöglicht. Für den Betrieb werden hierbei lediglich Spannungsversorgungen für Peltier und Lüfter benötigt.

$Q_h$	Maximale Leistung der warmen Seite des Moduls
$R_{th}$	Kennzahl des Kühlkörpers. Bei seriösen Anbietern in Abhängigkeit von Luftgeschwindigkeit und Leistung im Datenblatt angegeben.
$T_{Umg}$	Die Umgebungstemperatur, beziehungsweise deren Maximalwert ( $T_{Umg, \max}$ )

Der thermische Widerstand des Kühlkörpers in K/W gibt die Temperaturdifferenz zwischen dem heißesten Punkt des Kühlkörpers und der Umgebung an.

$$R_{th} = \frac{T_{hot} - T_{Umg}}{Q_h} \Leftrightarrow T_{hot} = R_{th} \cdot Q_h + T_{Umg}$$



Material	Wärmeleitfähigkeit	Dicke
Wärmeleitpaste	2-5 W/mK	30µm
Graphitfolie	7-1500 W/mK	10-300µm
Phase Change Material (PCM)	0,5 - 4 W/mK	70-700µm
PCM, druckbar	3 - 4 W/mK	40µm
Kleber	Ca. 7 W/mK	
Gap Pads	1-3 W/mK	0,3 5mm

Von der Temperatur  $T_{hot}$  zieht man das  $\Delta T$  des Peltiers ab und bekommt die Temperatur auf der kalten Seite des Peltiers. Es wird sofort klar, dass der Kühlkörper auf der Warmseite die bestmögliche Effizienz haben sollte, da jedes Grad über der Umgebungstemperatur die Kühlleistung schmälert. Als grober Anhaltspunkt sollte ein  $\Delta T$  von 10K am Kühlkörper auf der warmen Seite nicht überschritten werden.

## 2.2.9. Thermocycler-Anwendungen

Thermocycler sind Geräte, welche durch zyklischen Temperaturwechsel in der Polymerase-Kettenreaktion eingesetzt werden. Diese wird zum Beispiel dafür genutzt, um Krankheitserreger nachzuweisen. Die Geräte bauen auf einem relativ einfachen Prinzip auf. Es sind spezielle, zyklenfeste Peltiermodule verbaut, welche die Proben auf festgelegte Temperaturen bringen und wieder abkühlen lassen. Die schnelle zeitliche Abfolge der Zyklen während der Sequenzierung verlangt den Modulen einiges ab. Die Lebensdauer eines Moduls kann durch eine optimale Konstruktion erhöht werden. Ein Großteil der Module auf dem Markt erfüllt diese Kriterien nicht. Quick-Cool hat hierfür jedoch zwei Modulkonfigurationen mit hoher und sehr hoher Zyklusfestigkeit im Angebot.



## 2.2.10. Quick Facts: Peltier-Elemente

1. Ohne äußere Einflüsse bewegt sich ein Wärmestrom immer vom warmen zum kalten Punkt eines Körpers.
2. Liegt Strom an einem Peltier-Element, wird dieser Prozess umgekehrt. Der Wärmestrom fließt hiermit von der kalten zur warmen Fläche. Die eingesetzte Energie ist jedoch nur für den Transport verantwortlich, eine direkte Wärmekompensation (Vernichtung) findet in keinem Fall statt.
3. Je kälter die warme Seite des Peltier-Elements gehalten wird, desto kälter kann auch die kalte Seite werden.
4. Um eine ausreichende Kühlleistung zu erreichen, muss die warme Seite eines Peltier-Elements gekühlt werden. Es ist notwendig, die hier entstehende Wärme in vollem Umfang abzuführen.
5. Die auf der warmen Seite entstehende Wärme entspricht nicht allein der abgeführten Energie, sondern beinhaltet ebenso die Wärme, welche beim Betrieb entsteht.
6. Wird bei gleichbleibender Wärmemenge die Temperaturdifferenz am Peltier-Element reduziert, sinkt die benötigte Leistung überproportional. Dadurch ist es situationsabhängig sinnvoll, mehrere Elemente beziehungsweise Kaskaden zu verwenden.

7. Wärmeübergänge zwischen den einzelnen Bauteilen beeinflussen den Wärmetransport maßgebend.
8. Unterdimensionierte Peltier-Elemente benötigen für den gleichen Wärmetransport erheblich mehr Energie als ausreichend dimensionierte Modelle. Ab einem bestimmten Temperaturunterschied wird im schlimmsten Fall keine Wärme mehr abtransportiert.
9. Die Umkehr der Polung kehrt ebenso den Wärmefluss am Peltier-Element um.
10. Die Qualität von Peltier-Elementen lässt sich anhand folgender Faktoren bestimmen:
  - Anzahl der erlaubten Temperaturzyklen
  - Lebensdauer
  - maximal zulässige Temperatur
  - möglichst geringe Fertigungstoleranzen
  - Oberflächenhomogenität

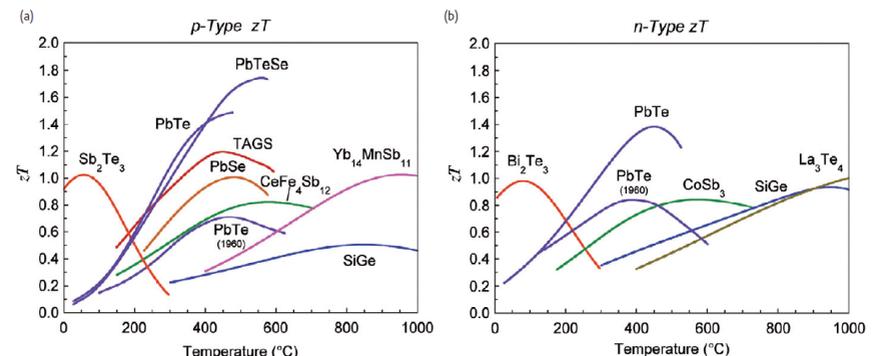
## 2.3. Thermoelektrische Generatoren (TEG)

Peltier-Elemente sind ebenso dafür geeignet, Wärmeenergie in elektrische Energie umzuformen, indem ein thermischer Wärmefluss durch das Element geleitet wird. Dieser entsteht durch einen Temperaturunterschied  $\Delta T$  und das grundsätzliche Bestreben nach thermischem Ausgleich innerhalb des Elements. Beim Kontakt zweier unterschiedlich temperierter Körper ver-

liert die wärmere Kontaktfläche an Temperatur, während die kältere an Temperatur zunimmt - bis beide Körper den gleichen Wärmegrad aufweisen. Namensgebend werden diese als Thermogeneratoren oder thermoelektrische Generatoren bezeichnet. Diese Generatoren haben, je nach Material, einen Wirkungsgrad von etwa ein bis fünf Prozent. Sie können vor allem dann eingesetzt werden, wenn aus Abwärme Strom erzeugt werden soll - u. a. zum Beispiel aus Abwärmeströmen von Müllverbrennungsanlagen (ohne dabei dem Rauchgas so viel Wärme zu entziehen, dass der Auftrieb im Abgasstrom ausbleibt) oder verschiedenen Industrie- und IT-Prozessen.

