

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 32

Artikel: Entwicklung auf dem Gebiet der Kälteerzeugung: Peter Grassmann zum 70. Geburtstag gewidmet
Autor: Trepp, Christian
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73429>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Entwicklung auf dem Gebiet der Kälteerzeugung

Peter Grassmann zum 70. Geburtstag gewidmet

Von Christian Trepp, Zürich¹⁾

Ich habe das Thema Kälteerzeugung als Teil der Kältetechnik für die Einführungsvorlesung aus zwei Gründen gewählt. Zum Ersten wird sie oft als Teil des grossen Fachgebietes «Verfahrenstechnik» betrachtet, von dem sie sich sehr gut für eine allgemein verständliche Darstellung eignet. Sie ist, wenigstens die in höheren Temperaturbereichen, eine allgemein verstandene Technik. Wir wissen alle, dass man heute Kälte in zusagender Menge und genügender Verlässlichkeit für fast beliebige Temperaturniveaus kaufen kann.

Der zweite Grund ist, dass wir im Gebiet der Kälteerzeugung auf 100jährige industrielle Erfahrung zurückblicken, wir haben es also mit einer *etablierten Kunst*, d.h. einer *technisch ausgereiften Disziplin*, zu tun. Gerade in solchen Gebieten treten besondere Probleme für die Weiterentwicklung auf, die auch auf anderen Fachgebieten ähnlich sind, wenn sie dort auch zu verschiedener Zeit auftauchen mögen.

Ich habe meinen Vortrag in drei Teile gegliedert,

- zunächst werde ich einen Überblick über den heutigen Stand der Technik geben,
- dann die Anfänge der Entwicklung skizzieren
- und zum Schluss noch Aussichten für die Weiterentwicklung etwas beleuchten.

Selbstverständlich kann es sich bei dieser allgemeinen Gebietsbeschreibung nicht um eine vollständige Darstellung handeln und selbst zu einzelnen Punkten mögen verschiedene Ansichten herrschen, die ja im wesentlichen von den jeweiligen Standpunkten stark beeinflusst sind. Ich kann hier nur meine persönlichen Ansichten zum Thema vortragen.

Das Gesamtgebiet der Kältetechnik und somit auch das der Kälteerzeugung kann in verschiedenste Bereiche unterteilt werden; ich will hier nur eine Einteilung in zwei Gruppen machen, nämlich in die *Tiefemperaturtechnik unter 120 K* (etwa -150°C) und das *darüberliegende Gebiet das zunächst einmal von 120–310 K* (-153 bis 37°C) reichen soll. Die 120 K ist eine etwas willkürlich gewählte Temperaturgrenze, die sich aber in der Praxis bewährt hat, da sie Gebiete in welchen verschiedene Kälteerzeugungsverfahren sinnvoll angewendet werden, voneinander abgrenzt.

Der Temperaturbereich von 120–310 K hat keinen besonderen Namen und ich möchte ihn hier als Gebiet der «*Gebrauchskälte*» bezeichnen. Es wird, trotzdem auf diesem Gebiet in letzter Zeit keine spektakulären Erfolge und Entwicklungen vorzuweisen sind, den Hauptteil meines Vortrages ausmachen.

¹⁾ Neufassung der Einführungsvorlesung an der ETHZ vom 15. Juni 1976.

Das schöne und interessante Gebiet der Tiefkälteerzeugung – für welches sich viele begeistern und erwärmen können – wird hier übergangen.

Wir machen zunächst die Bestandesaufnahme zum *heutigen Stand der Technik*.

Wir kennen einige grosse Gruppen der Kälteanwendung

- im *Haushalt* (Kühlschränke für 0°C , Kühltruhen für -30°C)
- in der *Klimatechnik*
- *Lebensmittelkühlung* für Behandlung, Transport, Lagerung
- *Prozesskühlung* in der chemischen und verwandten Industrie.

Für die beiden ersten Sachgebiete werden ganz spezifische Geräte gebaut und als Einheitsgeräte in grossen Serien angefertigt (Kühlschränke, -truhen; Klimageräte usw.).

Man könnte sich vorstellen, dass gerade im dritten und vor allem im vierten Gebiet noch besonders interessante oder schwierige Entwicklungsaufgaben liegen. Konsultieren wir dazu einen Fachmann auf dem Gebiet des Chemieanlagebaues. Im Buch von *Rase und Barrow* [1] – einem Werk von 692 Seiten über «Project Engineering of Process Plants» – ist der «Refrigeration» etwa eine viertel Seite gewidmet. Darin finden wir den bemerkenswerten Satz:

«In fact, the only difficult phase of refrigeration calculations is mastering the terminology of the industry... A ton of refrigeration is an arbitrary unit which is equivalent to the removal of 3517 W heat of the system.»

Dies ist sicher keine besonders stimulierende Auskunft, zumindest nicht für junge Forscher. Fragen wir nun doch nach beim Altmeister der deutschen Kältetechnik, bei *Rudolf Plank* [2]. Er schreibt in der Einleitung zum 1. Band eines zwölfbändigen Handbuches der Kältetechnik u.a. «Viele Kälteingenieure beherrschen nur einen Ausschnitt ihres Faches und sind nur einseitig orientiert. Eine solche Beschränkung ist ganz besonders bedenklich, wenn sie auf einem typischen Grenzgebiet geübt wird, wie es die Kältetechnik zweifellos darstellt.»

