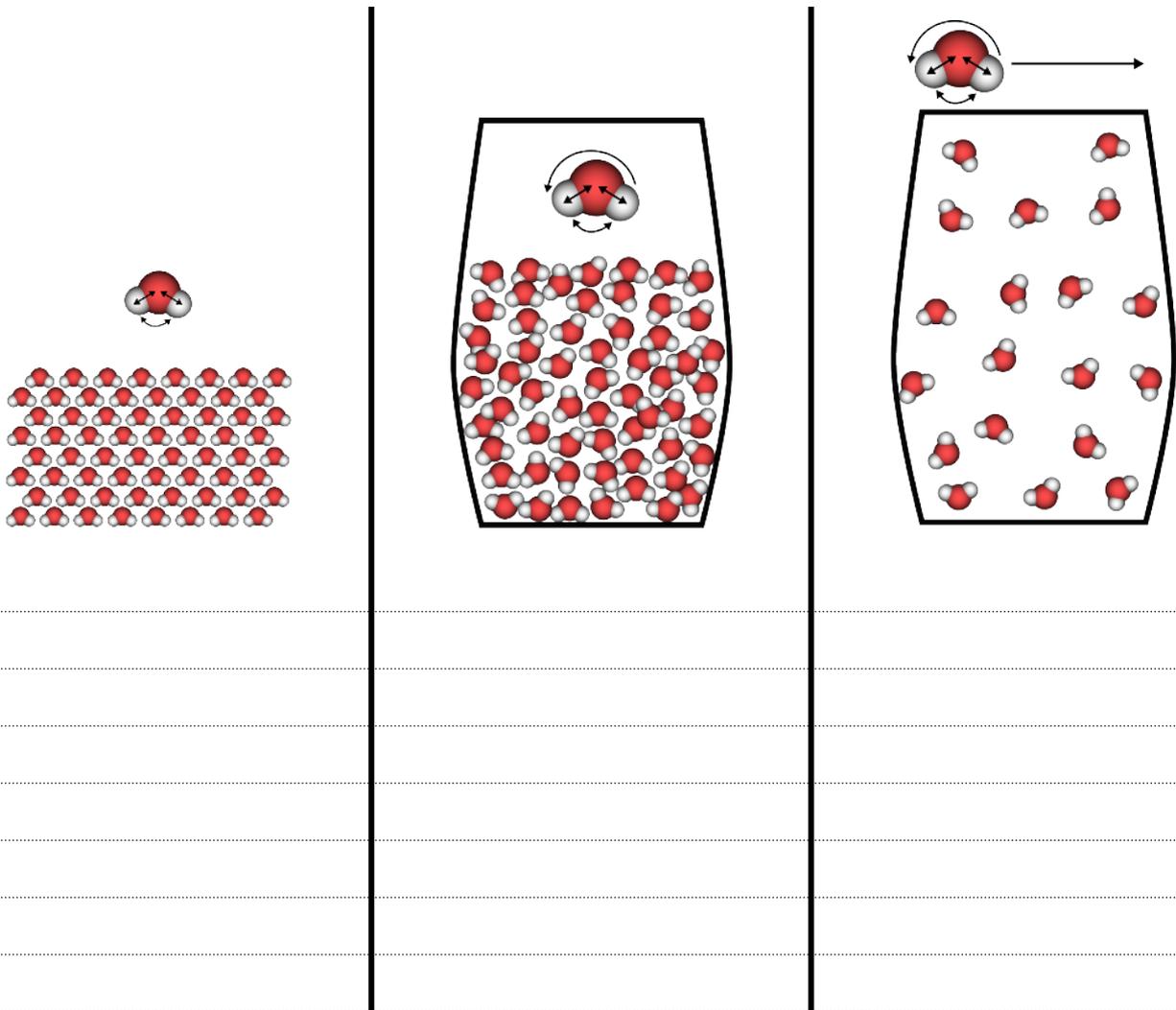


1. Die Aggregatzustände im Teilchenmodell

1.1 Die folgende Abbildung zeigt das Teilchenmodell von Wasser bei den verschiedenen Aggregatzuständen. Interpretieren Sie die Abbildung vollständig (Aspekte: Ordnungszustand, Molekülbewegung, Raumausfüllung). Geben Sie weiterhin die Fachausdrücke der Phasenübergänge an.



