



**Für die SHV-Theorieprüfung muss nichts über die Luftfeuchtigkeit gelernt werden. Für mich eine Wissenslücke. Für das Verständnis und die richtige Interpretation eines Emagramms ist es nämlich wichtig, das Thema einigermaßen zu beherrschen.**

**Pour passer l'examen théorique FSVL, il ne nous a pas été nécessaire d'apprendre quoi que ce soit au sujet de l'humidité de l'air. A mon avis, il s'agit d'une lacune, car pour comprendre et interpréter un émagramme, par exemple, il me semble important de maîtriser un minimum le sujet.**



Jean Oberson [www.soaringmeteo.ch](http://www.soaringmeteo.ch)



Je nach physikalisch genau definierten Bedingungen gibt es Wasser, wie andere Stoffe auch, in verschiedenen Aggregatzuständen: fest (Eis), flüssig oder gasförmig (Wasserdampf). Wasser ist im flüssigen oder festen Zustand allen vertraut und einfach zu erkennen. Im gasförmigen Zustand hingegen ist dies nicht der Fall, weil es dann farblos und damit unsichtbar, geruch- und auch geschmacklos ist. Unser Körper nimmt in einer warmen und feuchten, also wasserdampfgeladenen Atmosphäre, eine gewisse Trägheit kaum wahr.

Dabei darf der Wasserdampf aber nicht mit Wolken, Nebel, Dunst oder gar mit dem «Dampfbad» eines Hammam verwechselt werden. Diese erscheinen in der Form eines mehr oder weniger dichten, weissen Schleiers, der je nach Volumen und Dichte mehr oder weniger durchsichtig ist, immateriell erscheint und aus in der Luft schwebenden Mikrowassertropfen (Feinstaub) besteht. Sicher enthält die Luft in einem Dampfbad auch viel Wasserdampf – den sieht man aber nicht. Was man hingegen gut sieht, ist der warme «Nebel» dieses doch sehr angenehmen Bades.

Luft besteht hauptsächlich aus Stickstoff (ca. 80%) und Sauerstoff (ca. 20%). Sie enthält aber eigentlich immer auch eine, je nach Zeit und Ort unterschiedliche, Menge Wasserdampf. Sogar in der prallenden Sonne mitten in der Sahara. Im Regenwald enthält die Luft natürlich wesentlich mehr Wasserdampf. Die Luftfeuchtigkeit bezeichnet diejenige Menge Wasserdampf, welche die Atmosphäre enthält. Man kann diese Feuchtigkeit unterschiedlich darstellen. Ich möchte hier drei Möglichkeiten erklären, die von Meteorologen häufig angewendet werden, vor allem beim Emagramm: erstens das Mischungsverhältnis, zweitens die relative Feuchte und drittens der Taupunkt.

Das Mischungsverhältnis «r» ist das Verhältnis zwischen dem Gewicht des Wasserdampfes in Gramm und einem Kilogramm trockener Luft. Ein Luftpaket, das auf 2'000 m 10°C warm ist und 6 g Wasserdampf pro kg enthält, entspricht einer mässig feuchten Atmosphäre. Die Luft kann bei einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur nur eine Maximalmenge Wasserdampf enthalten. 1 kg Luft bei 20°C und 1'000 hPa zum Beispiel kann nur etwa 15 g Wasserdampf

L'eau, comme d'autres matières sous des conditions physiques bien définies (température et pression notamment), peut se présenter sous forme solide (glace), liquide et gazeuse (vapeur d'eau). Si l'eau est familière et très facilement identifiable sous forme liquide et solide, elle ne l'est pas sous forme gazeuse car la vapeur est parfaitement incolore (invisible), inodore et insipide. C'est tout juste si notre corps ressent une vague lourdeur dans une atmosphère chaude et humide, c'est-à-dire chargée de vapeur d'eau.

