Ueber die Isolierung in der Kältetechnik

Autor(en): **Emblik, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **76 (1958)**

Heft 3

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-63917

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P

Ueber die Isolierung in der Kältetechnik

Von Dr.-Ing. **E. Emblik,** Winterthur [1])

Eine gute Isolierung bildet die Grundlage dafür, dass man Temperaturunterschiede zwischen einem Raum und seiner Umgebung aufrechterhalten kann, sei es, dass der Raum gekühlt oder geheizt werden soll. Obwohl wir uns im nachfolgenden mit tiefen Temperaturen befassen wollen, sei doch eine Bemerkung bezüglich der im Vergleich zur Umgebung etwas höheren Temperaturen gestattet. Wenn nämlich unsere Wohnhäuser eine bessere Isolierung hätten, als sie die üblichen Baustoffe bieten, so könnte man eine ganze Menge wertvollen Heizmaterials, also in erster Linie Heizöl, einsparen. Neuerdings befasst man sich insbesondere in Schweden sehr viel mit der Isolierung von Wohnhäusern [1], [2], [3] [2]), und es sind Konstruktionen entwickelt worden, welche eine beträchtliche Einsparung an Heizmaterial ermöglichen [4].

Die Isolierung gekühlter Räume ist im Vergleich zur Isolierung geheizter Räume wichtiger, weil die «Kältekalorien» wesentlich wertvoller sind als die «Wärmekalorien». Dazu kommt noch, dass man für die Lagerung von Lebensmitteln immer tiefere Temperaturen anwendet. Vor etwa 30 bis 40 Jahren lagerte man gefrorene Lebensmittel bei Temperaturen von —8 bis —10° C. Diese Lagertemperatur ist nun im Laufe der Zeit immer tiefer geworden und beträgt heute mindestens —18° C, vielfach jedoch bereits —25° C und darunter. Die Entwicklung scheint zu noch tieferen Temperaturen hinzuführen, insbesondere wenn es sich um fetthaltige Lebensmittel handelt.

Vergleicht man den Wärmestrom mit dem elektrischen Strom, so findet man bezüglich der Isolierung des Stromes folgenden Unterschied. Für den elektrischen Strom gibt es nämlich Stoffe mit einem spezifischen Widerstand, der im Vergleich zu demjenigen der besten Leiter praktisch unendlich ist, z. B. Bernstein: Silber = 10^{24} : 1. Beim Wärmewiderstand ist das Verhältnis wesentlich kleiner, es beträgt 2500 : 1 (Polystyrol zu Silber).

Die Isolierfähigkeit der homogenen festen Stoffe reicht nicht aus, die Kälteverluste von gekühlten Räumen in wirtschaftlichen Grenzen zu halten. Nun ist aber die Isolierfähigkeit der Gase sehr viel grösser, weshalb man für die Wärmeisolierung poröse Stoffe wählt, deren Poren mit Luft gefüllt sind. Alle Wärmeisolierstoffe bestehen daher aus locker gepackten Fasern, Schichten, Pulver oder erstarrtem Schaum. Die Wärmeleitzahl der praktisch angewendeten Isolierstoffe liegt im trockenen Zustand bei etwa 0,03 kcal/mh°C; bei Pulverisolierungen erreicht man geringere Werte.

Arten der Kälteisolierstoffe

Es gibt sehr viele Isolierstoffe, von denen hier nur eine geringe Auswahl erwähnt sei. Der *Kork* ist der älteste; er wird auch heute noch sehr viel angewendet [5]. Er stellt einen organischen Stoff dar und ist daher im unbehandelten Zustand für Schimmelpilze anfällig, wenn er feucht ist. Durch Hitzebehandlung wird der Naturkork expandiert und gleichzeitig durch besondere Imprägnierung gegen Feuchtigkeit unempfindlicher gemacht. Ein grosser Vorteil ist seine hohe mechanische Festigkeit.

Zellbeton hat eine hohe mechanische Festigkeit und kann daher gleichzeitig als Baustoff verwendet werden. Er wird bei mässiger Raumtemperatur wie z. B. für Obstkühlräume in England viel angewendet.

Glas- und Mineralwolle werden zu Matten aus verfilzten Fasern verarbeitet. Die Isolierfähigkeit ist um so besser, je feiner und länger die Fasern sind. Das Isoliermaterial soll locker sein und viel Luft enthalten, da ja schliesslich die Luft isoliert.

[1]) Vortrag gehalten am 14. Febr. 1957 an der ETH in Zürich.

[2]) Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

Schichtisolierungen sind leicht und werden deshalb vorwiegend für die Isolierung von Transportgeräten verwendet. Erwähnt seien das aus Aluminiumfolien bestehende *Alfol* [6], [7], das aus gefalteten, kreuzweise übereinandergelegten Azetylzellulosefolien bestehende *Isoflex* [8], welches neuerdings auch als eine Kombination aus Aluminiumfolien und Glaswolle hergestellt wird [9], sowie das *Wellit* [10]. Bei diesem handelt es sich um eine Vielschichtenpappe ähnlich der Wellpappe, die im Vakuum mit Bitumen imprägniert ist. In einer Isolierplatte folgen abwechselnd glatte und wellige Schichten; es ist eine Konstruktion des bekannten schwedischen Erfinders *Carl Munters*.

Schaumstoffe sind in der Entwicklung noch nicht abgeschlossen, jedoch hat man bereits gute Ergebnisse erzielt. Im Kriege wurden Schaumstoffe auf Harnstoffbasis als Ersatz für Kork entwickelt. Diese sind sehr leicht, besitzen jedoch eine geringe Festigkeit und nehmen verhältnismässig viel Wasser auf. Auf Polystyrolbasis lassen sich Schaumstoffe herstellen, die eine bessere Festigkeit aufweisen und gegen Wasser weniger empfindlich sind [11], [12], [13], [14]. Bei einem Raumgewicht von etwa 25 kg/m³ enthält das Material nur etwa 2,25 % festes Polystyrol, während der Rest aus Luft besteht [15]. Die Zellengrösse beträgt 0,1 bis 1 mm, die Wärmeleitzahl etwa 0,028 kcal/mh°C. (Der reine Feststoff hat eine Wärmeleitzahl von 0,14 kcal/mh°C). Die Schaumstoffe lassen sich beim Kühlschrankbau vorteilhaft mit dem Wandmaterial in der sogenannten Sandwich-Bauweise verbinden [13], [16]. Schaumstoffe aus Polyvinylchlorid können in Streifen auf die Wand geklebt werden. Nach Verschweissen der Nähte ist die Isolierung dampf- und gasdicht [17].

Arten der reinen Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung in einem Isoliermaterial erfolgt auf drei Wegen, nämlich durch Wärmeleitung des Gases und des Feststoffes, durch Konvektion in den Luftschichten und Poren sowie durch Strahlung. Die Anteile der verschiedenen Wärmemengen lassen sich bei Schichtisolierungen rechnerisch ermitteln. So wird z. B. für Wellit von *Boman* [10] angegeben:

Leitung und Konvektion durch Luft	55 %
Leitung durch die feste Substanz	14 %
Strahlung	31 %

Die Konvektion und die Strahlung in den Poren und zwischen den Schichten sind um so geringer, je kleiner der Abstand der Porenwände bzw. der Schichten voneinander ist. Wärmeleitende Brücken in Isolierungen sind tunlichst zu vermeiden. Als Beispiel sei erwähnt, dass die mittlere Wärmeleitzahl einer Schiffswandisolierung durch die Spanten bei ungünstiger Konstruktion bis zum dreifachen Wert des reinen Isoliermaterials ansteigen kann [18].

Diffusion des Wasserdampfes durch das Isoliermaterial

Hiermit sind wir beim Hauptproblem der Kälteisolierung angelangt. Es geht nämlich in der Praxis bei weitem nicht nur um die Dämmung des Wärmestromes, sondern auch um die Beherrschung des Feuchtigkeitsstromes, der unweigerlich mit dem Wärmedurchgang verbunden ist. Dabei handelt es sich um äusserst verwickelte Vorgänge, denn die Wanderung von Feuchtigkeit erfolgt sowohl in Form von Dampf als auch in Form von Flüssigkeit, und zwar sowohl von der wärmeren zur kälteren Seite als auch umgekehrt. Die Einzelheiten dieser verschiedenen Vorgänge sind noch nicht endgültig geklärt, jedoch seien nachstehend die verschiedenen Arten der Feuchtigkeitswanderung in isolierten Wänden beschrieben.

Bei der Berechnung von Isolierungen wird oft nur die eindringende Wärme berücksichtigt und nicht beachtet, dass

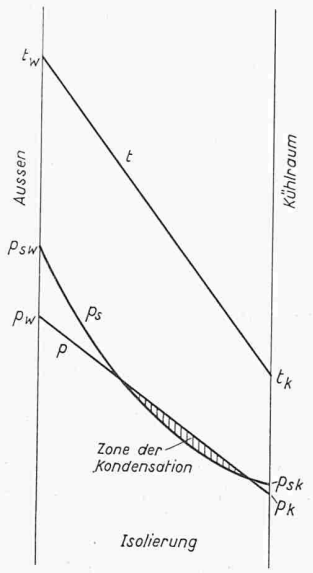
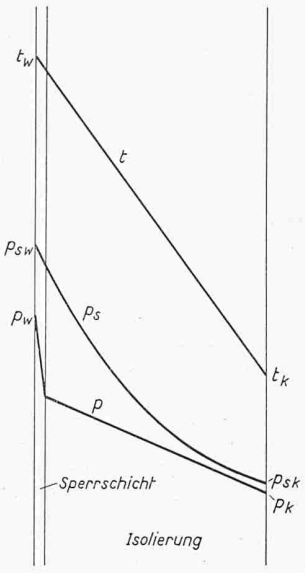
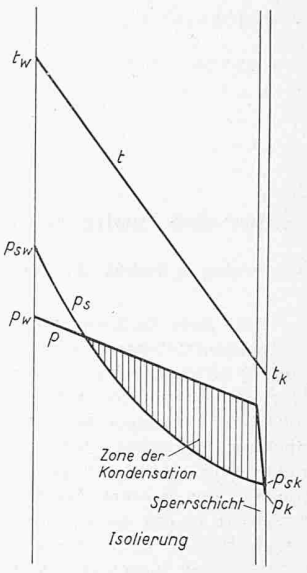


Bild 1 (links). Verlauf der Temperatur t und des Wasserdampfdruckes p in der Isolierung. Im Gebiet, wo der Dampfdruck p über den Sättigungsdruck p_s zu liegen kommt, kondensiert Wasser aus.

Bild 3 (Mitte). Einfluss einer Sperrschicht auf der warmen Seite der Isolierung auf den Verlauf des Wasserdampfdruckes im Material. Infolge des hohen Diffusionswiderstandes der Sperrschicht wird ein grosser Teil des Druckgefälles dorthin verlegt. Dadurch liegt der Dampfdruck im Material niedrig, und es findet keine Wasserausscheidung statt. Da der Wärmewiderstand der Sperrschicht gering ist, erfolgt keine merkliche Aenderung des Temperaturverlaufes.

Bild 4 (rechts). Einfluss einer Sperrschicht auf der kalten Seite der Isolierung auf den Verlauf des Wasserdampfdruckes im Material. Die Sperrschicht verhindert die Diffusion des von der warmen Seite eindringenden Wasserdampfes nach der kalten Seite hin, weshalb eine starke Kondensation vor der Sperrschicht stattfindet.





auch Wasserdampf von der warmen Umgebung durch die Isolierung hindurch in den Kühlraum eindringt. Dieser Wasserdampf trägt durch seine latente Wärme nicht unwesentlich zum Wärmetransport bei, denn jedes Kilogramm Wasserdampf führt 600 bis 680 kcal Wärme mit sich, je nachdem, ob der Dampf als Kondenswasser oder als Reif niedergeschlagen wird.

Die treibende Kraft bei der Dampfdiffusion ist der Unterschied der Teildrücke des Wasserdampfes aussen und innen. Sie entspricht sinngemäss der Temperaturdifferenz bei der Wärmeeindringung. Bei einer Aussentemperatur von +15 ° C und einer relativen Feuchtigkeit von 80 % beträgt der Teildruck des Wasserdampfes aussen 10,2 mm Hg. Herrscht im Kühlraum eine Temperatur von 0 ° C bei 85 % relativer Feuchtigkeit, so beträgt der Teildruck des Wasserdampfes im Kühlraum 3,9 mm Hg. Zwischen aussen und innen besteht somit in diesem Falle eine Dampfdruckdifferenz von 6,3 mm Hg = ~ 90 mm WS. Vergleicht man diese Druckdifferenz mit dem Druck eines normalen Ventilators, also etwa 30 mm WS, so sieht man, dass es sich um eine erhebliche Treibkraft handelt, die imstande ist, den Wasserdampf auch durch die feinsten Poren oder Fugen hindurchzudrücken.

Für den Vergleich der verschiedenen Materialien in bezug auf ihre Wasserdampfdurchlässigkeit hat sich der von *Krischer* [19] eingeführte Begriff der Diffusions-Widerstandszahl gut bewährt [20]. Diese sagt aus, um wieviel grösser der Widerstand eines Materials ist als derjenige einer gleich dicken ruhenden Luftschicht von der gleichen Temperatur: je höher sie ist, um so wasserdampfdichter ist das Material. Nachstehend seien einige Zahlenwerte für lufttrockene Stoffe nach *Cammerer* [21] angegeben:

Material	Diffusions-widerstandszahl	
Korkplatten	5— 30	je nach Bearbeitungsverfahren
Polystyrol-Schaumstoff	50—140	je nach Raumgewicht
Harnstoff-Schaum	etwa 2	
Glaswatte, Mineralwolle	etwa 1,2	

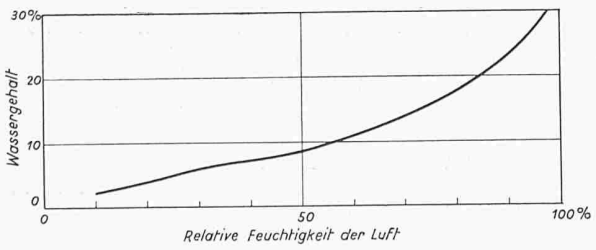


Bild 2. Beisiel einer Sorptionskurve für ein hygroskopisches Material (Holz). Jedem Wert der relativen Luftfeuchtigkeit entspricht im Beharrungszustand ein bestimmter Wert des Wassergehaltes.

Für feuchte Stoffe fehlen bis jetzt noch Messwerte für die Wasserdampfdurchlässigkeit.

Mit den oben angegebenen Zahlen soll nun durchaus nicht gesagt sein, dass ein Isolierstoff deshalb schlechter ist, weil er einen geringeren Diffusionswiderstand hat. Man muss lediglich die Art der Verlegung des Isoliermaterials nach der Wasserdampfdurchlässigkeit richten.

Freies Wasser und Eis in der Isolierung

Ausgehend von den Gleichungen für die Wärmeleitung und die Wasserdampfdiffusion lässt sich der Verlauf der Temperatur und des Wasserdampfteildruckes in einer Kühlraumisolierung berechnen [22]. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Bild 1 schematisch dargestellt, wobei angenommen wurde, dass die Luft im Kühlraum nicht gesättigt ist. Wie man sieht, schneidet die Gerade für den berechneten Wasserdampfteildruck die Sättigungskurve an zwei Stellen. Innerhalb dieses Gebietes liegt der berechnete Dampfdruck oberhalb der Sättigungslinie, was zu einer Ausscheidung von Wasser im gestrichelt angedeuteten Bereich der Isolierung führen muss.

Bei hygroskopischen Stoffen scheidet sich Wasser in den Poren schon aus ungesättigter Luft aus, also bei einer höheren Temperatur, als der Sättigungstemperatur entspricht [23]. Dieses Wasser wird als hygroskopisch gebundenes Wasser bezeichnet, da es an die submikroskopischen Poren des hygroskopischen Materials gebunden ist. Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines hygroskopischen Stoffes und der relativen Feuchtigkeit der umgebenden Luft geht aus der Sorptionslinie hervor, Bild 2.

Da die Wärmeleitzahl des Wassers etwa zwanzigmal grösser ist als diejenige von Luft, welche bei trockenem Material die Poren ausfüllt, wird durch die Wasserausscheidung die Isolierfähigkeit des Materials stark herabgesetzt.

Liegt das Gebiet der Wasserausscheidung im Temperaturbereich unter 0° C, so bildet sich in der Isolierung Eis, welches infolge seiner etwa viermal höheren Wärmeleitzahl als Wasser die Isolierfähigkeit noch weiter herabsetzt. Durch eine Ausdehnung beim Gefrieren wirkt das Eis ausserdem zerstörend auf die Isolierung.

Die Zunahme der Wärmeleitzahl infolge Wasseraufnahme beträgt bei Kork etwa 6 % je 1 Vol. Prozent Wasser, wenn dieses nicht gefroren ist [24]. Bei Temperaturen unter 0° C in der Isolierung beträgt die Zunahme der Wärmeleitzahl etwa 9 % je 1 Vol. Prozent Wasser bzw. Eis.

Mit Wasser gesättigter Kork hat eine Wärmeleitzahl von 0,5 kcal/mh°C, mit Eis gesättigter eine solche von 1,5 kcal/mh°C [25]. Vergleicht man diese Zahlen mit der Wärmeleitzahl von trockenem Kork, die etwa 0,035 kcal/mh°C beträgt, so erkennt man die Gefahr einer Wasser- bzw. Eisbildung im Isoliermaterial. In Kühlhäusern, die bereits eine Zeitlang im Betrieb gewesen waren, hat man Zunahmen der Wärmeleitzahl des Isoliermaterials von 80 bis 120 % festgestellt [23].

Je grösser die Neigung eines Stoffes zur Wasseraufnahme ist, um so ungünstiger verhält es sich als Isoliermaterial. Aus

diesem Grunde sind wasserabweisende Stoffe für die Kälteisolierung am besten geeignet.

Herabsetzung der Feuchtigkeitsansammlung in der Isolierung

Um die von aussen eindringende Wasserdampfmenge herabzusetzen, bringt man auf der warmen Seite der Isolierung eine möglichst wasserdampfdichte Schicht an. Diese Schicht, die als Sperrschicht bezeichnet wird, bewirkt eine Aenderung des Dampfdruckverlaufes in der Isolierung, indem die Ausscheidung von Wasser verhindert wird, Bild 3. Die Sperrschicht soll möglichst so dicht sein, dass das gesamte Dampfdruckgefälle dorthin verlegt wird.

Würde man die Sperrschicht nicht auf der warmen, sondern auf der kalten Seite der Isolierung anbringen, so würde sich ein Verlauf gemäss Bild 4 ergeben. Es würde also eine verstärkte Wasser- oder Eisausscheidung innerhalb der Isolierung stattfinden. Aus diesem Grunde ist auch eine vollkommen dichte Bitumen-Klebschicht zwischen zwei Lagen Isolierplatten nicht vorteilhaft, denn hierdurch würde möglicherweise Wasser auf der warmen Seite der Trennschicht gestaut werden [24]. Aehnlich wirkt auch eine Eisschicht in der Isolierung. Hat sich eine solche bereits gebildet, so verursacht sie infolge Undurchlässigkeit eine weitere Ansammlung von Wasser und Eis innerhalb der Isolierung [23]. Am günstigsten liegen die Verhältnisse bei Haushaltkühlschränken und Kühltruhen aus Metall oder sonstigem für Wasserdampf undurchlässigem Stoff. Hier können für die Isolierung auch feuchtigkeitsempfindliche Materialien verwendet werden.

Bei Kühlräumen gibt es verschiedene Ausführungsarten der Sperrschicht. Je dichter diese ist, um so höher sind natürlich deren Anschaffungskosten; jedoch lohnt sich eine gute Sperrschicht immer, weil dadurch die Isolierung vor einer Durchfeuchtung bewahrt wird.

Ein gewöhnlicher Asphaltanstrich vor dem Anbringen der Isolierung auf der Wand erhält leicht Risse. Durch diese wird jedoch der Durchgangswiderstand der Sperrschicht stark herabgesetzt [23], [26]. In Holland hat man bitumenhaltige Gewebe mit gutem Erfolg angewendet [17]. In Schweden legt man mehrere Schichten bitumengetränktes, filziges Papier auf die zu isolierende Wand und bestreicht es mit Bitumen [23]. In England wird neuerdings ein gummi- und bitumenhaltiges Präparat hergestellt, welches infolge seiner Elastizität nicht reissen soll [27]. Eine Sperrschicht auf der Aussenwand des Kühlhauses in Form eines Gummi-Farbanstriches wurde bei einem amerikanischen Kühlhaus versucht [28], [29], hat sich aber nicht bewährt [30].

Praktisch ist es trotz guter Sperrschichten nicht zu verhindern, dass geringe Feuchtigkeitsmengen von der warmen Seite her in die Isolierung eindringen. Aus diesem Grunde darf das Isoliermaterial keine Neigung zur Wasseraufnahme haben. Ausserdem ist es wichtig, dass die eingedrungene Feuchtigkeit durch die Isolierung hindurch diffundieren und auf der kalten Seite in den Kühlraum abwandern kann, wo sie an den Kühlvorrichtungen kondensiert.

Die Wandbekleidung der Kühlräume muss demzufolge möglichst durchlässig für Wasserdampf sein. Zugleich muss sie eine gewisse Festigkeit besitzen und möglichst abwaschbar sein. Je dichter die Wandbekleidung bzw. der Verputz auf der kalten Seite der Isolierung ist, um so dichter muss auch die Sperrschicht auf der warmen Seite sein, damit auf keinen Fall mehr Feuchtigkeit in die Isolierung von aussen eindringt, als aus dieser wieder nach innen abwandern kann. Besonders dicht muss daher die Sperrschicht sein, wenn die Kühlraumwand mit Fliesen belegt ist.

Der erforderliche Mindestwiderstand der Sperrschicht auf der warmen Seite, der höchstzulässige Widerstand der Wandbekleidung auf der kalten Seite und der Diffusionswiderstand des Isoliermaterials müssen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Hiefür hat *Krischer* [31] einige Gleichungen angegeben, die zusammengefasst folgendes besagen: Je grösser der Diffusionswiderstand des Isoliermaterials ist, um so grösser muss der Widerstand der Sperrschicht gewählt werden, um so grösser darf aber auch der Widerstand der Wandbekleidung auf der kalten Seite der Isolierung sein. Ist also ein Isolierstoff sehr undurchlässig für Wasserdampf, wie z. B. Polystyrol-Schaumstoff, so muss die Sperrschicht sehr dicht sein, um eine Durchfeuchtung der Isolierung zu vermeiden.

Bei einem Isolierstoff mit hoher Wasserdampfdurchlässigkeit, wie z. B. Glaswolle, braucht die Sperrschicht nicht so dicht zu sein, aber dafür darf die Wandbekleidung auf der Kühlraumseite möglichst keinen Widerstand bieten.

Als Wandabdeckung verwendet man in Schweden verschiedentlich Siporex-Leichtbetonplatten. In den USA hat man neuerdings perforierte Masonite-Platten (Presspan) angewendet [32], [33]. Auf der Deutschen Kältetagung in Mannheim 1956 berichtete *Dürhammer* über neuentwickelte Fliesen, die mit eingebauten Kanälen versehen sind, durch welche die Feuchtigkeit aus der Wand heraustreten kann. Die Kanäle sind so angeordnet, dass bei der Reinigung der Fliesen kein Wasser in die Isolierung eindringt.

Andere Arten der Feuchtigkeitsbewegung im Isoliermaterial

Bisher haben wir nur die Diffusion von Wasserdampf behandelt, die jedoch nur eine Art der Feuchtigkeitswanderung im Isoliermaterial darstellt. In Wirklichkeit gibt es noch verschiedene andere Arten. Hat sich irgendwo im Material eine Schicht freies Wasser gebildet, so findet infolge der kapillaren Saugkraft von dieser eine Wanderung des freien Wassers nach beiden Seiten hin statt, denn die Bewegung erfolgt stets in der Richtung des abnehmenden Wassergehaltes [23].

Bei Schichtisolierungen, wie z. B. Wellit, hat man festgestellt, dass die Ansammlung von Wasser in der Isolierung wesentlich geringer ist als in einem homogenen porösen Material. Dies wird durch die stärkere Kapillarsaugwirkung der Schichtisolierung erklärt, wodurch die im Material niedergeschlagene Feuchtigkeit sehr rasch nach der kalten Seite transportiert wird. Dort ist natürlich für eine gute Abzugmöglichkeit zu sorgen.

Sind die Kapillaren im Material nicht zusammenhängend, sondern durch grössere Hohlräume (Poren) unterbrochen, dann tritt eine Bewegung des freien Wassers infolge Verdunstung an einem Ende der Kapillaren und Kondensation am anderen Ende auf [34], Bild 5. Die letztgenannte Bewegung des Wassers bringt einen sehr grossen zusätzlichen Wärmetransport mit sich.

Die Kapillarsaugwirkung kann mit oder gegen die Diffusion wirken, je nach der relativen Feuchtigkeit auf der warmen Seite [35]. Ist diese dort niedriger als auf der kalten Seite, dann ist dort auch der Wassergehalt des Materials geringer als auf der kalten Seite. Die Folge ist eine Bewegung des Wassers von der kalten nach der warmen Seite.

Die Tatsache, dass die Isolierung von Blechbehältern und Rohren meistens auf der Innenseite trocken ist, lässt sich durch die gewöhnliche Wasserdampfdiffusion nicht erklären. Da es keine vollkommen dichte äussere Sperrschicht gibt, dringt stets eine geringe Feuchtigkeitsmenge in Form von Wasserdampf von aussen in die Isolierung ein. Da aber die Feuchtigkeit nach innen nicht abwandern kann, muss, wenn keine Ansammlung festgestellt wird, Feuchtigkeit auch von innen nach aussen gewandert sein.

Lilley [36] weist darauf hin, dass der Feuchtigkeitsdurchgang durch ein Isoliermaterial nicht nur proportional der Dampfdruckdifferenz ist, sondern bei sorbierenden Materialien auch noch von der relativen Feuchtigkeit abhängt. Hiedurch erklärt sich, dass eine Feuchtigkeitsbewegung im Material durch Adsorption und Kapillareffekte auch entgegen dem Dampfdruckgefälle möglich ist.

Im Bild 6 ist der Schnitt durch eine poröse Platte aus hygroskopischem Material dargestellt, wobei links die Temperatur und der Dampfdruck höher sind als rechts. Infolgedessen findet eine Wanderung der Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf von links nach rechts statt. Die relative Feuchtigkeit sei auf der rechten Seite höher, so dass sie innerhalb der Platte gemäss der mit φ bezeichneten Kurve von links nach rechts ansteigt. Entsprechend dem durch die Sorptionskurve des Materials gegebenen Zusammenhang nimmt auch der Was-

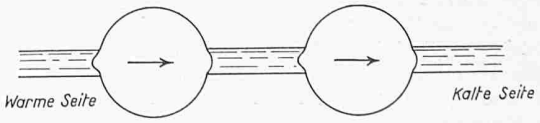


Bild 5. Feuchtigkeitsbewegung im porösen Material. An den Stellen, wo die Kapillaren durch grössere Hohlräume unterbrochen sind, verdunstet Wasser auf der warmen Seite des Hohlraumes, das dann auf der kalten Seite kondensiert

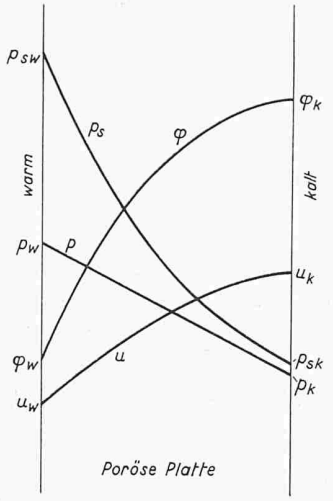


Bild 6. Feuchtigkeitswanderung in einer porösen Platte. Infolge des Dampfdruckgefälles von p_w nach p_k wandert Wasserdampf von links nach rechts, während gleichzeitig eine Feuchtigkeitswanderung von rechts nach links als Folge des nach links abnehmenden Wassergehaltes u des Materials stattfindet. Macht man auf beiden Seiten die relative Feuchtigkeit $\varphi_w = \varphi_k = 1$, dann ist auch $u_w = u_k$ und die letztgenannte, dem Dampfdruckgefälle entgegengesetzt gerichtete Feuchtigkeitswanderung hört auf.

sergehalt von links nach rechts zu, und zwar gemäss der mit u bezeichneten Kurve.

Infolge des höheren Wassergehaltes auf der kalten Seite findet eine Wanderung von Feuchtigkeit auch von rechts nach links statt, also entgegen der Richtung der Dampfdiffusion. Macht man nun bei unveränderter Dampfdruckdifferenz auf beiden Seiten der Platte $\varphi = 1$, dann ist der Wassergehalt des Materials überall gleich, und es wandert keine Feuchtigkeit von der kalten zur warmen Seite. Infolge dieses fehlenden entgegengesetzten Feuchtigkeitsstromes wandert trotz gleicher Dampfdruckdifferenz mehr Feuchtigkeit durch die Wand als ursprünglich.

Wie nun der Mechanismus dieser entgegengesetzten Feuchtigkeitswanderung genau aussieht, darüber scheint man sich noch nicht ganz im klaren zu sein. Man spricht von einer Oberflächendiffusion der Wasserdampfmoleküle, wobei sich die vom Material adsorbierten Wassermoleküle entlang der inneren Oberfläche des Materials als eine Art zweidimensionales Gas bewegen [37]. Man hat nämlich festgestellt, dass beim Transport von Wasserdampf durch Papier nicht nur das Gefälle der Oberflächenkonzentration, sondern auch die Oberflächenkonzentration selber von massgeblichem Einfluss ist [38]. Je höher die Oberflächenkonzentration an adsorbierten Wassermolekülen bei gleichem Konzentrationsgefälle ist, um so grösser ist der Transport. Diese Erscheinung kann durch die Diffusionsgesetze für die Hohlräume nicht erklärt werden.

Hier steht der Forschung noch ein weites Feld offen. Bei dieser Gelegenheit sei erwähnt, dass ein amerikanischer Teilnehmer am 9. Internationalen Kältekongress in Paris bemerkte: «Man weiss heute vielleicht darüber besser Bescheid, was in einem Atomkern vor sich geht als im Isoliermaterial eines Gefrierraumes» [39].

Konvektion in der Isolierung

In den Poren der Isolierung herrscht fast nur reine Wärmeleitung, insbesondere wenn die Poren nicht miteinander in Verbindung stehen. Auch bei der Schichtisolierung findet bei genügend geringem Schichtabstand keine Konvektionsströmung innerhalb der einzelnen Luftschichten statt, weil der Temperaturunterschied zwischen der wärmeren und der kälteren Seite der dünnen Luftschicht zu gering ist, um eine solche Strömung hervorzurufen.

In der Isolierung einer senkrechten Wand jedoch mit beispielsweise —20° C auf der kalten und +20° C auf der warmen Seite ist das spezifische Gewicht der Luft auf der kalten Seite etwa 15 % höher als auf der warmen. Das ergibt bereits eine starke Treibkraft für Konvektionsströmung in der gesamten Isolierung [40], die ja zum grössten Teil aus Luft besteht. Die innere Konvektionsströmung hat zur Folge, dass die Wärmeleitzahl eines Isoliermaterials in der Praxis stets höher ist als gemäss Laboratoriumsmessungen. Ausführliche Untersuchungen von *Watzinger* [41], [42] haben gezeigt, dass die gemessene Wärmeleitzahl bei gleicher Temperaturdifferenz von der Dicke und Höhe der Isolierschicht abhängt. Je dicker die Isolierung und je höher die Wand, um so stärker ist die Konvektionsströmung. Ist diese gut ausgebildet, so kann die Wärmeleitzahl bis auf den doppelten Wert ansteigen.

Wenn beim konvektionsfreien Wärmedurchgang die Isothermen in einer senkrechten Isolierplatte senkrecht verlaufen, so werden sie bei Auftreten der Konvektionsströmung gekrümmt [43]. Die Verschiebung der Isothermen ist um so stärker, je grösser der Temperaturunterschied zwischen der warmen und der kalten Seite der Isolierplatte ist.

Sind die Luftwege in der Isolierplatte zusammenhängend, wie z. B. bei Glaswolle, so bieten sie für die Konvektionsströmung einen geringeren Widerstand. Infolgedessen ist bei dichter Packung der Faserstoffe die Konvektion etwas geringer als bei loser Packung. Da jedoch die Wärmeleitzahl dichtgepackter Faserstoffe infolge der zahlreicheren Wärmebrücken an sich grösser ist als bei loser Packung, so gibt es für jedes Material und jeden Fall (Temperaturdifferenz, Dicke und Höhe der Isolierplatte) einen optimalen Wert der Dichte [44].

Durch die Konvektionsströmung in der Isolierung wird auch der Feuchtigkeitstransport erhöht, und je nach der Kühlraumtemperatur erfolgen Ansammlungen von Kondenswasser oder Eis in der obersten Ecke auf der kalten Seite der Isolierung. Zur Vermeidung dieser Erscheinung hat *Watzinger* [41] empfohlen, die Schutzbekleidung auf der Innenseite der Kühlraumwand in der obersten Ecke zu entfernen, damit die sich dort ansammelnde Feuchtigkeit möglichst leicht in den Kühlraum diffundieren kann, wo sie am Luftkühler niedergeschlagen wird. Diese Massnahme kann angeblich bei Faserstoffisolierung auch bei bereits erfolgter Feuchtigkeitsansammlung nachträglich vorgenommen werden, wobei dann die Isolierung trocken wird [45]. Von anderer Seite wird die Zweckmässigkeit dieser Massnahme bestritten [46], woraus folgt, dass hier noch Erfahrungen gesammelt werden müssen. Zur Herabsetzung der Konvektionsströmung empfiehlt es sich, Verbindungen oben und unten zwischen vertikalen Luftwegen mit verschiedener Temperatur tunlichst zu vermeiden [47].

Mit Rücksicht auf die verschiedenen Vorgänge in der Isolierung schlägt *Persson* [48] folgende Formulierung der charakteristischen Daten eines Isoliermaterials vor:

1. Wärmeleitzahl für die horizontale Platte, Wärmestrom von unten nach oben.
2. Wärmeleitzahl für eine vertikale Platte von 100 mm Stärke und 1 m Höhe (Konvektion).
3. Aenderung der Wärmeleitzahl mit der mittleren Temperatur.
4. Aenderung der Wärmeleitzahl mit dem Feuchtigkeitsgehalt.
5. Wasserdampfdurchlässigkeit.
6. Wasseraufnahme bei verschiedener relativer Feuchtigkeit (Sorptionskurve).
7. Mechanische Festigkeit im feuchten Zustand.
8. Spez. Gewicht, Vibrationsfestigkeit, Brennbarkeit.
9. Geruch, Neigung zu Schimmelbildung.

Hierzu käme für gewisse Gegenden noch die Termiten-Sicherheit des Materials [49], [50].

Montage, Prüfung der fertigen Isolierung

Bei der Beurteilung der verschiedenen Isoliermaterialien ist zu bedenken, dass man bei unterschiedlicher Montage und ungleichen Betriebsbedingungen mit dem selben Material verschiedene Ergebnisse erhält. Es ist deshalb von grosser Bedeutung, dass die Montage einer Kälteisolierung auf das sorgfältigste ausgeführt wird. Das beste Isoliermaterial nützt nichts, wenn es schlecht verlegt wird. Hohlräume sind in der Isolierung schädlich, da sie die Konvektionsströmung fördern. Auch sammelt sich dort Wasser an, wenn sich der Hohlraum in der Kondensationszone befindet. Besondere Sorgfalt ist der Feuchtigkeitsabdichtung auf der warmen Seite zu widmen, denn von dort dringt die Feuchtigkeit in das Material ein und setzt die Isolierfähigkeit herab. Bei Eisenbahnkühlwagen und gekühlten Strassenfahrzeugen ist die Gefahr für eine Feuchtigkeitseindringung von aussen infolge des starken Winddruckes während der Fahrt besonders gross [9], [51].

Die neueren Schaumstoffe sind zwar an sich unempfindlich gegen Feuchtigkeit. Aber wenn das in einem möglicherweise vorhandenen Hohlraum angesammelte Wasser gefriert, dann zerstört dieses die Isolierplatte. Um jegliche Wasserbildung in der Isolierung zu verhindern, werden von den Herstellern der Schaumstoffe besondere Klebemittel für die Platten empfohlen, die wasserfrei sind und auch beim Erhärten kein Wasser bilden.

Mit Rücksicht auf die Konvektion und die Wasserdampfdiffusion wäre es am besten, wenn man die Isolierung einer Wand aus einem Stück herstellen könnte, wobei dann keine Fugen vorhanden wären. Mit den üblichen Isolierplatten ist das technisch nicht ausführbar, jedoch werden hier mit den sich noch in der Entwicklung befindlichen Schaumstoffen, die an Ort und Stelle hergestellt werden können, neue Möglichkeiten eröffnet [52]. Für die Isolierung von Ventilen, Verteilstücken usw. wird eine verformbare Masse aus Korkschrot und Gummi hergestellt [53]. Diese lässt sich auf die zu isolierenden Flächen dicht andrücken, wodurch Hohlräume vermieden werden.

Es ist empfehlenswert, fertig verlegte Isolierungen von Zeit zu Zeit zu prüfen, die praktisch erreichte Wärmedurchgangszahl zu messen und gegebenenfalls ihre Zunahme festzustellen. Am zweckmässigsten misst man die Wärmedurchgangszahl mit einem Wärmestrom-Messgerät, welches im Kühlraum auf die zu untersuchende Wand gelegt wird [48], [54], [55]. Das Verfahren hat den Vorteil, dass dabei keine Löcher in die Wand gebohrt werden müssen, wie es bei der Entnahme von Isoliermaterialproben der Fall ist. Ein Wärmestrom-Messgerät besteht im wesentlichen aus einer dünnen Kunststoffplatte mit eingebauten Thermoelementen sowie einem Millivoltmeter. Die Platte wird im Kühlraum auf die zu untersuchende Stelle der Wand gelegt und so in den durch die Wand stattfindenden Wärmestrom eingeschaltet. Nach einer Zeit von etwa einer Stunde ist der Beharrungszustand erreicht, und zwischen den beiden Seiten der Messplatte hat sich eine Temperaturdifferenz eingestellt, die dem Wärmestrom durch die Kühlraumwand proportional ist. Die hintereinander geschalteten Thermoelemente der Messplatte ergeben eine dem Wärmestrom proportionale elektrische Spannung, so dass das elektrische Anzeigegerät auch in kcal/m²h geeicht sein kann. Das beschriebene Wärmestrom-Messgerät nach *E. Schmidt* [56] ist in Deutschland von *Cammerer* [55] und in Schweden von *Persson* [48] weiterentwickelt worden. Die Messung des Wärmestromes soll an verschiedenen Stellen der Wand vorgenommen werden, da infolge der Konvektion in der Isolierung Ungleichmässigkeiten vorkommen.

Eine Messung der von der Isolierung durchgelassenen Feuchtigkeitsmenge ist nur summarisch möglich, indem man die in einen leeren Kühlraum im Laufe einer bestimmten Zeit eingedrungene und am Luftkühler niedergeschlagene Feuchtigkeit misst.

Zur Messung der im Isoliermaterial kondensierten Feuchtigkeit bohrt man aus der Isolierung Proben heraus und bestimmt deren Wassergehalt auf die übliche Weise im Laboratorium. Dabei besteht allerdings die Gefahr, dass ein Teil der Feuchtigkeit entweicht, bis die Messung im Laboratorium ausgeführt ist. Die Entwicklung neuer Verfahren auf kernphysikalischer Grundlage zur Messung des Wassergehaltes an Ort und Stelle erscheint möglich [57].

Entfeuchtung der Isolierung

Sind die Voraussetzungen für die Bildung von freiem Wasser in der Isolierung gegeben, dann besteht die Gefahr, dass sich dort im Laufe der Zeit erhebliche Wassermengen ansammeln. Als Beispiel sei erwähnt, dass aus den Kühlraumwänden eines Bananenschiffes in 14 Tagen Reisedauer 0,34 kg Wasser je Kubikmeter Isolierung ausgeschieden werden konnten [58].

Die Ursachen der Wasseransammlung können verschieden sein. Entweder ist die Sperrschicht auf der warmen Seite der Isolierung nicht dicht genug, oder der Wandbelag auf der kalten Seite ist zu wenig durchlässig, oder auch die Widerstände der Sperrschicht und der Wandbekleidung des Kühlraumes stehen nicht im richtigen Verhältnis zum Diffusionswiderstand des Isoliermaterials. Wie dem auch sei, in der Praxis lässt sich jedenfalls eine Feuchtigkeitsansammlung in der Isolierung selten vermeiden, weshalb den Massnahmen zur Bekämpfung dieser Erscheinung eine grosse Bedeutung zukommt.

Nach einem Verfahren von *Munters* [23], [59], [60] lässt sich die Wasserbildung in der Isolierung dadurch vermeiden, dass man die Isolierung laufend entfeuchtet. Zu diesem Zweck versieht man die Isolierung auf der Kühlraumseite mit parallelen Nuten, die nach Auflegen der Wandbekleidung Kanäle bilden. Durch diese lässt man kalte, trockene Luft strömen, welche die einfallende Feuchtigkeit aufnimmt, bevor sie kondensiert. Die Luft durchstreicht dann einen Luftkühler, wo die Feuchtigkeit niedergeschlagen wird. Nach diesem, als Minikay-Verfahren bezeichneten System lassen sich auch bereits durchfeuchtete Isolierungen nachträglich trocknen [61], [62], [63], [64].

Vakuum- und Pulverisolierung

Der Hauptanteil der Wärme wird in einem Isoliermaterial durch Wärmeleitung der in den Poren oder Zwischenräumen enthaltenen Luft übertragen. Diese Wärmeleitung erfolgt durch die Bewegung der Luftmoleküle [65]. Senkt man den Druck in einem lufthaltigen Isoliermaterial, so nimmt die Zahl der Luftmoleküle in der Volumeneinheit ab und die freie Weglänge der Luftmoleküle zu [66]. Die Wahrscheinlichkeit für Zusammenstösse mit anderen Luftmolekülen wird also beim Vakuum geringer, was eine Abnahme der Wärmeleitzahl des Isoliermaterials zur Folge hat. Bei einem absoluten Druck von 1 mm Hg erhält man mit Kienruss-Isolierung eine Wärmeleitzahl von 0,0033 kcal/mh°C [65].

Im absoluten Vakuum findet keine Wärmeleitung mehr statt, jedoch bleibt der Strahlungsanteil der Wärmeübertragung bestehen. Um auch diesen möglichst herabzusetzen, macht man z. B. die einander gegenüberstehenden Flächen der Aussen- und Innenwand reflektierend, wie es bei einer Thermosflasche der Fall ist.

Sind die Poren des Isoliermaterials kleiner als die freie Weglänge der die Poren ausfüllenden Luft, dann wird die Wärmeleitung auch bei atmosphärischem Druck herabgesetzt. Aeusserst feine Poren lassen sich erreichen, wenn man die Isolierung als genügend feinkörniges Pulver ausführt; dabei ist auch die Wärmeleitung durch die feste Substanz sehr gering, da die Teilchen nur lose aufeinanderliegen. Schliesslich wird auch der Strahlungsanteil infolge der häufigen Unterteilung des Temperaturgefälles sehr gering. Man findet dann, dass ein lockeres Pulver eine geringere Wärmeleitzahl aufweist als das Füllgas. Von dieser Erscheinung, die nach ihrem Entdecker als *Smoluchowski-Effekt* [67] bezeichnet wird, macht man in der Praxis Gebrauch. In den USA ist ein im wesentlichen aus Kieselsäure bestehender Pulverisolierstoff entwickelt worden, dessen Körner porös sind. Bei einem Porendurchmesser von $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ mm und einem spezifischen Gewicht von 80 kg/m³ weist dieses Material eine Wärmeleitzahl von 0,018 kcal/mh°C auf [68]. Die Wärmeleitzahl des Pulvers ist also geringer als diejenige ruhender Luft. Das Material ist allerdings gegen Feuchtigkeit empfindlich, weshalb die Isolierungsschicht hermetisch abgeschlossen werden muss.

Durch Senkung des Druckes im pulvergefüllten Raum lässt sich eine noch bessere Isolierwirkung erzielen. So hat *Smoluchowski* durch ganz feinen Reispuder bei einem Druck von 0,05 mm Hg eine Wärmeleitzahl von 0,0005 kcal/mh°C erreicht [69]. *E. Schmidt* [70] erzielte mit Quarzpulver von 10^{-4} Millimeter Korndurchmesser bei einem Vakuum, welches noch mit einer gewöhnlichen Wasserstrahlpumpe erzeugt werden kann, eine Wärmeleitzahl von weniger als 0,01 kcal/mh°C. Derartige Pulverisolierstoffe im evakuierten Raum werden für die Isolierung von Behältern für verflüssigte Gase angewendet [71].

Bei allen bisher betrachteten Isolierungen befand sich normale oder verdünnte Luft in den Poren. Der Gedanke liegt nahe, dass man eine Verbesserung der Isolierwirkung erzielt, wenn man die Poren anstatt mit Luft mit einem Gas von geringerer Wärmeleitzahl ausfüllt. Untersuchungen mit Glaswolle [72] haben gezeigt, dass die Isolierfähigkeit tatsächlich sehr erheblich davon abhängt, welches Gas sich in den Poren des Materials befindet. Mit verschiedenen Füllgasen ergeben sich folgende Wärmeleitzahlen (in kcal/mh°C): Luft 0,032, Kohlendioxyd 0,024, Methylchlorid 0,021, Wasserstoff 0,092. Auch hier kann man einen Schritt weiter gehen und den Gasdruck im Isoliermaterial senken. *Leidenfrost* [73] füllte Pulverisoliermaterial mit schlecht wärmeleitenden Dämpfen, wie z. B. Tetrachlorkohlenstoff, aus. Bei +20° C herrscht im Isolierraum ein Druck von nur 90 mm Hg, wobei die Wärmeleitzahl 0,0045 kcal/mh°C beträgt.

Wirtschaftlichkeitsfragen

Bei der Berechnung der wirtschaftlichsten Isolierstärke pflegt man oft eine Kostenrechnung aufzustellen, wobei einerseits die Anlagekosten, anderseits die Betriebskosten eingesetzt werden. Indessen ist verschiedentlich darauf hingewiesen worden, dass nicht nur die reine Kostenrechnung wichtig ist,

sondern auch eine Reihe anderer Gesichtspunkte berücksichtigt werden müssen, wie z. B. Wasserbildung aussen am Gebäude oder auf Zwischenwänden zwischen kalten und warmen Räumen, relative Feuchtigkeit in den Räumen, Gewichtsverlust der Ware, Montagekosten usw. [74], [75], [76].

Es dürfte am vorteilhaftesten sein, wenn man zunächst die wirtschaftliche Isolierstärke [77] auf reiner Kostenbasis ausrechnet und darnach überprüft, wie sich die berechnete Isolierstärke auf die verschiedenen obengenannten Erscheinungen bzw. Grössen auswirkt. Erst dann, gegebenenfalls nach nochmaligem Prüfen, soll die Isolierstärke endgültig bestimmt werden.

Als Richtlinie für den Zusammenhang zwischen Gewichtsverlust und Isolierstärke mag dienen, dass in Räumen mit stiller Kühlung bei — 18 ° C, gemäss den Berechnungen von *Rjutov* [76], ein Gewichtsverlust von 0,00015 kg je kcal eingedrungene Wärme entsteht.

Für die Wirtschaftlichkeit einer Kühlhausisolierung ist auch die Form des Kühlhauses von Bedeutung. *Plank* [78] weist darauf hin, dass zwar die Würfelform in bezug auf die erforderliche Isoliermaterialmenge am vorteilhaftesten ist, jedoch mit Rücksicht auf andere Faktoren wie Gebäudekosten, innerer Transport usw. oft der Flachbau bevorzugt werden muss.

Bei der Berechnung der wirtschaftlichsten Isolierstärke darf man nicht übersehen, dass die Wärmeleitzahl der Isoliermaterialien infolge Feuchtigkeitsaufnahme allmählich ansteigt, wenn nicht ständig entfeuchtet wird. In einem von *Watzinger* [41] untersuchten Fall betrug die mittlere Wärmeleitzahl von Korkplatten nach etwa zweijährigem Betrieb 0,039 kcal/mh ° C und nach weiteren drei Betriebsjahren 0,048 kcal/mh ° C.

Für die Zeitfunktion der Wärmeleitzahl des Isoliermaterials gibt *Tenning* [79] auf Grund schwedischer Erfahrungen folgende Gleichung an:

$$\lambda_n = \lambda \left(1 + \frac{n}{c}\right)$$

Hierbei bedeuten:

λ_n = Wärmeleitzahl nach n Jahren Betrieb
λ = Wärmeleitzahl bei der Montage
n = Betriebszeit in Jahren
c = Konstante

Die Konstante c hängt ab vom Diffusionswiderstand der Sperrschicht und des Innenbelages der Kühlraumwand sowie von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Kühlraum und in dessen Umgebung. Auf Grund der Untersuchungen von *Bäckström* [80] an ausgeführten Isolierungen in Schweden setzt *Tenning* für die Konstante den Wert $c = 10$ ein, wenn die Sperrschicht aus einem doppelten Warmasphalt-Anstrich und der Innenbelag der Kühlraumwand aus Verputz oder ähnlichem dichten Material besteht. Dieser Wert gilt ferner unter der Voraussetzung, dass das in die Isolierung eingedrungene und dort kondensierte Wasser nicht gefriert.

Bei Gefrierräumen mit Temperaturen von — 15 ° C und tiefer besteht immer die Gefahr, dass das in die Isolierung eingedrungene Wasser zu Eis gefriert. In diesem Falle liegt der Koeffizient c zwischen 2,5 und 5.

Es gibt nach *Tenning* ausser einer wirtschaftlichen Isolierstärke auch eine wirtschaftliche Amortisationszeit, nach deren Ablauf es sich lohnt, die durchfeuchtete Isolierung durch eine trockene zu ersetzen. Als oberen Grenzwert der Wärmeleitzahl, bis zu dem ein Material mit günstigem Preis noch konkurrenzfähig ist, sieht *Cammerer* [81] den Wert 0,045 kcal/mh ° C an.

Es gibt Fälle, in denen eine Isolierung überhaupt nicht vorteilhaft zu sein braucht, wie z. B. dünne Rohre [82], bei denen der Aussenumfang durch die Isolierung das Vielfache des Rohrumfanges betragen würde. Auch bei Kunsteisbahnen lohnt es sich nicht immer, unter der Fahrbahnplatte eine Isolierung anzubringen. Im Laufe der Zeit dringt Wasser aus dem Erdreich in die Isolierung ein, weil die sich darunter befindliche Sperrschicht durch die Wärmeausdehnungsbewegungen der Platte allmählich zerstört wird. Dadurch wird die Isolierfähigkeit stark herabgesetzt. Ausserdem ist die Kältespeicherung im gefrorenen Erdreich unter der Fahrbahnplatte ein Vorteil. Aus diesem Grunde verzichtet man neuerdings auf eine Isolation der Kunsteisbahn-Fahrplatte.

Bei Transportgeräten ist es oft wichtiger, einen möglichst grossen Nutzraum zu haben, als an der erforderlichen Kälteleistung zu sparen. Bei einem Kühlschiff von 4000 BRT wird durch eine Erhöhung der Isolierstärke um 75 mm der Nutzraum bereits um 8 % vermindert [45]. Aehnlich verhält es sich bei Eisenbahnkühlwagen und gekühlten Strassenfahrzeugen, wo man heute eine dünnere Isolierung bei erhöhter Kälteleistung der Kältemaschine bevorzugt; denn eine grössere Kältemaschine braucht weniger Platz als eine stärkere Isolierung [83]. Gerade für die Transportkühlung ist es deshalb wichtig, vibrationsfeste Isolierstoffe mit geringer Wärmeleitzahl bei gleichzeitig geringem Gewicht zur Verfügung zu haben, welche Forderung zur Entwicklung der modernen Isolierstoffe wesentlich beiträgt.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. *E. Emblik*, Weinbergstrasse 129, Winterthur.

Literaturverzeichnis

[1] *B. Adamson* und *W. Tell:* Ekonomisk värmeisolering av byggnader. «Teknisk Tidskrift», Stockholm, Bd. 86 (1956), Nr. 31, S. 696.
[2] *B. Adamson:* Förrântning av förbättrad värmeisolering. «Teknisk Tidskrift», Bd. 87 (1957), Nr. 13, S. 293.
[3] *P. O. Persson:* Studiedag för isoleringsfrågor. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 16 (1957), Nr. 1, S. 27.
[4] *T. A. Widell:* Värmeisolerande vägg. «Teknisk Tidskrift», Bd. 87 (1957), Nr. 6, S. 117.
[5] *E. Griffiths:* Some recent developments in thermal insulation and instrumentation. «Comptes Rendus du IX Congrès International du Froid, Paris 1955», Tome I, S. 2003.
[6] *E. Schmidt:* Wärmeschutz durch Aluminiumfolien. «VDI-Z», Bd. 71 (1927), S. 1395.
[7] *N. Koshewin.* «Cholodilnaja Technika», Bd. 29 (1952), Nr. 4, S. 42. Referat in «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 6, S. 173.
[8] *E. Emblik,* Neuartige Isolierung eines Gefrierlagers in Schweden. «Zeitschr. f. d. ges. Kälte-Industrie», Bd. 50 (1943), S. 48.
[9] *Th. M. Elfving:* Moisture problems in low temperature railroad transportation. «Refrig. Engng.» Bd. 63 (1955), Nr. 6, S. 48.
[10] *L. Boman:* Kälteisolierstoff Wellit. «Kältetechnik», Bd. 2 (1950), Nr. 9, S. 211.
[11] *O. R. McIntire* und *D. W. McCuaig:* Styrofoam — a new thermal insulation. «Refrig. Engng.», Bd. 52 (1946), Nr. 3, S. 27.
[12] *F. Stastny:* Der neuartige Isolierstoff Styropor. «Kältetechnik», Bd. 7 (1955), Nr. 3, S. 75.
[13] *E. A. Edberg:* Expandable polystyrene beads, a new insulation material. «Refrig. Engng.», Bd. 64 (1956), Nr. 1, S. 38.
[14] Anon.: Le polystyrène cellulaire. «Revue Générale du Froid», Bd. 33 (1956), Nr. 3, S. 299.
[15] *K. Wiedemann:* Ein Beitrag zur Technologie der Polystyrol-Schaumstoffe. «Die Kälte», Bd. 10 (1957), Nr. 1, S. 11.
[16] *C. A. Buchanan.* «Refrig. Journ.» (Australien), Bd. 3 (1950), Nr. 11, S. 594, und Bd. 4 (1950), Nr. 1, S. 694, Ref. in «Kältetechnik», Bd. 4 (1952), Nr. 5, S. 124.
[17] *T. van Hiele, P. Noordzij, J. C. Tol* und *A. de Jong:* Wasserdampf- und gasdichte Isolierung von Kaltlagerräumen für Obst. «Kältetechnik», Bd. 7 (1955), Nr. 9, S. 262.
[18] *B. Pierre:* Spantens inverkan på isoleringen vid kyllast-fartyg. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 10 (1951), Nr. 2, S. 11, Nr. 3, S. 19.
[19] *O. Krischer:* Grundgesetze der Feuchtigkeitsbewegung in Trockengütern. «VDI-Zeitschr.», Bd. 82 (1938), Nr. 13, S. 373.
[20] *J. S. Cammerer* und *P. Görling:* Die Messung der Durchlässigkeit von Kälteschutzstoffen für Wasserdampfdiffusion. «Kältetechnik», Bd. 3 (1951), Nr. 1, S. 2.
[21] *J. S. Cammerer:* Bezeichnungen und Berechnungsverfahren für Diffusionsvorgänge im Bauwesen. «Kältetechnik», Bd. 8 (1956), Nr. 11, S. 339.
[22] *M. Bäckström:* Kältetechnik. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1953, S. 396.
[23] *C. Munters:* Moisture in walls of cold storage rooms. «Refrig. Engng.», Bd. 57 (1949), Nr. 8, S. 795.
[24] *J. S. Cammerer* und *W. Dürhammer:* Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitzahl von Korkplatten unterhalb und oberhalb von 0° C. «Kältetechnik», Bd. 7 (1955), Nr. 7, S. 195.
[25] *J. S. Cammerer:* Untersuchungen über die Durchfeuchtung von Kühlhausisolierungen aus Korkplatten. «Kältetechnik», Bd. 7 (1955), Nr. 9, S. 258, und Nr. 10, S. 296.
[26] *W. F. Cammerer:* Die Untersuchung von Diffusionsvorgängen in Kühlraumwandungen mit Hilfe elektrischer Modellversuche. «Kältetechnik», Bd. 3 (1951), Nr. 8, S. 197.
[27] *C. J. Moss* und *P. Stevenson:* Insulation of refrigerating plant with rubberized bitumen vapour seal. «Modern Refrigeration», Bd. 59 (1956), Nr. 1, S. 38.
[28] *E. R. Hallowell:* The Alford Refrigerated Warehouses. «Refrig. Engng.», Bd. 57 (1949), Nr. 3, S. 226.
[29] *W. Tamm:* Das grösste Kühlhaus der Welt. «Kältetechnik», Bd. 1 (1949), Nr. 6, S. 129.

[30] *P. Norbäck:* Besuch des Kühlhauses der Alford Refrigerated Warehouses, Dallas, Texas. «Kältetechnik», Bd. 4 (1952), Nr. 3, S. 69.
[31] *O. Krischer,* Diskussionsbeitrag zum Thema «Feuchtigkeitswanderung in isolierten Kühlraumwänden». «Kältetechnik», Bd. 3 (1951), Nr. 7, S. 162.
[32] Anon.: Dry wall construction halts hot asphalt hazard. «Refrig. Engng.», Bd. 63 (1955), Nr. 7, S. 58.
[33] *E. R. Queer* und *E. R. McLaughlin:* Performance of vapor vented insulation in a large freezer warehouse. «Refrig. Engng.», Bd. 64 (1956), Nr. 1, S. 29.
[34] *J. S. Cammerer:* Der Wärme- und Kälteschutz, 3. Auflage, Verlag J. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951.
[35] *P. F. McDermott:* Moisture migration. «Refrig. Engng.», Bd. 42 (1941), Nr. 2, S. 103.
[36] *G. G. Lilley:* Moisture penetration. «Refrig. Engng.», Bd. 60 (1952), Nr. 2, S. 143.
[37] *H. Schaschek:* Bewegungsmechanismus von Wasserdampf in porösen blattförmigen Materialien. «Chemie-Ing.-Technik», Bd. 28 (1956), Nr. 11, S. 698.
[38] *W. Vollmer:* Der Transport von Gasen und Dämpfen in Papier. «Chemie-Ing.-Technik», Bd. 26 (1954), Nr. 2, S. 90.
[39] *P. O. Persson:* Bericht über die Sitzung der Comm. 2 auf dem IX Congrès International du Froid, Paris 1955. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 14 (1955), Nr. 6, S. 77.
[40] *G. B. Wilkes:* Heat Insulation. Verlag Wiley & Sons, Inc., New York 1950.
[41] *A. Watzinger:* Die Feuchtigkeitswanderung in isolierten Kühlraumwänden. «Kältetechnik», Bd. 3 (1951), Nr. 6, S. 134, und Nr. 7, S. 159.
[42] *A. Watzinger:* Forsök angående kjöleisolering. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 11 (1952), Nr. 4, S. 33.
[43] *N. C. Toftegaard, A. Ahlqvist* und *P. O. Persson:* Temperaturfält och värmeflöde i på olika sätt isolerade väggar. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 13 (1954), Nr. 2, S. 13.
[44] *D. Ahlqvist:* Konvektion i isoleringsmaterial. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 11 (1952), Nr. 5, S. 47.
[45] *B. Folin* und *G. Sandberg:* Glaswatte-Isolierung auf Schiffen. «Kältetechnik», Bd. 4 (1952), Nr. 12, S. 322, und Bd. 5 (1953), Nr. 3, S. 78.
[46] *G. Lundborg:* Glaswatte-Isolierung auf Schiffen. «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 3, S. 78.
[47] *D. Ahlqvist:* Konvektion i isoleringsmaterial. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 11 (1952), Nr. 6, S. 64.
[48] *P. O. Persson: Isoleringsundersökningar.* «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 13 (1954), Nr. 5, S. 73.
[49] *F. Feller:* Le liège expansé pur et les termites. «Revue Générale du Froid», Bd. 34 (1957), Nr. 1, S. 75.
[50] *G. Clément:* Essais d'attaque par les termites d'un morceau de liège expansé. «Rev. Gén. du Froid», Bd. 34 (1957), Nr. 1, S. 77.
[51] *S. W. Eby* und *R. L. Collister:* Insulation in refrigerated transportation body design. «Refrig. Engng.», Bd. 63 (1955), Nr. 7, S. 50.
[52] Anon.: Isolierung durch Isoschaum. «Die Kälte», Bd. 9 (1956), Nr. 12, S. 424.
[53] Anon.: Insulating material. «Refriger. Engng.», Bd. 60 (1952), Nr. 10, S. 1100. Ref. in «Kältetechnik», Bd. 6 (1954), Nr. 1, S. 10.
[54] *E. Simons:* In place test studies of insulated structures. «Refrig. Engng.», Bd. 63 (1955), Nr. 2, S. 40.
[55] *J. S. Cammerer:* Messtechnische Fortschritte im Kälteschutzwesen. «Kältetechnik», Bd. 8 (1956), Nr. 4, S. 121.
[56] *E. Schmidt:* Ein neuer Wärmeflussmesser und seine praktische Bedeutung in der Wärmetechnik. «Mitt. Forschungsheim für Wärmeschutz», München 1923, Nr. 3.
[57] *E. Emblik:* Kernphysikalische Verfahren zur Bestimmung der Feuchte. «Kältetechnik», Bd. 9 (1957), Nr. 1, S. 19.
[58] *O. Prinzing:* Messungen an der Dehydrieranlage des Kühlschiffes «Proteus». «Hansa», Bd. 89 (1952), Nr. 11. Referat in «Kältetechnik», Bd. 6 (1954), S. 37.
[59] *C. Munters:* Fukt i kylrumsväggar. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 9 (1950), Nr. 2, S. 33, und Nr. 3, S. 55.
[60] *C. Munters:* Le problème de l'humidité dans les isolations frigorifiques. «Revue Gén. du Froid», Bd. 31 (1954), Nr. 1, S. 59.
[61] *T. Harsem:* Minikay-systemet. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 13 (1954), Nr. 1, S. 2.
[62] *P. Clément:* Les techniques nouvelles d'isolation. «Revue Gén. du Froid», Bd. 32 (1955), Nr. 2, S. 137.
[63] *O. D. Colvin* und *H. H. R. Niemann:* Improved cold storage insulation through dehumidification. «Modern Refrign.», Bd. 58 (1955), Nr. 7, S. 253.
[64] *G. Vassogne.* «Revue Pratique du Froid», Bd. 10 (1954), Nr. 5, S. 26. Referat in «Kältetechnik», Bd. 7 (1955), Nr. 2, S. 59.
[65] Siehe Literaturzitat 22, S. 424.
[66] *W. H. Westphal:* Physik, 16. und 17. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953, S. 161.
[67] *Gröber/Erk/Grigull:* Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1955, S. 137.
[68] *K. Linge:* Kälteisolierung in Amerika. «Kältetechnik», Bd. 1 (1949), Nr. 5, S. 105.
[69] *W. A. Kuenzli:* Insulation choice for a home refrigerator. «Refrig. Engng.», Bd. 55 (1948), Nr. 6, S. 560.
[70] *E. Schmidt:* Versuche über das Wärmeleitvermögen evakuierter Pulver (Vortragsauszug). «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 8, S. 237.
[71] *G. Stüber* und *H. J. Trauer:* Anwendung der Vakuum-Pulverisolierung beim Transport von Gasen in flüssiger Phase. «Die Technik», Bd. 11 (1956), Nr. 11, S. 779.
[72] *A. van Itterbeek, H. Myncke* und *L. de Greve:* Mesures récentes faites au laboratoire cryogénique de Louvain sur la conductibilité thermique des matériaux isolants. «Comptes Rendus de IX Congrès Internat. du Froid, Paris 1955», Tome I, S. 2019.
[73] *W. Leidenfrost:* Ueber die Wärmedämmwirkung feinkörniger Pulver in verdünnten Gasen. «VDI-Z.», Bd. 97 (1955), S. 1235.
[74] *W. Tamm:* Kältepreis und wirtschaftliche Isolierstärke von Raumkühlanlagen. «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 3, S. 62.
[75] *Th. E. Schmidt:* Bestimmung des Kostenminimums und seiner wirtschaftlichen Bedeutung. «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 3, S. 66.
[76] *J. Badilkes:* Die Wahl der wirtschaftlichen Isolierstärke bei Kühlhäusern. «Kältetechnik», Bd. 5 (1953), Nr. 3, S. 74.
[77] Siehe Literaturzitat 22, S. 435.
[78] *R. Plank:* Vergleich der Kosten für die Isolierung einstöckiger und mehrstöckiger Kühlhäuser. «Kältetechnik», Bd. 3 (1951), Nr. 8, S. 205.
[79] *K. B. Tenning:* Kylrumsisoleringars ekonomiska amorteringstid. «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 10 (1951), Nr. 4, S. 25.
[80] *M. Bäckström:* Isoleringsfrågor (Vortragsauszug). «Kylteknisk Tidskrift», Bd. 10 (1951), Nr. 4, S. 16.
[81] *J. S. Cammerer:* Die physikalisch-technischen Eigenschaften der gebräuchlichen Kälteschutzstoffe. «Kältetechnik», Bd. 2 (1950), Nr. 11, S. 270.
[82] *E. Emblik:* Einfluss der Isolierung auf den Wärmedurchgang bei dünnen Rohren. «Kältetechnik», Bd. 4 (1952), Nr. 12, S. 328.
[83] *H. Pollak:* Refrigerated road transport. «World Refrigeration», Bd. 7 (1956), Nr. 3, S. 139.

Der Säulenpalast von Mitla, ein Beispiel mexikanischer Denkmalpflege

DK 72.031.84

Von **F. Largiadèr,** dipl. Arch., Riehen (Basel)

Hierzu Tafeln 5/6

Die Vorstellung aus Coopers Lederstrumpf, alle Indianer hätten als Jäger und Nomaden gelebt, ist noch weit verbreitet. Altindianische Ruinen aus Mittel- und Südamerika lösen immer noch ungläubiges Staunen aus. Neuere Forschungen haben ergeben, dass auch die Indianerstämme des südöstlichen Nordamerika ursprünglich feste Wohnsitze hatten. Verlassene Höhlenwohnungen in diesen Staaten beweisen diese Tatsache. Heute sind die Indianer in unfruchtbare Gebiete verwiesen; sie führen ihre Tänze in Kriegsbemalung im Rahmen der Fremdenindustrie auf.

Hier beschäftigt uns die Bauweise der mexikanischen Indianer, die nebst den peruanischen Inkas höchste Kultur erreichten. Gold und Silber war den Indianern bekannt, Eisen hingegen nicht; die gefundenen Werkzeuge beweisen das. Die Kultur war also steinzeitlich, was angesichts der komplizierten Steinhauerarbeit der Bauwerke erstaunlich ist. Auch an Fresken und Gipsreliefs fehlte es nicht, wenn auch hiervon nur noch wenig übriggeblieben ist. Die freigelegten Ruinen haben meistens sakralen Charakter, nur selten profanen. Jene bestehen in der Regel aus Erd- oder Stufenpyramiden, diese sind Erdgeschossbauten auf hohen Sockelterrassen. Die Profanbauten werden als Paläste von Regierenden gedeutet.

Seit etwa 20 Jahren wird von den Forschern, die in den Urwäldern von Yucatán und Chiapas auf Fliegeraufnahmen überwachsene Bauwerke entdeckten und ihre Freilegung veranlassten, viel Aufsehen erregt. Darüber gerieten frühere