https://youtu.be/b7Q5U_bqS0s



2. Zustandsdiagramm allgemein

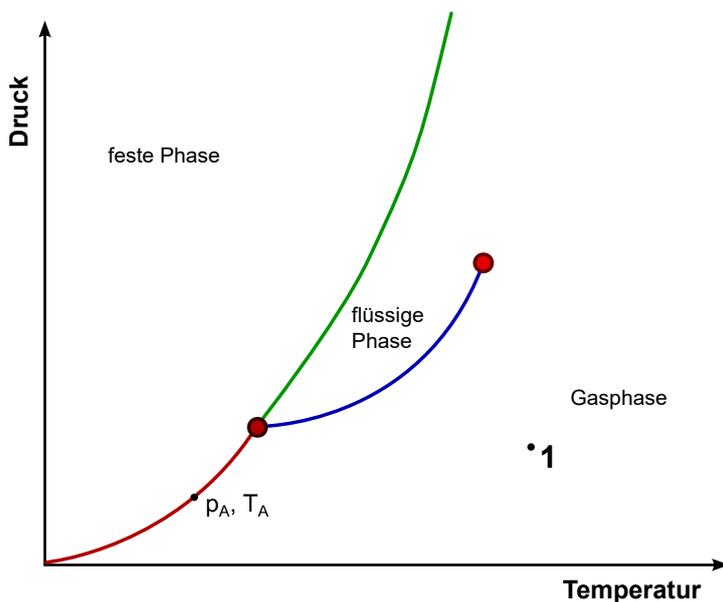


Abb. 2.1 Typisches Zustandsdiagramm (nichtlineare Auftragung). q: wikicommons Autor: Matthieumarechal (veränd.)

2.1 Beschriften Sie das Diagramm 2.1 mit allen fett gedruckten Worte.

2.2 Markieren Sie im Diagramm durch Linien und Schraffur folgende Aggregatzustände: **a)** flüssig **b)** überkritisches Fluid

Das Zustandsdiagramm eines Stoffes gibt Auskunft über die vorliegende Phase in Abhängigkeit des Drucks (p) und der Temperatur (T). Die Kurven grenzen die drei Aggregatzustände voneinander ab und werden deshalb **Dampfdruckkurve (Siededruckkurve)**, **Sublimationsdruckkurve** und **Schmelzkurve** genannt. Befindet sich die Materie gerade im Zustand p_A und T_A auf einer der Kurven (vgl. Abb!), so liegt ein Gleichgewicht aus beiden Phasen vor. Am **Tripelpunkt** koexistieren sogar drei Aggregatzustände. Die Materie liegt hier flüssig, gasförmig und fest vor.

Wir beginnen eine Reise am Punkt 1 (vgl. Diagramm!). Erhöht man den Druck, so nimmt der mittlere Teilchenabstand immer weiter ab. Die Dichte des Gases steigt, weil das Volumen der Gasportion sinkt. Wir bewegen uns dabei im Zustandsdiagramm senkrecht nach oben. Ab einem bestimmten Druck, dem **kritischen Druck**, ist der Teilchenabstand zwischen den Molekülen so klein, wie man ihn auch in einer Flüssigkeit erwarten würde. Ab hier liegt ein Mischzustand zwischen flüssig und gasförmig vor, das **überkritische Fluid**. Man erreicht es auch, wenn man die **Siededruckkurve** nach rechts oben entlang fährt. Das Ende der Kurve wird **kritischer Punkt** genannt. Bis zu diesem Punkt kann man die flüssige von der gasförmigen Phase unterscheiden, beide Phasen koexistieren entlang der Kurve. Die Phasengrenze verschwindet ab dem kritischen Punkt, im überkritischen Zustand kann man keinen Unterschied zwischen einer Flüssigkeit und einem Gasphase ausmachen.

sehenswertes Experiment zum Übergang:

<https://youtu.be/QLpgXsdjNP8>



Kritische Daten von Gasen	kritischer Druck	kritische Temperatur
Butan (Feuerzeuggas)	38 bar	152 °C
Wasserstoff	13 bar	-240 °C
Methan (Erdgas)	46 bar	-83 °C

2.3 Bei Temperaturen überhalb der kritischen Temperatur ist eine Verflüssigung eines Gases auch bei noch so hohen Drücken nicht möglich! Begründen Sie mit dem Zustandsdiagramm.