Erzeugung von «Gebrauchskälte»

Wir sehen also, dass nicht speziell die Kälteerzeugung besondere Probleme stellt, sondern vielmehr die Kälteanwendung von Bedeutung ist. Natürlich muss man in der Lage sein, die Leistung von Kälteanlagen richtig zu berechnen – und das ist nach *Rase & Barrow* unproblematisch, wichtig ist vor allem die richtige Wahl der kältetechnischen Verfahren, d.h. ihrer Anpassung an die zu kühlenden Objekte.

Für die Erzeugung der «Gebrauchskälte» kennen wir heute eine Vielzahl von Verfahren, aber nur zwei sind für die Technik von Bedeutung:

Die *Kompressionskältemaschine* (KKM) mit motorgetriebenem Kompressor.

Die *Absorptionskältemaschine* (AKM), Antrieb durch Temperaturgefälle zwischen Wärmereservoir. Bild 1 und Bild 2 zeigen durchaus *einfache* Verfahrensschemas. Sie werden mit der Einführung von Prozessverbesserungen zwar unübersichtlicher – bleiben aber doch noch recht einfach.

Kältemittelgruppen

Der überwiegende Teil der Anlagen arbeitet mit ganz spezifischen Kältemittelgruppen.

die KKM < NH_3 für Grosskälteanwendungen
Halogenkohlenwasserstoffe für Klimakälte

die AKM < $\text{NH}_3 / \text{H}_2\text{O}$ bzw. $\text{NH}_3, \text{H}_2 / \text{H}_2\text{O}$
 $\text{H}_2\text{O} / \text{LiBr}$

Geschichtlicher Rückblick

Wir gehen nun in der Geschichte um 200 Jahre zurück. Da begegnen wir dem genialen *Joseph Black*. Er hat die damaligen Kenntnisse über Verdampfungsvorgänge klar dargestellt und vielen ein besseres Verständnis derselben ermöglicht. Um diese Zeit begann überall ein Wetteifern um die *Verflüssigung der permanenten Gase*. Es war ein spannendes Rennen, an dem sich vor allem die Physiker beteiligten. Diese Entwicklung wollen wir hier nicht im einzelnen verfolgen.

Aus der Geschichte der Kälteerzeugung kann man sich zwei Daten merken: Vor etwa 130 Jahren (zwischen 1840 und 1850) wurden die wesentlichen Grundsteine zur klassischen Thermodynamik gelegt; die Technik der Kälteerzeugung stammt aus den Jahren 1855–1875. Eine ganz ausserordentliche Leistung auf dem Gebiet der Kälteerzeugung vollbrachte gegen Ende der fünfziger Jahre des vorigen Jahrhunderts der Franzose *Ferdinand Carré*. Es ist auch heute noch interessant und lohnend, sich mit seinen Schriften auseinanderzusetzen.

Die Absorptionskältemaschine

Nachdem sein Bruder Edmond eine funktionstüchtige Absorptionskälteanlage mit *Schwefelsäure* als Absorptionsmittel konstruiert und dann in grösserer Anzahl hergestellt hatte, wählte Ferdinand als Kältemittel *Ammoniak*, das er als erster für die Kälteerzeugung verwendete. 1859 meldete Carré sein Patent auf die Ammoniakabsorptionskältemaschine an (Bild 3). Diesem liess er dann in den nächsten drei Jahren mehr als ein Dutzend Zusatzpatente folgen.

Carré hat in seinen Zusatzpatenten eine Fülle von Ideen zu Papier gebracht und mit vielen Zeichnungen erläutert. Es sind Zeichnungen, die nicht nur die Prinzipfunktion darstellen, sondern solche, die in den damaligen Werkstätten ohne Umweg gleich zur Ausführung von Anlagen und Maschinen verwendet werden konnten. Er beschrieb Membrankompressoren, Verdampfer, Kondensatoren, Ventile – kurz alle notwendigen Elemente moderner Kälteanlagen, auch Sicherheitseinrichtungen – Vorrichtungen wie sie dann einige Jahrzehnte später wiedererfunden und in die Kältetechnik allgemein eingeführt

wurden, all das in Zusatzpatenten zur Absorptionskältemaschine.

Zur Absorptionskälteanlage selbst erfand er gleich auch die wesentlichen Prozessverbesserungen und seine durch ihn gebauten Anlagen sind auch heute noch – abgesehen von einigen Ausführungsdetails – zu den modernen zu zählen.

Die Kompressionskältemaschine oder Kaltdampfmaschine

Die Entwicklung der Kompressionskältemaschine, auch Kaltdampfmaschine genannt, verlief folgendermassen: Eine erste Beschreibung des idealen, mittels mechanischer Energie angetriebenen Kältekreislaufes finden wir in dem berühmten Werk von *Sadi Carnot* (1824) in seinen Betrachtungen über die Umwandlung von Wärme in Arbeit im Satz:

«Réciproquement partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température, il est possible d'occasionner une rupture d'équilibre dans le calorique.»

Offensichtlich wollte Carnot damit nicht eine Anlage beschreiben, mit der künstlich Kälte erzeugt werden kann, sondern ausdrücken, dass der – heute noch seinen Namen tragende Kreisprozess zur Gewinnung von mechanischer Arbeit – umkehrbar, also *reversibel* verlaufen solle.

Das erste Patent für Kältemaschinen, datiert aus dem Jahr 1834, wurde *Jakob Perkins* erteilt. Perkins hat die Maschine in allen Einzelheiten beschrieben und dargestellt, ohne jedoch sich für ein spezielles Kältemittel zu entscheiden. In den folgenden Jahren wurden von mehreren Konstrukteuren Kaltdampfmaschinen mit verschiedensten Kältemitteln – die aber durchwegs unsympathische Eigenschaften hatten – entworfen und gebaut.