### 2.3.1. Physikalischer Effekt und Aufbau

In der Regel kommt bei Thermogeneratoren primär der Seebeck-Effekt zum Tragen. Dabei handelt es sich um einen thermoelektrischen Effekt, bei dem eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Metallen eine Spannung erzeugt. Das hat zur Folge, dass selbst ein Temperaturunterschied von weniger als 20K mehrere mW Leistung erzeugen kann. Der Seebeck-Effekt kann hier ebenfalls zur Wärmefluss- oder Temperaturdifferenzmessung genutzt werden.



Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen  
Chancen für NRW, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Jedes Peltierelement ist ein thermoelektrischer Generator. Diese generieren bei Erwärmung eine elektrische Spannung, wobei der Wärmefluss von der heißen zur kalten Seite immer noch stattfindet und von der Temperaturdifferenz angetrieben wird. Die dabei entstehende Energie kann direkt über die Stromanschlüsse abgegriffen werden. Bei diesem Vorgang muss jedoch permanent Wärmeenergie zugeführt werden, um die Temperaturdifferenz aufrechtzuerhalten.

Die Leistung des Wärmestromes berechnet sich aus:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

Q beschreibt die Leistung, welche aus der warmen Seite abwandert und in Richtung der kälteren Seite strömt. Für die Aufrechterhaltung des Vorgangs muss der Warmseite kontinuierlich Leistung zugeführt werden, um zu verhindern, dass die Temperatur absinkt. Ebenso muss die kalte Seite diese Wärmeenergie abgeben können, um sich nicht zu erhitzen. Ansonsten würde die Temperaturdifferenz und damit der Motor des Wärmestroms sowie die Energiegewinnung rasch versiegen.

### 2.3.2. Stromerzeugung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Allgemeinen beträgt der vom Generator benötigte Wärmestrom etwa 10W/cm<sup>2</sup>. Der maximale Wirkungsgrad ist gewährleistet, wenn der Lastwiderstand gleich dem Innenwiderstand des Moduls ist. Darüber hinaus hängt die erzeugte Spannung von der Temperatur und der Anzahl der Beinpaare ab. Die Ef-

fizienz kann durch die Verwendung von Materialien mit ausgezeichneten thermoelektrischen Eigenschaften zusätzlich gesteigert werden.

Bismut-Tellurid-Legierungen (bis zu 300 Grad Celsius) oder Bismut-Blei-Legierungen (bis zu 360 Grad Celsius) sind gute Beispiele. Für höhere Anforderungen eignet sich eine homogene Mischung aus Blei-Tellurid. Diese bleibt bis zu einer Temperatur von 500 Grad Celsius stabil.

Der Energiegewinnungsprozess ist allerdings nur dann praktikabel, wenn dem Element eine ausreichend dimensionierte Kühlung zur Verfügung steht. Diese kann, je nach Einsatzgebiet und Wärmefluss pro TEC die Größe eines Lexikons\* besitzen - bei rein mittels Konvektion arbeitender Kühlkörper. Bei forcierter Belüftung könnten diese zwar kleiner ausfallen, würden jedoch die generierte elektrische Energie bereits für den Lüfterbetrieb aufbrauchen.

Durchaus sinnvoller erscheint der Einsatz von TEC im Micro Energy Harvesting (MEH). Dabei ist es möglich, zum Beispiel batteriebetriebene Systeme durch eine unabhängige Stromversorgung zu ersetzen. So sind TEG durchaus in der Lage, genügend Energie zu generieren, um Sensorsysteme mit ausreichend Strom zu versorgen - das ist gerade in Zeiten des Internet of Things (IoT) von großer Bedeutung. Außerdem werden TEG verstärkt an Orten, an denen es schwierig ist, eine Netzanbindung herzustellen oder statt einem ansonsten aufwendigen Batteriewechsel eingesetzt.

#### Für den Einsatz eines TEC wird Folgendes benötigt:

- zwei Areale unterschiedlicher Temperaturniveaus

\* Ein Lexikon ist ein Buch, in dem die Menschen in grauer Vorzeit das kollektive Wissen niederschrieben, das heute von Handys unvermittelt vorgetragen wird. Ein Lexikon konnte Abmaße von 30 cm x 20 cm x 10 cm erreichen und über zwei Kilogramm Gewicht auf die Waage bringen.

- dauerhaft nachströmende Energie
- dauerhafter Energieabtransport

Des Weiteren ist es notwendig, bereits bei der Projektplanung obige Voraussetzungen zu bewerten und zu untersuchen:

- Wodurch entsteht die hohe Temperatur?
- Wie kann die Temperatur durch ein Peltier-Element geleitet werden?
- Wie kann die Energie abgeführt werden?
- Wie reagiert die Temperatur der Quelle, wenn dauerhaft ein Wärmestrom abfließt?
- Wie reagiert die Temperatur der Senke, wenn sie dauerhaft Energie aufnimmt?

Erst nach umfassender, abgeschlossener Analyse ist es möglich, über die Nutzung der Wärme zu entscheiden und den Aufbau eines thermoelektrischen Generators zu dimensionieren.

### 2.3.3. Quick Facts:

#### Thermoelektrische Generatoren

1. Thermogeneratoren erzeugen bei einer Temperaturdifferenz elektrischen Gleichstrom bei einem Wirkungsgrad von etwa 5 Prozent.
2. Nur ein Bruchteil der Wärme wird in Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad steigt mit dem Temperaturunterschied.

