

Heatpipe oder Wärmerohr

Ein Wärmerohr ist ein Wärmeübertrager, der mit einer minimalen Temperaturdifferenz eine beträchtliche Wärmemenge über eine gewisse Distanz transportieren kann. Dabei nutzt die Heatpipe die Verdampfungsenthalpie und die Kondensationsenthalpie eines Arbeitsmediums aus, um hohe Wärmeströme zu bewegen.

Die Heatpipe besteht aus drei Komponenten:

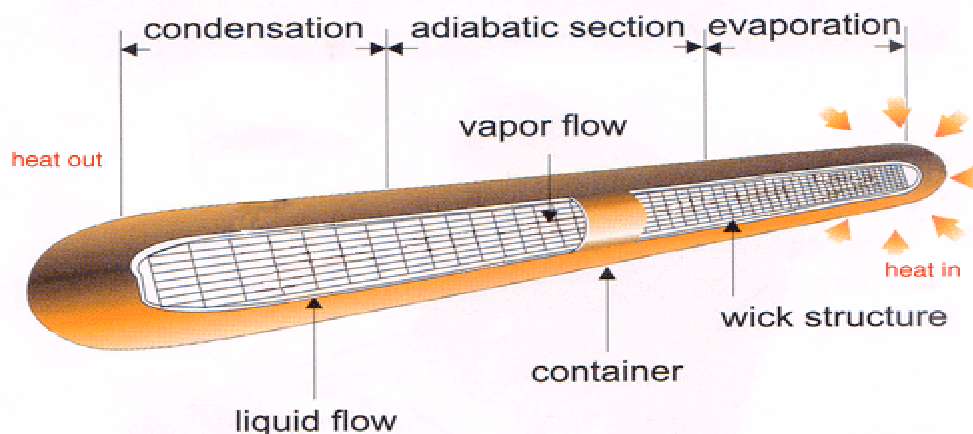
1. Hülle
2. Arbeitsmedium
3. Kapillarstruktur

Die Hülle besteht aus einem dünnwandigen möglichst gut wärmeleitenden Material. Dies ist vorzugsweise Kupfer, es kann aber auch Aluminium, Edelstahl, Keramik oder sogar Glas sein.

Der Wärmewiderstand einer Heatpipe ist wesentlich kleiner als eines Festkörpers gleicher Abmessung.

Wenn man z. B. über einen massiven Kupferstab mit 8 mm Durchmesser über eine Länge von 300 mm eine Wärmemenge von 100 Watt übertragen, würde man ein treibendes Temperaturgefälle von theoretisch 1493 °C benötigen, ein utopischer Wert der jenseits der Schmelztemperatur von Kupfer liegt. Eine Heatpipe schafft den gleichen Wärmedurchsatz mit einem treibenden Temperaturgefälle von ca. 0,5°C. Näheres hierzu ist unten aufgeführt.

Je größer die Strecke der Wärmeübertragung ist und umso kleiner der Querschnitt des Wärmeübertragers ist, umso größer fällt der Vorteil der Heatpipe aus.



In der Heatpipe ist ein Arbeitsmedium, vorzugsweise Wasser, welches bereits bei sehr niedrigen Temperaturen verdampft, da der Druck in der Heatpipe sehr klein ist (ca. 0,008 bar). Nimmt die Heatpipe durch Wärmeeintrag eine höhere Temperatur an, steigt der Druck entsprechend der Dampfdruckkurve. Wenn nun an einer anderen beliebigen Stelle der Heatpipe durch Wärmeabfuhr eine niedrigere Temperatur entsteht, führt dies an dieser Stelle zu einer sogenannten Taupunktunterschreitung mit sofortigem Kondensatanfall. Der Druck an dieser Stelle sinkt entsprechend der Temperatur ab. Der Dampf in der Heatpipe strömt, dem Druckgefälle folgend, zu der kälteren Stelle. Das Kondensat fließt durch Schwerkraft angetrieben und durch die Kapillarkräfte der Heatpipe zurück zum Ort des Verdampfens.

Da sich die dampfförmige Phase und die flüssige Phase des Arbeitsmediums im gleichen Raum geschlossenen Volumen befinden, ergibt sich ein Nassdampfgebiet. Das hat zur Folge, dass sich bei einer bestimmten Temperatur im Wärmerohr immer eine bestimmte dazugehörige Temperatur einstellt. Da die Druckunterschiede in Wärmerohren meist sehr gering sind (wenige Pascal), sind auch die Temperaturunterschiede sehr gering (wenige Kelvin), d. h. die sich einstellende Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator ist gering. Ein Wärmerohr besitzt daher einen sehr geringen Wärmewiderstand.

Der Bereich zwischen Verdampfer und Kondensator ist praktisch isotherm.

Da der Wärmetransport indirekt über den stoffgebundenen Transport von latenter Wärme (Verdampfungs-/Kondensationswärme) stattfindet, beschränkt sich der Einsatzbereich eines Wärmerohrs auf den Bereich zwischen der Schmelztemperatur und der Temperatur des kritischen Punktes Arbeitsfluids.