Der *technische Durchbruch in Europa* gelang 1876 – vor genau 100 Jahren – *Karl Linde*. Er entschied sich – nach einigen anderen Versuchen – letztlich für Ammoniak als Kältemittel und hatte mit dem nach seinen Plänen gebauten Kompressor einigen Erfolg. Ein Jahr später baute er den Kompressor um – er wählte eine liegende, doppelt wirkende Ausführung. Diese Maschine wurde zum *Standardtyp* und wurde schliesslich von recht vielen Firmen nachgebaut.

Etwa zur gleichen Zeit begann in den USA *David Boyle* mit dem Bau von NH_3 -Kompressoren. Nach anfänglich guten Erfolgen aber ging das Unternehmen schon bald wieder ein.

Karl Linde hatte sein theoretisches Rüstzeug am neugegründeten *Polytechnikum von Zürich* geholt. Nach mässiger Aufnahmeprüfung im Jahre 1861 wurde er provisorisch an die Schule aufgenommen, entwickelte sich aber dann zu einem ausgezeichneten Studenten. Er führte jedoch sein Studium nicht ganz zu Ende, denn während des letzten Semesters kam es zu Unstimmigkeiten zwischen Direktion und Studentenschaft. Linde verliess deshalb die Schule ohne Diplomabschluss.

Die beiden heute wesentlichen Kältekreisläufe wurden also vor gut 100 Jahren gebaut und in die Technik eingeführt. Beide trugen schon fast alle Merkmale der heute als modern

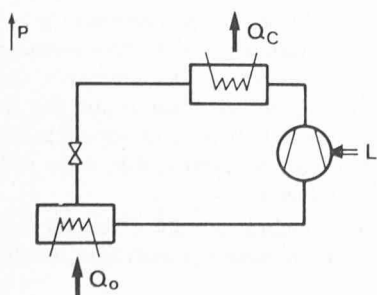


Bild 1. Schema einer einfachen Kompressionskältemaschine (links)

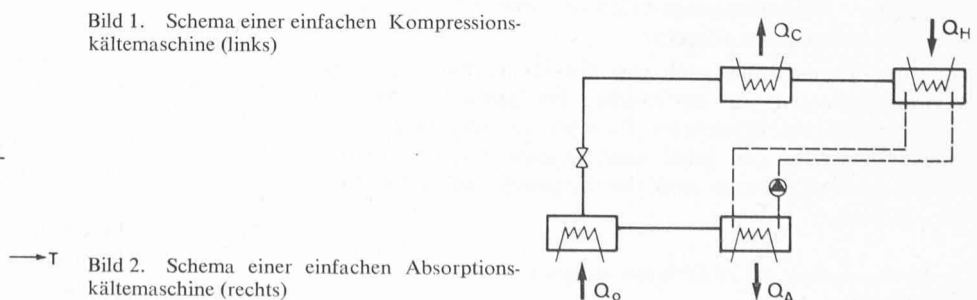
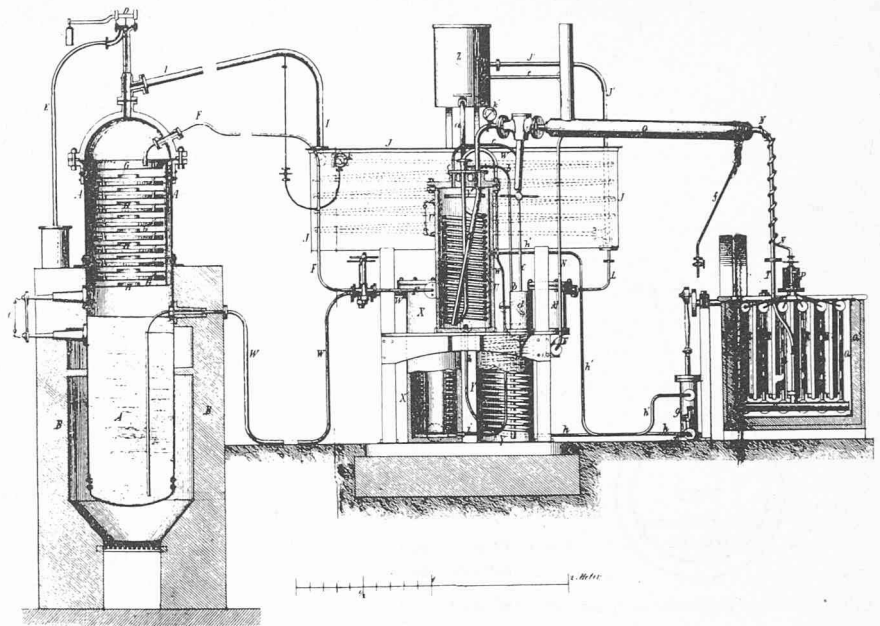


Bild 2. Schema einer einfachen Absorptionskältemaschine (rechts)

Bild 3. Carrés Apparat zur kontinuierlichen Eisfabrikation



geltenden Anlagen, liessen also der Weiterentwicklung nur noch wenig Spielraum. Trotzdem sind viele Anstrengungen unternommen worden, auch andere Kühlverfahren und Systeme zu entwickeln und es wurden auch viele Erfindungen gemacht. Als Beispiel dafür mag die Kaltluftmaschine dienen:

Die Kaltluftmaschine

Schon im Jahr 1864 hat Kirk eine Kaltluftmaschine mit dem 1827 von Stirling erfundenen Kreisprozess gebaut. Es war eine recht gute Maschine mit völlig unproblematischem Kältemittel – mit Luft. Sie konnte aber mit der Kaltdampfmaschine nicht konkurrenzieren, denn sie war bezüglich Betriebssicherheit und Leistungsaufwand beträchtlich unterlegen.

