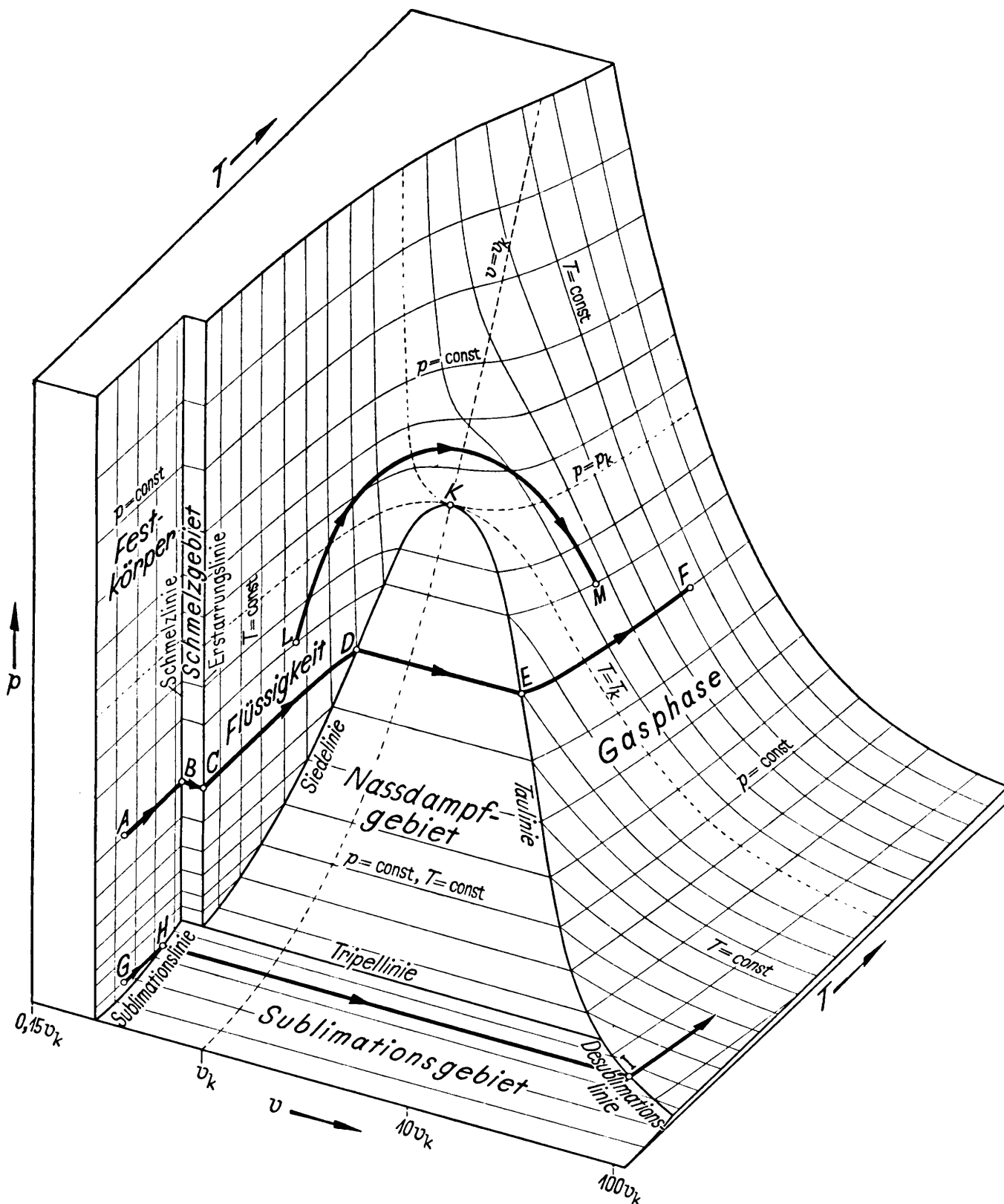




Das vorliegende p, v, T – Diagramm für reine Stoffe beschreibt den Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen Druck p, Temperatur T und dem spezifischen Volumen v.

$$v = \frac{\text{Volumen } V}{\text{Masse } m} = \frac{1}{\text{Dichte } \rho}$$



Quelle des Bildes: [Baehr 1973]



