



# KÄLTETECHNISCHE ANLAGENPLANUNG

Skript zur Selbstarbeit

## Exposee

Die kältetechnische Anlagenplanung bildet die Grundlage einer gut funktionierenden und energieeffizienten Kälteanlage. In diesem Skript bekommen Sie die physikalischen Grundbegriffe, die kältetechnischen Grundlagen und die Auslegung von Anlagenbauteilen und Rohrleitungen sowie den Umgang mit einer Auslegungssoftware nähergebracht. Nach durcharbeiten und verinnerlichen dieses Skriptes, sollten Sie in der Lage sein, die Planungsaufgabe, sowie den kältetechnischen Fachteil der Meisterprüfung erfolgreich zu absolvieren.

Maik Strauch

## Wegweiser durch das Lehrskript

Dieses Skript bildet die Grundlage für Ihren Unterricht in meinem Fachbereich **Kältetechnische Anlagenplanung**. Ergänzend zu diesem Skript stehen Ihnen weitere Medien aus meiner Online-Bibliothek sowie Aufgaben zur Verfügung, mit denen Sie sich Ihren individuellen Lern-Mix zusammenstellen können. Auf diese Weise können Sie sich den Stoff in Ihrem eigenen Tempo aneignen und dabei auf lerntypspezifische Anforderungen Rücksicht nehmen.

Die Inhalte sind nach didaktischen Kriterien in Lektionen aufgeteilt, wobei jede Lektion aus mehreren Lernzyklen besteht. Jeder Lernzyklus enthält jeweils nur einen neuen inhaltlichen Schwerpunkt. So können Sie neuen Lernstoff schnell und effektiv zu Ihrem bereits vorhandenen Wissen hinzufügen. Die Lösungen zu den Aufgaben aus diesem Skript finden Sie im Anhang am Ende dieses Skripts.

Ich bin bestrebt, in meinem Skript eine gendersensible und inklusive Sprache zu verwenden. Ich möchte jedoch hervorheben, dass auch in den Skripten, in denen das generische Maskulinum verwendet wird, immer Frauen und Männer, Inter- und Trans-Personen gemeint sind sowie auch jene, die sich keinem Geschlecht zuordnen wollen oder können.

Um die Zugänglichkeit zu meinen Unterrichtsmaterialien zu vereinfachen habe ich eine Website erstellt, auf der Sie die aktuellen Updates zu den Unterrichten und meine Online-Bibliothek finden. Hier können Sie auch mittels Kontaktformular Fragen stellen, die zeitnah per Mail beantwortet werden.

[www.ms-meisterschule.de](http://www.ms-meisterschule.de)



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
Lektion 1    Physikalische Grundbegriffe .....	4
Zyklus 1      SI-Einheiten .....	5
Länge:.....	5
Zeit: .....	7
Masse:.....	7
Elektrische Stromstärke:.....	8
Thermodynamische Temperatur:.....	9
Stoffmenge: .....	10
Lichtstärke:.....	11
Zyklus 2      Mechanik .....	12
Kraft:.....	12
Arbeit:.....	14
Leistung:.....	15
Wirkungsgrad: .....	15
Zyklus 3      Strömungsmechanik .....	17
Druck:.....	17
Ideale Strömung:.....	18
Massenstrom: .....	19
Volumenstrom: .....	19
Kontinuitätsgleichung:.....	20
Zyklus 4      Thermodynamik .....	21
Wärme:.....	21
Leistung:.....	22
Erster Hauptsatz der Thermodynamik: .....	22
Enthalpie: .....	23
Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik: .....	23
Entropie: .....	24
Kinetische Gastheorie: .....	25
Gasgesetze: .....	27
Aggregatzustände:.....	28
Zyklus 5      Wellen- und Schwingungslehre .....	29
Akustik:.....	29

Lektion 2	Grundlagen der Kältetechnik .....	32
Zyklus 1	Kreisprozess .....	32
	Isolinien und Nassdampfgebiet.....	33
	Idealer Kreisprozess .....	35
	Realer Kreisprozess .....	36
Zyklus 2	Dampf tafeln.....	36
Zyklus 3	Interpolation .....	37
Zyklus 4	Lift .....	38
Zyklus 5	Verdichtungsprozess .....	39
Zyklus 6	Wärmeleistungen eines Systems .....	41
Zyklus 7	Kältetechnische Komponenten .....	45

# Lektion 1    Physikalische Grundbegriffe

Die Physik bildet das Fundament nahezu aller kältetechnischer Anwendungen. Die Grundprinzipien der Mechanik, Thermodynamik und Elektrizitätslehre werden z.B. in nahezu allen kältetechnischen Komponenten umgesetzt und bei deren Gestaltung berücksichtigt. Diese Lektion bietet einen breiten Überblick über die Grundlagen der Physik, ausgehend von den Axiomen der Mechanik bis hin zu den thermodynamischen Grundlagen.

Die klassische Physik behandelt vier wesentliche Bereiche, welche im Folgenden kurz dargestellt werden:

1) **Mechanik:**

Die klassische Mechanik bildet die Grundlage der Physik. Sie betrachtet die Wechselwirkung von Massen und Kräften in Raum und Zeit sowie die Energie, welche in entsprechenden Systemen vorhanden ist.

2) **Thermodynamik:**

Die Thermodynamik, als moderne Bezeichnung der Wärmelehre, betrachtet physikalische Abläufe unter Einfluss von Wärme.

3) **Elektrizität und Magnetismus:**

Die Elektrizität und der Magnetismus betrachtet den Einfluss von Ladungen auf die Eigenschaften und das Verhalten von Objekten, wobei der Magnetismus sich mit bewegten Ladungen und der einhergehenden Veränderung des Systems auseinandersetzt.

4) **Schwingungslehre und Wellen:**

Die Schwingungslehre und Wellen beschreiben die periodische Umwandlung zweier Energieformen. Dies lässt sich leicht für massebehaftete Systeme vorstellen, gilt jedoch ebenso für Systeme anderer Energieformen.

In diesem Kurs gehen wir auf die Grundlagen der Mechanik, der Thermodynamik sowie der Schwingungslehre im Bereich der Akustik ein. Den Bereich der Elektrizität und des Magnetismus decken die anderen Dozenten ab.

## Zyklus 1 SI-Einheiten

Da Forscher und Anwender auf der ganzen Welt verteilt sind, sollten die verwendeten Bezeichnungen in der Physik möglichst international sein. Aus diesem Grund wurde das Internationale Einheitensystem oder SI-Einheitensystem nach dem „Système Internationale“ geschaffen, das seit 1971 die Basiseinheiten vorgibt.

Das SI-Einheitensystem besteht aus insgesamt 7 Basisgrößen, aus denen insgesamt 22 weitere SI-Einheiten abgeleitet wurden. Im Folgenden gehen wir kurz auf die Basisgrößen ein.

### Länge:

Die SI-Basiseinheit der SI-Basisgröße **Länge** ist der **Meter**. Ein Meter bezeichnet hierbei die Länge, die Licht im Vakuum während einer Zeitdauer von  $\frac{1}{299.792.458}$  Sekunden zurücklegt.

Die Länge besitzt das Formelzeichen  $l$ .

Neben der in weiten Teilen der Welt verwendeten metrischen Einheit, dem Meter, gibt es auch weitere Maßeinheiten, um eine Länge zu definieren. In den USA beispielsweise finden folgende Einheiten Anwendung:

Meter [m]	Fuß/feet [ft]	Zoll/inch [in]	Meile/mile [mi]
1	3,28084	39,3701	0,00062
10	32,8084	393,701	0,0062
100	328,084	3.937,01	0,062
1.000	3.280,84	39.370,1	0,62

Tabelle 1) Amerikanische Längeneinheit im Vergleich zum Meter

Je nach Gebrauch kann die Länge in verschiedenen Einheiten angegeben werden. Zum Beispiel werden weite Entfernungen meistens in Kilometern angezeigt. Der Kilometer ist ein Mehrfaches der SI-Einheit Meter. Es handelt sich hierbei um ein sogenanntes **Präfix**. Es gibt noch weitere Präfixe zur Angabe einer Länge. Die folgende Tabelle zeigt Ihnen eine Übersicht und wie Sie verschiedene Angaben ineinander umrechnen.

### Präfix

Aus praktischen Gründen bietet das SI-Einheitensystem zu allen Größen weitere Einheiten an, die sich von den kohärenten Einheiten um Zehnerpotenzen mit ganzzahligem Exponenten unterscheiden. Sie werden durch Präfixe wie *Kilo-* oder *Zenti-* bezeichnet.

Name der Einheit	Formelzeichen	Umrechnung zum Meter	Größenordnung zum Meter
Nanometer	nm	geteilt durch 1.000.000.000 (1 Milliarde)	$\cdot 10^{-9}$
Mikrometer	$\mu\text{m}$	geteilt durch 1.000.000 (1 Million)	$\cdot 10^{-6}$
Millimeter	mm	geteilt durch 1.000 (1 Tausend)	$\cdot 10^{-3}$
Zentimeter	cm	geteilt durch 100	$\cdot 10^{-2}$
Dezimeter	dm	geteilt durch 10	$\cdot 10^{-1}$
Meter	m	=	$\cdot 1$
Kilometer	km	multipliziert mit 1.000 (1 Tausend)	$\cdot 10^3$

Tabelle 2) Umrechnung der meistverbreiteten Längeneinheiten

Im Bereich der Kältetechnik ist die Länge eine häufig benutzte Größe. Sowohl in der theoretischen Betrachtung, beispielsweise bei der Berechnung von Rohrnetzen, als auch in der Praxis, beispielsweise bei der Bestimmung von Abständen.

### Alles verstanden?

#### Aufgabe 1)

Ein Menschenhaar ist etwa 0,05 mm breit. Geben Sie die Breite in Meter als Dezimalzahl und mit der Größenordnung (Zehnerpotenz) an.

#### Aufgabe 2)

Die Entfernung von Duisburg nach Berlin beträgt etwa 550 km. Geben Sie die Entfernung in Zentimeter als Dezimalzahl und mit der Größenordnung (Zehnerpotenz) an.

#### Aufgabe 3)

Sie haben auf Ihrem Monteurs-Fahrzeug noch eine Rolle Mantelleitung NYM 3x1,5 bestehend aus 16 Ringen. Der Durchmesser eines Ringes beträgt 30 cm. Wie viele Meter Mantelleitung befinden sich noch auf dieser Rolle?



## Zeit:

Die SI-Basiseinheit der SI-Basisgröße **Zeit** ist die **Sekunde** [s]. Im SI-Einheitensystem ist die Sekunde durch ein atomares Zeitnormal, die **Atomsekunde**, definiert, da dies eine erheblich größere Genauigkeit und langfristige Konstanz gewährleistet als astronomische Zeitnormale.

Die Zeit besitzt das Formelzeichen  $t$ .

Die Zeit ist eine grundlegende Größe für die Beschreibung von Vorgängen. Sie beschreibt die Abfolge und die Dauer von Ereignissen.

In der Kältetechnik, sowie in der weiteren Physik ist die Zeit eine der wichtigsten SI-Einheiten. So beruhen fast alle physikalischen Prozesse auf einer Ableitung der Zeit. Der Volumenstrom, ein in der Kältetechnik häufig vorkommender Begriff ist ein zur Zeit hin abgeleitetes Volumen. Die Ableitung zur Zeit hin, wird mit einem Punkt oberhalb des Formelbuchstabens angezeigt.

Auch auf die Sekunde können die SI-Präfixe angewendet werden. Von der Sekunde sind die nicht zum SI gehörenden Einheiten Minute, Stunde und Tag abgeleitet; diese sind in Deutschland gesetzliche Einheiten.

## Masse:

**Masse** ist eine grundlegende physikalische Größe und trägt das Formelzeichen  $m$ . Die SI-Einheit der Masse ist das **Kilogramm** [kg].

Um die Masse eines Körpers bestimmen zu können werden zwei Informationen benötigt. Das Volumen eines Körpers sowie seine Dichte reichen aus, um die Masse zu berechnen. Je nach Geometrie oder Material können sich diese Eigenschaften allerdings unterscheiden.

Die Masse  $m$  eines beliebigen Körpers kann berechnet werden aus dem Produkt seines Volumens  $V$  und seiner Dichte  $\rho$ .

$$m = V \times \rho$$

Dabei hat die Dichte die Einheit  $\frac{kg}{m^3}$  und das Volumen die Einheit  $m^3$ . Bei der Multiplikation kürzt sich das  $m^3$  weg und es bleibt nur noch die Masse übrig. Wichtig hierbei ist, dass die passende Volumenformel zu jedem Körper verwendet wird.

Das Kilogramm als SI-Einheit wurde lange Zeit durch das Ur-Kilogramm definiert – ein Zylinder von 39 mm Durchmesser und Höhe, bestehend aus einer Platin-Iridium-Legierung. Allerdings ist dieses Referenznormal anfällig für Messfehler, weshalb auf der Generalkonferenz für Maß und

### Atomsekunde

Eine Atomsekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung.



Gewicht 2019 das Urkilogramm als Silizium Kugel neu definiert wurde, über die Planck-Konstante  $h$ .

In der Kältetechnik wird die Masse häufig für die Angabe von Massenströmen (Zeitliche Ableitung der Masse) verwendet. Des Weiteren ist das Gewicht von Bauteilen und Fluiden wichtig um Beispielsweise die Statik bei der Planung und Installation von Anlagenteilen zu beachten.

#### Planck-Konstante

Sie ist das Verhältnis von Energie und Frequenz eines Photons. Der SI-Wert der Planck-Konstanten ist  $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

#### Alles verstanden?

##### Aufgabe 4)

Wie viel kg Kältemittel befinden sich in einem Teilrohrstück mit einem Rohrinhalt von 5 Litern, wenn die Dichte des Kältemittels  $500,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$  beträgt?