Il ne faut pas la confondre avec les nuages, le brouillard, la brume, le bain dit «vapeur» (hammam), bien visibles sous la forme d'un voile blanchâtre, plus ou moins opaque, transparent ou translucide selon son volume et sa densité, d'apparence immatérielle, composé de micro gouttelettes (poussières) d'eau en suspension dans l'air. Bien sûr, dans un hammam, l'air contient aussi beaucoup de vapeur d'eau, mais elle n'est pas perceptible, seul le «brouillard» chaud de ce bain bien agréable est visible.

L'air, composé essentiellement d'azote (environ 80%) et d'oxygène (environ 20%), contient en réalité toujours une certaine quantité variable, dans le temps et l'espace, de vapeur d'eau, même en plein Sahara sous un soleil de plomb. Mais il y en a bien sûr beaucoup plus dans l'air d'une forêt équatoriale. L'humidité de l'air est la mesure de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Il y a plusieurs façons de représenter l'humidité. Je parlerai ici de trois façons souvent utilisées en météorologie et en particulier sur l'émagramme: (1) le rapport de mélange, (2) l'humidité relative et (3) la température de point de rosée.

Le rapport de mélange «r» est le rapport du poids en grammes de vapeur d'eau pour 1 kg d'air sec. Par exemple une parcelle d'air de 10°C à 2'000 m contenant 6 g de vapeur par kg de cet air sec correspond à une atmosphère moyennement humide.

À une pression et une température données, l'air ne peut contenir qu'une certaine quantité maximale de vapeur d'eau. Par exemple 1 kg d'air à 20°C et à 1'000 hPa peut contenir environ 15 g de vapeur d'eau au maximum. Dans ce cas, on dit que l'air est saturé d'humidité ou sim-

# Der Wasserdampf

## Histoire de vapeur d'eau

enthalten. In diesem Fall spricht man von einer mit Feuchtigkeit gesättigten Luft oder einfach von gesättigter Luft. Wird der Luft noch mehr Wasser zugeführt, kondensiert der Wasserdampf, wird flüssig und bildet Wolken (in der Luft schwebender Wasserstaub), Dunst, Pfützen oder sogar Eis, wenn die Temperatur tief genug ist. Das Sättigungsmischungsverhältnis «rs» ist also das maximale r, das ein Luftpaket enthalten kann. Abbildung 1 zeigt, wie rs von der Temperatur und der Höhe (Druck) abhängig ist. Das Verhältnis ist nicht linear: Je wärmer es ist, desto mehr Sättigungswasserdampf kann die Luft enthalten. Auf einem Skew-T Emagramm (dem am häufigsten angewandten Modell) sind die rs-Isolinien üblicherweise als gestrichelte, nach rechts geneigte Linien dargestellt (Abb. 2), deren Temperaturgradient im Vergleich zu den Isothermen etwa  $-0.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  beträgt. So beträgt zum Beispiel der Temperaturunterschied  $4^{\circ}\text{C}$  über  $2'000\text{m}$  zwischen den Punkten A und B auf der Isolinie  $4\text{ g/kg}$ , was tatsächlich  $0.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  entspricht.

Die relative Feuchte «H» ist das prozentuale Verhältnis zwischen dem Wasserdampfdruck und dem Sättigungswasserdampfdruck. Es ist jedoch praktischer, H mittels dem Mischungsverhältnis zu definieren, obwohl es etwas ungenauer ist:  $H = 100 r/rs$ . Wenn also  $rs = 10$  und  $r = 5$  sind, dann ist  $H = 50\%$ . Gesättigt ist  $r = rs$  und somit  $H = 100\%$ .

Der Taupunkt «Td» ist diejenige Temperatur, auf die ein Luftpaket sinken muss, bis es gesättigt ist und anfängt zu kondensieren. Je grösser der Unterschied zwischen Td und T, desto trockener die Luft. Meteorologen nennen diesen Temperaturunterschied «spread». Ist  $T_d = T$ , dann ist die Luft bereits gesättigt ( $H = 100\%$  und  $\text{spread} = 0^{\circ}\text{C}$ ). Td kann nie höher als T sein: Wenn  $T = T_d$  ist, dann hat man bereits die maximale Luftfeuchtigkeit erreicht (gesättigte Luft). Wird dem Luftpaket weiterhin Feuchtigkeit zugeführt, bildet sich flüssiges Wasser (Kondensation).