## 1 Aufgaben:

- 1 Isobare Zustandsänderungen A bis F
  - a Beschreiben Sie die Zustandsänderungen von A bis F am Beispiel von Wasser bei Atmosphärendruck. Wie verhalten sich die  $H_2O$ -Moleküle ?
  - b Welchen Aggregatzustand hat Wasser im Schmelzgebiet (Nassdampfgebiet) ?
  - c Wie verläuft der Siedevorgang in einem Dampfkochtopf ?
  - d Welchen Unterschied macht es, wenn Wasser im Gebirge gekocht wird ?
- 2 Welche Abweichungen vom vorliegenden Diagramm sind bei Wasser zu beobachten (Anomalie des Wassers) ?
- 3 Partialdruck:  
Erklären Sie die folgenden Phänomene, und tragen Sie sie als Zustandsänderung ins Diagramm ein.
  - a Verdunstung, z.B. beim Trocknen von Wäsche
  - b Entstehung von Nebel
  - c Entstehung von Tau
  - d Entstehung von Reif bzw. Eisblumen
  - e Bei längeren Frostperioden ohne Neuschnee taut der Altschnee zwar nicht, verschwindet aber allmählich
  - f Gefriertrocknung  
Dabei wird das Produkt
    - 1) auf  $-15$  bis  $-70^\circ\text{C}$  tiefgefroren und
    - 2) dem sehr niedrigen Druck von  $0,2$  bis  $3$  hPa ausgesetztDabei verliert das Ausgangsprodukt bis zu  $98\%$  des Wassers.
  - g Wenn man eine Spritze mit Wasser füllt, die Spitze mit dem Daumen verschließt und den Kolben herauszieht, bewirkt dies einen starken Unterdruck. Dabei entstehen Blasen. Wenn man den Kolben zurück drückt, verschwinden die Blasen.  
Erklären Sie den Vorgang. (Woraus bestehen die Blasen, Verlauf im pvT-Diagramm, Temperaturänderung des Wassers in der Spritze) ?
  - h Feuerwehrlente lernen, dass man Wasser mit einer Saugpumpe nicht höher als etwa  $10$  m pumpen kann. Wenn es höher gepumpt werden soll, muss man eine Druckpumpe verwenden oder mehrere Saugpumpen nacheinander.
  - i Kavitation  
Bauteile, die mit verwirbelten Flüssigkeitsströmungen in Kontakt kommen (z.B. Schiffsschrauben, Turbinen, mechanische Herzklappen ..), können an der Oberfläche von implodierenden Dampfbläschen beschädigt werden, weil bei der Implosion kurzzeitig extrem hohe Drücke und Geschwindigkeiten auftreten, denen auf Dauer kein Material gewachsen ist. Man nennt diesen Vorgang Kavitation.  
Wie kommt es zur Bildung der Dampfbläschen in der verwirbelten Flüssigkeitsströmung ?
- 4 Das vorliegende pvT-Diagramm entspricht im Schmelzgebiet nicht den Verhältnissen von Wasser. Bei Wasser sinkt die Schmelztemperatur mit steigendem Druck (schematisches pT-Diagramm).
  - a Erklären Sie die niedrige Reibung beim Schlittschuhlaufen. Beachten Sie dabei, dass der Druck unter dem Schlittschuh nicht ausreicht, um den Schmelzpunkt des Eises nennenswert zu senken.
  - b Wieso wird ein Schneeball fester als der ursprüngliche Schnee ?
- 5 Der Tripelpunkt eines Stoffes ist der durch Druck und Temperatur gegebene Zustand, bei dem der Stoff in allen 3 Aggregatzuständen fest, flüssig, gasförmig auftreten kann.

Der Tripelpunkt von Wasser liegt bei  $T = 0,01^\circ\text{C}$  und  $p = 610$  Pa ( $0,0061$  bar). Das spezifische Volumen von Wasser im Tripelpunkt liegt zwischen  $1,00002$   $\text{dm}^3/\text{kg}$  (flüssige und feste Phase) und  $206,2$   $\text{m}^3/\text{kg}$  (Gasphase)

  - a Warum heißt die Tripellinie in einem zweidimensionalen p,T-Diagramm Tripelpunkt ?
  - b Der Tripelpunkt ist Bezugspunkt der Temperaturskala nach Kelvin ( $T_{\text{Tr}} = 273,16$  K). Außerdem ist das Tripelwasser Bezugspunkt für die Enthalpie ( $h_{\text{Tr}} = 0$  J/kg) und die Entropie ( $s_{\text{Tr}} = 0$  J/kg) des Wassers. Früher war es auch der Bezug für die Masse. Warum ist der Tripelpunkt für solche Bezugspunkte geeignet ?
- 6 Der kritische Punkt K liegt bei  $T = 374,2^\circ\text{C}$ ,  $p = 22120$  Pa ( $221$  bar) und  $v = 3,14$   $\text{dm}^3/\text{kg}$ . Oberhalb des kritischen Punktes ändert sich die Dichte kontinuierlich mit der Temperatur, und man kann nicht mehr zwischen Flüssigkeit und Gas unterscheiden.



