

Kühlbrutschränke und Klimaprüfschränke mit Peltier-Technologie



Zusammenfassung

Kälte ist per Definition keine eigene Energieform, sondern ein Ungleichgewichtszustand. Dem Ort, an dem Kälte erzeugt werden soll, muss Wärme entzogen werden. Die Wärme fließt also aus dem Energieüberschuss in der warmen Umgebung in Richtung Energiedefizit in den zu kühlenden Raum. Technologisch gesehen ist dieser Prozess wesentlich komplexer als die Wärmeerzeugung, die die Menschen seit vielen hundert Jahren beherrschen.

Die erste funktionierende Kältemaschine der Welt wurde 1845 von dem amerikanischen Arzt John Gorrie gebaut, um damit Krankenzimmer zu kühlen¹. Sie war aber ein finanzieller Misserfolg. In den 1870er Jahren machte sich Carl von Linde das Prinzip der Kältemaschine zu Nutze. Er entwickelte Kompressionskälteanlagen für Brauereien, um die Lagerung des Bieres zu revolutionieren und zu vereinfachen. Auch im Labor ist Kälte unersetzlich. Neben Kühlschränken, Kühlbrutschränken und Klimaprüfschränken, die wie zu Lindes Zeiten durch eine Kompressionskälteanlage gekühlt werden, hielten in den vergangenen Jahren Peltier-temperierte Geräte Einzug.

Sie versprechen vor allem einen reduzierten Energieverbrauch im konstanten Teillastbetrieb. Ein Entscheidungskriterium, das in Zeiten von Klimawandel, knappen Ressourcen und steigenden Energiekosten, immer wichtiger wird. In dieser Ausarbeitung ist dargestellt, wie sich die beiden Technologien unterscheiden, welche Vor- und Nachteile sie mit sich bringen und welches Kühlgerät für welche Laboranwendung überwiegend eingesetzt wird.

¹ Plank, Rudolf (Hrsg). Handbuch der Kältetechnik. Springer-Verlag, 1954

Physikalische Grundlagen

Thermoelektrische Effekte

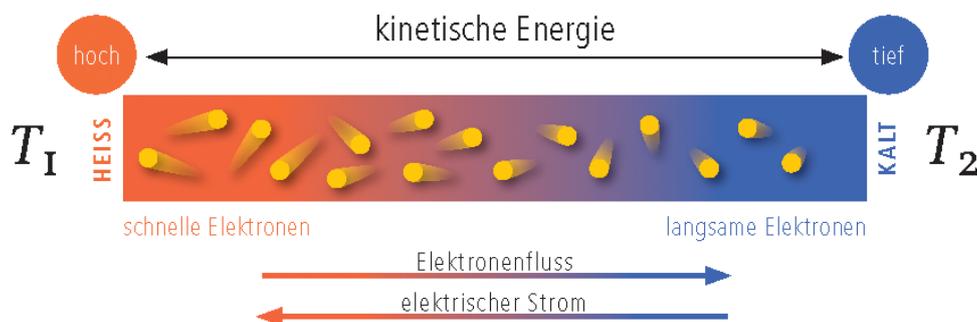
Die Thermoelektrik befasst sich mit der direkten Umwandlung von Wärme in elektrische Energie und umgekehrt. In modernen technischen Anwendungen werden Energiewandler wie thermoelektrische Elemente (TEC) zur Stromerzeugung und Peltier-Elemente zum Heizen und Kühlen verwendet. Der Seebeck-Effekt und der Peltier-Effekt beschreiben die zwei bedeutendsten thermoelektrischen Phänomene.