Bei entsprechender Wahl der Kapillarstruktur kann das Kondensat gegen die Schwerkraft von unten nach oben fließen.

Die Heatpipe kann deshalb diese Wärmemenge ohne jegliche Hilfsenergie übertragen. Sie benötigt keinen Antrieb für einen Lüfter oder eine Wasserpumpe. Treibende Kraft ist ausschließlich die Ausdehnung des Dampfes und die Kapillarkräfte der flüssigen Phase des Arbeitsmediums.

Hochtemperatur-Heatpipes werden bei der allothermen Biomassevergasung. Hierbei werden die Heatpipes genutzt, um die für den Vergasungsprozess notwendige Wärme in die Hackschnitzelschüttung einzubringen. Hier übertragen sie Wärme im Bereich von 850 °C nahezu ohne Verlust von Temperaturdifferenzen. Dabei werden Heatpipe mit Natrium als Arbeitsmedium eingesetzt.

Bei der Anwendung und der Weiterverarbeitung der Heatpipe ist zu beachten, dass es sich bei einer Heatpipe um ein geschlossenes System handelt. Der Wärmeeintrag ist also eine isochore Zustandsänderung, die zu einer unmittelbaren Druckänderung führt.

Beim Überschreiten des Druckes kann die Heatpipe explodieren. Dies kann etwa bei Temperaturen ab ca. 280°C eintreten.

Der Druck in der Heatpipe steigt etwa gemäß folgender Formel an: $P(t) \sim (t/100)^4$ wobei t die Temperatur in °C ist.

Die Übertragungsleistung einer Heatpipe ist durch physikalische Grenzen limitiert:

Viskositätsgrenze

Sie begrenzt die Wärmestromdichte bei Arbeitstemperaturen knapp über dem Schmelzpunkt. Durch die Viskositätskräfte im Dampf wird die Strömung stark beeinträchtigt.

Schallgeschwindigkeitsgrenze

Die Wärmestromdichte kann nur so weit gesteigert werden, bis der durch den Druckunterschied entstehende Dampfstrom die Schallgeschwindigkeit erreicht.

Wechselwirkungsgrenze

Bei hohen Wärmestromdichten wird Flüssigkeit durch den Dampf mitgerissen, und eine partielle Austrocknung der Kapillare führt zu einem Abriss der Flüssigkeitsströmung.

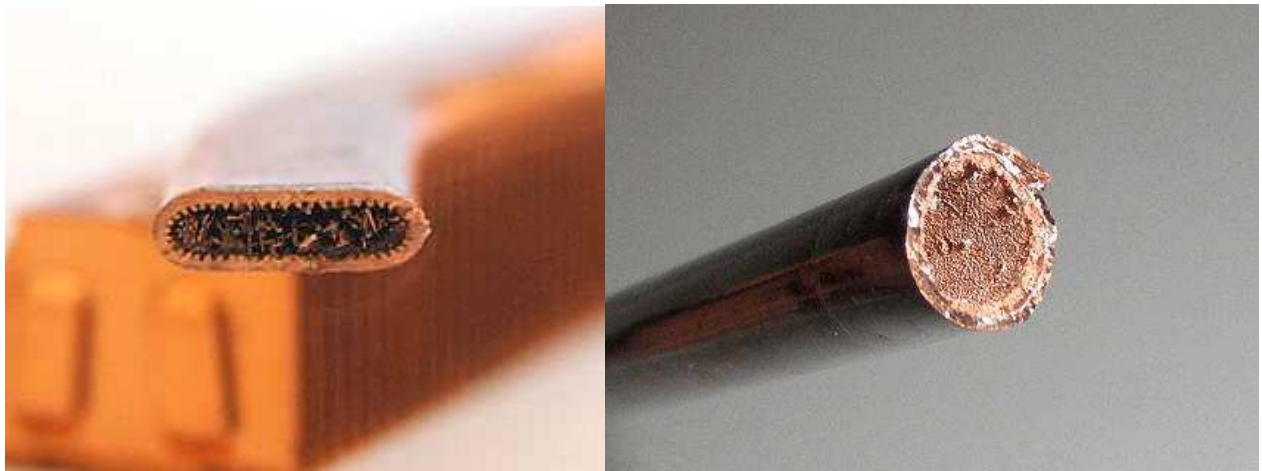
Kapillarkraftgrenze

Die Kapillarkraftgrenze wird erreicht, wenn die Strömungsverluste des flüssigen Wärmeträgers größer sind als der vorhandene Kapillardruck

Siedegrenze

Durch Blasensieden in der Kapillare wird der Flüssigkeitsstrom eingeschränkt bzw. er kommt dadurch zum Erliegen.