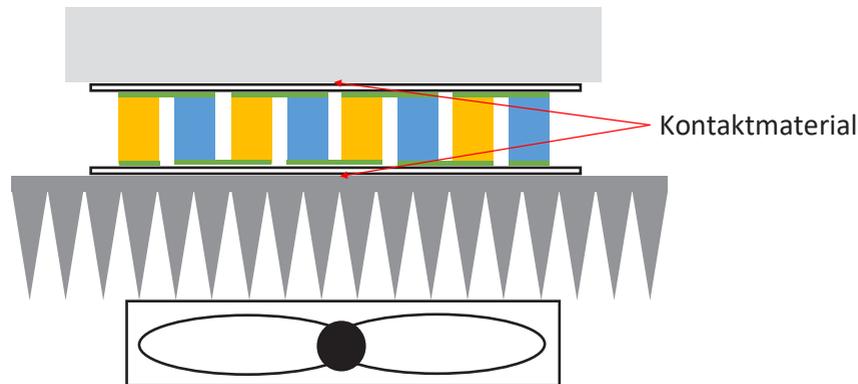
3. Strom wird nur bei einer vorhandenen Temperaturdifferenz generiert, nicht, wenn beide Seiten gleich warm sind.
4. Um die Funktion als Generator aufrecht zu erhalten, muss eine Seite ständig erwärmt, die andere kontinuierlich gekühlt werden.
5. Jedes Peltier-Element lässt sich als Thermogenerator nutzen. Die Qualität der Verarbeitung und des Materials ist jedoch ausschlaggebend für Wirkungsgrad und Lebensdauer.



6. Eine nahtlose Integration in die thermische Umgebung sorgt für eine optimale Energieausbeute.
7. Je größer der Temperaturunterschied ausfällt, desto höher sind Spannung und Stromstärke.
8. Der ohmsche Widerstand eines Generators bestimmt die maximal mögliche Spannung und Stromstärke am Ausgang.
9. Die Zahl der Thermopaare (Schenkel) vergrößert den Innenwiderstand des Generators und beeinflusst dadurch Spannung und Stromstärke.

10. Die ohmschen Widerstände des Generators und des Verbrauchers sollten annähernd gleich sein, da sonst Verluste auftreten können.
11. Die Integration eines Thermogenerators in ein bestehendes System beeinflusst den Zustand des Systems. Die Temperaturen werden beeinflusst und stellen sich verändert ein.
12. Es ist zu prüfen, ob der sekundäre Effekt der Generierung den ursprünglichen Effekt des Systems nicht derart stört, dass in Summe ein Nachteil zurückbleibt.

## 2.4. Interface-Material / TIM



Luft ist mit einer Wärmeleitfähigkeit von nur  $0,0263 \text{ W/mK}$  ein denkbar schlechter Wärmeleiter. Aus diesem Grund existiert eine Reihe an Materialien für den Übergang zwischen Wärmequelle und Kühlkörper. Dieses Kontaktmaterial in Form von Pasten, Klebern, Pads, Folien oder speziellen Phase-Change-Mate-

rialien weist einen sehr geringen thermischen Widerstand auf und wird direkt zwischen den Bauteilen aufgebracht. Je nach Oberflächengüte und zu erwartender Temperatur werden bestimmte Schichtstärken und Materialien vorausgesetzt.

### 2.4.1. Bedeutung im System

Die Leistungsfähigkeit eines Systems wird nicht allein durch die vorhandene Kühlleistung der Komponenten beeinflusst, sondern ebenso durch die Übergänge der einzelnen Bauteile zueinander. Thermal Interface Materials (TIM, Wärmeleitmaterialien) stellen sicher, dass Wärme effizient abgeführt und lokale Temperaturüberlastungen verhindert werden. Wärmeleitmaterialien füllen außerdem kleinste Zwischenräume oder Unebenheiten auf den Kontaktflächen, sodass die Möglichkeit der Wärmeübertragung zwischen jeder Komponente gegeben ist.

Wärmeleitpaste ist als relativ kostengünstige Lösung in Elektronik, Motorenbau und bei Heiz- und Kühlgeräten weit verbreitet. Sie weist eine Wärmeleitfähigkeit von 2 bis  $10 \text{ W/mK}$  auf. Für anspruchsvollere Zwecke ist es jedoch notwendig, auf thermisch leitfähigere Materialien und Techniken zu setzen, wie zum Beispiel Folien oder Kleber.

### 2.4.2. Arten und Eigenschaften

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, um beispielsweise Toleranzen, Unebenheiten oder Rauheiten auszugleichen und Kontaktflächen mit Interface-Materialien nahezu luftdicht miteinander zu verbinden. Dabei sind aber durchaus ein paar Fak-

toren zu beachten, denn kein Material eignet sich gleichermaßen als universelles Medium.

Im Großen und Ganzen kann zwischen drei Arten von TIMs unterschieden werden:

### Wärmeleitpasten

Wärmeleitpasten weisen meist eine keramische Basis auf, welche mit mikroskopisch kleinen Partikeln aus Aluminiumoxid, Bornitrid und Zinkoxid versetzt ist. Meist frei von Silikon und durch Zugabe mehrerer spezieller, synthetischer Öle wird eine Langzeitstabilität erreicht und überdurchschnittliche Performance garantiert.



Bei der Erwärmung in der Inbetriebnahme verringert sich die Viskosität des TIM. Dadurch werden kleinste Oberflächenrauheiten ausgefüllt und schädliche Luft einschüsse verdrängt. In den ersten 20-30 Betriebsstunden verfestigt sich die Paste und verhindert so durch Temperaturschwankungen bedingte Ausdehnungen. Mit einem Temperaturbereich von -40 bis 180 Grad Celsius ist Wärmeleitpaste für einen Großteil der Einsatzgebiete geeignet.

Anwendung findet Wärmeleitpaste überall dort, wo eine effiziente Wärmeübertragung zwischen zwei Objekten erreicht werden soll. Beispielsweise zwischen einem Mikrochip und einem Kühlkörper.

### Wärmeleitfolien / Spezialfolien

Gerade im Bereich der Leistungselektronik werden häufig höhere Anforderungen an die Wärmeableitung und auch Durchschlagsfestigkeit gestellt. Wärmeleitfolien gibt es in verschiedensten Ausführungen mit vielfältigsten Eigenschaften. Bestehend aus Materialzusammensetzungen auf der Basis von zum Beispiel Polyamid, Silikon oder Kohlenstofffasern ist für nahezu jeden Anwendungszweck etwas dabei.