Brennstoffzellen-Autos fahren mit Wasserstoff. Damit eine große Menge des Treibstoffs mitgeführt werden kann, wäre es hilfreich, wenn man flüssiges H₂ in einer (Flüssiggas-)Flasche mitführen könnte, wie etwa das Butan in Campinggaskartuschen. Man kann das flüssige Butan sogar durch den transparenten Kunststoff in Feuerzeugen sehen. In flüssiger Form passt deutlich mehr in ein Gefäß, ohne dass dieses einem extremen Druck standhalten muss: Die Materie ist in flüssiger Phase deutlich dichter. Die kritischen Daten von Wasserstoff (vgl. Tabelle oben!) verraten jedoch, dass dies kaum technisch zu realisieren ist. Man muss es tiefer als -240 °C kühlen. Auch der Transport von flüssigem Methan (Erdgas) mit Schiffen, statt gasförmig über Pipelines, ist aufgrund der erforderlichen tiefen Temperaturen leider sehr teuer.

3. Das sonderbare Verhalten von Wasser

Im Phasendiagramm des Wassers ist zu erkennen, dass die Schmelzkurve eine negative Steigung hat:

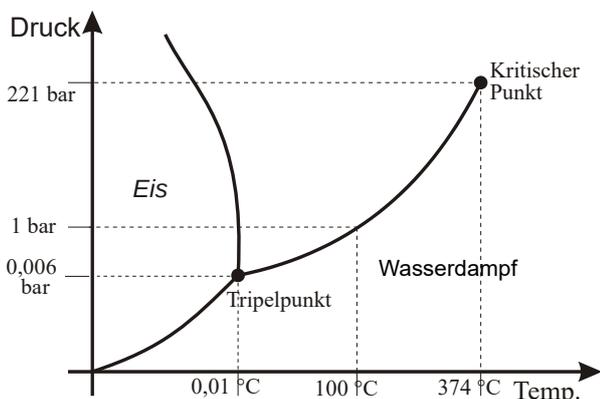


Abb. 3.1: Phasendiagramm des Wassers. Beachten Sie die nicht-lineare Auftragung! Q: commons.wikimedia.org Autor: JoWi

Diese ungewöhnliche Eigenschaft hat Konsequenzen:

- Übt man auf Eis Druck aus, so schmilzt es. Dies nutzt man etwa beim Schlittschuhlaufen. Unter dem Druck der Kufe bildet sich ein gleitender Flüssigkeitsfilm.
- Erhöht man den Druck nimmt die Dichte der Materie zu, weil sich der mittlere Teilchenabstand verringert. Da H₂O unter Druck schmilzt, muss Wasser also offensichtlich im flüssigen Zustand einen kleineren Teilchenabstand besitzen. Wasser besitzt in flüssiger Form seine höchste Dichte. Diese **Dichteanomalie des Wassers** ist auch auf dem Temperatur-Dichte-Diagramm deutlich zu sehen, wenn man an die entsprechende Stelle im Diagramm hineinzoomt:

Dichte von Eis und Wasser

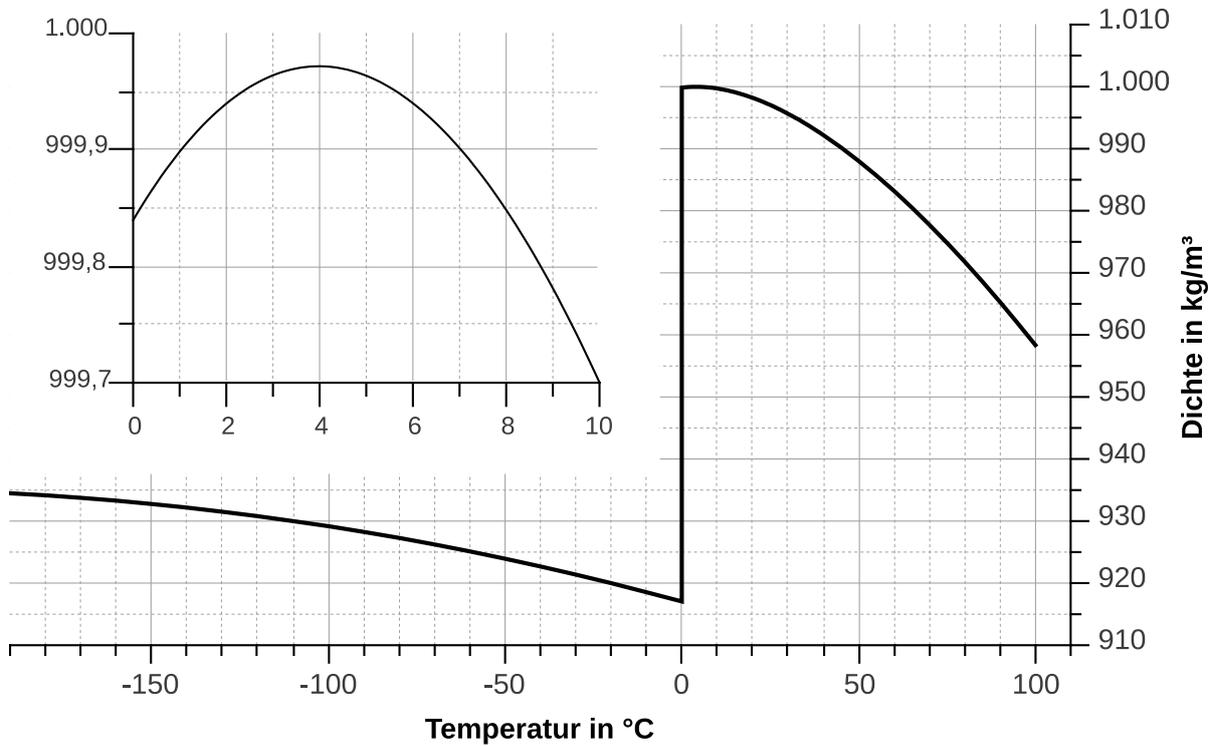


Abb. 3.1: Dichte-Temperaturdiagramm von H₂O. Q: commons.wikimedia.org. A: K-D. Keller

Dieses Verhalten ist *anomal*, denn normalerweise weisen feste Aggregatzustände eine höhere Dichte auf als flüssige. Typischerweise können nämlich gerade durch die hoch regelmäßige Packung in einem Kristall die Teilchenabstände besonders klein gehalten werden. Bei Wasser ist die optimale Ausbildung aller Wasserstoffbrücken jedoch ausnahmsweise mit einer Abstandszunahme der Moleküle untereinander verbunden. Eis hat deshalb eine niedrigere Dichte als die Flüssigkeit und schwimmt oben. Das wurde der *Titanic* zum Verhängnis.

Beim Schmelzen von Wasser rücken die Teilchen bis 4 °C immer näher zusammen. Dort hat Wasser seine größte

Dichte. Das ist für Wasserorganismen im Sommer wie im Winter überlebenswichtig.

3.1 Begründen Sie diesen Sachverhalt mit folgender Abbildung:

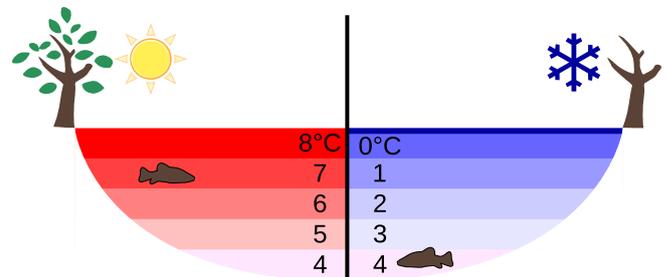


Abb. 3.2: Dichteanomalie Wasser. Q: commons.wikimedia.org. A: K-D. Keller