## 2 Lösungsvorschläge

### 1 Isobare Zustandsänderungen

a **A-B:** Das Wasser ist gefroren. Die Bewegungsenergie der Wassermoleküle ist nicht hoch genug, um die Bindungskräfte zwischen den Molekülen zu überwinden. Deshalb sind die Moleküle in einem festen Gitter eingebunden. Sie sind im Eiskristall regelmäßig (=kristallin) angeordnet

**B-C:** An der Schmelzlinie B ist das Wasser noch vollständig gefroren. Wenn Wärme hinzukommt, nehmen einzelne Wassermoleküle sie als Bewegungsenergie auf, lösen sich aus der Kristallstruktur und sind freier beweglich (flüssig). Das Wasser schmilzt. Der Wärmebedarf zum Schmelzen entspricht der Kristallisationsenergie. Je nach Wärmezugabe ändert sich das Verhältnis zwischen flüssigem und festem Wasser, aber die Temperatur bleibt konstant bei 0°C (bei Atmosphärendruck). Mit Erreichen der Erstarrungslinie C ist das Wasser vollständig geschmolzen.

Zur Anomalie ( $\rightarrow 2$ ) von Wasser gehört es, dass gefrorenes Wasser eine geringere Dichte als flüssiges Wasser hat und obenauf schwimmt. **C-D:** Das Wasser ist flüssig und dehnt sich mit steigender Temperatur aus, mit der Besonderheit, dass Wasser seine höchste Dichte bei 4°C erreicht ( $\rightarrow 2$ ).

**D-E:** An der Siedelinie D ist das Wasser noch vollständig flüssig. Durch Zugabe von Wärme lösen einzelne Wassermoleküle ihre letzten Bindungen und werden frei beweglich (gasförmig). Das Wasser verdampft. Je nach Wärmeinput ändert sich das Verhältnis zwischen flüssigen und gasförmigem Wasser, aber die Temperatur bleibt konstant bei 100°C (bei Atmosphärendruck).

**E-F:** Mit Erreichen der Taulinie E ist das Wasser vollständig verdampft. Wenn man weiter Wärme einbringt, steigt die Temperatur und der Dampf dehnt sich aus.

b Im Nassdampfgebiet zwischen der Siede- und der Taulinie liegt Wasser in flüssiger und gasförmiger Form gemischt vor. Die beiden Phasen sind nicht eindeutig getrennt, denn Dampfblasen reißen kleine Tropfen flüssigen Wassers mit sich, die im Dampf schweben. Nassdampf hat in technischen Anwendungen Nachteile<sup>1</sup>. Deshalb erhitzt man ihn weiter, nachdem er nicht mehr mit der Wasseroberfläche in Kontakt steht. Man nennt diese Maßnahme überhitzen. Dabei verdampfen zuerst die Tröpfchen, anschließend steigt die Temperatur des Dampfes<sup>2</sup>.

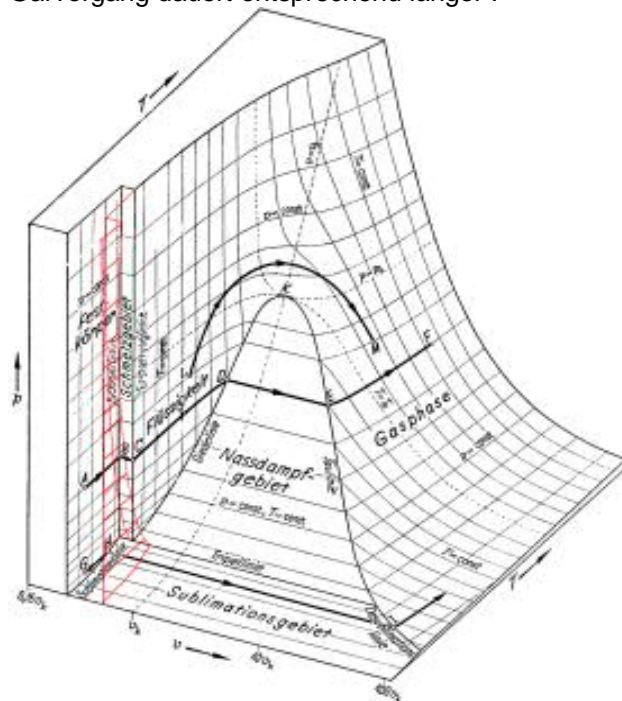
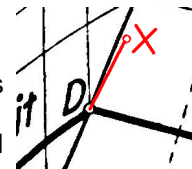
1 In Dampflokomotiven haben die Tröpfchen den Nachteil, dass sie die Wärme gut an die Wandungen ableiten, was zu Kondenswasser und Druckverlust führt. In Dampfturbinen beschädigt ein zu hoher Wassergehalt die Turbinenschaufeln.