Kapillarstrukturen

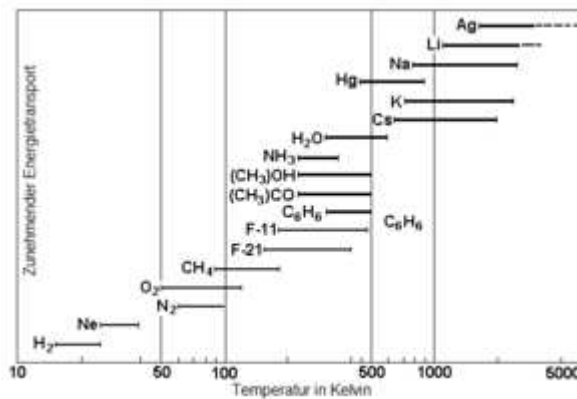


Die Kapillarwirkung wird links durch ein eingelegtes Kupferdraht-geflecht (Mesh) in Kombination mit Rillen (Grooves) erzeugt und rechts durch gesinterte Kupferkügelchen. Häufig sind in Heatpipes auch nur Mesh oder Groove Kapillare.

Innerhalb von Heatpipes wird die Flüssigkeit mit einer Kapillarstruktur zum Verdampfer zurückgeführt. Die kondensierte Phase des Arbeitsmediums fließt in der Kapillare zurück zum Verdampfer. Heatpipes arbeiten daher auch unter Schwerelosigkeit. Je feiner die Struktur ist, umso größer ist die Kapillarkraft.

Arbeitsmedien

Für verschiedene Temperaturbereiche kommen unterschiedliche Arbeitmedien in Betracht.



Verdampfungstemperaturen (druckabhängig) einiger Stoffe in Wärmerohren

Arbeitstemperatur (°C)	Arbeitsmedium	Hüllmaterial
- 200 bis 80	Flüssiger Stickstoff	Edelstahl
- 70 bis 60	Ammoniak	Aluminium, Edelstahl
- 45 bis 120	Methanol	Kupfer, Edelstahl
5 bis 300	Wasser	Kupfer
190 bis 550	Quecksilber	Edelstahl
400 bis 800	Kalium	Edelstahl
500 bis 900	Natrium	Edelstahl

Die Merit-Zahl gibt die Leistungsfähigkeit eines Wärmeträgers in einer Heatpipe an. Dabei soll die Oberflächenspannung und die Verdampfungsenthalpie möglichst groß und die Viskosität möglichst gering sein. Mit ihr lässt sich also der für den Arbeitspunkt optimale Wärmeträger ermitteln.

Für sehr niedrige Temperaturen kommen Medien zum Einsatz, die unter Raumbedingung gasförmig sind. Mit Gasen wie zum Beispiel Helium kann man den Temperaturbereich nahe dem absoluten Nullpunkt (0 K) bis hin zu etwa -20 °C abdecken. Darüber kommen typische Kältemittel R134a oder Ammoniak zur Verwendung. Ab 0 °C bietet sich Wasser als Wärmeträger an. Je nach möglicher Druckfestigkeit (Dampfdruck) des Wärmerohrs reicht Wasser bis in Temperaturbereiche von 300 °C aus. Ab dieser Temperatur spricht man auch von Hochtemperatur-Heatpipes. Alkalimetalle wie Natrium und Lithium sind hier nach der Merit-Zahl die besten Wärmeträger.

Effektivität von Heatpipes

Der wesentliche Vorteil der Heatpipe ist die Fähigkeit, Wärme mit einer vergleichsweise geringen Temperaturdifferenz zu übertragen. Bei dem Vergleich mit einem Festkörper wird dieser Unterschied deutlich. Die Heatpipe benötigt nur einen Bruchteil der Temperaturdifferenz als treibendes Temperaturgefälle. Diese Eigenschaft wird üblicherweise als Effektivität bezeichnet. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass eine Heatpipe im Falle einer Überbelastung zusammenbrechen kann und der Wärmewiderstand nahezu unendlich hoch ansteigen kann. Deshalb gilt die nachfolgende Betrachtung nur für den Fall, dass die Heatpipe im Rahmen ihrer Leistungsgrenzen betrieben wird.

Rechenbeispiel:

Es wird ein Stab aus massivem Kupfer mit einer Länge von 300 mm und 8 mm Durchmesser mit einer Heatpipe gleicher Geometrie verglichen. Dabei wird ein Wärmetransport von 100 Watt unterstellt.

Die Temperaturdifferenz ΔT , die sich in dem Kupferstab einstellt, ergibt sich nach der Formel

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

mit Q : transportierte Wärmemenge
und Rth: Wärmewiderstand

$$R_{th} = L / (F * \lambda)$$

mit L: Distanz, über die die Wärme übertragen wird
F: Querschnittsfläche des Bauteils, mit dem die Wärme übertragen wird
 λ : Wärmeleitwert des Materials

Die Länge beträgt 0,3 m, die Querschnittsfläche 50,8 mm² und der Wärmeleitwert des Kupfers 400 W/mK

Damit stellt sich rechnerisch eine Temperaturdifferenz an dem Kupferstab von 1.487 K ein.

Mit einer Heatpipe kann die gleiche Wärmemenge mit einer Temperaturdifferenz von ca. 1 K übertragen werden, woraus im Sinne der oben genannten Bezeichnung abgeleitet werden kann, dass die Heatpipe in diesem Beispiel 1.478 X effektiver als der Kupferstab arbeitet.

Je größer die Distanz der Wärmeübertragung ist und umso geringer die Querschnittsfläche der Wärme übertragenden Bauteiles ist, umso vorteilhafter ist die Heatpipe.