Der Seebeck-Effekt wurde 1821 erstmals durch den deutschen Physiker Thomas Johann Seebeck beobachtet. Sein Versuchsaufbau war quasi das erste bekannte Thermoelement – ein metallischer Leiter aus zwei unterschiedlich leitenden Materialien.²

In einem offenen Stromkreis wird ein Endpunkt eines Leiters aus zwei unterschiedlich leitenden Materialien erhitzt. Die ladungstragenden Elektronen auf der heißen Seite bewegen sich schneller und diffundieren zur kalten Seite (Thermodiffusion), auf der nun ein Elektronenüberschuss mit negativer Ladung entsteht. Allein aufgrund der spezifischen Materialeigenschaften erzeugt dieses Temperaturgefälle eine Thermospannung. Wird der Stromkreis geschlossen, fließt elektrischer Strom.

² Irrgang, Klaus. *Altes und Neues zu thermoelektrischen Effekten*. Springer-Verlag, 2020

Elektronenfluss in einem Leiter aufgrund eines Temperaturgradienten (Thermodiffusion)



Kehrt man den Seebeck-Effekt um und führt Energie von außen zu, wird aus dem Thermoelement ein Peltier-Element. Der Peltier-Effekt wurde 1834 durch den französischen Physiker Jean Peltier entdeckt.²

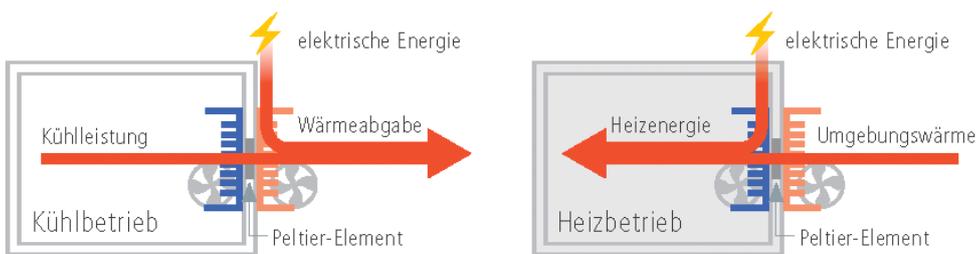
In einem elektrischen Stromkreis wird an den Kontaktstellen zweier unterschiedlich leitender Materialien ein Temperaturunterschied erzeugt: eine Seite wird kalt, die andere Seite wird warm.

² Irrgang, Klaus. *Altes und Neues zu thermoelektrischen Effekten*. Springer-Verlag, 2020

Seebeck und Peltier wirkten beide im 19. Jahrhundert. Kommerziell erfolgreiche, thermoelektrische Anwendungen entstanden aber erst mit der Entwicklung von Halbleitern, denn einfache metallische Leiter haben einen entscheidenden Nachteil: sie sind auch gute Wärmeleiter. Durch die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten entsteht ein unerwünschter Wärmerückstrom. Darüber hinaus steigt bei höheren Temperaturen der Ohm'sche Widerstand und ein Teil der eingebrachten Energie wird in Verlustwärme umgewandelt. Wärmerückstrom und Verlustwärme reduzieren beide die Kälteleistung. Daher liegen die erzielbaren Temperaturdifferenzen unter einem Kelvin. Halbleiter funktionieren entgegengesetzt: ihr Widerstand sinkt bei steigender Temperatur und die Leitfähigkeit steigt. In modernen Thermoelementen werden überwiegend unterschiedlich dotierte Halbleiter verwendet.³

³ Dr. König, Jan, et al. Thermoelektrik: Strom aus Abwärme. BINE Informationsdienst, 2016