Die wichtigsten Vertreter unter den Spezialfolien sind Graphit-Wärmeleitfolien. Sie können in einem breiten Temperaturbereich von -200 bis zu +600 Grad Celsius eingesetzt werden. Zusätzlich weisen sie hervorragende elektrisch sowie thermisch leitende Charakteristika auf. Mit einer Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser von 5-16 W/mK bzw. in Faser-Richtung zwischen 155-470 W/mk leiten sie die Wärme effizient und zielgerichtet ab. Jedoch benötigen sie eine gewisse Anpresskraft.

#### QUICK TIPP



Wärmeleitfolien gibt es sowohl ohne als auch mit Klebebeschichtung. Jedoch wirkt diese thermisch und elektrisch isolierend.

## Wärmeleitkleber

Wärmeleitende Klebstoffe basieren auf einer Kunstharzmasse, welche mit metallischen Füllstoffen wie Silber oder Graphit angereichert ist. Dadurch wird ein optimaler Wärmeleitwert erzielt und gleichzeitig eine Fixierung des Kühlkörpers gewährleistet. Um elektrische Leitfähigkeit durch das Wärmeleitmaterial zu verhindern, können statt metallischer Stoffe keramische oder mineralische Materialien beigemischt werden. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von 1 bis 4 W/mK können Maximaltemperaturen von bis zu 250 Grad Celsius aufgenommen und abgeleitet werden.

Der große Vorteil an Klebeverbindungen gegenüber Schweißen oder Löten liegt in der einfachen Möglichkeit, verschiedenste Materialien miteinander zu verbinden. Die Medien härten bei Raumtemperatur aus, sodass mechanische Verspannungen oder Verformungen in der Regel nicht auftreten.

Eingesetzt wird diese Art thermisch leitender Klebstoffe in den Bereichen der Mikro- und Leistungselektronik, Sensor- und Energietechnik sowie der Automobilbranche, um dauerhafte, mechanische und wärmeleitende Verbindungen zwischen einzelnen Komponenten zu schaffen.

Darüber hinaus gibt es noch Sonderformen der bereits erwähnten Materialien, aber auch andersartige Möglichkeiten, die nur zum Teil an die Hauptarten anlehnen, wie zum Beispiel:

## Phase-Change-Material (PCM) / PCM-Siebdruck

Für den Anwendungsfall, dass konventionelle Wärmeleitpaste nicht genutzt werden kann, würde möglicherweise das Auftragen von PCM in Frage kommen. Bei Raumtemperatur ist die-

ses Material trocken und formbar. Es besitzt die Eigenschaft, erst im eingebauten Zustand bei einem Druck von  $>20\text{N/cm}^2$  und circa 45 Grad Celsius die Phase zu ändern und flüssig zu werden. So füllt es Hohlräume und Spalten optimal aus und gewährt dadurch beste Wärmeübertragung. Der Einsatz von konventioneller Wärmeleitpaste (WLP) wird dadurch hinfällig.

Außerdem wird durch ein spezielles Siebdruckverfahren eine Massenproduktion von beschichteten Bauteilen ermöglicht. Dadurch wird das Phase-Change-Material (PCM) im Direktdruck auf die einzelnen Elemente aufgedruckt.

## Keramik- / Wärmeleitscheiben

Wärmeleitscheiben aus Keramik dienen aufgrund ihrer induktionsarmen Eigenschaft in erster Instanz als Isolator. Sie ermöglichen eine galvanische Trennung und bieten zugleich hervorragende Wärmeleiteigen-



schaften bei Korrosions- und Verschleißbeständigkeit. Zusätzlich ist Aluminiumoxid-Keramik bis zu 4.000 MPa druckfest und bis zu einer Einsatztemperatur von 1.000 bis 1.500 Grad Celsius stabil.

Isolierscheiben aus glasfaserverstärktem Silikon sind selbstklebend, schwer entflammbar und können ohne Wärmeleitpaste installiert werden. Sie bieten jedoch nur einen mittelmäßigen Wärmeleitwert. Da sie sich elastisch an die Oberfläche anpassen, können hier grobe Unebenheiten überbrückt werden.

Aufgrund der schwachen thermischen Leitfähigkeit und der fertigungsbedingten Mindestdicke ist diese Folie für große Leistungsdichten und somit für die Peltiertechnik nicht geeignet.

### Wärmeleitendes Epoxidharz

Die durch verschiedene Bauteile verursachten Unebenheiten auf einer Platine verhindern in vielen Fällen, dass ein ebener Kühlkörper angebracht werden kann. Wärmeleitendes Epoxidharz sorgt dafür, dass Wärme aus unterschiedlich hohen Wärmequellen einheitlich an Gehäuse oder Kühllösung weitergegeben wird. Sogenannte Vergussmasse besteht in der Regel aus konventionellem Epoxidharz mit Beimengungen aus wärmeleitenden Metallen, wie zum Beispiel Aluminium. Wichtig hierbei ist, dass die Elektronik vor der Anwendung ausreichend isoliert wird, etwa mit PU-Lack.

Durch den Metallanteil ist wärmeleitendes Epoxidharz elektrisch leitfähig. Dieser Tatsache kann jedoch mit einer Beimengung von keramischen oder anderen Zusatzstoffen entgegengewirkt werden. Während Epoxidharz-Vergussmassen weniger hitzebeständig sind, können silikonbasierende Produkte Temperaturen von mehr als 180 Grad Celsius ableiten. Die Wärmeleitfähigkeit dieses Stoffes hängt von der jeweiligen Zusammensetzung ab und schwankt zwischen 1 und 7,5 W/mK.

Unterschiedliche Materialien und Zusammensetzungen dieser Hauptgruppen sorgen dafür, dass sich für nahezu jeden Verwendungszweck eine optimale Lösung zur Überbrückung von wärmeabführenden Komponenten finden lässt. Diese Stoffe unterscheiden sich zum Beispiel in Schichtstärke, Wärmeleitfähigkeit oder elektrischer Isolation.