2 Je höher die Dampftemperatur ist, desto besser ist der Wirkungsgrad in Wärmekraftmaschinen. Allerdings ist das Überhitzen nicht unproblematisch, weil trockener Dampf ein schlechter Wärmeleiter ist und deshalb die Wärme schlecht annimmt. In Dampfturbinen liegt die Dampftemperatur bei 500..600°C, weil die Werkstoffe der Turbinen nicht mehr aushalten. Bei Dampflokomotiven ist die Temperatur viel niedriger, und wird begrenzt durch den Kesseldruck und durch die Schmierung der Zylinder [Niedersträßer 1940].

c Im Dampfkochtopf kann der Dampf nicht entweichen, deshalb steigt der Druck und damit der Siedepunkt des Wassers. Praktisch begrenzt man den Druck durch ein Überdruckventil auf 2 bis 3 bar, wodurch die Siedetemperatur auf 120 - 130°C steigt und die chemische Reaktion des Garens erheblich beschleunigt wird<sup>3</sup>.

Auch in Kfz-Motoren steht das Kühlwasser<sup>4</sup> unter Druck, um die Siedetemperatur zu erhöhen.

d Im Gebirge ist der Luftdruck niedriger als im Tal. Deshalb siedet Wasser schon unter 100°C und der Garvorgang dauert entsprechend länger<sup>5</sup>.



### 2 Anomalie von Wasser:

Wassermoleküle bestehen aus zwei Wasserstoffatomen, die an eine Sauerstoff-Atom gebunden sind. Die Elektronen sind in dieser Bindung nicht gleichmäßig verteilt, deshalb sind Wassermoleküle Dipole und wirken wie kleine Magneten. Das negative Ende des einen Moleküles wird vom positiven Ende des anderen Moleküles angezogen (Wasserstoffbrücke). Dieses Verhalten erklärt einige merkwürdige Eigenschaften von Wasser:

- Die Wassermoleküle klumpen im flüssigen Zustand enger zusammen als in der kristallinen Anordnung des Eises. Dadurch ist die Dichte von gefrorenem geringer als die von

3 Der Dampfkochtopf wurde 1681 von Denis Papin erfunden. Es gehört zu den amüsanten Anekdoten der Technikgeschichte, dass bei der ersten Vorführung der Dampfkochtopf den Mitgliedern der Royal Society in London um die Perücken geflogen ist und diese nur mit Mühe dazu überredet werden konnten, einer zweiten Vorführung beizuwohnen. Diese war erfolgreich, denn Papin erfand auch noch das Überdruckventil.

4 Meist ist der Verschlussdeckel als Überdruckventil ausgeführt. Schauen Sie es sich an.

5 Auf dem Montblanc mit 4800m beträgt die Siedetemperatur 84°C, auf den Gipfeln des Himalaya reicht die Siedetemperatur nicht mehr aus, um Eiweiß gerinnen zu lassen: Man kann dort keine Eier kochen. Muss man Ostern eben zu Hause vorbereiten :-)



flüssigem Wasser. Kurz gesagt: Es ist nicht selbstverständlich, dass festes Wasser auf flüssigem schwimmt<sup>6</sup>.

- Andere Stoffe, die eine ähnliche Molekülmasse wie Wasser haben, sind bei Zimmertemperatur gasförmig, aber Wasser ist flüssig, weil die Wasserstoffbrücken die Moleküle bis 100°C zusammenhalten.
- Auch die Wärmekapazität von Wasser ist höher als erwartet.
- Wasser ist ein gutes Lösungsmittel.
- Wasser hat seine größte Dichte bei 4°C, deshalb hat Tiefenwasser im Meer oder in tiefen Seen immer diese Temperatur. Wärmeres Wasser oder Eis steigen auf.
- Bei steigendem Druck sinkt die Schmelztemperatur von Wasser<sup>7</sup>. Wenn es nicht so wäre, könnte das Wasser am Boden der Tiefsee gefrieren.

In einer Parallelwelt ohne diese Anomalie und ohne ihre Folgen ist Leben in unserer Form nicht vorstellbar.<sup>8</sup> Aber das stört dort niemanden :-)  
Das p,v,T-Diagramm müsste für Wasser dahingehend geändert werden, dass das Schmelzgebiet in die andere Richtung geklappt wird, d.h. die Schmelzlinie rechts von der Erstarrungslinie in Richtung größeren spezifischen Volumens verläuft.