Dank dem Emagramm (Abb. 2) kennt man die Temperatur und die Höhe eines Luftpakets und kann somit einfach, graphisch und ohne komplizierte Formel, von einer Feuchtigkeitsmessung zur anderen wechseln. Es ist eine der vielen Anwendungen dieser Berechnung in zwei Dimensionen, mit der Meteorologen arbeiten. Für uns bleibt die Hauptanwendung natürlich die Vorhersage der Thermik, der kon-

plement gesättigt. L'apport supplémentaire d'eau entraîne la condensation de la vapeur en eau liquide sous forme de nuage (poussières d'eau liquide en suspension), buée, flaque d'eau, ou encore, si la température est basse, sa congélation en givre. Le rapport de mélange saturant ou rapport de mélange à saturation «rs» est donc r maximum qu'une parcelle d'air peut contenir. La figure 1 montre la dépendance de rs à la température et l'altitude (pression). Les relations ne sont pas linéaires, mais plus il fait chaud, et plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau à saturation. Sur un émagramme de type Skew-T (le plus fréquemment utilisé), les isolignes de rs sont généralement représentées par des lignes discontinues obliques (voir figure 2). Elles ont un «gradient» de température (par rapport aux isothermes) d'environ  $-0.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . En effet, entre les points A et B sur l'isoligne de  $4\text{ g/kg}$ , par exemple, il y a bien environ  $2'000\text{m}$  et  $4^{\circ}\text{C}$  de différence, ce qui correspond à  $0.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ .

Formellement, on définit l'humidité relative «H» en % au moyen du rapport entre la pression de vapeur d'eau et la pression de vapeur d'eau à saturation. Mais il est plus pratique, malgré une très légère imprécision, de définir H au moyen des rapports de mélange:  $H = 100 r/rs$ . Par exemple, si  $rs = 10$  et  $r = 5$ ,  $H = 50\%$ . À saturation,  $r = rs$  et par conséquent  $H = 100\%$ .

La température de point de rosée «Td» est la température à laquelle il faut abaisser une parcelle d'air pour que celle-ci devienne saturée et que la condensation commence. Plus Td est éloignée de la température T, plus l'air est sec. Cet éloignement s'appelle le «spread» dans le jargon du météorologue. Si  $T_d = T$ , l'air est déjà saturé ( $H = 100\%$  et  $\text{spread} = 0^{\circ}\text{C}$ ). Td ne peut jamais être supérieure à T. En effet, quand  $T = T_d$ , l'humidité de l'air est maximale (air saturé) et toute augmentation d'humidité entraîne une formation d'eau liquide (condensation).

Grâce à l'émagramme (figure 2), on peut facilement et graphiquement, sans formule compliquée, passer d'une mesure de l'humidité à l'autre en connaissant la température et l'altitude d'une parcelle d'air. C'est une des nombreuses applications de cette règle de calcul en deux dimensions pour météorologie. L'application principale pour nous

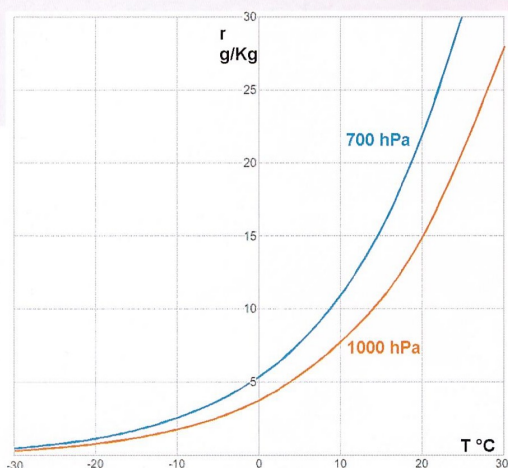


Abb. 1: Kurve des Sättigungswasserdampfes im Verhältnis zur Lufttemperatur auf 1'000 hPa und 700 hPa. Da diese Kurven graphisch und mittels Emagramm erstellt wurden, kann ich natürlich nicht versichern, dass sie absolut exakt sind.