##### Aufgabe 5)

Wie viel wiegt ein Würfel aus Gold mit einer Kantenlänge von 3 cm und einer Dichte von  $19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ?

##### Aufgabe 6)

In einer Kälteanlage befinden sich 11 kg Kältemittel. Wie groß muss ein Sammler sein, wenn das gesamte Kältemittel (spez. Volumen  $v = 0,872 \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}}$ ) in die Sammelflasche passen soll, und eine Platzreserve von 10% vorhanden sein muss?

#### Elektrische Stromstärke:

Die Stromstärke gibt an, wie viel **elektrische Ladung** in einer bestimmten Zeit durch einen Leiter fließt. Dabei gilt: Je mehr Ladung pro Zeit durch eine bestimmte Leiterfläche fließt, desto höher ist die elektrische **Stromstärke**. Ihr Formelzeichen ist  $I$  und ihre Einheit das **Ampere** [A].

Bei einer Stromstärke von einem Ampere fließt durch einen Leiter eine Ladung eines Coulombs pro Sekunde. Das sind etwa 6,2 Trillionen Elektronen. Dies kann auch als  $6,2 \cdot 10^{18}$  geschrieben werden. (6.200.000.000.000.000.000).

In der Kältetechnik wird die elektrische Stromstärke häufig verwendet. Bei der Auswahl von elektrischen Verbrauchern wie beispielsweise Motoren und Pumpen, aber auch zur Auslegung von elektrischen Leitungen.

#### Elektrische Ladung

Die elektrische Ladung bestimmt, wie groß der Elektronenüberschuss oder der Elektronenmangel eines Körpers ist.

Die Einheit ist Coulomb. Sie wird bestimmt aus dem Vielfachen der Elementarladung  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

## Thermodynamische Temperatur:

Das Formelzeichen der **Temperatur** ist T und ihre SI-Einheit heißt **Kelvin** [K]. Ebenfalls verbreitet ist die Angabe in Grad Celsius (°C) welches allerdings nur eine abgeleitete SI-Einheit ist.

Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen. Je wärmer es ist, desto mehr bewegen sich diese Teilchen. Die Temperatur gibt also an, wie heftig sich die Teilchen eines Stoffes bewegen.

Das Ausmaß dieser Bewegung hängt von der Temperatur des Stoffes ab. Bei hoher Temperatur ist die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen hoch, bei sinkender Temperatur sinkt äquivalent hierzu auch die kinetische Energie, also die Bewegungsenergie ab.

Am absoluten Nullpunkt, an dem sich die Skala für die Temperatur orientiert, bewegen sich die Teilchen überhaupt nicht mehr. Dies stellt somit die tiefstmögliche Temperatur dar.

Überschreitet die Temperatur einen stoffspezifischen Wert, ist die Bewegung so groß, dass die Teilchen ihre festen Strukturen verlassen. In diesem Punkt wechselt der Stoff seinen Aggregatzustand.

Neben der Temperatur in Kelvin und Celsius gibt es auch noch die Maßeinheit Fahrenheit. Die nachfolgende Tabelle liefert einen Überblick über die Markanten Temperaturpunkte.

Kelvin [K]	Celsius [°C]	Fahrenheit [°F]
0	-273,15	-459,67
273,15	0	32
255,37	-17,78	0
373,15	100	212

Tabelle 3) Gängige Temperatureinheiten im Vergleich

Die Formel zur Umrechnung von Fahrenheit in Kelvin lautet wie folgt:

$$T_K = \frac{T_F + 459,67}{1,8}$$

### Alles verstanden?

#### Aufgabe 7)

Rechnen Sie die Temperatur von 167°F in die SI-Einheit Kelvin um.

#### Aufgabe 8)

Wie viel Kelvin entspricht die Temperatur -96°C

#### Aufgabe 9)

In einer amerikanischen Backanleitung finden Sie die Angabe, den Kuchen für 45 Minuten bei 320°F zu backen. Auf welche Temperatur stellen Sie den Backofen in Deutschland ein?

## Stoffmenge:

Unter dem Begriff der **Stoffmenge**  $n$  [mol] versteht sich die SI-Basisgröße, welche die Anzahl an Teilchen in einem System beschreibt. Diese Teilchen können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie auch viele weitere Teilchen beinhalten. Die Anzahl der Teilchen ist genauso groß wie **die Avogadro-Konstante**.

1 Mol entspricht also  $6,0221415 \cdot 10^{23}$  Teilchen.

Dies entspricht genau der Anzahl an Teilchen, die in 12g des Kohlenstoff Isotops C-12 sind.

Die Stoffmenge kann mit der Formel  $n = \frac{N}{N_A}$  berechnet werden, wobei  $N$  die Teilchenanzahl des Stoffes darstellt und  $N_A$  die Avogadro-Konstante.

Alternativ kann die Stoffmenge  $n$  auch über die Masse und die molare Masse berechnet werden. Dies ist vor allem wichtig, wenn die Teilchenanzahl  $N$  nicht gegeben ist, aber die Masse eines Stoffes. Die über die Masse berechnete Stoffmenge  $n$  kann über folgende Formel berechnet werden:

$$n_x = \frac{m_x}{M_x}$$

$m_x$  = Masse des Stoffes;  $M_x$  = Molare Masse des Stoffes

Die molare Masse des Stoffes kann im Periodensystem der Elemente abgelesen werden und steht beim jeweiligen Atom oben rechts in der Ecke. Die molare Masse  $u$  entspricht der Atommasse in  $\frac{g}{mol}$  also ist keine Umrechnung nötig.

## Avogadro-Konstante

Die Avogadro-Konstante gibt an, wie viele Teilchen ( $N$ ) in einem Mol, der Einheit der Stoffmenge ( $n$ ), enthalten sind.

Die Avogadro-Konstante beträgt:

$$6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$$

## Alles verstanden?

### Aufgabe 10)

Ein R290 Molekül besteht aus 3 Kohlenstoff- und 8 Wasserstoffatomen.

Kohlenstoff hat eine Atommasse von  $12 \frac{g}{mol}$ ;

ein Wasserstoffatom wiegt  $1 \frac{g}{mol}$ .

Welche Stoffmenge haben 3 kg R290 ?

### Aufgabe 11)

Wie vielen Teilchen entspricht die Stoffmenge aus Aufgabe 10?

## Lichtstärke:

Die Lichtintensität ist ein Maß für die Helligkeit eines Lichtstrahls. Sie beschreibt die Menge an sichtbarem Licht, das in eine bestimmte Richtung ausgesendet wird.

Die Einheit der Lichtstärke ist Candela [cd]. Um die Lichtintensität zu messen, verwendet man ein Gerät namens Luxmeter, das die Lichtmenge in einem bestimmten Bereich erfasst.

Eine Kerze hat etwa eine Lichtstärke von einem Candela. Hieraus leitet sich auch der Begriff Candela ab.

In der Kältetechnik findet die Lichtstärke eher weniger Verwendung. In manchen Fällen jedoch ist sie eine nicht zu vernachlässigende Größe. Die Lichtstärke kann Einfluss auf die Qualität und die Haltbarkeit von frischen Lebensmitteln oder Medikamenten haben. So kann es bei der Planung von Kühlmöbeln oder Kühlräumen schon mal zu einer Vorgabe im Bezug auf die Lichtstärke kommen.

Die Grundlegende Formel zur Berechnung der Lichtintensität lautet:

$$I = \frac{P}{A}$$

Hierbei steht I für die Lichtintensität, P für die Leistung der Lichtquelle und A für die Fläche auf, die das Licht trifft. Die Einheit der Lichtintensität in diesem Fall  $\frac{W}{m^2}$ .

Die Lichtintensität nimmt mit zunehmender Entfernung von der Lichtquelle ab. Dies folgt dem umgekehrten Quadratgesetz, das besagt:

$$I = \frac{I_0}{r^2}$$

Wobei  $I_0$  die Lichtintensität an der Quelle ist und  $r$  die Entfernung von der Lichtquelle.

Die Einheit Lux [lx] misst die Beleuchtungsstärke und gibt an, wie viel Licht auf eine bestimmte Fläche trifft. Eine übliche Konversion zwischen Candela und Lux ist durch die Formel:

$$E[lx] = \frac{I[cd]}{d^2[m]}$$

Hierbei entspricht ein Lux eine Candela pro Quadratmeter.

Einem Antrag zur Änderung der Basisgröße von Candela in Lumen, welche viel geläufiger ist, wurde 1979 mit der Begründung abgelehnt, dass man zu viele Änderungen befürchte.

## Zyklus 2 Mechanik

Die Mechanik bildet eine grundlegende Basis der Physik. Sie beschäftigt sich mit dem Einfluss von Kräften auf Körper. Dabei wird zwischen Kräftegleichgewichten bei ruhenden Körpern (Statik), Bewegungsvorgängen (Kinematik) sowie durch Kräfte verursachte Bewegungen (Kinetik) differenziert.

Im Zuge dieses Skriptes lernen Sie die klassische newtonsche Mechanik kennen. Dies bedeutet, dass sich die getroffenen Aussagen weder fehlerfrei auf Probleme in atomaren Dimensionen (Quantenmechanik) noch bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit (relativistische Mechanik nach Einstein) anwenden lassen.

### Kraft:

Die physikalische Einheit Kraft im internationalen Einheitensystem (SI) ist das Newton, das nach dem berühmten Physiker Sir Isaac Newton benannt wurde.

Ein Newton [N] wird definiert als die Kraft, die Notwendig ist, um einem Körper der Masse 1 kg eine Beschleunigung von  $1 \frac{m}{s^2}$  zu erteilen. Die Einheit der Kraft lautet somit  $\frac{kg \times m}{s^2}$ . Das Symbol für die Einheit Newton lautet  $F$ .

Die allgemeine Formel zur Berechnung der Kraft lautet demnach:

$$F = m \times a$$

Jeder Körper hat eine spezifische Gewichtskraft, welche sich mit der Formel  $F = m \times g$  berechnen lässt, wobei  $g$  die **Fallbeschleunigung** darstellt.

Die physikalische Größe der Kraft kann direkt gemessen oder aus anderen Größen abgeleitet werden. Eine wichtige Tatsache ist, dass Kräfte addiert werden können. Dies bedeutet, dass die resultierende Kraft auf einen Körper gleich der vektoriellen Summe aller Einzelkräfte ist, die auf diesen Körper wirken.

In der Kältetechnik wird die Kraft häufig benutzt, auch wenn man zunächst nicht merkt das damit gearbeitet wird. So muss der Verdichtermotors genug Drehmoment aufbringen, um den Verdichtungsprozess zu vollführen. Das Drehmoment ist das Produkt aus der benötigten Kraft und dem Wirkabstand. Die Einheit für das Drehmoment lautet Newtonmeter [Nm] und beschreibt damit ein Drehmoment, auf das eine Kraft von 1N bei einer Hebellänge von 1m wirkt.

### Fallbeschleunigung

Die Fallbeschleunigung ist die Beschleunigung, die bei einem frei fallenden Körper auftritt, wenn der Luftwiderstand vernachlässigbar klein ist. Ihr mittlerer Wert liegt auf der Erde bei  $9,81 \frac{m}{s^2}$ .

Der Physiker Sir Isaac Newton stellte mithilfe seiner Forschungen folgende drei physikalische Gesetze auf:

### 1. Newtonsches Axiom

„Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung so lange bei, bis er durch äußere Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.“

So bleibt beispielsweise ein Körper, der sich in Ruhe befindet, so lange in Ruhe, bis eine Kraft auf ihn wirkt. Dieses Gesetz nennt man auch das Trägheitsgesetz. Es ist eine äußere Kraft notwendig, um den Bewegungszustand des betrachteten Objektes zu ändern.

### 2. Newtonsches Axiom

„Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Die Beschleunigung ist dabei direkt proportional zur Kraft und indirekt proportional zur Masse des Körpers“

Die dazugehörige mathematische Formulierung wird auch oft als Grundgleichung der Mechanik bezeichnet. Sie ist eines der Erkenntnisse aus Newtons Werken.

$$F = m \times a$$

Dabei ist  $m$  die Masse des betrachteten Objektes und  $a$  dessen Beschleunigung. Die zwei Größen zusammen multipliziert ergeben die Kraft  $F$ . Setzt man für die Beschleunigung die Erdbeschleunigung ein

( $F = m \times g; g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ) erhält man die sogenannte

Gewichtskraft. Dieses Axiom nennt man auch Aktionsprinzip.

### 3. Newtonsches Axiom

„Besteht zwischen zwei Körpern 1 und 2 eine Kraftwirkung, so ist die Kraft, die Körper 1 auf Körper 2 auswirkt, gleich der Kraft, die Körper 2 auf Körper 1 auswirkt.“

Dabei sind die Kräfte allerdings entgegengesetzt gerichtet. Dieses Prinzip wird auch als Reaktionsprinzip bezeichnet.

## Alles Verstanden?

### Aufgabe 12)

Ein Körper mit einer Masse von 420 kg wird hochgehoben.

Welche Kraft muss überwunden werden, um den Körper hochzuheben?

## Arbeit:

Mechanische **Arbeit** ist ein zentrales Konzept in der Physik. Es handelt sich um eine Form der Energieübertragung und ist eng mit den Konzepten Kraft und Bewegung verknüpft. In der einfachsten Form kann die mechanische Arbeit als Produkt aus der auf einen Körper ausgeübten Kraft und der Strecke, auf welcher der Körper bewegt wird, definiert werden.