Welches Schnittstellenmaterial sich für welchen Einsatz eignet, hängt im Wesentlichen von folgenden Materialeigenschaften ab:

- Wärmeleitfähigkeit
- Widerstand (thermisch)
- Toleranzen der Kontaktpaare
- Temperaturempfindlichkeit
- Impedanz (thermisch)
- Umweltverträglichkeit

### Vor- und Nachteile

Elektronische Bauteile generieren je nach Anwendungsfall teilweise hohe Verlustleistungen, welche sich in Form von Wärme äußern. Diese muss abgeführt werden, wobei nicht jede Art der Wärmeübertragung für jedes Anwendungsfeld geeignet ist. Deshalb existiert eine Reihe unterschiedlicher Methoden, um zwei Bauteile sowohl mechanisch als auch thermisch miteinander zu verbinden und dort entstehende Wärme effizient nach außen abzuführen. Die TIM unterscheiden sich in Wärmeleitfähigkeit und Schichtstärke voneinander. Zudem sind manche Materialien nicht nur zuverlässiger oder in der Lage, Hohlräume auszufüllen, sondern lassen sich außerdem nachträglich verändern beziehungsweise verformen.

Folgende Tabelle soll einen Überblick über gängige Thermal Interface Materials geben und deren spezifische Eigenschaften erläutern.

	Dicke (µm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Ausfallsicherheit	nachträgliche Änderung möglich	Spaltfüllvermögen
Wärmeleitpasten		2 - 5	●	●	●
Carbon-/Graphitfolien	10 - 300	7 - 1500	●	●	●
Wärmeleitkleber		1 - 4	●	●	●
Phase-Change-Material (PCM)	70 - 700	0,5 - 4	●	●	●
PCM-Siebdruck	40	3 - 4	●	●	●
Gap Pads	300 - 5000	3 - 6	●	●	●
Keramik- / Wärmeleitscheiben	1500 - 2300	20 - 30	●	●	●
Wärmeleitendes Epoxidharz		1 - 7,5	●	●	●

### 2.4.3. Korrektur einer mangelhaften Kühlung

Nach dem Aufbau einer passiven Kühlung stellt sich oftmals heraus, dass diese nicht ausreichend dimensioniert ist. Hierfür gibt es zwei Lösungsansätze.

- Der Kühlkörper kann erweitert werden, sodass eine größere Fläche für die Konvektion zur Verfügung steht,

beziehungsweise im gleichen Zug mehr oder effizientere Lüfter montiert werden können.

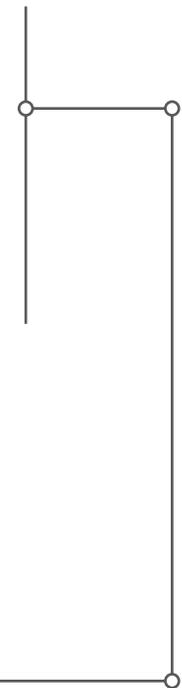
- Ein Peltier-Element kann eingesetzt werden. Diese komplizierte Variante kommt dann zum Tragen, wenn zum Beispiel eine Vergrößerung des Kühlkörpers aufgrund Platzmangels nicht infragekommt. Hier gilt es jedoch zu beachten, dass ein Peltier-Element wiederum Energie aufnehmen muss, um überhaupt in der Lage zu sein, den Peltiereffekt anzutreiben. Diese Energie wird dann dem bereits zuvor überlasteten Kühlkörper zugeführt, der sich wiederum weiter aufheizt. Der Temperaturhub wird weiter vergrößert. Deshalb stößt dieser Lösungsansatz schnell an seine Grenzen. In der Praxis bedeutet dies, dass in diesem Arbeitspunkt das Verhältnis aus abgeführter Energie zur Betriebsenergie größer als 1 sein muss. Diese Möglichkeit vermag deshalb nur wenige Kelvin zu korrigieren.

#### QUICK TIPP



Ist ein Kühlkörper zu schwach ausgelegt, so ist es in der Regel nicht möglich, diesen Designfehler mit Peltier-Elementen zu korrigieren.

Lösungen und  
Dienstleistungen  
von Quick-Cool



3

# 3. Lösungen und Dienstleistungen von Quick-Cool

**Sie kennen das Hitzeproblem. Wir kennen die Lösung!** Wir verstehen uns als anwendungsorientiertes Unternehmen und haben uns zum Ziel gesetzt, Thermomanagement-Lösungen zeitnah auszuarbeiten und projektspezifische Lösungen von der Problemstellung bis zur Serienfertigung zu realisieren.

## 3.1. Engineering

Zu Beginn eines Projekts müssen die thermische Problemstellung und damit verbundene Randbedingungen abgesteckt und als Ausgangspunkt für die gesamte Entwicklung herangezogen werden. Stehen die zu erwartenden thermischen Lasten und Temperaturen fest, kann die passende Kühllösung gewählt werden.

### 3.1.1. Simulation / Computational Fluid Dynamics (CFD)

Ein dreidimensionaler Modellaufbau ermöglicht, im Zuge der CFD-Simulation (*Computational Fluid Dynamics*, zu dt. numerische Strömungsmechanik) komplexe Wärmeströmungen zu visualisieren und die Bauteile daraufhin zu optimieren. Mithilfe von Navier-Stokes-Gleichungen und einer Vielzahl verschiede-

ner Parameter kann eine detaillierte Darstellung in der virtuellen Umgebung erfolgen.

Erkenntnisse aus diesen Visualisierungen fließen nicht nur direkt in die Produktentwicklung mit ein, sie reduzieren auch die benötigte Zeit auf ein Minimum. Außerdem wird ein detaillierter Einblick in die Funktion der einzelnen Komponenten möglich. Dadurch kann bereits im Vorfeld eventuell auftretenden Problemen und Schäden entgegengewirkt werden. Tests an und mit Prototypen entfallen hier sogar beinahe vollständig.

Mit unserer Expertise und der parallel zur Simulation verlaufenden mathematischen Charakterisierung aller Bauteile kann eine genaue Validierung der einzelnen Komponenten erfolgen. Dadurch können Projekte nicht nur in kurzer Zeit realisiert werden, sondern arbeiten mit ihrer Spezifikation stets am Rande des physikalisch Machbaren.

## 3.2. Forschung & Entwicklung

Wir von Quick-Cool legen großen Wert darauf, kontinuierlich am Puls der Zeit zu bleiben und neuen Trends aus der Forschung zu folgen. Durch unsere Beteiligung an diversen Forschungsprojekten, wie zum Beispiel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie oder der Europäischen Union, sind wir in der Lage, neue Trends zeitnah aufzugreifen und auf dem Markt zu etablieren. Zudem teilen wir unser Wissen mit Partnern wie Forschungs- und Hochschulinstituten in insgesamt 9 Anwendungsbereichen.