Funktionsweise eines Peltier-Elements



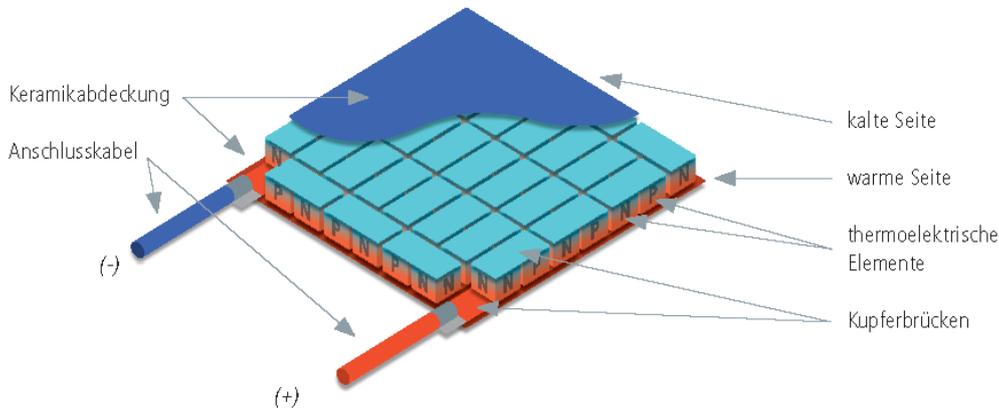
Funktionsprinzip eines Peltier-Element

Prinzipiell funktioniert das Peltier-Element wie eine Wärmepumpe. Es wird Energie von der kalten auf die heiße Seite gepumpt. Die Gesamtmenge der Abwärme, die auf der heißen Seite abgeführt werden muss, ergibt sich aus der zugeführten elektrischen Energie und der Kühlleistung. Durch Umpolen des Stroms können die Warm- und Kaltseiten vertauscht werden.³

In einem Peltier-Element sind Thermopaare aus unterschiedlich leitenden Halbleitern elektrisch in Reihe geschaltet und über keramikierte Kupferbrücken verbunden. Fließt Gleichstrom durch das Element, baut sich eine Temperaturdifferenz auf (Peltier-Effekt). Die kalte Seite des Peltier-Elements entzieht der Umgebung Wärme und gibt sie an der gegenüberliegenden Seite ab. Gängige, einstufige Peltier-Elemente haben ihre physikalischen Grenzen bei einer Temperaturdifferenz von rund 70 Kelvin zwischen der warmen und der kalten Seite bei Nennleistung I_{max} (siehe Abb). Mit neuartigen, gut leitenden Materialien und/oder dem Einsatz mehrstufiger Peltier-Elemente können für Hightech-Anwendungen in der Elektronik auch Temperaturdifferenzen von mehr als 130 Kelvin erreicht werden.

³ Dr. König, Jan, et al. Thermoelektrik: Strom aus Abwärme. BINE Informationsdienst, 2016

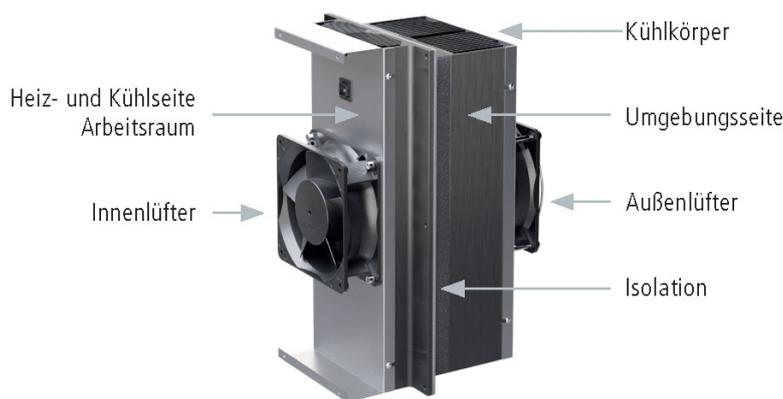
Aufbau eines Peltier-Elements



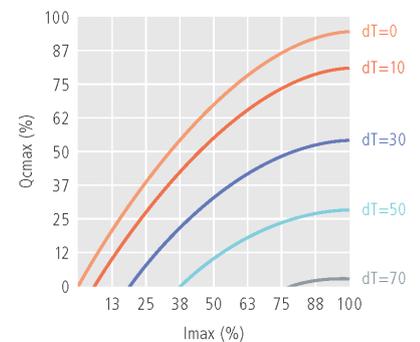
Aufbau einer Peltier-Kühleinheit

In einem Peltier-Kühlbrutschrank oder -Klimaprüfschrank sind Peltier-Elemente in Kühleinheiten integriert. Um ein Überhitzen der Peltier-Elemente zu vermeiden, die Effizienz zu optimieren und vor allem, um eine möglichst große Temperaturdifferenz zwischen Kalt- und Heißeite zu ermöglichen, muss die Abwärme möglichst effizient abtransportiert werden. Dies geschieht mit einem (bedarfsabhängig geregelten) Außenlüfter und einem ausreichend dimensionierten Kühlkörper. Der Innenlüftermotor sollte idealerweise möglichst wenig Wärme in den Innenraum eintragen.