Die **mechanische Arbeit**  $W$  wird dabei durch die Formel  $W = F \times d \times \cos(\theta)$  berechnet. Dabei steht  $F$  für die Kraft,  $d$  für die zurückgelegte Strecke und  $\theta$  für den Winkel zwischen der Kraft und der Bewegungsrichtung.

Neben der mechanischen Arbeit unterscheiden wir in der Physik unter anderem noch die **elektrische Arbeit**, die **thermische Arbeit** und die **magnetische Arbeit**.

Die elektrische Arbeit, die zum Beispiel von einem elektrischen Motor geleistet wird, unterscheidet sich von der mechanischen Arbeit, insofern, als dass die Energie nicht durch eine direkte Kraftwirkung, sondern durch das elektrische Feld übertragen wird.

Die Einheit der Arbeit spielt eine große Rolle, da sie Auskunft gibt, über die Größe der geleisteten Arbeit. In der international gebräuchlichen Einheitensystem wird die Arbeit in **Joule** (J) angegeben. Ein Joule entspricht der Arbeit, die verrichtet wird, wenn eine Kraft von einem Newton einen Meter weit bewegt wird, also  $1\text{J} = 1\text{N} \times 1\text{m}$ . Dies ist eine sehr kleine Einheit, daher werden im Alltag oft größere Einheiten wie Kilojoule (kJ) oder Megajoule (MJ) verwendet.

Anstelle der Frage welche Arbeit verrichtet wird, wird häufig auch von **Energie** gesprochen. Dem liegt zugrunde, dass ein sich bewegendes Körper seine Energie ändert. Hierbei gilt, dass die von einem Körper verrichtete Arbeit gleich der Änderung seiner Energie ist. Das Formelzeichen für Energie ist  $E$ . Die Einheit ist ebenfalls **Joule** (J). Die Formel zur Änderung lautet  $W = \Delta E$ .

## Alles Verstanden?

### Aufgabe 13)

Ein fallender Körper mit einer Masse von 7 kg verrichtet eine Arbeit von 2.120 Nm. Welche Ausgangshöhe hatte der Körper?



## Leistung:

Die **Leistung** gibt an wie viel Arbeit in jeder Sekunde verrichtet wird, bzw. die Rate, mit der Energie in dieser Zeiteinheit umgewandelt wird. Sie ist damit ein Maß dafür, wie schnell oder wie langsam Arbeit verrichtet wird, also ein Maß der Arbeitsgeschwindigkeit. Die Leistung trägt das Formelzeichen  $P$ .

Die Einheit der Leistung ist das **Watt** [W], benannt nach dem schottischen Ingenieur James Watt. 1 Watt bedeutet, dass 1 Joule Arbeit pro Sekunde verrichtet wird.

Die Berechnung der Leistung erfolgt gemäß der Gleichung  $P = \frac{W}{t}$ , wobei  $W$  der Arbeit, bzw. der Energieänderung entspricht und  $t$  der Zeit entspricht, in der diese Arbeit/Energieänderung verrichtet wird.

## Alles Verstanden?

### Aufgabe 14)

Ein Würfel mit einer Masse von 3 kg wird innerhalb von 4 Sekunden um 5 m angehoben.

Welche Leistung muss aufgebracht werden?

### Aufgabe 15)

Ein PKW mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $100 \frac{km}{h}$  hat eine Luftwiderstandskraft von etwa 210 N. Welche Leistung muss er aufbringen um auf einer Strecke von 1.000 m nur den Luftwiderstand zu überwinden?

## Wirkungsgrad:

Der Wirkungsgrad eines technischen Systems bzw. eines technischen Prozesses ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Er beschreibt, wie effizient ein Prozess aus energetischer Sicht abläuft.

Um ein Verhältnis aufzustellen, werden vorerst die Größen selbst benötigt. Der Wirkungsgrad bezieht sich auf technische Systeme und betrachtet dabei typischerweise die Energie, Arbeit oder Leistung.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  wird berechnet, indem der Nutzen durch den Aufwand geteilt wird.

$$\eta = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} = \frac{W_{\text{Nutzen}}}{W_{\text{Aufwand}}} = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}}$$

Nutzen und Aufwand müssen hier die gleiche physikalische Größe sein. Es sind also beide Energien, beide eine Arbeit oder beide eine Leistung.

Der Wirkungsgrad kann niemals kleiner als 0 oder größer als 1 sein.

Den Gesamtwirkungsgrad eines Systems zusammenhängender einzelner Prozesse gibt an, wie energetisch effizient ein gesamtes System ist. Berechnet wird dieser über die Multiplikation aller einzelner Wirkungsgrade von einer Anzahl  $n$  Prozesse:

$$\eta_{ges} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_n$$

Da sich alle einzelnen Wirkungsgrade selbst nur im Bereich von 0 bis 1 aufhalten, ist der Gesamtwirkungsgrad niemals größer als der kleinste einzelne Wirkungsgrad.

Häufig hört man in der Kältetechnik davon, dass der Wirkungsgrad einer Kälteanlage  $> 1$  ist. Dies stimmt aber nicht, da die genannte Größe nicht der Wirkungsgrad, sondern die Leistungszahl (COP / EER) beschreibt. Abgeleitet von einem verkehrt laufenden idealen Kreisprozess (Carnot-Kreisprozess) ergibt sich, dass die maximal mögliche Leistungszahl einer Kältemaschine nur von den Temperaturen der Wärmesenke  $T_K$  und der Wärmequelle  $T_H$  abhängt. Die Formel zur Bestimmung der maximal möglichen Leistungszahl lautet  $\epsilon_{KM,max} = \frac{T_K}{T_H - T_K}$

## Zyklus 3 Strömungsmechanik

Strömungen beschreiben die gerichtete Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen (Fluide). Fluide unterscheiden sich dabei in der Art von Festkörpern, dass ihre Moleküle frei gegeneinander verschiebbar sind.

Strömungen treten in Natur und Technik in vielfältiger Weise auf: Wasser in einem Flussbett, Blut in unseren Adern bzw. im Herzen, Luftströmungen an Flugzeugen oder Öl und Gas in Pipelines. Die Strömungen lassen sich einerseits über Aspekte des Strömungsverhaltens (laminar, turbulent, etc.) und andererseits auch über Aspekte des Fluidverhaltens (einphasig, mehrphasig) unterscheiden.

Auch in der Kältetechnik kommen Sie täglich mit den Aspekten der Strömungsmechanik in Berührung. Im Folgenden gehen wir auf die für Sie wichtigsten Aspekte ein.

### Druck:

Der Druck in Fluiden ist als Kraft pro Fläche definiert und hat die Einheit Pascal [Pa]. Ein Pascal entspricht hierbei einer Kraft eines Newtons pro Quadratmeter. Die Benennung erfolgte nach dem französischen Wissenschaftler Blaise Pascal. Die Formel zur Berechnung des Druckes lautet:

$$p = \frac{F}{A}$$

Neben der in der Physik allgemein durchgesetzten Einheit Pascal, gibt es auch noch die in Deutschland geläufigere Einheit Bar. Hierbei entspricht 1 Bar 100.000 Pascal oder weiter umgerechnet  $100.000 \frac{N}{m^2}$

Im amerikanischen Raum taucht ebenfalls die Einheit psi auf, welche für „pound-force per square inch“ steht, also die Gewichtskraft die von einem angloamerikanischen Pfund bei Normalfallbeschleunigung auf eine Fläche von einem Quadratzoll wirkt. Hierbei gilt, dass der Druck von einem Bar ungefähr dem Druck von 14,5 psi entsprechen.

In ruhenden Medien breitet sich der Druck nahezu konstant im Ganzen Fluid aus. So ist beispielsweise der uns alle umgebende Luftdruck auf Höhe des Meeresspiegels etwa 1.013 hPa was umgerechnet etwa 1,013 bar entspricht.

In der Physik gibt es verschiedene Arten von Druck. Ein häufig auftretender Begriff hierbei ist der **Schweredruck**. Der schweredruck ist der Druck, der durch das Eigengewicht eines Fluids entsteht. Die Formel zur Berechnung des Schweredruckes lautet  $p = \delta \times g \times h$ . In Kälteanlagen finden Sie den Schweredruck im Bereich von

Höhenänderungen in Rohrleitungen. So wirkt beispielsweise auf ein Expansionsventil, welches sich am Ende einer fallenden Flüssigkeitsleitung befindet, ein höherer Druck als bei einer waagerechten Leitung. Wichtig ist dieser Effekt bei der Betrachtung des Druckverlustes. So kann beispielsweise eine Nichtbeachtung des Schweredruckes bei steigenden Flüssigkeitsleitungen für ein Vorverdampfen des Kältemittels und somit zu Flüssigkeitsschlägen am Expansionsventil führen.

### Alles Verstanden?

#### Aufgabe 16)

Welcher Druck baut sich in einer Wassersäule von 10 m Höhe auf?

#### Aufgabe 17)

Auf ein Rechteck mit den Kantenlängen  $a = 3 \text{ m}$  und  $b = 7 \text{ m}$  wirkt eine Kraft von 17 kN.

Wie groß ist der Druck in Pa und wie groß ist der Druck in mbar?

### Ideale Strömung:

Fluide bewegen sich nicht wie Festkörper, bei denen die Position jedes Moleküls gleichbleibt. Stattdessen ergibt sich ein Strömungsfeld aus vielen einzelnen Masseteilchen mit einer räumlichen Geschwindigkeitsverteilung. Das bedeutet bei Fluiden, die sich bewegen, können an unterschiedlichen Positionen unterschiedliche Geschwindigkeiten vorliegen. So herrscht, in der Regel, bei Flüssigkeiten und Gasen, die durch ein Rohr fließen, im Kern des Rohres eine höhere Geschwindigkeit als außen im Bereich der Wandung. Sehr langsam fließende Medien haben in technisch glatten Rohren eher ein laminares Fließverhalten. Bei zunehmender Geschwindigkeit entstehen jedoch Wirbel im Fluid und man spricht von einer turbulenten Strömung. Verstärkt wird das Phänomen noch durch die Rohrbeschaffenheit. Je rauer das Rohr, desto mehr Verwirbelungen entstehen.

Ein physikalischer Wert, welcher die Fließeigenschaften eines strömenden Fluids beschreibt, ist die sogenannte Reynoldszahl. Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Kenngröße und lässt sich im Bereich der kältetechnischen Anwendungsfälle wie folgt berechnen:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\eta}$$

Hierbei ist  $\rho$  die Dichte des Stoffes,  $v$  die mittlere Geschwindigkeit,  $d$  der Innendurchmesser und  $\eta$  die dynamische Viskosität des Fluids.

Bis zu einer Reynoldszahl von 2320 spricht man in der Strömungslehre von einer laminaren Strömung, bei Werten über 2320 von einer turbulenten Strömung.

In den kältetechnischen Anwendungen sind die Strömungen in der Regel turbulent. Eine turbulente Strömung erhöht den Wärmeübergang in einem Rohr. Doch je turbulenter eine Strömung ist, desto höher ist auch der Druckverlust. Da der Druckverlust eine entscheidende Kenngröße bei der Rohrleitungsdimensionierung ist, wird die Reynoldszahl noch einmal im späteren Verlauf des Skriptes auftauchen.

### Massenstrom:

Wie im Feld der SI-Einheiten schon kurz angeschnitten handelt es sich bei einem Massenstrom um eine zeitliche Ableitung einer Masse.

Der Massenstrom oder Massenfluss beschreibt die Masse eines Mediums, das sich pro Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt bewegt.

Die Formel zur Berechnung des Massenstromes lautet demnach:

$$\dot{m} = \rho \times v \times A$$

und trägt die Einheit  $\frac{kg}{s}$ .

Der Massenstrom in einem geschlossenen System ist immer konstant.

### Volumenstrom:

Auch der Volumenstrom ist eine zeitliche Ableitung des Volumens und definiert die volumenbezogene Menge eines Mediums in Bewegung.

Die Formel zur Berechnung des Volumenstromes lautet:

$$\dot{V} = A \times v = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

und trägt die Einheit  $\frac{m^3}{s}$ .

In einem typischen, direktverdampfenden Kälteprozess herrschen in den verschiedenen Rohrleitungen aufgrund der unterschiedlichen Dichten des Kältemittels unterschiedliche Volumenströme. Doch auch innerhalb einer Rohrleitung können aufgrund von Druck- und Temperaturunterschieden unterschiedliche Volumenströme herrschen.

## Kontinuitätsgleichung:

In der Strömungsmechanik gibt es drei mathematisch-physikalische Beschreibungen, um die Strömungen weiter zu beschreiben. Auf eine davon gehen wir hier genauer ein, da sie in der Kältetechnik häufig Anwendung findet.

Bei der sogenannten Kontinuitätsgleichung, auch Massenerhaltungssatz genannt, handelt es sich um eine Gleichung, die die Änderungen von Geschwindigkeit und Querschnittsfläche bei gleichbleibendem Massenstrom beschreibt. Hieraus resultiert auch der Name Massenerhaltungssatz.

Die Beziehung kann mathematisch mit folgender Beschreibung wiedergegeben werden:

Bei kompressiblen Medien, also gasförmigen Medien gilt:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\Leftrightarrow \rho_1 \times v_1 \times A_1 = \rho_2 \times v_2 \times A_2 = \text{konst.}$$

Für inkompressible Fluide, also flüssige Medien gilt, da die Dichte konstant bleibt:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

$$\Leftrightarrow A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = \text{konst.}$$

Also, je kleiner der Querschnitt in der Austrittsseite wird, desto höher ist die Geschwindigkeit an diesem Punkt.

In der Kältetechnik nutzt man dieses physikalische Phänomen, um Steigleitungen so zu dimensionieren, dass die Geschwindigkeit ausreichend hoch ist, um die Öltropfen mitzureißen.