## Ein Überblick über vergangene und aktuelle Projekte

Projekt	Förderkennzeichen	Dauer
Entwicklung von Peltierelementen mit erhöhter Leistungsdichte	RUS09/B25	01.09.2009 – 31.08.2010
ThermoSpritz - Thermisches Spritzen zur industriellen Herstellung von TEG-Modulen	03X3554E	01.04.2011 – 31.03.2014
NanoCaTe - Nano-Carbons for versatile power supply modules ( <a href="http://www.nanocate.eu">www.nanocate.eu</a> )	European Commission Grant Agreement N°604647	01.10.2013 – 30.09.2017
HeaTEG - Entwicklung und Erprobung eines Heatpipe gekühlten thermoelektrischen Systems zur Nutzung industrieller Abwärme	312-9.06-129670	01.10.2016 – 31.10.2017
ZIM KMU-Projekt - Temperatur- und Feuchteregelung sowie Entkeimung eines Humidors mit UVC-Licht	ZF 4784301J09	01.12.2019 – 30.11.2021
Research Fund for Coal and Steel (RFCS): Development of innovative TEG systems optimized for energy harvesting from EAF off-gas cooling water and radiative waste heat sources designed to be cost-effectively integrated within steel plants "InTEGrated"	899248	01.07.2020 – 31.12.2023

## 3.3. Fertigung

Unsere langjährige Erfahrung im Bereich des Thermomanagements sowie unsere Forschungs- und Entwicklungstätigkeit ermöglichen uns, kritische Projekte zeitnah und kompetent zu realisieren. Wir haben die Möglichkeit, von der Einzellösung bis hin zu vierstelligen oder noch größeren Stückzahlen zeit- und kosteneffizient sowie kundenspezifisch zu produzieren. Viele Standardteile führen wir ab Lager, sodass verschiedenste Thermomanagementsysteme just-in-time zu realisieren sind.

## 3.3.1. Umfassende Beratung und Abstimmung

Da wir ausschließlich kundenspezifische Lösungen entwickeln, stehen wir mit einer Vielzahl an Branchen und Industriezweigen im direkten Kontakt. Dank dieses Erfahrungsschatzes sind wir in der Lage, viele Problemketten möglichst schnell zu erkennen und dementsprechend aufzulösen.

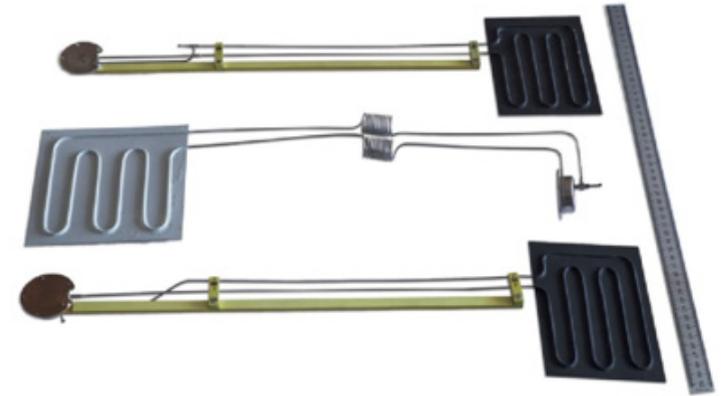
Dabei betrachten wir jeden individuellen Fall aus verschiedenen Blickwinkeln und auf anderen Ebenen, sodass wir unseren Kunden die bestmögliche Lösung unterbreiten können.

## 3.3.2. Vom Rohstoff zum Produkt

Der Weg vom Rohmaterial zum Endprodukt ist weit. Wir haben jedoch die Möglichkeit, jeden einzelnen Produktionsschritt von der Materialherstellung bis zur Verpackung zu überwachen und zu steuern. Wir können sowohl kundenspezifische Peltier-Elemente auslegen und fertigen, so wie auch Kühlkörper in allen erdenklichen Formaten, Materialien und Fertigungsverfahren. Hierfür nutzen wir unser globales, stetig wachsendes Netzwerk aus Spezialunternehmen in den jeweiligen Bereichen.

### 3.3.3. Fertigung von Prototypen

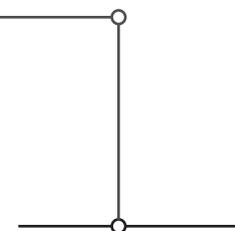
Bevor ein individuelles Bauteil die Serienproduktionsreife erreicht, ist es uns durch experimentelle Validierung sowie unter Berücksichtigung des Optimierungspotenzials möglich, zeitnah Prototypen oder Funktionsmodelle zur Verfügung stellen. Neben diesen sogenannten „Black Boxes“ können wir unseren Kunden auch während der Entwicklung beratend zur Seite stehen oder Auftragsentwicklungen durchführen.



### 3.3.4. Serienproduktion

Als mittelständisches, flexibles Unternehmen können wir unseren Kunden die optimale Lösung schnell und ohne zeitaufwendige Umwege bereitstellen. Unsere Produkte setzen eine hohe Fertigungstiefe voraus, weshalb wir auf ein Netzwerk aus hochspezialisierten Partnern zurückgreifen können. Dadurch lassen sich nicht nur Einzellösungen, sondern Serienfertigungen kompetent umsetzen.





Glossar

4

## 4. Glossar / Sachregister

### Dichte

Die Dichte bzw. Massendichte gehört zu den kennzeichnenden Eigenschaften eines Werkstoffs. Sie wird durch das Verhältnis zwischen der Masse eines Körpers und dessen Volumen definiert.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

### Dotierung, n-,p-

Unter Dotierung versteht man den Einbau von Fremdatomen in ein Atomgitter von Halbleitern. Auf diese Weise ist es möglich, die elektrische Leitung in Halbleitern zu beeinflussen, die sowohl auf der Leitung von Elektronen als auch auf der Leitung von Löchern beruht.

### Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Stoffes unter Einwirkung von Druckkräften. Wird dieser Wert überschritten, führt dies zu einer Deformation oder nachhaltigen Beschädigung des Bauteils.