Figure 1: Courbes de saturation de vapeur d'eau en fonction de la température de l'air à 1'000 hPa et à 700 hPa. Puisque j'ai réalisé ces courbes graphiquement à partir de l'émagramme, elles n'ont pas la prétention d'être rigoureusement exactes.

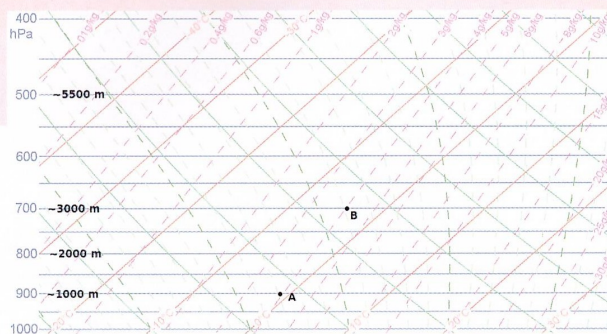


Abb. 2: Skew-T Emagramm. Die horizontalen, hellblauen Linien sind die Isobaren (Höhe), die geneigten, beigen Linien die Isothermen. Die geneigten, gestrichelten rosa Linien sind die Isolinien des Mischverhältnisses. Bemerkenswert sind auch die Trockenadiabate (hellgrüne Linie) und die Feuchtadiabate (gleichfarbige Linien, gestrichelt).

Figure 2: Emagramme de type Skew-T. Les droites horizontales bleu clair sont les isobares (altitudes), les droites obliques continues beige sont les isothermes. Les droites obliques discontinues rose sont les isolignes de rapport de mélange. En passant, vous noterez les adiabatiques sèches (lignes continues vert clair) et les adiabatiques humides (courbes discontinues de même couleur).

vektiven Grenzschicht und der Wolken. Die graphische Schätzung ist zwar etwas weniger genau als die Formelberechnung, sie ist jedoch einfacher, schneller und reicht für die tägliche Routinevorhersage vollkommen aus.

Beispiel 1 (Abb. 3): Auf der Internetseite von MeteoSchweiz zeigt die Station Moléson (auf 2'000 m, etwa 800 hPa) folgende Werte:  $T = 10^\circ\text{C}$  und  $H = 60\%$ . Wir wollen diese Werte nun mit denen der Radiosonde von Payerne bei 800 hPa vergleichen. Weil die Radiosonde die Luftfeuchtigkeit in Td angibt, müssen wir zuerst  $H = 60\%$  (Moléson) in Td umrechnen. Dazu setzen wir T auf dem Emagramm (Abb. 3) auf dem Schnittpunkt zwischen der Isobare 800 hPa und der Isotherme  $10^\circ\text{C}$  (1). Dann suchen wir die zwei Isolinien  $r_s$  (2), die  $T = 10^\circ\text{C}$  eingrenzen, und zwar  $r_s = 8 \text{ g/kg}$  und  $r_s = 10 \text{ g/kg}$ . Ich habe geschätzt, dass sich T graphisch auf der Isolinie  $9.6 \text{ g/kg}$  befindet. Das ergibt für Moléson:  $H = 60\%$ ,  $r = 9.6 \times 60\% = 5.8 \text{ g/kg}$ . Nun suchen wir die beiden Isolinien, die  $5.8$  eingrenzen, also  $5$  und  $6 \text{ g/kg}$  (3), um die Isolinie  $r_s = 5.8$  zu schätzen. Der Schnittpunkt dieser Isolinie und der Isobare 800 hPa ergibt Td, irgendwo zwischen  $0$  und  $10^\circ\text{C}$  (4), näher an  $0^\circ\text{C}$  – ich schätze ihn graphisch auf  $2.5^\circ\text{C}$ . Dieser letzte Wert ist der Td, den wir für Moléson suchen.