## Alles Verstanden?

### Aufgabe 18)

Durch eine Rohrleitung mit dem Innendurchmesser von 20 mm fließt

Wasser mit dem Volumenstrom von  $3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ .

Wie groß ist die Geschwindigkeit des Wassers, wenn das Rohr auf einen Innendurchmesser von 100 mm erweitert wird?

## Zyklus 4 Thermodynamik

Das Gebiet der Thermodynamik ist einer der wichtigsten Bereiche der Physik und erlaubt es, Energiesysteme real zu betrachten. Sie erweitert die Umwandlung verschiedener Energieformen, die bereits aus dem Bereich der Mechanik bekannt sind, um den Faktor Wärme und bildet damit die Grundlage zur Beschreibung vieler technischer Systeme wie beispielsweise der Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen.

### Wärme:

Wird Energie ohne den Einfluss von mechanischer Arbeit von einem System bzw. Gegenstand auf ein anderes bzw. einen anderen übertragen, so geschieht dies in Form von Wärme. Innerhalb des Systems oder des Gegenstandes ist die durch Wärme übertragene Energie in Form von Bewegung der Atome und Moleküle als thermische Energie gespeichert.

Die Bewegungen der Atome und Moleküle sind, wie bei der Beschreibung der SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur bereits erwähnt, Wechselwirkungen mit deren Temperatur.

Genau wie die mechanische Arbeit ist die Wärme auch eine Energieform und trägt damit die Einheit Joule [J]. Ihr Formelbuchstabe ist Q.

In der Physik gibt es den Begriff der Kälte theoretisch nicht. Es gibt nur verschiedene Mengen an Wärme. Eine Kälteanlage ist somit eigentlich nur eine Wärmetransportmaschine, um einem Medium Wärme zu entziehen und zu einem anderen Ort zu transportieren (→Wärmepumpe).

Die in der Kältetechnik meist vorkommenden Formeln zur Bestimmung einer Wärmemenge lauten wie folgt:

1.  $Q = m \times c \times \Delta\vartheta$  → Wärmemenge eines Stoffes
2.  $Q = m \times q$  → Schmelzwärme
3.  $Q = m \times r$  → Verdampfungswärme
4.  $Q = m \times a$  → Atmungswärme
5.  $Q = P \times f \times \tau$  → Abwärme (elektr.)

$m$ = Menge eines Stoffes;  $c$ = spez. Wärmekapazität;  $\Delta\vartheta$ = Temperaturänderung;  $q$ = spez. Schmelzwärme;  $r$ = spez. Verdampfungswärme;  $a$ =spez. Atmungswärme;  $P$ = elektr. Leistung;  $f$ = Abwärme-Faktor;  $\tau$ = Zeitabschnitt



## Leistung:

Wie auch schon bei der Wärme hat die thermische Leistung einen von der mechanischen und elektrischen Leistung abweichenden Formelbuchstaben.

Die thermische Leistung ist ebenfalls wieder eine zeitliche Ableitung der Wärme und beschreibt, wie viel Wärmeenergie in einer bestimmten Zeit transportiert wird. Der Formelbuchstabe lautet demnach  $\dot{Q}$  und trägt die Einheit Watt [W].

Die Wärmeleistung kann mit der Formel

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

bestimmt werden.

Zwei weitere in der Kältetechnik oft verwendete Formeln um einen Wärmestrom, also eine Wärmeleistung, zu berechnen lauten:

1.  $\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h$  → Wärmeleistung
2.  $\dot{Q} = k \times A \times \Delta \vartheta$  → Wärmestrom durch Bau- / Dämmstoffe (Transmission)

## Erster Hauptsatz der Thermodynamik:

Analog zur Energieerhaltung in der Mechanik gilt ebenso in der Thermodynamik, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Es kann also lediglich eine Umwandlung der Energieformen untereinander stattfinden. Wenn wir diesen Grundsatz in Bezug auf ein geschlossenes System formulieren, so gilt:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Die Änderung der gesamten inneren Energie  $\Delta U$  entspricht der Summe der mit der Umgebung oder einem anderen System oder Gegenstand ausgetauschten Wärme  $\Delta Q$  und Arbeit  $\Delta W$ . Dieser erweiterte Energieerhaltungssatz wird gemeinhin als der erste thermodynamische Hauptsatz bezeichnet.

Die mechanischen Arbeiten im Bereich der Thermodynamik können beispielsweise die Volumenänderungsarbeit und die Druckänderungsarbeit sein.

$$W_V = -p \times \Delta V \quad \rightarrow \text{Volumenänderungsarbeit}$$

$$W_D = V \times \Delta p \quad \rightarrow \text{Druckänderungsarbeit}$$

## Enthalpie:

Mit dem Wissen aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann die Enthalpie als neue Zustandsgröße definiert werden. Die Enthalpie -  $H$  wird vollständig beschrieben durch die Summen der einzelnen Differenziale der inneren Energie und der Änderung des Produkts aus Druck und Volumen:

$$\Delta H = \Delta U + p \times \Delta V + V \times \Delta p$$

Sie beschreibt als **extensive Zustandsgröße** von Materie, wie viel Energie sich darin befindet. Da es sich bei der Enthalpie ebenfalls um eine Energie handelt, ist ihre Einheit ebenfalls das Joule [J].

Die Enthalpie, früher oft auch Energieinhalt genannt, kann messtechnisch nicht erfasst werden, lediglich eine Enthalpiedifferenz zwischen zwei Zuständen. Diese Differenz wird auch Reaktionsenthalpie genannt.

In der Kältetechnik ist häufig die Rede von der sogenannten spezifischen Enthalpie. Diese bezieht sich auf eine Masse und man erhält sie in dem man die Enthalpie durch die Masse teilt. Es ergibt sich die Einheit  $\frac{J}{kg}$ . Der Formelbuchstabe ist das kleine  $h$ . Durch den Bezug auf eine fixe Masse wird aus der extensiven Größe, eine intensive Größe, also eine nicht von der Systemgröße abhängige Kennziffer.

**Extensive Zustandsgröße**  
Extensive Zustandsgrößen sind Größen, die von der Größe eines Systems abhängig sind.

## Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik:

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gibt dem ersten Hauptsatz eine Einschränkung. In der Physik haben alle Prozesse eine Vorzugsrichtung, das heißt, Energien können nicht einfach so beliebig ineinander umgewandelt werden.

Um das nachfolgende Prinzip besser zu verstehen, sollte man zunächst auf die Begriffe Reversibilität und Irreversibilität genauer eingehen.

**Reversibilität (lat.; dt., Umkehrbarkeit):**

Als reversibel werden alle Prozesse bezeichnet, welche vollständig umkehrbar, also ohne bleibende Änderung des betrachteten Systems sowie der Umgebung ablaufen.

**Irreversibilität (lat.; dt., Unumkehrbarkeit):**

Als irreversibel werden alle Prozesse bezeichnet, bei denen nach deren Rückkehr zum Ausgangszustand eine bleibende Änderung des betrachteten Systems oder der Umgebung resultiert.

In der Tat existiert kein einziger natürlicher oder technisch ablaufender Prozess, dessen Ausgangszustand ohne äußeres Einwirken wieder vollständig erreicht wird. Der zweite Hauptsatz besagt also folgendes:

- Alle in der Natur vorkommenden Vorgänge sind irreversibel.
- Wärme geht von selbst nur von einem wärmeren zu einem kälteren Körper über.

## Entropie:

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich über die Definition einer weiteren Zustandsgröße, der Entropie, auch mathematisch in Form von Wahrscheinlichkeiten ausdrücken. Die Entropie ist also ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustands. Je größer die Entropie des Zustands ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass dieser Zustand erreicht wird.

Allgemein kann die Entropie auch als das Maß der Unordnung oder des Chaos in einem System beschrieben werden. Das Formelzeichen der Entropie ist das  $S$  und die Einheit der Entropie lautet  $\frac{J}{K}$ .

Berechnet werden kann die Entropie nachfolgender Formel:

$$S = k_B \times \log w$$

$k_B$  ist hierbei die **Boltzmann-Konstante** und  $w$  die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes.

Bei einem ideal reversiblen Prozess kann von einer Entropieänderung  $\Delta S$  von 0 ausgegangen werden.

Die spezifische Entropie bezieht sich wie auch schon die spezifische Enthalpie auf eine bestimmte Masse. Der Formelbuschstabe ist  $s$  und die Einheit  $\frac{J}{kg \times K}$ .

## Wärmetransport:

Wenn sich Wärme, wie im zweiten Thermodynamischen Hauptsatz erklärt, vom hohen zum niedrigen Temperaturniveau bewegt, spricht man in der Physik vom sogenannten Wärmetransport.

Nachfolgend gehen wir kurz auf die verschiedenen Formen des Wärmetransportes ein und betrachten kurz beispielhaft einzelne, einfache geometrische Konfigurationen.

### Wärmeleitung

Wärmeleitung ist der Energietransport zwischen benachbarten Molekülen in einem Material, in dem ein Temperaturunterschied herrscht. Moleküle bewegen sich chaotisch um ihre Ruhelage herum, wobei diese kinetische Energie (=> Bewegungsenergie) umso höher ist,

### Boltzmann-Konstante

Die Boltzmann-Konstante ist ein Umrechnungsfaktor von absoluter Temperatur in Energie und beträgt:

$$1,3806 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}.$$

je höher die Temperatur ist. Der Energietransport erfolgt aufgrund von Zusammenstößen zwischen den einzelnen Molekülen. In Metallen wird zusätzlich noch Energie durch freie Elektronen übertragen. Betrachtet man nun diesen Grundsatz, lässt sich festhalten, dass Wärmeleitung in allen Festkörpern, Gasen und Flüssigkeiten auftreten, setzt aber keine wirkliche Bewegung des Stoffes voraus.

Die **Wärmestromdichte**  $\dot{q}$  bei reiner Wärmeleitung hängt nur von der sogenannten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ab. In Beziehung auf das Fouriersches Gesetz ergibt sich für die Wärmestromdichte die Formel

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

bei der  $\Delta T$  dem Temperaturunterschied und  $\Delta x$  dem Ortsunterschied entspricht. Durch Zusammensetzung des Fourierschen Gesetzes und der Herleitung der Wärmestromdichte ergibt sich für die Wärmeleitung folgende Formel:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\Delta x} \times A \times \Delta T$$

Die einfachste Bestimmung einer Wärmeleitung kann bei einer ebenen Wand vorgenommen werden. Hier erfolgt aufgrund der Eindimensionalität die Temperatur linear und anstelle von  $\Delta x$  kann die Wanddicke angenommen werden.

Zur Bestimmung der Wärmeleitung durch einen Hohlzylinder wie beispielsweise einer Rohrleitung ändert sich die obige Formel wie folgt ab:

$$\dot{Q} = \frac{2 \times \pi \times l \times \lambda}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \times \Delta T$$

### *Konvektion und konvektiver Wärmeübergang*

Als Konvektion wird der Energietransport in einem strömenden Medium bezeichnet. Zu dem Energietransport durch Wärmeleitung kommt hier aus Sicht eines ruhenden Beobachters ein Energietransport durch die Bewegung des Stoffes hinzu. Mit dieser Bewegung findet ein Transport von Enthalpie und kinetischer Energie statt.

Konvektiver Wärmetransport hängt somit nicht nur von den Stoffwerten des Fluids, sondern auch von Parametern wie der Strömungsgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad ab.

Die Berechnung der Wärmestromdichte bei der Konvektion erfolgt mithilfe eines Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  nach der Formel

$$\dot{q} = \alpha \times \Delta T$$

wobei das  $\Delta T$  der Temperaturdifferenz zwischen einem Medium (Bsp. Verdampferoberfläche) und dem strömenden Medium entspricht.

Der Wärmeübergangskoeffizient wird in der Praxis experimentell ermittelt, da seine rechnerische Ermittlung aufgrund der vielen Faktoren wie Temperatur, Dichte, Viskosität, Geschwindigkeit, Turbulenzgrad etc. äußerst komplex wäre.

Die Berechnung des Wärmestroms bei einer freien Konvektion berechnet sich unter einbeschuss der Herleitung der Wärmestromdichte wie folgt:

$$\dot{Q} = \alpha \times A \times \Delta T$$

Für weitere Berechnungen müssten zunächst weitere Berechnungsmethoden und Kennziffern erläutert werden, was über das in der Meisterschule benötigte Maß weit hinausgehen.

### Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung befasst sich mit der von einem Körper in Form von elektromagnetischen Wellen emittierten Energie. Sie ist umso größer, je höher die Temperatur des Körpers ist. Anders als Wärmeleitung oder Konvektion ist der Transport dieser Energieform von einem Ort A zu einem Ort B nicht an ein Medium gebunden, da elektromagnetische Wellen sich auch im Vakuum ausbreiten können.

Jeder Körper emittiert Wärmestrahlung. Die maximale Energiestromdichte  $\dot{e}_s$  die ein Körper hierbei emittieren kann beträgt:

$$\dot{e}_s = \sigma \times T^4$$

$\sigma$  entspricht hierbei der Stefan-Boltzmann-Konstante (nicht zu verwechseln mit der Boltzmann-Konstante) und beträgt  $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ .

Ein Körper, von dem diese maximale Strahlung ausgeht, nennt man auch *schwarzen Körper*. Bei Wärmetransportvorgängen von schwarzen Strahlern ist die Energiestromdichte mit der Wärmestromdichte gleichzusetzen.

Die Wärmestrahlung eines realen Körpers lässt sich unter Berücksichtigung eines Emissionsgrades  $\varepsilon$  berechnen.

$$\dot{e} = \varepsilon \times \sigma \times T^4$$

Hierbei hängt der Emissionsgrad vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers ab.