### Enthalpie

Ganz allgemein ist die Enthalpie eine Zustandsgröße der Ther-

modynamik. Sie beschreibt die abgegebene bzw. aufgenommene Energie eines thermodynamischen Systems. Kennzeichnend für die Enthalpie ist der Buchstabe **H** (abgeleitet von heat content, zu dt. Wärmeinhalt). Gemessen wird die Enthalpie in Kilojoule (kJ).

$$H = H_{\text{Endzustand}} - H_{\text{Anfangszustand}}$$

### Fluidmechanik / Strömungsmechanik / Strömungslehre

Bei der Fluidmechanik handelt es sich um die Lehre des physikalischen Verhaltens gasförmiger und flüssiger Stoffe. Teilgebiete dieses Feldes sind unter anderem die Fluidodynamik, die Strömungsmesstechnik oder Ähnlichkeitstheorien. Gewonnene Kenntnisse der Strömungsmechanik können als Gesetzmäßigkeiten betrachtet und zur Lösung von Strömungsproblemen herangezogen werden. Dadurch lassen sich durch- beziehungsweise umströmte Bauteile optimal auslegen und überwachen.

### Gütezah

Die Gütezahl ist vergleichbar mit dem Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Die Gütezahl kann entgegen des Wirkungsgrades bei Kältemaschinen  $>1$  sein.

### Hysterese

Die Hysterese ist der Bereich um einen Schwellwert, der für eine sichere Erfassung unter- bzw. überschritten wird. Eine ein-

fache Regelung schaltet bei Überschreiten eines bestimmten Temperaturwertes die Kühlung zu und bei Unterschreiten wieder ab. Ohne eine Hysterese würde das Zu- und Abschalten in einer rasanten Geschwindigkeit erfolgen und die betroffenen Bauteile stark beanspruchen. Die Hysterese bewirkt, dass die Einschaltsschwelle einen von der Abschaltsschwelle abweichenden Wert annimmt. Das System wird träger. Die Zieltemperatur schwankt folglich zunehmend mit einer Hysteresezunahme.

### **Klemmkraft**

Jedes Peltier-Element benötigt für den korrekten Halt eine ganz bestimmte Klemmkraft. Diese reduziert gleichzeitig den thermischen Widerstand und sorgt für einen reibungslosen Betrieb des Bauteils. In der Regel liegt dieser Wert zwischen 150 und 200 N/cm<sup>2</sup>. Um zu verhindern, dass durch thermische Verformung einzelner Bauteile ein unzulässig hoher Anpressdruck entsteht oder auch die Kontaktierung verloren geht, ist eine Verspannung grundsätzlich federnd auszuführen. Eine einfache Lösung bieten etwa Tellerfedern, die anstatt Unterlegscheiben verwendet werden. Die Klemmkraft kann grob über das Drehmoment eingestellt werden. Da Materialeigenschaften sowie die Geometrien des Schraubenaufbaus und auch Fette oder Korrosion den resultierenden Druck erheblich beeinflussen, ist eine Anpresskraftermittlung über Federweg und Federkonstante der deutlich sicherere Weg.

### **Kondensator**

Der Kondensator oder Verflüssiger bezeichnet eine Apparatur,

welche gasförmige Stoffe wieder in deren flüssigen Zustand überführt, indem Wärme an Luft oder ein weiteres Kühlmittel abgegeben wird. Innerhalb eines Kreislaufs kühlt hier das gasförmige Arbeitsmedium auf Verflüssigungstemperatur ab und bewegt sich wieder Richtung Verdampfer.

### **Konstante, physikalisch**

Eine physikalische bzw. natürliche Konstante ist eine physikalische Größe, die sich weder in Bezug auf Zeit und Raum noch durch andere Gegebenheiten verändern lässt.

### **Konvektion**

Konvektion (abgeleitet lat. "convehere", zu dt.: mischen, sammeln) bzw. auch Wärmeströmung ist eine Methode zur Übertragung energetischer Wärme - von einem Punkt zum anderen. Im Gegensatz zur Wärmeleitung ist bei der konvektiven Wärmeübertragung nicht ein physikalisches Medium zum Transport der Energie erforderlich, sondern es muss außerdem in der Lage sein, zu fließen - wie zum Beispiel Wasser oder Luft.

### **Leistungszahl**

Die Merit-Zahl (Me, Einheit W/m<sup>2</sup>) bestimmt die Fähigkeit eines Arbeitsmediums, Wärme zu übertragen. Sie ist sowohl von thermodynamischen als auch strömungstechnischen Eigenschaften des Mediums abhängig. Sind die erreichten Temperaturen in einem System bekannt, kann anhand dieser die Me-

rit-Zahl für mehrere mögliche Wärmeträger berechnet und als Entscheidungshilfe herangezogen werden.

### Ohmscher Widerstand

Ohmsche Widerstände „R“ verhindern in elektrischen Leitern, dass der Strom „I“ frei fließen kann. Bedingt durch den ohmschen Widerstand erreicht die Versorgungsspannung „U“ den Verbraucher niemals in voller Höhe. Strom, Spannung und Widerstand in einer elektrischen Schaltung sind über das ohmsche Gesetz miteinander verknüpft. Fließt in diesem Spezialfall Strom, wird elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt. Als Eselsbrücke dient der Ausdruck „URI“:

$$U = R \cdot I$$

### RoHS-Konform

RoHS steht im Englischen für *Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment* - zu dt.: Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Bezeichnet werden dadurch drei EU-Richtlinien, durch welche garantiert werden soll, gesundheits- und umweltschädliche Stoffe zu regulieren. Auf diesem Weg soll die Verwendung von Schwermetallen (Pb, Cd, Hg, Sechswertigem Chrom), Brom-Verbindungen (PBB, PBDE) sowie bedenklichen Weichmachern (DEHP, BBP, DBP, DIBP) auf ein Minimum reduziert werden.

### Schenkelpaar / Thermopaar

Das Schenkel- oder Thermopaar bei einem Peltier-Element besteht aus einem n- und p-dotierten Quader, welche bei Anliegen eines elektrischen Stroms Wärme in eine Richtung transportieren. Peltier-Elemente bestehen aus einer x-y-Anordnung einzelner Thermopaare, deren Anzahl zwischen einigen wenigen bis zu einigen hundertern reichen kann.

### Schmelzpunkt

Der Schmelzpunkt eines Stoffes gibt an, welche Temperatur benötigt wird, bei der das Material von einem festen in einen flüssigen Aggregatzustand übergeht.

### Temperaturdifferenz

Die Temperaturdifferenz bezeichnet den Unterschied der Temperatur an zwei verschiedenen Messpunkten. In der Regel erfolgt die Angabe in der SI-Einheit Kelvin.