Aufbau eines Memmert-Peltier-Elements



Kühlleistung vs. Strom



Kühlleistung im Gegensatz zum anliegenden Strom und der Temperaturdifferenz innerhalb des Peltier-Elementes (Meerstetter Engineering, 2016)

Die tatsächliche Kälteleistung wird gemindert

- durch die Verlustwärme (steigt quadratisch mit der Stromstärke).
- durch Wärmerückfluss zur kalten Seite (proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Materials und der Temperaturdifferenz).

Technologievergleich Peltier-Kühlelement und Kompressor-Kühlung

Wie ist der Aufbau?

Die konstruktiven Unterschiede der beiden Kühltechnologien bringen für den Anwender spezifische Vorteile mit sich. Ein Peltier-Gerät kann kompakter gebaut werden, da kein zusätzlicher Bauraum für eine Kältemaschine benötigt wird. Aufgrund einer geringen Anzahl mechanischer Bauteile, wie Pumpen, Filtern und Rohrleitungen, ist die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls geringer und die Wartung einfacher. Wartungen an Kühlkompressoren dürfen nur von Spezialisten mit spezieller Zertifizierung durchgeführt werden. Darüber hinaus arbeiten Peltier-Geräte annähernd vibrationsfrei sowie durch drehzahlgeregelten Lüfterbetrieb geräuscharm. Der Verzicht auf ein Kältemittel schlägt bei den laufenden Betriebskosten und der Klimafreundlichkeit zu Buche. Durch die Umkehr des Stromflusses werden Peltier-Elemente in vielen Geräten auch zum Heizen verwendet. Dies macht eine eigene Heizquelle im Kühlbrutschrank oder Klimaschrank überflüssig. Darüber hinaus können Temperaturzyklen mit der gleichen Heiz-Kühl-Einheit gefahren werden.

Wie ist die Regelbarkeit?

In der Labortechnik bieten kompressorgekühlte ebenso wie Peltier-Geräte eine sehr hohe Regelgenauigkeit. Peltier-Elemente reagieren jedoch unmittelbar und ohne Kühlmedium, da alles elektrisch betrieben wird. Sie sind daher äußerst präzise regelbar.

Peltier-Technologie zum Heizen und Kühlen im Kühlbrutschrank und Klimaschrank

Lange Jahre betrachtete man Peltier-gekühlte Geräte aufgrund des schlechten Wirkungsgrads von Peltier-Elementen nicht als echte Konkurrenz zu kompressorgekühlten Geräten. Mittlerweile ist eine Vielzahl an Peltier-gekühlten Laborgeräten auf dem Markt. Einige arbeiten mit einem einzigen Heiz-/Kühl-System, andere heizen mit einem elektrischen Widerstandsheizelement. Die Geräte haben ihre Stärken vor allem in der Nähe der Umgebungstemperatur, denn bei geringem Heiz- und Kühlbedarf benötigt die Peltier-Technologie auch nur geringe Energiemengen.