### 3 Übergänge fest - flüssig - gasförmig

Aus dem pvT-Diagramm von Wasser könnte man ablesen, dass Wasser bei normalem Luftdruck erst bei 100°C in den gasförmigen Zustand übergeht (Verdampfung). Tatsächlich wissen wir aber, dass Wasser auch bei normalen Lufttemperaturen verdunstet. Wie ist dies im pvT-Diagramm zu erklären ?

#### Erklärung mit Hilfe des Partialdruckes

Des Rätsels einfache Lösung ist, dass für das Verhalten von Wasser nicht der Druck der Luft, sondern der (Partial-)Druck des Wassers (in der Luft) maßgebend ist. Im Gasgemisch Luft übt nämlich nicht jedes Gas denselben Druck aus, sondern trägt anteilmäßig zum Gesamtdruck bei.

Zur Erklärung nehmen wir an, die Luft habe einen Druck von 1000 hPa (1 bar) und enthalte 1% Wasserdampf. Außerdem erinnern wir uns daran, dass mechanischer Druck durch den Aufprall von Molekülen entsteht.

Wenn also innerhalb eines normalen Kochtopfes Wasser kocht, ist jedes Molekül, das von innen gegen den Kochtopfdeckel prallt, ein Wassermolekül.

Der Wasserdampf im Kochtopf hat also denselben Druck wie die umgebende Luft (1000 hPa). Bei diesem (Wasserdampf-)Druck wird Wasser wie erwartet erst bei 100°C gasförmig.

Von den Luftmolekülen, die von außen auf einen Kochtopf prallen, ist aber nur jedes hundertste Molekül ein Wassermolekül. Demzufolge trägt Wasser auch nur 1% zum gesamten Luftdruck bei. Der (Partial-)Druck<sup>9</sup> des Wasser in der Luft beträgt also in diesem Fall ein Hundertstel des Luftdruckes, 10 hPa (= 10 mbar)<sup>10</sup>.

Der Partialdruck eines Gases ist also ein Maß für den Anteil des Gases innerhalb eines Gasgemisches, bezogen auf den Gesamtdruck. Die Summe aller Partialdrücke der in der Luft enthaltenen Komponenten ist so groß wie der Luftdruck.

Für das Ablesen der Siedetemperatur aus einer Dampftabelle ist nicht der ganze Luftdruck, sondern nur der Partialdruck des Wassers maßgebend. Da der Partialdruck des Wassers in der Luft sehr niedrig ist, kann Wasser auch bei Temperaturen weit unter 100°C verdunsten.



#### Erklärung über die Verteilung der Bewegungsenergie und über die Löslichkeit

Wärme wird in der Bewegung der Moleküle gespeichert. Je mehr Wärme zugeführt wird, desto schneller können sich die Moleküle bewegen und desto höher steigt die Temperatur. In einer Flüssigkeit ist die Bewegungsenergie aber nicht gleichmäßig verteilt. Es gibt immer einige Moleküle, die schnell genug sind, um sich aus der Flüssigkeit zu lösen – sie verdampfen.

Als Beispiel für ein geschlossenes System betrachten wir eine halb volle, geschlossene Wasserflasche mit einer Temperatur von konstant 20° C. An der Wasseroberfläche gibt es immer Wassermoleküle, die durch Kollisionen mit anderen derart beschleunigt wurden, dass sie sich aus den Bindungen der Flüssigkeit lösen können (= verdampfen bzw. verdunsten).

Trotzdem wird das Wasser nicht vollständig verdampfen, weil auch die verdunsteten Wasserdampfmoleküle gegen andere Moleküle stoßen. Sie werden früher oder später abgebremst und beim nächsten Kontakt mit der Flüssigkeitsoberfläche wieder eingefangen (= tauen).

Es stellt sich also ein Gleichgewicht zwischen flüssigem Wasser und Dampf ein. Die Luft in der Flasche enthält bei dieser Temperatur einen bestimmten Wasseranteil. Seinen Partialdruck kann man an der Satt-dampf- bzw. Taulinie des pvT-Diagrammes bei 20°C ablesen.

In einem offenen System (z.B. einer Pfütze) dagegen wird der Dampf an der Grenzschicht nicht gesättigt, weil sich in der angrenzenden Luft

6 Das ist bei den meisten anderen Stoffen nicht der Fall, aber es gibt weitere Ausnahmen, z.B. Bismut [Fenichel 1911] S.134. [Tyndall 1894] S.129f.