90 Jahre später entstand bei der Firma Philips – als Nebenprodukt zu der Entwicklung der Stirlingmaschine als Heissgasmotor – eine Einrichtung zur problemlosen *Verflüssigung vieler Gase*, insbesondere der Luft. Diese Maschine hat einige Ähnlichkeit zu der von Kirk entwickelten, sie ist jedoch betriebssicherer und wird nun in dem für sie günstigsten Temperaturbereich von etwa -100 bis -200 °C verwendet. Auch hier kam es offensichtlich auf die richtige Wahl des Einsatzbereiches des Verfahrens an.

Die beiden Hauptverfahren: AKM und KDM. Für die beiden Hauptverfahren aber, die AKM von Carré und die KDM von Perkins, Linde und anderen folgten nun 100 Jahre der Weiterentwicklung, teils Einführung von Neuerungen, zum Teil Produktverbesserungen. In der Kühltischtechnik wurde Integration des Antriebes mit dem Kompressor zu hermetischen Aggregaten vollzogen. Es sind alles Aggregate, die vor allem von der Kleinkälteindustrie verwendet werden. Einige wesentliche Stationen in dieser langen Entwicklungsperiode sind:

- um 1930 die Einführung der *Halogenkohlenwasserstoffe* als Kältemittel (initiiert in den USA durch *du Pont* und *Carré*), damit Verwendung von Turbokompressoren und Verwendung der Direktverdampfung in Klimaanlage;
- Einführung des druckausgleichenden Gases in Absorptionskältemaschinen durch *Platen* und *Munters*;
- Verbesserung der Theorie der Absorptionskälteanlagen durch *Altenkirch* [3] und neuerdings *Stierlin* [4].

Natürlich sind auch heute Fortschritte im einzelnen zu verzeichnen, insbesondere beim Bau von Komponenten. Sie

mögen nicht besonders spektakulär erscheinen, da das ganze Gebiet sich ja nur in allgemeiner langsamer Entwicklung befindet und sie werden vor allem für den Aussenstehenden nur dann offenkundig, wenn der technische Stand an zwei Jahrzehnte auseinander liegenden Daten verglichen wird.

Wir haben nun gesehen, wie sich die Kältetechnik oder präziser die Kälteerzeugungstechnik im Laufe der Zeit entwickelt hat und wir kennen auch den heutigen Stand. Uns müssen jetzt auch die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten interessieren. Wir sollten deshalb jetzt versuchen, eine Prognose zu machen. Zwar warnt uns davor ein chinesisches Sprichwort, das etwa folgendermassen lautet: «Die Prognose ist schwierig, insbesondere weil es sich dabei um die Zukunft handelt.»

Versuchen wir also aus der Vergangenheit zu lernen: Im Zuge der Entwicklung der Kältemaschinen konnte wiederholt festgestellt werden, dass bestimmte Bauarten und sogar grosse neue Anwendungsgebiete erst dann wirtschaftliche Bedeutung erlangten, wenn dafür das bestgeeignete Kältemittel gefunden war. So konnten sich die Kaltdampfmaschinen gegen die weniger wirtschaftlichen Kaltluftmaschinen erst durchsetzen, nachdem der sehr feuergefährliche Äthyläther durch Ammoniak ersetzt worden war.

Der *Siegeszug des Turbokompressors* setzte erst ein, nachdem die nicht brennbaren, nicht gesundheitsschädlichen *Freone* gefunden waren und sie waren es auch, welche die grosse Entwicklung der Klimatechnik ermöglichten.

Die Absorptionskältemaschinen sind ein weiteres Beispiel für die Abhängigkeit des Erfolges eines Kältemaschinensystems von der passenden Wahl der Arbeitsstoffe. Erst als man das Kältemittel Ammoniak durch Wasser absorbieren liess, konnte die Leistung solcher Maschinen beliebig gesteigert werden. Sie erwiesen sich besonders dort am Platze, wo billige Heizenergie zur Verfügung stand.

Für die kleinsten Einheiten im Haushalt und Gewerbe haben Absorptionsmaschinen erst Bedeutung erlangt als es gelang, sie bewegungslos zu bauen. Die Beispiele könnten noch vermehrt werden; sie zeigen uns, dass in der Vergangenheit offensichtlich die jeweilige Wahl des besonderen Kältemittels für den Fortschritt von entscheidender Bedeutung war. Heute verfügen wir aber über eine beträchtliche Anzahl von Kältemitteln und verstehen auch die Kreisprozesse, mit denen man Kälte erzeugen kann.