Für die Berechnung der Wärmestrahlung für einen nicht leitenden Körper, auch *grauer Strahler* genannt, kann die Formel

$$\dot{Q} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_1^4 - T_2^4)$$

Genutzt werden, wobei die Temperaturen in Kelvin umgerechnet werden müssen.

## Kinetische Gastheorie:

Die kinetische Gastheorie liefert einen Ansatz, um die Zusammenhänge zwischen den thermischen Zustandsgrößen Druck, Volumen und Temperatur mathematisch für ideale Gase zu beschreiben. Sie liefert die Verknüpfung der makroskopisch zu beobachtenden Zustandsgrößen mit den mikroskopischen Vorgängen im Gas. Um die Theorie nachzuvollziehen, betrachten wir die idealisierten Annahmen, welche zur Beschreibung eines idealen Gases führen. Bei einem idealen Gas...

.. sind die unter den Atomen und Molekülen vorhandenen Anziehungskräfte vernachlässigbar klein, ihr Verhalten folgt dem von Massepunkten, Zusammenstöße einzelner Atome oder Moleküle untereinander bzw. mit vorhandenen Gefäßwänden erfolgen ideal elastisch und sie bewegen sich geradlinig und ohne bestimmte Vorzugsrichtung.

Die Zustandsgleichung der kinetischen Gastheorie lautet wie folgt:

$$p \times V = n \times R \times T$$

Wobei  $n$  die Molzahl des Gases beschreibt und  $R$  die **allgemeine Gaskonstante** darstellt.

Die Zustandsgleichung lässt sich auch über die Masse des Gases über die Formel  $p \times V = m \times R_s \times T$  berechnen, wobei  $R_s$  die spez. Gaskonstante ist.

### Allg. Gaskonstante

Die allg. Gaskonstante ist das Produkt der Boltzmann- und der Avogadro-Konstante und beträgt:

$$8,31444 \frac{J}{mol \times K}$$

## Gasgesetze:

Um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten Druck, Volumen und Temperatur besser zu beschreiben, haben sich in der Vergangenheit verschiedene Forscher mit dem Verhalten von Gasen beschäftigt.

Zur Beschreibung idealer Gase wurden mehrere Gesetze aufgestellt, die wie folgt lauten:

### Gesetz von Boyle-Mariotte:

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$$

Das Gesetz beschreibt die Wechselwirkung von Druck- und Volumenänderungen unter Konstanthaltung der Temperatur.

### 1. Gesetz von Gay-Lussac:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = konst.$$

Das erste Gesetz von Gay-Lussac beschreibt die Abhängigkeit von Temperatur- und Volumenänderungen bei konstantem Druck.

## 2. Gesetz von Gay-Lussac:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Das zweite Gesetz von Gay-Lussac beschreibt die Abhängigkeit von Druck- und Temperaturänderungen bei konstantem Volumen.

Setzt man die drei Gasgesetze zusammen ergibt sich das vereinigte Gasgesetz:

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2} = \text{konst.}$$

## Aggregatzustände:

Der Aggregatzustand bezeichnet den physikalischen Zustand von Materie, der auf die Anordnung und Schwingungsamplitude der Teilchen zurückzuführen ist.

Wenn Wasser beispielsweise gekühlt wird, verlangsamen sich die Wassermoleküle und es entsteht Eis.

Die Aggregatzustandsänderung lässt sich mit Hilfe des Temperatur-Enthalpie-Diagramms sehr leicht veranschaulichen.

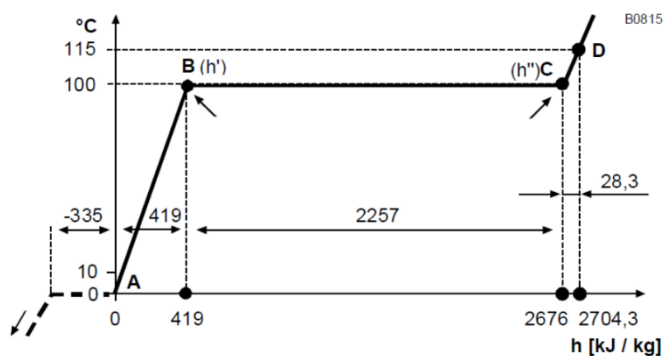


Abbildung 1 ) Temperatur-Enthalpie Diagramm für Wasser

Die Zustände des Wassers lassen sich zwischen den Punkten A-D wie folgt beschreiben:

- A -> B Erwärmung des flüssigen Stoffes (sensible Wärme)
- B -> C Verdampfung, flüssig -> gasförmig (latente Wärme)
- C -> D Überhitzung des gasförmigen Stoffes (sensible Wärme)
- C -> B Verflüssigung, gasförmig -> flüssig (latente Wärme)



Der Übergang von einem Aggregatzustand in den anderen erfolgt durch Zu- oder Abfuhr von Wärme (Enthalpie) oder durch eine Druckänderung.

Es gibt drei klassische Aggregatzustände: fest, flüssig und gasförmig. Zudem gibt es noch den Aggregatzustand Plasma, welcher bei extrem hohen Temperaturen erreicht wird.

Jeder Übergang zwischen den individuellen Zuständen wird als Phasenübergang bezeichnet. Sollte eine Substanz von einem Zustand in einen anderen übergehen, ohne einen Zwischenzustand zu passieren (Bsp. Wasser von fest zu gasförmig), nennt man dies Sublimation.

Zusätzlich gibt es noch zwei weitere, besondere Punkte. Der Punkt, wenn ein Medium gleichzeitig fest, flüssig und gasförmig ist, wird Tripelpunkt genannt. Der andere Punkt ist der kritische Punkt. Oberhalb dieses Punktes lässt sich der Aggregatzustand nicht genau beschreiben. Für beide Punkte muss eine richtige Kombination aus einer bestimmten Temperatur und eines bestimmten Druckes vorliegen.

## Zyklus 5      Wellen- und Schwingungslehre

Schwingungen treten sowohl massebehaftet in Form von mechanischen Schwingungen von Stoffen jeglichen Aggregatzustands, als auch masselos in Form von elektromagnetischer Schwingung auf. Ursächlich kommen Schwingungen durch die Umwandlung zweier Energieformen ineinander zustande.

Wellen sind im Unterschied zu Schwingungen immer Massebehaftet und setzen voraus, dass schwingende Teilchen andere Teilchen mitreißen, welche daraufhin ebenfalls anfangen zu schwingen.

In diesem Zyklus beschäftigen wir uns lediglich mit Wellen im Bereich der Akustik. Die weiteren Bereiche sind für Sie als angehende Kälteanlagenbauermeister im Bereich der Kältetechnik zu vernachlässigen.

### Akustik:

Die Akustik beschäftigt sich mit der Ausbreitung von Wellen in elastischen Medien. Diese Medien können Gase, Flüssigkeiten und Festkörper sein. In der Akustik gibt es einen für den Menschen hörbaren und nicht hörbaren Schwingungsbereich. Genau wie Wärmestrahlung können auch sichtbare elektromagnetische Strahlungen (Licht) und mechanische Wellen (Schall) von einem Stoff absorbiert, transmittiert und reflektiert werden. Im Unterschied zum Licht, sind Schallwellen massebehaftete, mechanische Wellen.

Schallwellen sind massebehaftete Longitudinalwellen, über welche sich lokale Druckschwankungen in Medien ausbreiten.

Um die Erregung unterschiedlicher Medien durch Schallwellen zu beschreiben, werden diverse Schallfeldgrößen genutzt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , welche in der Akustik auch Schallgeschwindigkeit bezeichnet wird, ist je nach Übertragungsmedium unterschiedlich groß und lässt sich über ein Stoffspezifisches Kompressionsmodul  $K$  und die Dichte des Mediums  $\rho$  bestimmen.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

In unserer Umgebungsluft bei 0°C und einem Luftdruck von 1 bar liegt die Schallgeschwindigkeit bei  $331,5 \frac{m}{s}$ .

Schallwellen transportieren eine Energie, welche in Form der Schallintensität als Energie pro Zeit und Messfläche  $S$  definiert ist.

$$I = \frac{1}{S} \times \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Bei Integration der Schallintensität über die Messfläche erhält man die Schallleistung  $P$ .

Geläufiger, und den meisten Personen bekannt, ist jedoch die Größe des Schalldruckpegels. Er wird als Maß für die Schallemission genutzt und in der Einheit Dezibel [dB] angegeben. Der Schalldruckpegel liegt bei normalen Unterhaltungen zwischen zwei Menschen, die sich im Abstand von einem Meter gegenüberstehen, bei etwa 50 dB. Der Schalldruckpegel  $L_p$  lässt sich über die Effektivwerte des Schalldruckes und des Bezugsschalldruckes bestimmen.

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{\frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} = \text{Schalldruck}}{\frac{\hat{p}_0}{\sqrt{2}} = \text{Bezugsschalldruck}} \right) \text{dB}$$

Der Bezugsschalldruck ist in der Regel der Schalldruck der Hörschwelle bei 1000 Hz und beträgt  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ .

Um die auditive Wahrnehmung des Menschen mit einzubeziehen, welcher nicht jedes Frequenzband des Schalls wahrnimmt, wird meist eine Klammerangabe nach dem Pegelmaß in dB verwendet → dB(A). Tiefliegende Töne werden vom Menschen als weniger laut empfunden

als hochtönige Geräusche. Die A-Bewertung dämpft daher die tiefen Frequenzen in der Messung, um den Messwert an das menschliche Hörempfinden anzupassen.

Bei einer Zunahme des auditiven Schalldruckpegels um 10 dB(A) entspricht die subjektive menschliche Schallwahrnehmung einer Verdopplung der Lautstärke.

Bei einer Verdopplung des Abstandes zur Bezugsquelle nimmt der Wert der Schallemission in dB(A) jeweils um ca. 6 dB(A) ab.

Für Berechnungen innerhalb der Meisterschule ist die Verwendung dieser Faustformel hinreichend genau.

## Lektion 2 Grundlagen der Kältetechnik

Die Grundlage der heutigen Kältetechnik bildete der deutsche Ingenieur Carl von Linde, als er im Jahr 1872 mit seinen Arbeiten zum Kaltdampfverfahren begann. Damals stellte er bereits fest, dass dieses Verfahren dem bereits bekannten Kaltluft- und Absorptionsverfahren energetisch überlegen war. 1877 wurde seine Erfindung der ersten Kälteerzeugungsmaschine durch das Kaiserliche Patentamt patentiert.

Am Grundprinzip der „Kälteerzeugung“ hat sich bis heute nichts geändert.

### Zyklus 1 Kreisprozess

Den thermodynamischen Zustand eines Fluids kann man in Zustandsdiagrammen darstellen. Komplexe Prozesse wie Kältekreisläufe werden durch die Verbindung von Punkten mit Linien dargestellt. Diese Verbindungslinien entsprechen der Zustandsänderung des Fluids.

In der Kältetechnik ist das Druck-Enthalpie-Diagramm das mit Abstand am häufigsten verwendete Zustandsdiagramm. Der Druck wird meistens logarithmisch skaliert, daher die Bezeichnung  $\log(p)$ -h-Diagramm.

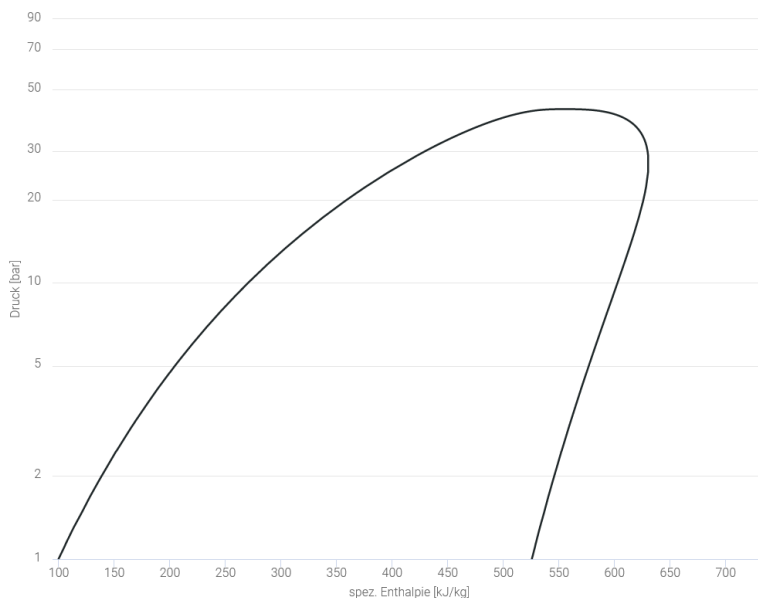


Abbildung 2)  $\log(p)$ -h-Diagramm für das Kältemittel R290

## Isolinien und Nassdampfgebiet

Die thermodynamischen Eigenschaften eines Kältemittels werden im Zustandsdiagramm als Linien konstanter Zustandsgrößen dargestellt – sogenannte Isolinien.

Im nachfolgenden Diagramm bildet der dunkle Bereich das Nassdampfgebiet, oder auch Zweiphasengebiet genannt. Hier liegt das Kältemittel in zwei Phasen vor: flüssig und gasförmig. Je weiter links man sich im Nassdampfgebiet befindet, desto mehr Flüssigkeitsanteile hat das Gemisch.