7 Bei den meisten Stoffen steigt die Schmelztemperatur mit steigendem Druck, z.B. hat Blei bei Normaldruck eine Schmelztemperatur von 327°C, die bei 100 MPa auf 336°C steigt.

8 [Tyndall 1894] S.129f geht in einer Bemerkung zu Wismut (veraltet für Bismuth), das ähnliche Anomalien wie Wasser hat, auch auf metaphysische Spekulationen ein: „Trotzdem hier kein lebendes Wesen zu retten ist, verhält sich geschmolzenes Wismuth doch gerade wie Wasser“. Hintergrund ist, dass solche etwas komplexeren Zusammenhänge unbedarften Zeitgenossen gerne als Wunder, Gottesbeweis o.ä. verkauft werden.

9 Lateinisch pars (Mehrzahl: partes) bedeutet Teil oder Anteil. Man findet es in Begriffen wie Part, Partei, partiell, Parzelle, Apartment, Apartheit und vielleicht Portion wieder.

10 Der Einfluss der Molmasse wird in dieser Erklärung vernachlässigt.



verteilt. Deshalb verdampft das Pfützenwasser immer weiter. Wenn Wind nachhilft, geht es noch schneller. Die notwendige Verdampfungsenergie wird der Umgebung entnommen. Dies spürt man, wenn nasse Haut im Wind fröstelt.

Umgekehrt wird die Verdunstung erschwert, wenn die Luftfeuchtigkeit hoch ist, d.h. die Luft schon annähernd mit Dampf gesättigt ist. Wenn dieser Zustand unseren Körper trifft, nennen wir ihn schwül. Die Verdunstung kann auch an der Grenzschicht behindert werden, deshalb halten sich Pfützen mit einem Ölfilm länger als solche ohne.

Man spricht übrigens auch davon, dass Luft einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Menge Wasser „lösen“ kann. Aber während Stahl nur eine bestimmte Menge Kohlenstoff in seinem Gitter lösen kann, weil einfach nicht mehr Raum vorhanden ist, kann es der gasförmigen Luft eigentlich gleichgültig sein, wie viele Wassermoleküle in ihr umherfliegen – die Luft kann sich ja ausdehnen. Es ist eher so, dass sich die Wassermoleküle selbst zu flüssigem Wasser vereinen (= kondensieren) oder an der Grenze der Gasphase ausscheiden (= tauen), wenn sie zu viele und zu langsam sind.

a siehe oben

b Mit der im Laufe der Nacht fallenden Temperatur kann die Luft immer weniger Wasser lösen. Wenn es gegen Morgen so kalt ist, dass die Luft das Wasser nicht mehr halten kann, scheidet es aus. Die Wassermoleküle verklumpen (= kondensieren) schon in der Luft und bilden feine Tröpfchen (Nebel). Typische Nebellöcher sind Flusstäler im Herbst: Tagsüber wird die Luft noch warm und nimmt Wasser aus dem Fluss auf, nachts kühlt sie stark ab und das Wasser kondensiert. Da im Tal oft der Wind fehlt, um den Nebel wegzutreiben, muss man manchmal stunden- oder gar tagelang warten, bis die Sonne genügend Energie zur Verdunstung eingestrahlt hat.



c Die Wassermoleküle aus b) können auch an den Phasengrenzen zwischen Luft und Umgebung (z.B. Gras) ausscheiden und benetzen die Umgebung mit flüssigem Wasser (= Tau).

d Alle oben geschilderten Prozesse laufen auch direkt zwischen festen und gasförmigen Zustand ab. Wenn der Partialdruck hoch und die Temperatur niedrig genug sind, überspringt Wasserdampf die flüssige Phase (= desublimiert) und bindet sich als Eis an Bäume und Autoscheiben (= Reif) oder vereist den Kühlschrank. Da die Desublimation langsam geschieht, haben die gefrierenden Wassermoleküle Zeit, sich die Stellen im schon vorhandenen Kristall auszusuchen, die das niedrigste Energieniveau bieten (wo die Bindung am stärksten ist). Dadurch können Eiskristalle wachsen, die wir als schön empfinden.<sup>11</sup>

Im Diagramm ist dies die Linie von I nach H.

e Die direkte Umwandlung von Eis in Gas bei niedrigem Partialdruck und niedriger Temperatur nennt man Sublimation. Es ist die Ursache dafür, dass Eis und Schnee bei längeren Frostperioden allmählich verschwinden, ohne zu schmelzen.