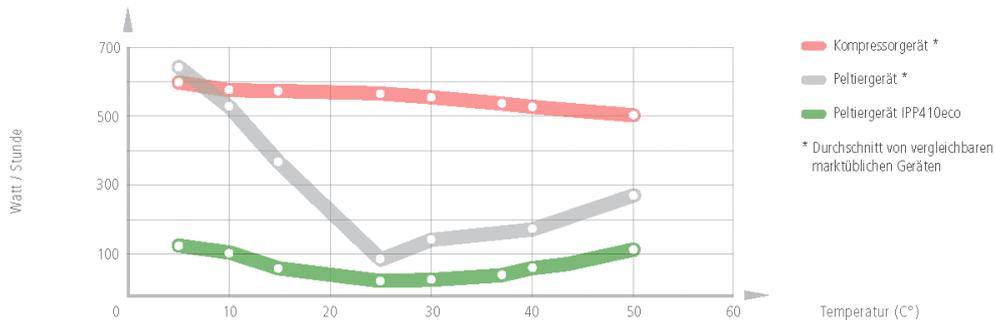
Es findet kein Luftaustausch zwischen Kammer und Umgebung statt. Die unvermeidliche Kondensation während des Abkühlvorgangs erfolgt nicht im Arbeitsraum, sondern außerhalb am Kühlkörper in der Kammer. Die in den Peltier-Elementen integrierten Lüfter unterstützen einen schnellen Energietransport sowie eine optimale Temperaturverteilung.

Nach einer umfangreichen Optimierung des Gesamtsystems aus Elektronik, Konstruktion und Regelungstechnik im Jahr 2020 erweitern die Geräte HPPeco und IPPeco des Herstellers Memmert den energieeffizienten Betrieb über den gesamten Temperaturbereich.



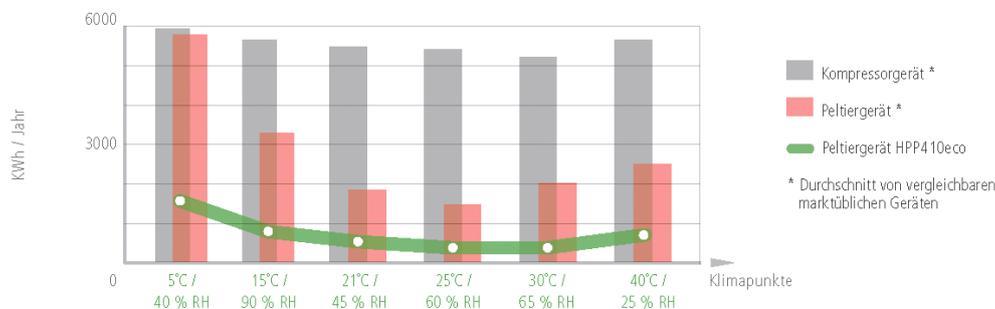
Blick in die Memmert Konstantklima-Kammer HPPeco: Beim Heizen wird der Umgebung Energie entzogen und in die Kammer übertragen. Zum Kühlen wird die Polarität des Halbleiters umgekehrt und dem Innenraum die Energie entzogen.

Gerätevergleich zeigt enormes Potenzial für Energieeinsparungen



Vergleich Energieverbrauch Memmert Kühlbrutschrank IPPeco mit Advanced Peltier Technology (Einführung 2020) mit vergleichbaren marktüblichen Geräten

Energieverbrauch bei Langzeitprüfungen nach ICH-Q1A (R2) Guideline (12 Monate)



Vergleich Energieverbrauch Memmert Konstantklima-Kammer HPPeco mit Advanced Peltier Technology (Einführung 2020) mit vergleichbaren marktüblichen Geräten

Entscheidungskriterien in der Praxis

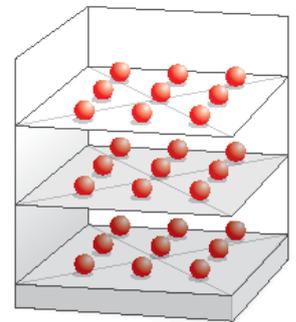
Bei der Entscheidung für und gegen die Kompressortechnologie oder Peltier-Technologie lässt sich keine allgemeingültige Aussage treffen. Es steht immer die spezifische Anwendung im Vordergrund und in der Regel sind die Geräte für definierte Prozesse ausgelegt. Herstellerangaben zu Energieverbrauch, Kälteleistung, Aufheiz- und Abkühlzeiten und anderen Messwerten sind hier hilfreich.