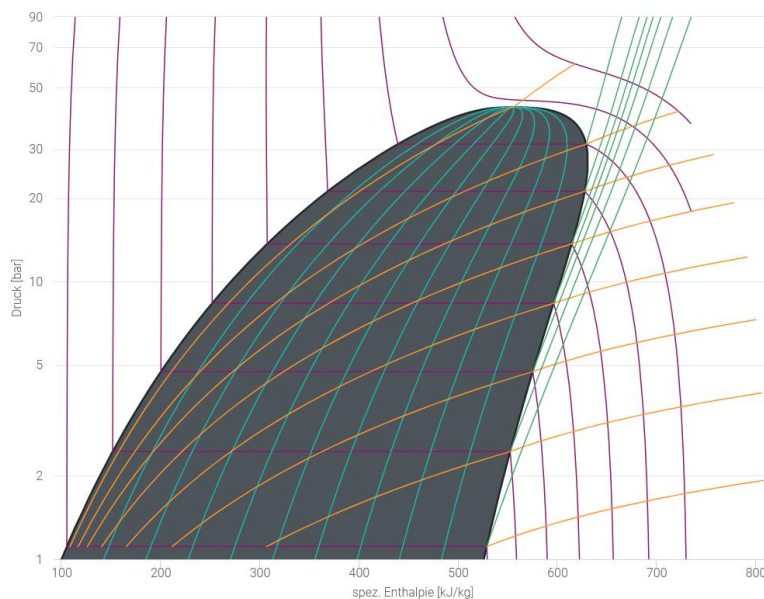


Abbildung 3) log(p)-h-Diagramm mit den Isolinien

Das Nassdampfgebiet wird auf der linken Seite durch die Siedelinie und auf der rechten Seite durch die Taulinie begrenzt. Diese Linien werden auch als Sättigungslinien bezeichnet.

Links von der Siedelinie befindet sich die sogenannte unterkühlte Flüssigkeit. Rechts von der Taulinie befindet sich überhitzter Dampf. Der Punkt in dem sich die beiden Linien treffen wird auch kritischer Punkt genannt. Oberhalb dieses Punktes lässt sich der Aggregatzustand des Kältemittels nicht mehr genau definieren.

### Isobare

Die Isobare ist die Linie des konstanten Druckes. In der Abbildung 3 sind die Isobaren als hellgraue Linien, welche waagerecht verlaufen gekennzeichnet. Der Druck innerhalb des log(p)-h-Diagrammes wird aus Gründen der Übersichtlichkeit meistens logarithmisch dargestellt (-> Daher auch log(p)-h-Diagramm genannt) und entspricht dem

**Absolutdruck.**

### Isenthalpe

Die Isenthalpe ist die Linie der konstanten Enthalpie. In der Abbildung 3 sind die Isenthalpen nicht eingezeichnet. Sie verlaufen orthogonal, ausgehend von der x-Achse. Entlang einer Isenthalpen entstehen somit keinerlei Energieveränderungen.

### Isotherme

Die Isotherme ist die Linie der konstanten Temperatur.

In der Abbildung 3 sind die Isothermen violett dargestellt und verlaufen im Bereich links vom Nassdampfgebiet nahezu senkrecht, im Bereich des Nassdampfgebietes bei Kältemitteln ohne gleit waagrecht und rechts vom Nassdampfgebiet exponentiell fallend. Für die Berechnung von kältetechnischen Prozessen ist die Annahme das die Isotherme im Bereich der unterkühlten Flüssigkeit entlang der Isenthalpen verläuft hinreichend genau.

### Isovapore

Die Isovaporen, oder auch Verhältnisslinien genannt, beschreiben den Dampfgehalt innerhalb des Nassdampfbereiches in Prozent. In Abbildung 3 sind die Isovaporen türkis dargestellt.

### Isochore

Die Isochoren sind die Linien des konstanten, spezifischen Volumens des Kältemittels. In Abbildung 3 sind die Isochoren als orange Linien gekennzeichnet. Da das spezifische Volumen den Kehrwert der Dichte bildet, kann man aus ihnen die Dichte des Kältemittels ableiten.

### Isentrope

Die Isentropen sind die Linien der konstanten, spezifischen Entropie. Die Entropie ist eine physikalische Größe, welche die Unordnung in einem Teilchensystem beschreibt. In Abbildung 3 sind die Isentropen grün dargestellt. Je mehr Unordnung in einem System herrscht, desto höher ist die Entropie und desto schwieriger ist es, zum Ausgangspunkt zurückzukehren.

Linientyp	Konstante	Farbe
<b>Isobare</b>	Druck	Hellgrau
<b>Isenthalpe</b>	Enthalpie	Farblos
<b>Isotherme</b>	Temperatur	Violett
<b>Isovapore</b>	Dampfgehalt	Türkis
<b>Isochore</b>	Spez. Volumen	Orange
<b>Isentrope</b>	Entropie	Grün

Tabelle 4) Zusammenfassung der Isolinien

## Idealer Kreisprozess

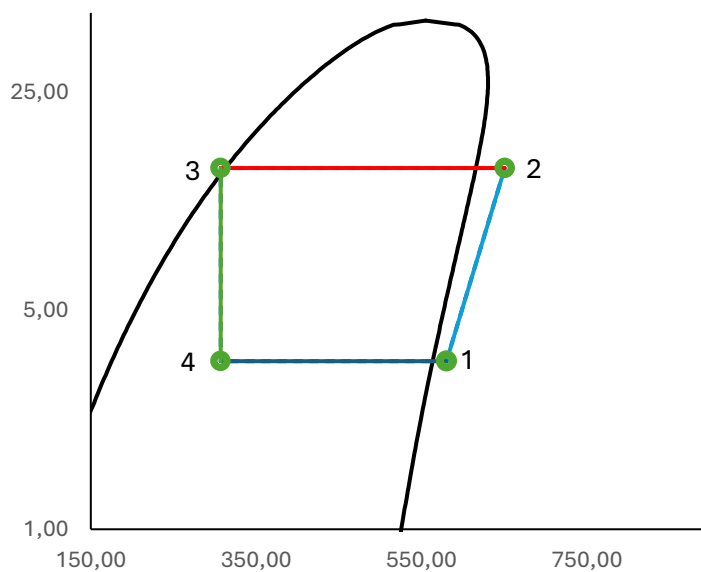


Abbildung 4) Idealer Kreisprozess in einem  $\log(p)$ - $h$ -Diagramm

Der ideale Kältekreislauf besteht aus 4 Punkten, welche mit Linien verbunden werden. Punkt 1 spiegelt hierbei den Ausgangspunkt des Verdampfers und gleichzeitig den Eingangspunkt des Verdichters wider. Punkt 2 beschreibt den Ausgangspunkt des Verdichters und den Eingangspunkt des Verflüssigers. Punkt 3 symbolisiert den Ausgangspunkt des Verflüssigers und den Eingangspunkt in das Drosselorgan und Punkt 4 entspricht dem Drosselorganausgang und dem Verdampfereingang.

Zwischen den Punkten 1 und 2 verläuft die Linie der Verdichtung. Da diese Linie im idealen Kreisprozess entlang der Isentropen verläuft, spricht man auch von isentroper Verdichtung. Zwischen den Punkten 2 und 3 liegt die Verflüssigung. Da diese Linie entlang der Isobaren verläuft, wird sie auch isobare Verflüssigung genannt. Hierbei teilt sich die Verflüssigung in 3 Bereiche auf. Ausgehend von Punkt 2 bis zur Taulinie entspricht die Linie der Isobaren Enthitzung, von der Taulinie bis zur Siedelinie verläuft die eigentliche Verflüssigung. Sie ist im idealen Kreislauf sowohl isobar als auch isotherm. Von der Siedelinie aus bis zum Punkt 3 befindet sich noch die isobare Unterkühlung. Die Linie von Punkt 3 nach Punkt 4 wird aufgrund ihres isenthalpen Verlaufes auch isenthalpe Entspannung genannt, da hier das Kältemittel von einem hohen Druckniveau auf ein niedrigeres Druckniveau entspannt wird. Ausgehend von Punkt 4 bis zur Taulinie befindet sich die isobare und isotherme Verdampfung, von der Taulinie bis zu Punkt 1 spiegelt die Linie die isobare Überhitzung wider.



## Realer Kreisprozess

Im realen Kreisprozess wird das bisher aus 4 Punkten bestehende System auf eine nahezu unendliche Anzahl an Punkten erweitert. Dies liegt daran, dass die Prozesse in den seltensten Fällen wirklich entlang der Isolinien verlaufen. So haben die Wärmetauscher beispielsweise einen gewissen Druckverlust, sodass die Verflüssigung/Verdampfung nicht isobar verlaufen kann. Genau so finden sich zwischen den Bauteilen Rohrleitungen, die eine Temperatur und Druckänderung zur Folge haben. Einer der markantesten Punkte ist der, dass die Verdichtung nicht isentrop, sondern angenommen polytrop verläuft. Hierzu später mehr.

## Zyklus 2 Dampftafeln

Um im  $\log(p)$ - $h$ -Diagramm Berechnungen durchführen zu können werden Stoffdaten benötigt. Diese Stoffdaten werden in sogenannten Dampftafeln zusammengetragen. Jedes Kältemittel hat eigene Dampftafeln, welche durch komplexe Berechnungen und Näherungsverfahren erstellt werden. Durch den hohen Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Dampftafeln sind diese in der Regel nur käuflich zu erhalten.

Der Aufbau der Dampftafeln ist, egal um welchen Anbieter es sich handelt, immer ähnlich. Die Dampftafeln starten mit den Stoffdaten für die Sättigungslinien. In dieser Tabelle kann jedem Druck eine äquivalente Temperatur zugeordnet werden. Da die Sättigungslinien beide Zustände (sowohl 100% flüssig als auch 100% gasförmig) beschreiben, findet man für die Dichte des Kältemittels, den Energiegehalt, die Entropie und die spezifische Wärmekapazität jeweils zwei Werte. Der erste, meist mit einem Einzelstrich gekennzeichnete Wert beschreibt die Stoffdaten auf der Siedelinie, die mit zwei Strichen gekennzeichneten Werte beschreiben die Taulinie. In manchen Dampftafeln findet man anstelle der Dichte auch das spezifische Volumen. Dieses ist der Kehrwert der Dichte.

Temperatur t °C	Druck p bar	Dichte $\rho'$ $\rho''$ $\frac{kg}{m^3}$		Enthalpie h'   h'' $\frac{kJ}{kg}$		Entropie s'   s'' $\frac{kJ}{kg \cdot K}$		spezifische Wärmekapazität c <sub>p</sub> '   c <sub>p</sub> '' $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	
-55	0,55	595,5	1,3764	71,73	510,46	0,4799	2,4910	2,1912	1,3712
-54	0,58	594,4	1,4417	73,93	511,66	0,4899	2,4874	2,1952	1,3763

Abbildung 5) Ausschnitt einer Dampftafel (R290) für die Sättigungslinien

Um kältetechnische Berechnungen durchzuführen, benötigt man zudem noch die Stoffdaten im Überhitzten Bereich. Da im gasförmigen

Bereich einem gewissen Druck nicht nur eine Temperatur zugeordnet werden kann, ist hier der Dampftafel eine etwas andere. Hier hat jeder Druck eine Starttemperatur (ausgehend von der Taulinie) und dann werden die Stoffdaten an mehreren, überhitzten, Temperaturen dargestellt.

ts= -52°C ps= 0,6408 bar									
t	-52	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15
ρ	1,579	1,564	1,527	1,491	1,458	1,426	1,395	1,366	1,338
h	514,07	516,85	523,85	530,94	538,10	545,36	552,70	560,13	567,65
s	2,4802	2,4927	2,5238	2,5545	2,5849	2,6150	2,6449	2,6746	2,7040
c <sub>p</sub>	1,3866	1,3928	1,4086	1,4249	1,4418	1,4592	1,4770	1,4954	1,5141
c <sub>v</sub>	1,1736	1,1806	1,1983	1,2163	1,2347	1,2534	1,2725	1,2919	1,3117
c	215,90	216,89	219,35	221,76	224,12	226,44	228,72	230,96	233,17

Abbildung 6) Ausschnitt einer Dampftafel (R290) für den Überhitzten Bereich

Die in dem Beispielbild verwendete Tabelle liest sich dementsprechend wie folgt:

Das Kältemittel hat bei einer Verdampfungstemperatur von -52°C einen Druck von 0,6408 bar und beispielhaft eine Enthalpie von 514,07  $\frac{kJ}{kg}$ . Bei einer Überhitzung von 12 K (-40°C) hat das Kältemittel einen Energiegehalt von 530,94  $\frac{kJ}{kg}$ .

Die Tabellen sind für alle Zustände im Bereich des gasförmigen Aggregatzustandes nutzbar. Sollten weitere Daten aus Bereichen innerhalb oder zwischen zwei Tabellen gebraucht werden, so muss interpoliert werden.

Mit der Tabelle für die Sättigungslinien und die Tabellen für den überhitzten Bereich lassen sich alle für die Meisterschule benötigten Zustände, Rohrleitungen und Komponenten auslegen.

## Zyklus 3 Interpolation

Unter Interpolation versteht man die Bestimmung von Zahlenwerten zwischen aufeinanderfolgenden Tabellenwerten. Die in der Meisterschule verwendete Form der Interpolation ist die lineare Interpolation.

Die Formel hierfür lautet:

$$x_g = x_2 + (x_1 - x_2) \times \frac{y_2 - y_g}{y_2 - y_1}$$

Mit einer Lösungstabelle lassen sich die Indizes und Tabellenwerte leicht darstellen.

	X	Y
unterer Wert (1)		
gesucht (g)		
oberer Wert (2)		

Tabelle 5) Lösungstabelle einer Interpolation

Da es sich hierbei um ein Näherungsverfahren handelt spiegelt das Ergebnis bei nicht linear verlaufenden Tabellenwerten nicht das exakte, jedoch ein für diesen Anwendungsfall hinreichend genaues Ergebnis wider.

## Zyklus 4 Lift

Das Verhältnis zwischen Verflüssigungsdruck und Verdampfungsdruck wird Lift genannt. Es definiert, um welches vielfaches der Verdichter den Saugdruck erhöht.

$$Lift = \frac{\text{Verflüssigungsdruck } p_c}{\text{Verdampfungsdruck } p_e}$$

Damit ein Verdrängungsverdichter arbeiten kann, wird ein mindest-Lift benötigt. Dieser variiert von Verdichter zu Verdichter und kann in der jeweiligen Herstellersoftware durch Betrachten des Verdichter Einsatzgrenzendiagrammes ermittelt werden.

So wie ein Verdichter auch ein mindest-Lift hat, so hat er auch einen maximalen Lift. Dieser ist ebenfalls aus dem Einsatzgrenzendiagramm abzuleiten.

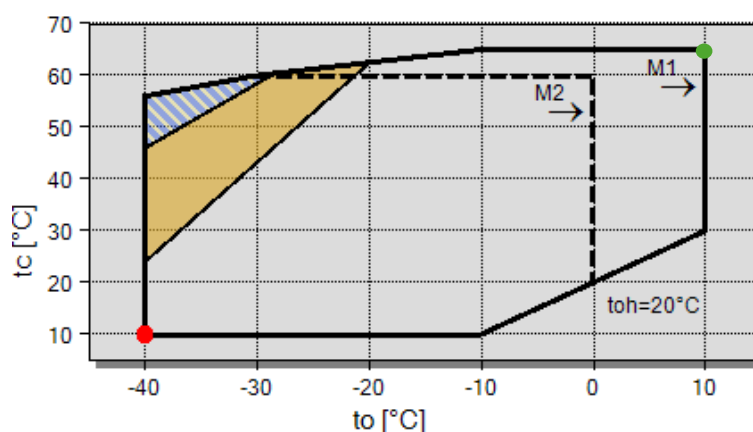


Abbildung 7) Einsatzgrenzendiagramm eines Hubkolbenverdichters. Die Punkte kennzeichnen Minimal-Lift (rot) und Maximal-Lift (grün) – (Quelle: BITZER Software 6.17)

Je geringer der Lift ist, desto weniger Arbeit muss der Verdichter verrichten, um das Kältemittel von Punkt 1 auf Punkt 2 zu verdichten und desto weniger Elektrische Energie muss aufgebracht werden. Die Anlagen laufen also effizienter.



### Isentroper Druckgasgütegrad

Der Isentrope Druckgasgütegrad wird auf die isentrope Stutzenarbeit  $w_{st}$  bezogen, welche in Abbildung 6 als  $\Delta h_{st}$  bezeichnet ist. So ergibt sich der isentrope Druckgasgütegrad  $\eta_{ih}$  aus dem Verhältnis der isentropen Enthalpiedifferenz ( $w_{st-is}; \Delta h_{st-is}$ ) zur realen Enthalpiedifferenz ( $w_{st}; \Delta h_{st}$ ) der Ersatzpolytropen.

Der Unterschied zwischen dem isentropen Gütegrad und dem isentropen Druckgasgütegrad liegt somit in der Definition der zugeführten Energie. Beim isentropen Gütegrad wird die isentrope Stutzenarbeit auf die zugeführte mechanische oder elektrische Leistung bezogen. Beim isentropen Druckgasgütegrad wird dagegen selbige zugeführte Energie um die vom Verdichter abgegebene Wärme  $q$  reduziert.

Der isentrope Druckgasgütegrad eignet sich dazu, den Verdichtungsprozess als Polytrope in das  $\log(p)$ - $h$ -Diagramm einzuzeichnen.

$$\eta_{ih} = \frac{\Delta h_{st-is}}{\Delta h_{st}} = \frac{\Delta h_{st-is}}{w_t - q}$$

Er sagt über die Effizienz, vor allem von kleinen Verdichtern, aber wenig aus. Um eine möglichst genaue Aussage über die Effizienz eines Verdichters zu treffen, muss der isentrope Gütegrad verwendet werden, da nur hier die Abwärme des Verdichtermotors berücksichtigt wird.

### Liefergrad

Eine weitere wichtige Kennzahl ist der Liefergrad  $\lambda$ . Er beschreibt die Variation des geförderten Saugvolumenstromes eines Verdichters bei sich ändernden Betriebsbedingungen. Oftmals wird er als Maß für die Ausnutzung und somit für die Kompaktheit eines Verdichters betrachtet. Er gibt das Verhältnis von, auf Saugstutzenzustand bezogenem Volumenstrom zu Verdrängungsvolumenstrom wieder und ist wie folgt definiert:

$$\lambda = \frac{\dot{m} \times v_s}{\dot{V}_h} = \frac{\dot{m} \times v_s}{n \times f \times V_h}$$

Dabei ist  $v_s$  das spezifische Volumen am Saugstutzen. Der Massenstrom  $\dot{m}$  ist der tatsächlich geförderte Kältemittelmassenstrom. Der Hubvolumenstrom  $\dot{V}_h$  beschreibt das verdrängte Volumen pro Zeit. Er ist somit von der Geometrie, der Anzahl der Verdichtungskammern  $n$  und der Frequenz  $f$  abhängig.

Der Liefergrad wird wie auch der isentrope Gütegrad durch Leckage, Wärmeübertragung und Strömungsverluste verschlechtert. Bei Hubkolbenverdichtern hat zudem der Schadraum einen großen Einfluss.

### Zusammenfassung

Der Isentrope Gütegrad beschreibt, wie effizient ein Verdichtungsprozess abläuft, unter Berücksichtigung von Nutzenergie zu Erzeugungsenergie.

Der Isentrope Druckgasgütegrad definiert die Ersatzpolytrope im Kreisprozess und liefert den „realen“ Verdichtungsendpunkt für Berechnungen.

Der Liefergrad eines Verdichters bestimmt, in welchem Verhältnis sein Ansaugvolumenstrom zu seinem geometrischen Hubvolumenstrom steht.

Im Zuge der Meisterschule wurde entschieden, dass in den Berechnungen im Vorbereitungskurs und der Meisterprüfung lediglich die Begriffe Liefergrad und Gütegrad vorkommen.

**Mit dem Begriff Gütegrad ist der isentrope Druckgasgütegrad gemeint.**

## Zyklus 6 Wärmeleistungen eines Systems

Wie im Bereich der Thermodynamik bereits erklärt, beschreibt der Formelbuchstabe  $\dot{Q}$  eine Wärmeleistung.

In einem kältetechnischen System gibt es viele verschiedene Wärmeleistungen. Jedes Bauteil wird mit einer gewissen Leistung beaufschlagt und muss mit dieser berechnet und ausgelegt werden. In der Regel wird mindestens zwischen folgenden Leistungen unterschieden, mit denen auch die Bauteilauswahl erfolgt:

$\dot{Q}_e$	→	Verdampferleistung
$\dot{Q}_c$	→	Verflüssigerleistung

### Verdampferleistung

Die Verdampferleistung beschreibt, wie viel Wärmeenergie ein Verdampfer bei einem bestimmten Betriebspunkt aufnehmen und transportieren kann.

In der Regel wurde bereits im Vorfeld der Bauteilauswahl eine Kühllastberechnung durchgeführt und die Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  die über den Verdampfer abgeführt werden muss ist bekannt  $\rightarrow \dot{Q}_0 \Leftrightarrow \dot{Q}_e$ .

Mit der Formel  $\dot{Q}_e = \dot{m} \times \Delta h$  kann nun der benötigte Kältemittelmassenstrom durch Umstellen ermittelt werden.

Hierbei ist die Enthalpiedifferenz der Unterschied zwischen der Flüssigkeitsenthalpie und der Enthalpie an der Position des Expansionsventilfühlers, da dieser das Ende des Verdampfers definiert.

Die benötigten Enthalpiewerte können den Dampftafeln entnommen werden. Die Vorgehensweise im einfachen Kältesystem lautet hierbei wie folgt:

1) Ermittlung der Enthalpie in der Flüssigkeitsleitung

$$t_{fl} = t_c - t_u - t_{\Delta p}$$

Hierbei entspricht  $t_c$  der Verflüssigungstemperatur,  $t_u$  der Unterkühlung und  $t_{\Delta p}$  der durch den Druckverlust/Druckgewinn bedingten Temperaturänderung.

Nun wird in der Tabelle der Unterkühlten Flüssigkeit nach diesem Wert gesucht und der Enthalpiewert bei  $h'$  entnommen. Sollte der Temperaturwert nicht genau in der Auflistung sein, so muss zwischen den Tabellenwerten interpoliert werden.

2) Ermittlung der Enthalpie am Expansionsventilfühler

$$t_{ex} = t_0 + t_{ü,n}$$

Hierbei entspricht  $t_0$  der Verdampfungstemperatur und  $t_{ü,n}$  der nutzbaren Überhitzung. Nutzbar, weil diese Überhitzung im Verdampfer passiert und die daraus resultierende Enthalpiemenge mit zur Abkühlung des Mediums genutzt werden kann.

Die entsprechende Enthalpie kann im Bereich des Überhitzten Dampfs aus der Tabelle der Verdampfungstemperatur abgelesen oder interpoliert werden.

3) Errechnen des Massenstromes

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{h_{ex} - h_{fl}}$$

Da der Massenstrom im System immer der gleiche bleibt, stellt der errechnete Massenstrom den benötigten Massenstrom des Verdichters dar. Sollten mehrere Massenströme herrschen (zwei oder mehr Kühlstellen / Bypässe o.ä.) werden diese addiert, um den benötigten Massenstrom zu errechnen.

### Verflüssigerleistung

Da der Verflüssiger die Aufgabe hat die im Verdampfer aufgenommene Wärme und die im Verdichtungsprozess entstandene Wärme abzugeben, wird zur Ermittlung der Verflüssigerleistung noch weitere Werte aus dem Verdichtungsprozess benötigt.

Je nach Betrachtung des Verdichtungsprozesses (ideal o. real) ist die Vorgehensweise der Verflüssigerleistungsbestimmung wie folgt durchzuführen:

#### Ideal:

##### 1) Ermittlung der Enthalpie am Verdichtereingang

$$t_{ve} = t_0 + t_{ü,n} + t_{ü,r} + t_{\Delta p}$$

$t_{ü,r}$  steht hierbei für die Überhitzung in der Rohrleitung und  $t_{\Delta p}$  für die durch den Druckverlust/ Druckgewinn bedingte Temperaturänderung in der Saugleitung.

Mit dieser Temperatur kann die Enthalpie aus dem überhitzten Bereich der Dampftafel, in der Tabelle der Verdampfungstemperatur, gesucht und abgelesen oder interpoliert werden.

##### 2) Ermittlung der Enthalpie am Verdichterausgang

Für die in Schritt 1 genannte Enthalpie wird der entsprechende Entropiewert ebenfalls abgelesen oder interpoliert.

Da die Ideale Verdichtung isentrop verläuft, also bei gleichbleibender Entropie, wird in der Tabelle der Verflüssigungstemperatur der entsprechende Enthalpiewert bei gleicher Entropie wie am Eingangspunkt des Verdichters abgelesen oder interpoliert.

So kann auch die **ideale Verdichtungsendtemperatur** bestimmt werden.

##### 3) Ermittlung der Verflüssigerleistung

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \times (h_{va} - h_{fl})$$

$h_{va}$  steht hierbei für die Enthalpie am Verdichterausgang und  $h_{fl}$  für die Enthalpie der Flüssigkeit.

Da der Ideale Verdichtungsprozess jedoch stark von den realen Bedingungen abweicht, wird in der Meisterschule die Verdichtung nicht als isentrop, sondern als polytroper Prozess mit einer Entropiezunahme (siehe *Isentroper Druckgasgütegrad*). Dieser Prozess wird auch als realer Verdichtungsprozess bezeichnet, obwohl auch hier Abweichungen zur Praxis entstehen.

Die Verflüssigerleistung mit realem Verdichtungsprozess wird wie folgt berechnet:



## Real:

### 1) Ermittlung der Enthalpie am Verdichtereingang

$$t_{ve} = t_0 + t_{ü,n} + t_{ü,r} + t_{\Delta p}$$

$t_{ü,r}$  steht hierbei für die Überhitzung in der Rohrleitung und  $t_{\Delta p}$  für die durch den Druckverlust/ Druckgewinn bedingte Temperaturänderung in der Saugleitung.

Mit dieser Temperatur kann die Enthalpie aus dem überhitzten Bereich der Dampftafel, in der Tabelle der Verdampfungstemperatur, gesucht und abgelesen oder interpoliert werden.

### 2) Ermittlung der idealen Enthalpie am Verdichterausgang

Für die in Schritt 1 genannte Enthalpie wird der entsprechende Entropiewert ebenfalls abgelesen oder interpoliert.

In der Tabelle der Verflüssigungstemperatur wird der entsprechende Enthalpiewert bei gleicher Entropie wie am Eingangspunkt des Verdichters abgelesen oder interpoliert.

### 3) Bestimmung der idealen Enthalpiedifferenz

Nun wird eine Enthalpiedifferenz zwischen Eingang und Ausgang ermittelt:

$$\Delta h_{id} = h_{va} - h_{ve}$$

$h_{va}$  steht hierbei für die Enthalpie am Verdichterausgang und  $h_{ve}$  für die Enthalpie am Verdichtereingang.

### 4) Bestimmung der realen Enthalpiedifferenz

$$\Delta h_{re} = \frac{\Delta h_{id}}{\eta_{ih}}$$

Da sich mit dem isentropen Druckgasgütegrad  $\eta_{ih}$  (In der Meisterschule kurz: Gütegrad) die Ersatzpolytrope des Verdichtungsprozesses beschreiben lässt, wird durch Division die reale Enthalpiedifferenz bestimmt.