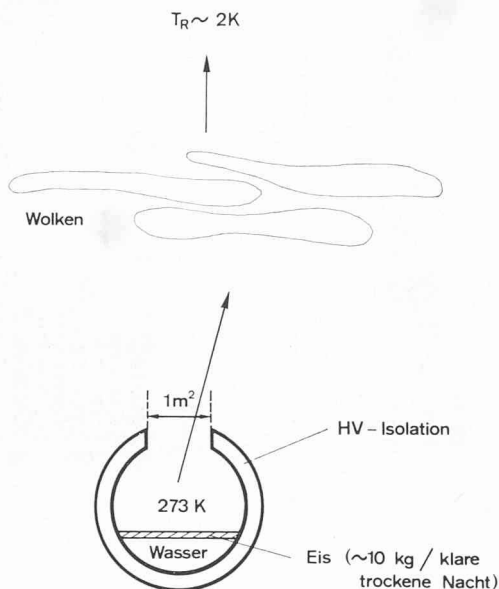


Bild 4. Strahlungsaustausch mit dem Weltall

Was soll die Kältetechnik an der Hochschule?

Wir sollten an dieser Stelle nun noch eine Betrachtung darüber anstellen, was denn ein Fachgebiet Kältetechnik, bei dem es sich nun offensichtlich um eine ausgereifte, technische Disziplin handelt, an einer Hochschule überhaupt soll. Es ist wohl eine ausgereifte Disziplin, aber die Schule kann doch noch wesentliche Beiträge leisten.

Zunächst solche auf dem Gebiet der Lehre. Einmal ist die Wissensvermittlung allgemein von Bedeutung, dann aber gehört ja die Kältetechnik zum grossen Gebiet der Wärmetechnik und hat – sehr zum Missfallen vieler Studenten – als Fundament die *technische Thermodynamik*.

Bei der Besprechung der Prozesse zur Kälteerzeugung, also von Prozessen, die nicht von selbst ablaufen, kann sehr anschaulich der Unterschied von *Energie* und *Exergie* gezeigt und geübt werden. Dazu ein einfaches Beispiel, das ich von meinem Vorgänger im Amt, Prof. Dr. Peter Grassmann, übernommen habe:

Der Besitzer einer grossen Kälteanlage stellt fest, dass ein Nachbar eine kalte Leitung abgeändert hat und zur Kühlung seines Weinkellers verwendet. Er bezichtigt ihn des Energie-diebstahles und verklagt ihn beim Kadi. Dieser erkundigt sich und belehrt den Kläger, dass ihm der Nachbar ja aus seinem Weinkeller Wärme, also Energie *geliefert* habe und dass er demzufolge die Klage ablehnen müsse. Der sogenannte Dieb hat eben Exergie genommen, auch wenn er Energie geliefert hat.

Der Begriff «Energie» umfasst sämtliche Energieformen und nimmt keine Rücksicht darauf, ob sie dem Menschen selbst dienbar sei. Die «Exergie» hingegen gibt uns an, welcher

Betrag irgendeiner Energieform imstande sein kann, dem Menschen in seiner Umgebung Dienste zu leisten.

Man kann im weiteren die Ausbildung in Kältetechnik als eine *Ergänzung zum verfahrenstechnischen Apparatebau mit starker Betonung der Maschinenbautechnik* auffassen. Ich meine, dass man insbesondere in der Verfahrenstechnik davor warnen muss, ganze Maschineneinheiten als «black boxes» zu betrachten. Es ist sicher von Vorteil, wenn die Verfahreningenieure die Grundvorgänge in Maschinen kennen, vor allem um ein gutes Verständnis für das Verhalten unter geänderten Betriebsbedingungen zu erhalten.

Wie aber steht es an der Hochschule mit der *Forschung* auf dem Gebiet der Kältetechnik? Um diese Frage zu beantworten, betrachten wir die Entwicklungsmöglichkeiten der Kältetechnik.

Entwicklungsmöglichkeiten

Neben «Produktverbesserungen», die mit ändernder Technik sich Herstellern als Daueraufgabe gestellt haben, kann man sich etwas allgemeiner für die Weiterentwicklung der «Gebrauchs»-Kältetechnik (im hohen Temperaturbereich) die Betätigung auf folgenden Arbeitsgebieten vorstellen:

- Entwicklung von thermischen Prozessen, bei welchen Kühlung vorteilhaft sein könnte, z.B. in der Lebensmitteltechnik, für die Abwasserbehandlung.
- Standardisierung von Komponenten und Anlagen.
- Suche nach neuen Kältemitteln.
- Anwendung der Verfahrensschemas der Kältetechnik auf anderen Gebieten.

Standardisierungsprobleme

Dieser Punkt ist eine Aufgabe, die im wesentlichen von der *Industrie* zu lösen – oder wenigstens zu definieren ist. Vergleichen wir den Stand der Kältetechnik in verschiedenen Gegenden der Erde miteinander, so kommen wir zum Schluss, dass die Lösung der Standardisierungsprobleme bisher den amerikanischen Firmen wesentlich besser gelungen ist als den europäischen.

Sicher sind für diesen Unterschied mehrere Ursachen verantwortlich – aber wenigstens einmal dürfte die Schuld nicht beim unterschiedlichen Masssystem liegen. Sicher hat besonders das Marktvolumen einen beträchtlichen Einfluss auf den Grad der Standardisierung. Daneben aber scheint mir noch besonders interessant der Unterschied im *Einsatz von Ingenieuren in der sogenannten Marketingtätigkeit*. Diese ist in den US eine Tätigkeit mit grossem Gewicht. Sie wird sehr ernst genommen und spielt sich meines Wissens immer unter Einbezug der Ingenieure von Forschung und Entwicklung ab. Für Europa hingegen ist festzustellen, dass oft als äusseres Zeichen der Modernisierung, der Sparte Verkauf noch ein Anhängsel Marketing angegliedert wird, eine Stelle, die in dieser Organisationsform wirkungslos bleibt, denn meist kommen dabei die Entwicklungsingenieure nicht mehr zum Zuge. Dieser Unterschied der Organisationsform hat meines Erachtens einen