Im Diagramm ist dies die Linie von H nach I.

f siehe e. Beim Gefriertrocknen wird der niedrige Druck durch Pumpen erzeugt. Dieses Verfahren ist auch geeignet, um Kaffeebohnen oder wertvolle, von Löschwasser durchnässte Bücher schonend zu trocknen.

g Je niedriger der Druck, desto niedriger ist die Siedetemperatur. Wenn man eine Spritze mit kleinem Durchmesser nimmt, kann man genügend Unterdruck erzeugen, um Wasser bei Raumtemperatur sieden zu lassen.

h Je niedriger der Druck, desto niedriger ist die Siedetemperatur. Wenn in der Saugleitung der Druck zu niedrig bzw. Unterdruck zu groß ist, verdampft das Wasser. D.h., es entsteht eine Dampfblase, die nicht mehr sinnvoll gepumpt werden kann.

Man kann den Sachverhalt auch so erklären, dass das Wasser gar nicht vom Unterdruck in der Leitung angesogen wird, sondern vom Umgebungsdruck in die Leitung gedrückt wird<sup>12</sup>. Da der Umgebungsdruck etwa 1 bar = 10 N/cm<sup>2</sup> beträgt, kann er etwa 10 N bzw. 1 kg bzw. 1 dm<sup>3</sup> bzw. 1l Wasser pro cm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt drücken. Und eine Säule mit einem Liter Rauminhalt und 1 cm<sup>2</sup> Grundfläche hat welche Höhe ... ?

i Kavitation

Kavitation ist die Bildung von Dampfblasen in Flüssigkeiten bei niedrigem Druck.

Ursachen: Dampfblasen können entstehen durch die Absenkung des Siedepunktes bei niedrigem Druck. Der Druck wiederum sinkt in strömenden Medien automatisch. Man sieht dies an einem Kabrio, das sich beim Fahren aufbläht, weil die umströmende Luft Druck verliert. Flugzeuge nutzen denselben Effekt und hängen sozusagen am Unterdruck über ihren Tragflächen. In verwirbelten Strömungen sinkt der Druck und damit der Siedepunkt manchmal so weit ab, dass spontan Dampfblasen entstehen. Steigt der Druck wieder an, so implodieren (zerfallen) diese Blasen wieder, wobei ein leiser Knall entsteht.

Auswirkungen und Anwendungen: Bei Geräten wie Schiffsschrauben ist Kavitation ein schädlicher Effekt. Sie verringert den Wirkungsgrad und führt zu Beschädigungen, denn beim Implodieren der Dampfblasen treten kurzzeitig enorm hohe Geschwindigkeiten und Drücke auf, denen auf Dauer kein bisher bekanntes Material gewachsen ist. Das beim Zerfallen auftretende Geräusch ist das Ende aller Tarnung bei U-Booten, da es auch mit einem passivem Sonar gut zu orten ist<sup>13</sup>.

Kavitation tritt auch auf, wenn die Druckschwankungen äußerlich erzeugt werden, z.B. durch Ultra-

<sup>12</sup> Die falsche Hypothese, dass Unterdruck saugt, wurde im 4. Jhd. v.u.Z. vom Griechen Aristoteles aufgestellt und später lateinisch „horror vacui“ (Abscheu der Natur vor der Leere) genannt. Diese Hypothese hatte sogar Einfluss auf die Philosophie und wurde erst 2000 Jahre später von Otto von Guericke widerlegt. Das war der Mann mit den 2 luftleer gepumpten Halbkugeln, die von 8 Pferden nicht auseinander gezogen werden konnten.

<sup>13</sup> gekürzt von: [www.de.wikipedia.org](http://www.de.wikipedia.org)

<sup>11</sup> „Wie Schneekristalle entstehen“ steht in [SdW] 02/2008



schall, in Dieseleinspritzpumpen oder beim Fingerknacken<sup>14</sup>.

#### 4 Oberflächenschmelzen

- a Die Kufen gleiten auf einem Schmierfilm aus flüssigem Wasser.

Die gängige Theorie, dass der Kufendruck den Schmelzpunkt des Eises senkt und so das Eis verflüssigt, reicht nicht aus, denn der Kufendruck senkt den Schmelzpunkt nur sehr wenig.

Auch die ergänzende Theorie, dass Reibungswärme einen zusätzlichen Schmelzeffekt bringt, erklärt nicht, warum man auf Schlitsschuhen so schwer still stehen kann.