### 5) Bestimmung der realen Enthalpie am Verdichterausgang

$$h_{va,r} = h_{ve} + \Delta h_{re}$$

Die reale Verdichtungsenthalpiedifferenz wird auf den Startpunkt, also den Eingangspunkt des Verdichters addiert.

Mit dieser Enthalpie kann in der Tabelle der Verflüssigungstemperatur im überhitzten Bereich der Dampftafel auch die **reale Verdichtungsendtemperatur** gesucht/interpoliert werden.

## 6) Ermittlung der Verflüssigerleistung

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \times (h_{va,r} - h_{fl})$$

$h_{va,r}$  steht hierbei für die reale Enthalpie am Verdichteraustgang und  $h_{fl}$  für die Enthalpie der Flüssigkeit.

Mit dieser Leistung kann nun ein Verflüssiger laut Datenblatt ausgewählt werden. Wie genau diese Auswahl erfolgt wird zu einem späteren Zeitpunkt im Skript erklärt.

## Zyklus 7 Kältetechnische Komponenten

Für den ordnungsgemäßen Betrieb einer Kälteanlage sind vier zentrale Komponenten unverzichtbar: der Verdichter, der Verflüssiger, das Drosselorgan und der Verdampfer. Darüber hinaus können Kälteanlagen durch eine Vielzahl zusätzlicher Bauteile erweitert werden, die dazu dienen, die Effizienz zu steigern, die Betriebssicherheit zu erhöhen oder Wartungs- und Reparaturarbeiten zu erleichtern.

Eine fehlerhafte Dimensionierung von Komponenten kann die Funktionalität oder Sicherheit einer Anlage erheblich beeinträchtigen. Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Bauteile analysiert und die Kriterien für deren sachgerechte Auswahl näher erläutert.

### Kältemittelverdichter

Es gibt viele verschiedene Arten von Kältemittelverdichtern. Die Bauart der Verdichter kann grob in drei Hauptgruppen unterteilt werden:

- **Hermetische Verdichter**  
Bei hermetischen Verdichtern sitzen Motor und Kompressor in einer verschweißten, druckfesten Hülle. Die Bauteile befinden sich im Kältemittelstrom, welcher für die deren Kühlung sorgt.
- **Halbhermetische Verdichter**  
Halbhermetische Verdichtern befinden sich die Bauteile in einem verschraubten Metallgehäuse. Der Kompressor wird hierbei direkt durch den Elektromotor angetrieben. Je nach Verdichter kann die Kühlung bei halbhermetischen Verdichtern auch über das Sauggas oder über die Umgebungsluft realisiert werden.
- **Offene Verdichter**  
Offene Verdichter sind über eine Welle oder einen Riemen mit dem Motor verbunden. Hier sitzt der Motor extern und kommt mit dem Kältemittel nicht in Verbindung. Die Antriebswelle des Verdichters ist mit einer Gleitringdichtung gegen ungewünschten Kältemittelaustritt gesichert.

Jede Verdichterbauart hat ihre eigenen Vor- und Nachteile. So sind hermetische Verdichter kompakt, günstig und wartungsfrei, jedoch

lassen sich an ihnen keine Reparaturen durchführen und durch die Sauggaskühlung steigt die Verdichtungsendtemperatur.

Halbhermetische Verdichter sind reparabel, zuverlässig und noch relativ kompakt, jedoch sind auch hier meist höhere Endtemperaturen zu erwarten und die Dichtungen an den Verschraubungen können bei langem Stillstand undicht werden.

Bei offenen Verdichtern ist durch Wahl eines Benzin- oder Dieselmotors auch ein Betrieb ohne direkte Stromversorgung möglich. Auch bei Kältemitteln, welche mit Buntmetallen unverträglich sind, wie beispielsweise Ammoniak wird auf Verdichter mit offener Bauweise zurückgegriffen. Ein großer Nachteil bei diesen Verdichtern ist jedoch, dass die Dichtungen schnell verschleifen und somit ungewollt Kältemittel austreten kann. Auch die Baugröße ist aufgrund der externen Positionierung des Motors häufig größer.

Zusätzlich zur Bauart können Kältemittelverdichter noch in Verdränger- und Strömungsverdichter unterteilt werden. In

Verdrängungsverdichtern wird das Kältemittel in einem abgeschlossenen Raum durch Volumenreduzierung verdichtet. Bei Strömungsverdichtern wird dem Kältemittel in einem Laufrad Bewegungsenergie zugeführt. Diese wird anschließend durch Reduzierung der Geschwindigkeit in Druckenergie umgewandelt. Zu den Typischen Verdrängerverdichtern gehören unter anderem die Hubkolben- und die Rotationsverdichter wie Scroll-, Rollkolben- und Schraubenverdichter. Zu den Strömungsverdichtern gehören die Turboverdichter und die weniger verbreiteten **Dampfstrahlverdichter**.

In der Praxis der Gewerbekälte werden meist Verdrängerverdichter genutzt, da hier das Zusammenspiel aus Leistungsbedarf, Preis und Einsatzmöglichkeiten für die Anwendungsfälle am besten passt.

Die Unterschiedlichen Bauformen bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. Hubkolbenverdichter können so beispielsweise bauartbedingt auch kleinste Fördervolumenströme und sehr hohe Lifte abfahren. Ein Nachteil ist jedoch, dass dieser aus vielen beweglichen Teilen besteht und somit einen hohen Verschleiß hat.

Schraubenverdichter haben eine deutlichere Laufruhe als Hubkolbenverdichter und durch einen stetigen Verdichtungsprozess auch keine Kältemittelpulsationen. Die Leistung ist durch Leistungsschieber gut regelbar und der Verdichter hat weniger Verschleißteile als ein Hubkolbenverdichter. Jedoch ist bei Schraubenverdichtern genauestens auf die Laufrichtung, den Öltransport und Flüssigkeitsanteile zu achten. Auch bieten Schraubenverdichter in Anwendungsfällen mit kleinen Kälteleistungen keine kosteneffiziente Einsatzmöglichkeit. Scrollverdichter sind unempfindlich gegen Flüssigkeitsschläge, haben einen gleichmäßigen

Fördervolumenstrom und eine hohe Laufruhe. Am Markt sind jedoch keine kommerziell verfügbaren, halbhermetischen Scrollverdichter erhältlich, was eine Reparatur der Verdichterbauteile für den normalen Kälteanlagenbauerbetrieb unmöglich macht.

Auch im Bereich des Verdichtungsprozesses haben die Verdichter unterschiedliche Eigenschaften. Der Begriff des Liefergrades wurde bereits erklärt. Nachfolgende Tabelle gibt typische Werte für Verdrängerverdichter bei den jeweiligen Temperaturbereichen:

Liefergrad $\lambda$	Hubkolben- verdichter	Schrauben- verdichter	Scroll- verdichter
<b>Pluskühlung</b>	0,85	0,95	0,92
<b>Normalkühlung</b>	0,8	0,92	0,84
<b>Tiefkühlung</b>	0,7	0,87	0,74

Tabelle 5) Typische Liefergrade von Verdrängerverdichtern.

Die genaue Auslegung eines Kältemittelverdichters erfolgt über den benötigten Volumenstrom. Im Zyklus 6 haben Sie gelernt, wie Sie den Massenstrom innerhalb einer Anlage berechnen. Um nun einen passenden Verdichter für Ihre Anlage auszulegen, summieren Sie zunächst die einzelnen Massenströme Ihrer Verdampfer.

$$\dot{m}_{ges} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_n$$

Im Anschluss entnehmen oder interpolieren Sie die Dichte des Kältemittels am Verdichtereingang aus Ihrer Dampftafel, wie Sie es bereits mit der Enthalpie gemacht haben.

Mit der Formel,

$$\dot{V}_{theo} = \frac{\dot{m}_{ges}}{\rho_{ve}}$$

können Sie nun den theoretisch benötigten Volumenstrom berechnen. Um aus dem theoretischen Volumenstrom nun einen real benötigten Volumenstrom zu errechnen, fließt der Liefergrad wie folgt in die Berechnung mit ein:

$$\dot{V}_{geo} = \frac{\dot{V}_{theo}}{\lambda}$$

Der Index  $_{geo}$  steht hierbei für „geometrisch“ und meint den geometrisch vorhandenen Volumenstrom, den der Verdichter unter Berücksichtigung des Liefergrades erbringen muss. Dieser kann aus den Katalogen und Datenblättern der Verdichterhersteller abgelesen werden und bietet die Entscheidungsgrundlage für die

Verdichterauswahl. Die Kälteleistung kann je nach Betriebsbedingungen stark von den Katalogangaben für die Kälteleistung abweichen. Begründet liegt dies am Arbeitspunkt der Leistungsangabe im Katalog. Hier ist in der Regel eine Sauggastemperatur von 20°C zugrunde gelegt, welche aber in den wenigsten Anwendungsfällen realistisch ist.

Neben der benötigten Leistung (-> Volumenstrom) des Verdichters, sollte auch berücksichtigt werden, dass Kältemittel verschiedene Druckniveaus haben. So kann ein Kältemittelverdichter für R410A (Hochdruckkältemittel) beispielsweise nicht mit dem Kältemittel R134a oder R600a (Niederdruckkältemittel) betrieben werden. Auf die weiteren kältemitteltechnischen Beschränkungen wird in der Lektion Kältemittel näher eingegangen.

### Verflüssiger

Der Verflüssiger hat die Aufgabe die durch Verdampfer und Verdichter aufgenommene Wärmemenge aus dem Kältemittelkreislauf auf ein anderes Medium zu übertragen. Im Zuge dieses Prozesses wird das Kältemittel, welches aus dem Verdichter kommt, zunächst enthitzt, danach verflüssigt und im Anschluss unterkühlt. Da nach dem zweiten thermodynamischen Hauptsatz Wärmeenergie immer nur vom höheren zum niedrigeren Niveau strömt, ist eine Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und dem Sekundärmedium zwingend erforderlich.

Die im nachfolgenden Diagramm als blau dargestellte Temperatur der Luft steigt im Verlauf durch den Verflüssiger kontinuierlich an. Das Flächenintegral (blau schraffierte Fläche) zwischen den beiden Temperaturverläufen bildet die mittlere Temperatur-Differenz.

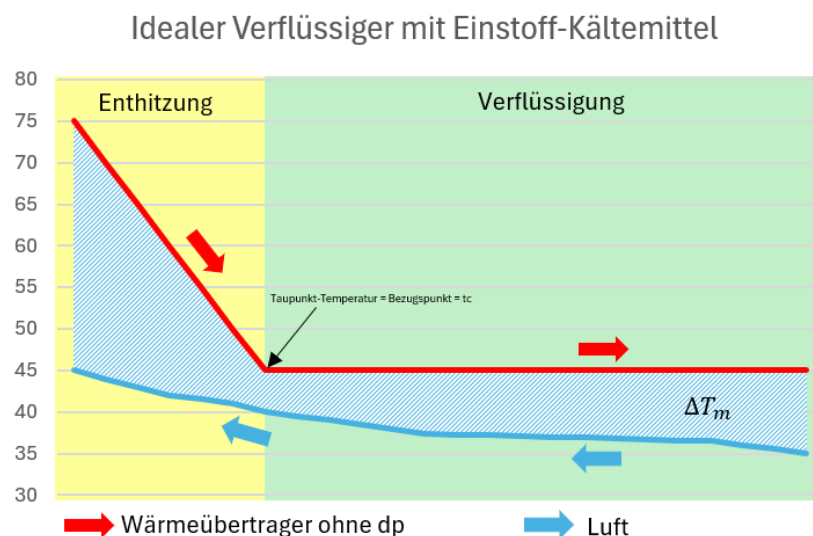


Abbildung 9) Temperaturverlauf im idealen Verflüssiger mit einem Einstoff-Kältemittel im reinen Gegenstromprinzip ohne Unterkühlung.

Die allgemein gültige Formel

$$\dot{Q}_C = k \times A \times \Delta T_m$$

zeigt, dass die mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  in linearem Verhältnis zur Wärmeübertragerleistung  $\dot{Q}_C$  steht. Nimmt sie ab, sinkt die Leistung eines bestimmten Wärmeübertragers in gleichem Maße und umgekehrt.

In den Herstellerunterlagen (Katalogauszüge, etc.) sind die Leistungsdaten für die Verflüssiger bei einer Standard-Temperaturdifferenz (In der Regel 10 K oder 15 K) angegeben. Da der k-Wert des Verflüssigers eine gemittelte, angenommen konstante Kenngröße ist, ist diese bei reiner Änderung des  $\Delta T_m$  genauso wie die Oberfläche des Verflüssigers unveränderlich.

Hierdurch kann die reale Leistung des Verflüssigers mit der Formel

$$\dot{Q}_{C,real} = \frac{\dot{Q}_{C,Katalog} \times \Delta T_{m,real}}{\Delta T_{m,Katalog}}$$

für den jeweiligen Betriebspunkt berechnet werden.

Wie schon beim Kältemittelverdichter, gibt es auch verschiedene Wärmeübertrager-Bauformen. Neben dem klassischen Luft-Kältemittel-Tauscher wie er meistens in der Kältetechnik verwendet wird, gibt es auch Plattenwärmeübertrager und beispielsweise Rohrbündel-Wärmeübertrager, bei denen die Wärme zwischen Kältemittel und einem Sekundärmedium (Häufig Wasser oder Glykolgemische) übertragen wird. Die gängigsten Bauformen von Wärmeübertragern und deren Vor- und Nachteile werden zu einem späteren Zeitpunkt genauer beschrieben.