Energieeffizienz

Die Energieeffizienz von Klimaschränken und Kühlbrutschränken ist von der individuellen Auslegung, der Konstruktion, der Regelung und vor allem der Anwendung abhängig. Aufgrund der großen Unterschiede der verfügbaren Peltier-Geräte empfiehlt sich, vom Hersteller die Wärmeabgabe für die spezifischen Anwendungen berechnen zu lassen. Sobald die Anwendung Beschickungsgut umfasst, das Wärme in den Arbeitsraum einbringt, wie elektronische Aufbauten oder Halogenlampen, so ist ein Kompressor-betriebener Klimaschrank oft das Gerät der Wahl, da es im Vergleich zum Peltier-gekühlten Gerät eine höhere Wärmekompensation besitzt.

Temperaturhomogenität und -konstanz

Ist die Temperatur im gesamten Arbeitsraum über die gesamte Prozessdauer gleich verteilt und wie hoch sind die Abweichungen von den Sollwerten? Diese Fragen beantworten Messungen nach DIN 12880:2007, die jeder Hersteller für seine Kühlbrutschränke und Klimaschränke zur Verfügung stellen kann. Die Temperaturkonstanz, also die zeitliche Temperaturabweichung, gibt den Ausschlag des Messpunktes mit der größten zeitlichen Temperaturschwankung wieder. Die Temperaturhomogenität, also die räumliche Temperaturabweichung, ergibt sich aus der Differenz zwischen den zeitlichen Temperatur-Mittelwerten der zwei Messstellen, deren Ergebnisse am weitesten voneinander abweichen.



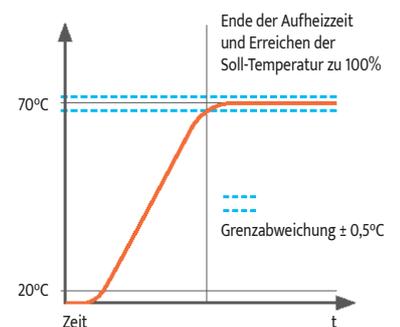
Messaufbau mit 27 Messpunkten für Geräte mit mehr als 50 Litern Arbeitsraum nach DIN 12880:2007

Aufheiz- und Erholzeiten

Die Bedingungen in Temperiergeräten sollen konstant bleiben bzw. möglichst nicht von den eingestellten Sollbedingungen abweichen. Schnelle Aufheiz-, Abkühl- und Erholzeiten sind dann wichtig, wenn Kühlbrutschränke in der täglichen Praxis mehrmals geöffnet werden und damit die Temperatur im Innenraum steigt. Nach DIN 12880:2007 wird bis zum Erreichen von 100% der Soll-Temperatur gemessen, wobei die Ist-Temperatur ab diesem Zeitpunkt definierte Grenzabweichungen nicht überschreiten darf.

Laufruhe und Geräuschpegel

Der Schalldruckpegel, ausgedrückt in dB (A), wird nach DIN EN ISO 3743-1:2010 ermittelt. Das Dezibel ist eine logarithmische Größe. Die Schallintensität eines Geräusches an der menschlichen Schmerzschwelle von circa 130 dB(A) ist also nicht 130 Mal so hoch wie das eines Geräusches an der Hörschwelle, sondern 10 Billionen mal höher. Eine Verdopplung der Schallintensität erreicht man bereits bei einer Lautstärkensteigerung um drei Dezibel. Zur Einordnung: In Deutschland darf der Lärmpegel an einem Bildschirmarbeitsplatz nicht höher als 55 dB (A) sein. Ein Flüstern schlägt mit ungefähr 30 dB (A), ein normales Gespräch mit 50 bis 60 dB (A) und der Lärm an einer Hauptverkehrsstraße mit circa 80 dB (A) zu Buche. Peltier-gekühlte Geräte bringen sowohl beim Punkt Geräuschentwicklung als auch beim Punkt Vibrationen Vorteile mit sich. Die Erschütterungen in einem Kompressor-Kühlbrutschrank sind vor allem auf den Verdichter zurückzuführen, die Geräusche auf Magnetventile und Verflüssigerlüfter.



Ermittlung der Aufheizzeit eines Wärmeschrankes beispielhaft für 70°C nach DIN 12880:2007

Umgebungstemperatur

Mit der Wärme in der Umgebung steigt der Energieverbrauch eines gekühlten Brutschranks oder Klimaschranks. Ab einer bestimmten Temperatur können Geräte mit Kompressor die Abwärme aus dem Kondensator nicht mehr vollständig an die Umgebung abgeben und die Kälteleistung nimmt ab. Bei Peltier-Geräten wird in der Regel die Abwärme mit einem Lüfter forciert vom Gerät abgeführt. Je kühler die Warmseite der Peltier-Temperier-Einheit, desto kälter wird die kalte Seite. Daher funktionieren Peltier-Geräte selbst bei Ausfall der Klimaanlage und an heißen Sommertagen immer noch zuverlässig bis zu einer Temperaturdifferenz von circa 25 K. Es empfiehlt sich in jedem Fall, mit dem Hersteller Rücksprache zu halten, wenn das Gerät in extremen Umgebungstemperaturen arbeiten soll.

Temperaturbereiche (Minusgrade)

Kühlbrutschränke und Klimaprüfschränke mit Peltier-Technologie sind durch die maximal erzielbare Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Arbeitsraum in der Anwendung bei tiefen Temperaturen beschränkt. Im Gegensatz dazu können Kompressorgeräte auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sicher erreichen – mit der Einschränkung der zulässigen Umgebungstemperatur.

Kältemittel

Die Möglichkeit, ohne Kältemittel kühlen zu können, ist sicher einer der größten Vorteile der Peltier-Technologie. Bei Kompressorgeräten sind unterschiedliche Kältemittel im Einsatz, die bei Freisetzung mehr oder weniger stark zur Erderwärmung beitragen. Als Orientierung dient der GWP-Wert (Global Warming Potential). Er setzt Kältemittel ins Verhältnis zu klimaneutralem CO². Ein Beispiel: Das CO²-Äquivalent des Kältemittels R134a ist 1430, auf einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet. Ein Kilogramm R134a trägt also innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 1.430 Mal so stark zum Treibhauseffekt bei wie ein Kilogramm CO².

Service und Wartung

Kühlbrutschränke und Klimaprüfschränke mit Peltier-Technologie sind durch die maximal erzielbare Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Arbeitsraum in der Anwendung bei tiefen Temperaturen beschränkt. Im Gegensatz dazu können Kompressorgeräte auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sicher erreichen – mit der Einschränkung der zulässigen Umgebungstemperatur.

Anwendungen in Kühlbrutschränken mit Peltier-Technologie (Beispiele)

Stabilitäts- und Klimaprüfungen

Hauptvorteile Kompressor-Klimaprüfschrank:

Hohe Flexibilität bei großem Anforderungsspektrum:

- Temperaturbereiche von Minus bis Plus
- Photostabilitätsprüfungen in Kombination mit vielen Temperatur-Feuchte-Kombinationen
- schnelle Temperatur-/ Klimawechselprüfungen
- hohe Wärmekompensation

Hauptvorteile Peltier-Klimaprüfschrank:

- bei konstantem Lagerklima hohe Energieeffizienz
- geringere Ausfallwahrscheinlichkeit der Peltier-Elemente
- leiser Betrieb

ICH-Guidelines Q1A und Q1B

Stabilitätstest in Kühlbrutschränken nach ICH Guideline Q1A (R2)

Diese Richtlinie beschreibt die kontrollierten Lagerbedingungen (Temperatur und Feuchte) und die Lagerdauer für Stabilitätstests von Fertigarzneimitteln und Wirksubstanzen für die verschiedenen Klimazonen auf der Erde. Die chemisch-physikalische Stabilität nach dem Ende der Prüfungen ermöglicht Aussagen zur Haltbarkeitsdauer und zu den Lagerungsbedingungen.