### Thermischer Widerstand

Der thermische Widerstand  $R_{th}$  bewirkt, dass sich ein Wärmefluss  $\dot{Q}$  nicht ungehindert über eine Strecke fortbewegen kann. Fließt ein Wärmestrom über eine Strecke mit einem gewissen thermischen Widerstand, so entsteht zwischen Wärmeeintritt und Wärmeaustritt ein Temperaturunterschied  $\Delta T$ .

$$\Delta T = R_{th} \cdot \dot{Q}$$

## Thermodynamik

Die Thermodynamik oder auch Wärmelehre genannt, ist ein Teilgebiet der Physik. Sie befasst sich mit thermischen Gegebenheiten auf naturwissenschaftlicher Ebene. Das bedeutet mit allen Prozessen, die durch Temperatur und Temperaturänderungen beeinflusst werden. Dabei spielt die Wärmeenergie eine tragende Rolle. Das ist auch der Grund, weshalb der Terminus Thermodynamik synonym zur Wärmelehre herangezogen wird.

## Thermomanagement

Eine allgemeingültige Definition des Begriffs Thermomanagement existiert nicht. Würde dieser Terminus allerdings auf die Gesetze der Thermodynamik widergespiegelt, wird darunter ganz allgemein das Steuern vorhandener Energie- und insbesondere Wärmeströme verstanden. Thermomanagement beschäftigt sich in erster Linie mit der gezielten Ableitung von Wärme, um durch konstruktive Maßnahmen die Lebensdauer von Komponenten zu erhöhen oder deren einwandfreie Funktion sicherzustellen.

## Verdampfer

Am Verdampfer wird Wärme von der zu kühlenden Oberfläche aufgenommen. Das darin enthaltene Arbeitsmedium erwärmt sich und wechselt je nach Typ und Temperatur in den gasförmigen Zustand. Der durch die Temperaturdifferenz entstehende Druckunterschied sorgt dafür, dass sich das Medium in Richtung Kondensator bewegt.

## Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Dabei gilt: Je höher die Viskosität eines Stoffes, desto weniger fließfähig ist das Gas bzw. die Flüssigkeit und je niedriger, desto fließfähiger.

## Volumenstrom

Der Volumenstrom (**Q** oder  $\dot{V}$ ), auch Durchflussrate genannt, ist eine physikalische Größe aus der Fluidmechanik. Sie gibt an, wie viel Volumen V eines Mediums, unabhängig des Aggregatzustandes, sich in einer definierten Zeitspanne t durch einen Querschnitt bewegt.

## Wärmedurchgangskoeffizient / k-Wert

Der Wärmedurchgangskoeffizient beschreibt die thermische Leitfähigkeit bezogen auf eine Fläche. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird in W/m<sup>2</sup>K angegeben. Der k-Wert beschreibt, wie gut eine Fläche in der Lage ist, einen Wärmestrom abzuleiten. Der k-Wert wird beispielsweise dafür verwendet, die Güte einer Wärmeleitfolie anzugeben. Je größer der k-Wert der Folie, desto besser ist die Folie als Gap Filler geeignet. Über den k-Wert wird der resultierende thermische Widerstand  $R_{th}$  beziehungsweise der thermische Leitwert  $G_{th}$  bestimmt. Aus einer Fläche mit der Größe A und einem Wärmedurchgangskoeffizienten k ergibt sich der thermische Leitwert

$$G_{th} = k \cdot A \text{ mit } G_{th} = \frac{1}{R_{th}}$$

## Wärmefluss

Der Wärmefluss oder Wärmestrom  $\dot{Q}$  beschreibt als physikalische Größe mit der SI-Einheit  $\text{kgm}^2\text{s}^{-3}$  die in einer bestimmten Zeit übertragene Wärmeenergie. In einem elektrischen Bauteil beispielsweise wird, bedingt durch den elektrischen Widerstand und dem zugeführten Strom, Wärme erzeugt.

Soll diese Wärme über einen Kühlkörper abgeführt werden, so muss dieser Kühlkörper einen Wärmefluss von

$$\dot{Q} = R \cdot I^2 \text{ abführen.}$$

## Wärmekapazität, spezifisch

Bei der spezifischen Wärmekapazität (Formelzeichen  $c$ ) handelt es sich um eine physikalische Materialkonstante. Sie gibt an, wieviel Energie benötigt wird, um 1 kg dieses Stoffes um 1 Kelvin zu erwärmen.

$$c = \frac{\Delta E_i}{m \cdot \Delta \vartheta} \quad [c] = \frac{J}{\text{kg} \cdot K}$$

## Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  ist eine Proportionalkonstante, der die Intensität der Wärmeübertragung an einer Kontaktfläche beziehungsweise zwischen zwei Materialien bestimmt. Je höher dieser Wert ausfällt, desto größer ist auch die Wärmeübertragung. Zudem ist die Konstante abhängig von

der Strömungsgeschwindigkeit (in Fluiden), der Oberflächenbeschaffenheit sowie den geometrischen Verhältnissen.

## Wärmeübertragung

Es gibt drei Arten der Wärmeübertragung: Thermische Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Sie definiert den Transport thermischer Energie in Form von Wärme über mindestens eine thermodynamische Grenze hinweg.

## Welligkeit

Klassifiziert wird die Welligkeit zu den möglichen Formabweichungen eines Bauteils. Kennzeichnend dafür ist eine periodische, in Intervallen auftretende Abweichung des Ist-/Sollzustandes der Oberfläche eines Körpers.

## Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad  $\eta$  gibt an, welcher Anteil der zugeführten Energie in eine nutzbare Energieform umgewandelt werden kann. Ein Motor beispielsweise formt elektrische Energie in mechanische Energie um. Der Wert der mechanischen Energie wird gegenüber der zugeführten elektrischen Energie geschmälert. Ursache hierfür sind beispielsweise der ohmsche Widerstand und auch Reibung, die die zugeführte Energie in Wärmeenergie umwandeln. Der Wirkungsgrad ist demnach immer kleiner als 1 bzw. 100 Prozent.

## Impressum

Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH

Cronenfelder Str. 75  
42349 Wuppertal  
Deutschland

[kontakt@quick-ohm.de](mailto:kontakt@quick-ohm.de)  
[www.quick-cool.de](http://www.quick-cool.de)

1. Auflage

© 2021 Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH