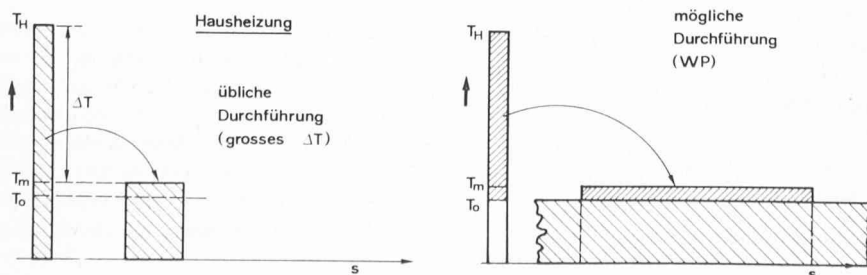


Bild 5. Hausheizung. Verschwendung (links) bzw. Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie (rechts)

grossen Einfluss auf den Unterschied im Vermögen, Probleme zu formulieren.

Von der Hochschule kann innerhalb der Standardisierungsaufgabe bei der Komponentenentwicklung eine gewisse Mithilfe erwartet werden, nämlich dort, wo es um die Ausmessung von Einzeleffekten und die Beschaffung von exakten Berechnungsgrundlagen geht.

Suche nach neuen Kältemitteln

Die Suche nach neuen Kältemitteln soll zunächst im Hinblick auf spezielle Anwendungen unternommen werden. Es gehören hierher die Untersuchungen von Prozessen, die mit Gemischen von Kältemitteln arbeiten. Es lassen sich mit solchen viele Kältemaschinen energetisch günstiger betreiben, weil die Wärmeaustauschverluste verringert werden können. Wir werden dieses Gebiet an unserem Institut als Forschungszweig bearbeiten. (Vielleicht wird die Ausdehnung der Suche auf Kältemittel für die allgemeine Verwendung nötig, zumal heute die Hauptgruppen NH_3 und Freone etwas unter Beschuss geraten sind: den Freonen wird Umweltfeindlichkeit angelastet, das NH_3 ist giftig. Der generelle Erfolg der Suche ist ungewiss, sie muss aber ernst genommen werden.)

Zum Schluss des Vortrages nun noch ein Beispiel für die Anwendung der in der Kältetechnik bekannten Verfahrensschemas in anderen Gebieten. Wir halten dabei nicht mehr fest an der früher eingeführten oberen Temperaturgrenze von 310 K.

Verfahrensschemata in der Heiztechnik

Ein Fachgebiet, das dieser Tage von vielen behandelt wird, ist das der Heizung, im speziellen der Hausheizung. Mit ihr befassen sich in letzter Zeit so viele Publikationen – über die Nacherfindung der Wärmepumpe – also einer Kälteanlage – und vor allem der Verwendung der Sonnenenergie, dass man sich vielleicht ausrechnen sollte, ob denn der Heizwert des damit bedruckten Papiers nicht auch einen beachtlichen Beitrag an die Energiezulieferung ergäbe. Ein Pendant zur Verwendung der Sonnenenergie für Heizzwecke wäre übrigens die *Strahlungskühlung zur Kälteerzeugung* (Bild 4).

Ein Beispiel aus der Haustechnik, das hier nur der Kuriosität halber als Spielerei angeführt sei. Man stelle ein gut isoliertes Gefäss in der Nacht so auf, dass eine Öffnung zum Weltraum hinschaut. Im Gefässinnern wird sich eine Temperatur einstellen, die wesentlich unter dem Gefrierpunkt des Wassers ist – man kann auf diese Art Eis herstellen – zwar nicht sehr viel und auch nicht zuverlässig – auch nicht gratis, nur ohne Antriebsarbeit.

Hausheizung

Wir legen den folgenden Betrachtungen einfachheitshalber immer die gleichen typischen Temperaturen zugrunde:

Umgebungstemperatur	$T_o = 270 \text{ K} = -3^\circ \text{C}$
Heizmitteltemperatur	$T_m = 330 \text{ K} = +57^\circ \text{C}$
(Radiator)	
Heizkesseltemperatur	$T_H = 990 \text{ K} = +717^\circ \text{C}$

Bei der üblichen Hausheizung verschwenden wir einen Grossteil der im Brennstoff vorhandenen Exergie wie in Bild 5 (linker Teil) in einem Temperatur/Entropie-Diagramm dargestellt. Durch besseren Einsatz der Brennstoffexergie könnten wir – auf dem Umweg über die Wärmepumpe – wie im rechten Teil des Bildes dargestellt ein mehrfaches an Heizwärme gewinnen, indem wir eben diese Exergie verwenden, um die – hier als beliebig langes Band der Breite T_o dargestellte Umgebungswärme – auf das benötigte Temperaturniveau T_m aufzuwerten, also hinaufzupumpen.

Dieses Verfahren wird recht oft mit Hilfe der Kaltdampfmaschine angewendet. Der allgemeinen Einführung dieses an sich sinnvollen Prozesses haftet aber der Nachteil an, dass wir zur Bereitstellung der mechanischen Betriebsenergie wiederum

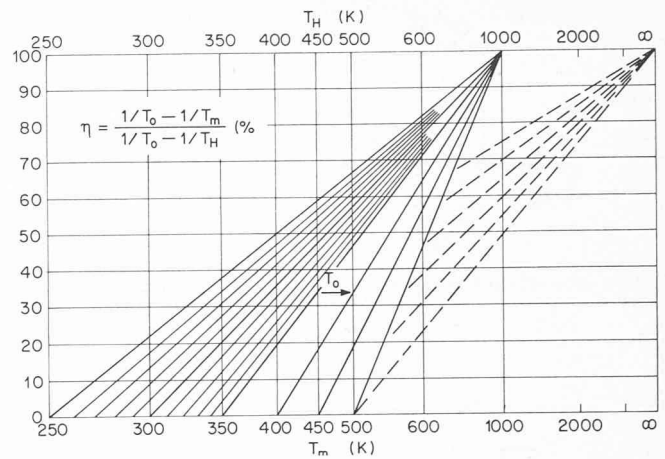


Bild 6. Exergetische Wirkungsgrade von Heizungen

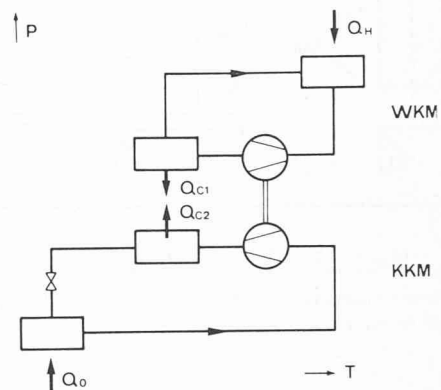


Bild 7. Koppelung von Wärmekraftmaschine und Kompressionskältemaschine. Anlageschema (oben)

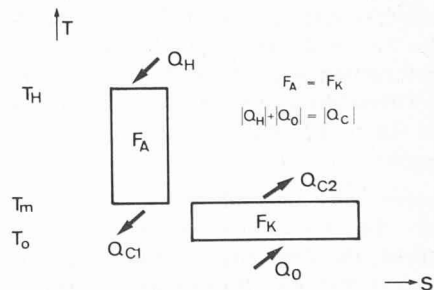


Bild 8. Gekoppelte Wärmekraftmaschine und Kompressionskältemaschine. Temperatur-Entropie Diagramm (unten)

Kraftwerke zu installieren haben, die ihrerseits nur etwa ein Drittel der Brennstoffenergie in mechanische Arbeit umwandeln können, der Rest ist unerwünschte Abwärme.

Würden von der in der Schweiz jährlich verbrannten Heizölmenge von etwa 7 Mio t zu Heizzwecken etwa 6 Mio t im Winterhalbjahr mit 70% Kesselwirkungsgrad als Bandenergie verfeuert, ergäbe das eine mittlere Heizleistung von 13,5 GW_{th}, die mit mechanisch betriebenen Wärmepumpen mit der Leistungsziffer von $\epsilon = 3$ das Elektrizitätsnetz mit 4,5 GW belasten würde.

Die exergetischen Wirkungsgrade von Heizungen betragen

$$\eta = \frac{1/T_o - 1/T_m}{1/T_o - 1/T_H}$$

Die ausgezogene Geradenschar in Bild 6 gibt uns die Wirkungsgrade an für die Heiztemperatur von 990 K, die gestrichelte gilt für beliebig hohe Heiztemperatur T_H .

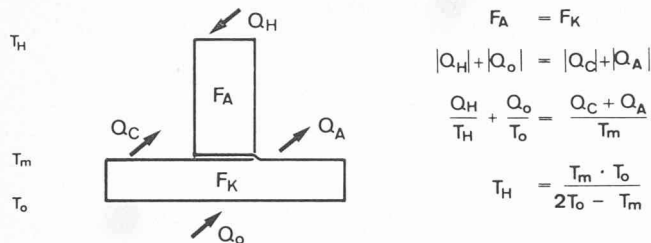


Bild 9. Absorptionskälteanlage. Darstellung nach Stierlin

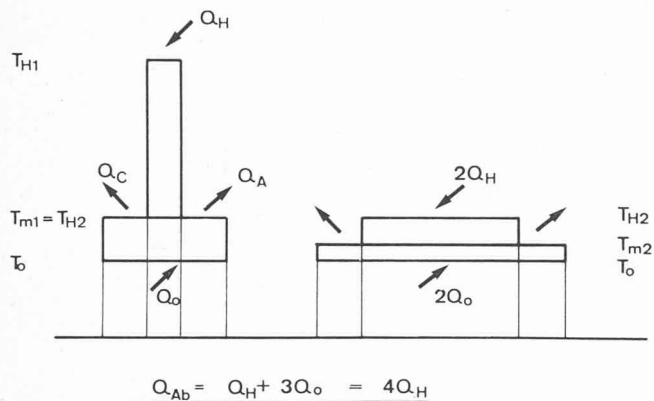


Bild 10. Wärmetransformator. Hochtemperaturteil (links), Niedrigtemperaturteil (rechts)

Mit der Heiztemperatur von 990 K und $T_0 = 270$ K, $T_m = 330$ K ergibt sich aus dem Diagramm $\eta = 25\%$, dies bei einem Kesselwirkungsgrad von 100%, d.h. diese Heizung wäre noch um den Faktor 4 verbesserungsfähig; oder wenn wir die tatsächliche Raumtemperatur von 20 °C als T_m einsetzen, wird $\eta = 10,8\%$. Offensichtlich ist der Wirkungsgrad um so kleiner, je näher die Raum- (T_m) und Umgebungstemperatur T_0 beieinander liegen.

Als bisher oft ausgeführte verbesserte Hausheizung kennen wir die Kaltdampfmaschine, angetrieben durch Elektromotoren, die ihrerseits die Antriebsenergie im allgemeinen von einer Wärmekraftmaschine beziehen, die aber auch direkt mit der KDM verbunden sein könnte, wie das in den Bildern 7 und 8 dargestellt ist. Es handelt sich um eine Anlage zur *Wärmeumformung*.

Das Analogon zu dieser Anlage wäre eine Absorptionsanlage nach Bild 2, für die das Temperatur/Entropie-Diagramm in Bild 9 gezeichnet ist [4].

In Anlehnung an die in der Elektrotechnik üblichen Bezeichnungen sprechen wir in diesem Fall von einem *Wärmetransformator*. Bei diesem Wärmetransformator – also der Absorptionsanlage, sind nun keine Umformermaschinen (Turbine für Antrieb des Kompressors) nötig, doch ist energetisch der reversible Transformator dem reversiblen Umformer ebenbürtig. Mit diesem Wärmetransformator werden die bei T_H und bei T_0 zugeführten Heizwärmen (bei 990 K und 270 K) umgeformt in gleich grosse Wärmemengen einer mittleren Temperatur T_m , die nach der in Bild 9 angegebenen Gleichung starr mit den Heiztemperaturen gekoppelt ist.

Für die Anwendung in der Heiztechnik eignet sich wegen der recht hohen Heiztemperatur T_H und dem verhältnismässig kleinen Gefälle $T_m - T_0$ eine zweistufige Anordnung wie im Bild 10 dargestellt.

Im Hochtemperaturteil (links) werden die Wärmeströme Q_H und Q_0 von 990 und 270 K umgeformt in einen Wärmestrom $Q_H + Q_0$ von 424 K = 151 °C, nach der Beziehung

$$T_m = \frac{2T_0 T_H}{T_H + T_0},$$

der nun seinerseits als Heizleistung einem Niedertemperaturteil (rechts) zugeführt werden kann.

Dem Kocher des zweiten Wärmetransformators steht nun das zweifache der ursprünglichen Heizwärme zur Verfügung (nun aber bei 424 K) und in einem reversiblen Kreislauf kann damit wieder eine gleich grosse Wärmemenge von 270 K auf 330 K gehoben werden, so dass dort, bei der Temperatur des Heizungswassers von 57 °C nun viermal so viel Wärme zur Verfügung steht wie im Hochtemperaturteil an Heizwärme aufgewendet wurde. Dies wurde offensichtlich erreicht durch die Anhebung von Wärme aus der Umgebungstemperatur, die in beliebiger Menge zur Verfügung steht, auf ein höheres Temperaturniveau. Damit wird die Heizölrechnung viermal kleiner und der Tankinhalt reicht viermal länger.

Besondere Vorteile solcher Systeme sind, dass sie primär von der vorhandenen Infrastruktur Gebrauch machen (Energieverteilung und Speicherung) und auch Möglichkeiten zeigen, dass die Schweiz im Laufe der Zeit bezüglich der Heizenergie wieder Selbstversorger werden könnte. Aus unseren Wäldern könnten wir jährlich gut 2 Mio m³ Holz mehr beziehen, als dies heute der Fall ist, d.h. auch ohne Abbau der langjährig angehäuften, noch stehenden Holzvorräte, stünden uns insgesamt etwa 3 Mio m³ als Brennholz zur Verfügung. Mit grob geschätzten Heizwerten könnten wir damit während der halbjährlichen Heizperiode rund 1,5 GW_{th} oder etwas über 10% des schweizerischen Heizölbedarfes decken. Rechnen wir optimistisch damit, dass durch gezielte Bewirtschaftung der Gesamtertrag von heute 7 auf 10 Mio m³ je Jahr erhöht werden könnte, dann würde damit eine um den Faktor 3 verbesserte Hausheizung genügen, um 60% des Heizölbedarfes mit Brennholz zu decken. Den Rest müssten wir woanders suchen, z.B. bei Einsparungen oder bei verbesserter Bauweise.

Bevor nun diese verbesserten Heizkessel allgemein verwendet werden können, müssen sie studiert, geplant und demonstriert werden. Dies zu tun, ist eines unserer Ziele und es wird zu seiner Erreichung einigen Aufwand auf verschiedenen Gebieten der Verfahrenstechnik benötigen. Die Hauptprobleme, die wir heute erkennen, liegen einmal auf der Seite der *Konstruktionsmaterialien*, daneben aber beim Auffinden von geeigneten *Arbeitsstoffpaaren*. Von diesen wird eine grosse Hochtemperaturstabilität gefordert. Vom Auffinden geeigneter Stoffe, von der Lösung von Korrosionsproblemen usw. hängt der Erfolg dieses Systems ab. Der Erfolg ist noch ungewiss, doch ist in Anbetracht der möglichen Verbesserungen eine grosse Anstrengung gerechtfertigt.

Literaturverzeichnis

- [1] Rase H.F., Barrow M.H.: «Project Engineering of Process Plants», 3. Aufl. John Wiley & Sons Inc. New York 1957.
- [2] Plank Rudolf: «Handbuch der Kältetechnik». (12 Bde.) Bd. 1, S. III. Springer Berlin 1954.
- [3] Altenkirch E.: «Absorptionskältemaschinen». VEB Verlag Technik, Berlin 1954.
- [4] Stierlin H.: «Beitrag zur Theorie der Absorptions-Kältemaschine». Kältetechnik 16, S. 213–218, 1964.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Ch. Trepp, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.