Ein Effekt, der das Gleiten der Kufen vollständig erklärt, ist das Oberflächenschmelzen. Dies entsteht nicht durch äußere Wärme, sondern ist eine Eigenheit der äußeren Grenze von festen Körpern: Im Innern eines Eiskristalles sind die Wassermoleküle regelmäßig (= kristallin) angeordnet und durch die chemischen Bindungen fixiert. Doch im Kontaktbereich zur Umgebung wird Anordnung der Oberflächenmoleküle weniger regelmäßig und ihre Bindung weniger fest. Eine dünne Randschicht kann beweglich wie eine Flüssigkeit sein, wenn ihre Temperatur nicht zu niedrig ist. Bei Wasser ist dies noch bei  $-20^{\circ}\text{C}$  der Fall. Außerdem wird Oberflächenschmelzen durch Verunreinigungen gefördert. Schon der englische Physiker Michael Faraday (1791 – 1867) vermutete nach seinen Untersuchungen von Eis und Schnee, dass Eiskristalle von einer dünnen Schicht flüssigen Wassers umgeben seien. Aber erst in den 1980er Jahren konnte das Phänomen erstmals beobachtet werden. Mittlerweile haben Wissenschaftler gezeigt, das Oberflächenschmelzen bei fast allen Festkörpern auftritt (→ [SdW] 04/2000)

- b Die Randschichten von Eiskristallen sind durch Oberflächenschmelzen flüssig (siehe 4a). Wenn man sie aneinander drückt, sind sie keine Randschicht mehr und frieren zusammen. Unterstützt wird das Schmelzen durch Druck und Handwärme.

#### 5 Tripellinie, Tripelpunkt

- a Im p,T-Diagramm erscheint die Tripellinie als Punkt.

- b Wasser im Tripelpunkt hat eine eindeutige Temperatur, einen eindeutigen Druck und in der flüssigen Phase auch eine eindeutige Dichte, die in jedem Labor eindeutig erzeugt werden können. Da man dazu keine Messgeräte benötigt, entfallen Messfehler. Mit Wasser im Tripelpunkt kann man Messgeräte prüfen (= justieren) und einstellen (= kalibrieren). Problematisch an dieser Definition ist allerdings, dass der Tripelpunkt auch von der Isotopenzusammensetzung des Wassers abhängt, weshalb genau vorgeschrieben ist, in welchem Verhältnis das Wasser aus den irdischen Ozeanen zu mischen ist (→ [SdW] 03/2010).<sup>15</sup>

14 Beim Ziehen an den Fingergelenken wird schlagartig  $\text{CO}_2$  frei, das in der Gelenkschmiere gelöst ist. Das Knacken kann erst wiederholt werden, wenn sich das  $\text{CO}_2$  wieder gelöst hat → <http://de.wikipedia.org/wiki/Fingerknacken> (05.06.2012)

15 Ein Tripelpunkt benötigt nicht zwingend alle drei Aggregatzustände, sondern gibt es z.B. auch mit zwei unterschiedlichen festen Erscheinungsformen und einer flüssigen Phase (→



### 3 Einzubauen

- 1 Dampftafel für gesättigten Wasserdampf siehe Google
- 2 Hebelgesetze in den 2-Phasen-Gebieten erinnern an Zustandsdiagramme von Zweistofflegierungen
- 3 Begriffe Satttdampf/Kristallisationslinie
- 4 Flüssiggas, z.B. in Feuerzeugen
- 5 Volumenausdehnungskoeffizient
- 6 Wenn Wasser in einem abgeschlossenen Gefäß bis zum Sieden erhitzt wird, steigt der Druck und damit die Siedetemperatur. In einem Dampfkochtopf wird das Wasser bei 2..3 bar ca. 120..130°C heiß. Wenn man das Gefäß von der Wärmequelle entfernt, hört es auf zu Sieden. Wenn man es anschließend öffnet und den Druck ablässt, sinkt die Siedetemperatur (bei Wasser auf 100°C). Wenn die Temperatur der Flüssigkeit dann noch über der neuen Siedetemperatur liegt, beginnt die Flüssigkeit wieder zu siedeln.

- 7 Phasendiagramm → [Tipler 1995] S. 530
- 8 Wie kann man absolute und relative Feuchte aus einer Wasserdampftafel herauslesen?

### Literaturverzeichnis

- Baehr 1973: Hans Dieter Baehr, Thermodynamik, 1973  
Niederstraßer 1940: Leopold Niederstraßer, Leifaden für den Dampflokomotivdienst, 1940  
Fenchel 1911: Adolf Fenchel, Metallkunde, 1911  
Tyndall 1894: John Tyndall, Die Wärme, betrachtet als eine Art der Bewegung, 1894  
SdW: wechselnde Autoren, Spektrum der Wissenschaft,  
Tipler 1995: Paul Tipler, Physik, 1995