Stabilitätstest in Kühlbrutschränken nach ICH Guideline Q1B, Option 2 (Photostabilität)

Mit einer Beleuchtungseinheit, die Tageslichtleuchten und UV-Licht kombiniert, kann zusätzlich nach den ICH Guidelines Q1B, Option 2 (Photostabilität) geprüft werden. Die Richtlinie macht keine Vorgaben für Feuchtegehalt und Temperatur während der Prüfung. Dennoch kann man sich mit einem Klimaschrank mit regelbarer Temperatur, Feuchte und separat regelbarer Beleuchtungsstärke für Tageslicht und UV-Licht die Möglichkeit offenhalten, Photostabilität auch für definierte Luftfeuchtigkeiten zu prüfen. Neben der hohen Flexibilität bei den Prüfungen spricht für diese Geräte der geringe Wärmeeintrag durch die Beleuchtungseinheiten im Vergleich zu den Xenon-Lampen gemäß ICH Guidelines, Option 1.

Stabilitätsprüfungen in Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie

Auch in der Lebensmittel-, der Kosmetik- und der Verpackungsindustrie sind Stabilitätsprüfungen üblich und teilweise vorgeschrieben. Mikrobiologische Prüfungen finden meist bei definierten Temperaturen im Kühlbrutschrank statt, manche Stabilitätsprüfungen werden aber auch analog der Arzneimittel in definierten Norm- oder Prüfklimata im Klimaprüfschrank durchgeführt.

Proteinkristallographie

Hauptvorteile Peltier-Kühlbrutschrank:

- annähernd vibrationsfreier und geräuscharmer Betrieb
- hochpräzise Regelung

Proteinkristalle sind äußerst empfindlich. Die kleinste Erschütterung kann das Wachstum negativ beeinflussen. Möglichst langsam und erschütterungsfrei wachsen die empfindlichen Kristallisationsansätze bei konstanten Temperaturen zwischen +4 °C und +20 °C über einen sehr langen Zeitraum im Kühlbrutschrank heran. Neben der Geräuscharmheit und den minimalen Vibrationen spielt die hochpräzise Regelbarkeit des Kühlbrutschranks eine wesentliche Rolle bei der Kristallisation, denn Temperaturschwankungen, insbesondere während der Keimbildungsphase, beeinträchtigen die Reproduzierbarkeit der Kristalle.

Kultivierung über und unter Raumtemperatur, Mikrobiologische Tests, Keimzahlbestimmung

Hauptvorteile Peltier-Kühlbrutschrank:

- kompakte Bauform
- geräuscharm
- sparsamer im Energieverbrauch

Hauptvorteile Kompressor-Kühlbrutschrank:

- schnelle Aufheiz- und Abkühlzeiten
- schnelle Erholzeiten

Prinzipiell sind beide Technologien gleich gut geeignet für Kultivierungsaufgaben über und unter Raumtemperatur. Daher spielen bei gängigen mikrobiologischen Anwendungen ohne Temperaturrampen andere Entscheidungskriterien eine Rolle. Werden in der täglichen Praxis die Gerätetüren mehrmals am Tag geöffnet, kann dies zu einer Temperaturerhöhung im Gerät führen. Daher sind schnelle Aufheiz-, Abkühl- und Erholzeiten wichtig. Mit der technischen Optimierung der Peltier-Kühlbrutschränke gilt auch die Aussage, dass Kompressorgeräte überlegen sind, nicht mehr universell. Messungen der Hersteller zu den einzelnen Geräten bieten hier eine gute Orientierung, da sie in der Regel nach den Vorgaben der DIN 12880:2007-05 geprüft werden und daher vergleichbar sind.

Literaturhinweise

Memmert Whitepaper | 02/2021

Memmert GmbH + Co. KG | www.memmert.com

Sie möchten weitere Informationen? Dann melden Sie sich gern bei uns!

Seite 10 von 10