Beispiel 2 (Abb. 4): Anhand dieser Graphik, welche die Zustandskurven T (rot) und Td (blau) einer Sondierung darstellt, wollen wir nun die relative Feuchte am Gipfel der konvektiven Grenzschicht (kG) berechnen. Den Gipfel der kG erkennen wir an der Inversion, die hier dargestellt wird, dort, wo die blaue Kurve (Luftfeuchtigkeit) und die rote Kurve (Temperatur) am nächsten sind. Auf der Graphik können wir diesen Gipfel auf 700 hPa schätzen, dort wo  $T = 2^\circ\text{C}$  und  $T_d = -1^\circ\text{C}$  sind und auf eine Inversion hinweisen. Auf 700 hPa schneiden T und Td jeweils die Isolinien  $r = 6$  und  $5 \text{ g/kg}$ . Das ergibt am Gipfel der kG:  $H = 5/6 = 83\%$ .

Eine letzte Bemerkung: Wenn man die Td-Kurve zwischen 900 und 700 hPa, also in der kG, beobachtet, so stellt man fest, dass sie parallel zu den Isolinien des Mischungsverhältnisses  $r$  verläuft. Das weist darauf hin, dass die Feuchtigkeit in der kG homogen ist. Eigentlich logisch, gibt es doch in der kG starke, vertikale konvektive Bewegungen. Jetzt wird auch klar, warum die Td und  $r$  Gradienten in der kG so ähnlich sind, etwa  $-0.2^\circ\text{C}/100\text{m}$ .

reste bien sûr la prévision des thermiques, de la couche convective et des nuages. Certes, l'estimation graphique est un peu moins précise que le calcul numérique par des formules, mais elle est plus simple, plus immédiate et amplement suffisante pour la prévision journalière de routine.

Premier exemple (figure 3): sur le site web de MeteoSuisse, la station du Moléson, située à 2'000 m (environ 800 hPa), fournit des valeurs de  $T = 10^\circ\text{C}$  et  $H = 60\%$ . On aimerait comparer ces valeurs avec celles du radiosondage de Payerne à 800 hPa. Puisque sur un radiosondage l'humidité est donnée sous forme Td, on va transformer  $H = 60\%$  de la station du Moléson en Td. Sur l'émagramme (figure 3), on place d'abord T à l'intersection de l'isobare 800 hPa et de l'isotherme  $10^\circ\text{C}$  (1). On repère les 2 isolignes  $r_s$  (2) délimitant  $T = 10^\circ\text{C}$ . Il s'agit de  $r_s = 8 \text{ g/kg}$  et de  $r_s = 10 \text{ g/kg}$ . J'ai estimé graphiquement que T est sur l'isoligne  $9.6 \text{ g/kg}$ . Avec  $H = 60\%$ ,  $r$  au Moléson =  $9.6 \times 60\% = 5.8 \text{ g/kg}$ . On repère les 2 isolignes délimitant  $5.8$ , soit  $5$  et  $6 \text{ g/kg}$  (3) afin d'estimer l'isoligne  $r_s = 5.8$ . L'intersection de cette ligne avec l'isobare 800 hPa donne Td, entre les isothermes  $0$  et  $10^\circ\text{C}$  (4), plus près de  $0^\circ\text{C}$ , que j'estime graphiquement à  $2.5^\circ\text{C}$ . Cette dernière valeur est la Td recherchée au Moléson.

Deuxième exemple (figure 4): sur ce graphique où sont représentées les courbes d'état (T en rouge et Td en bleu) d'un sondage, on aimerait calculer l'humidité relative au sommet de la couche convective (CC). Le sommet de la CC est repérable par le début de l'inversion de température, au niveau duquel la courbe bleue de l'humidité est la plus proche de la courbe rouge de température. Sur le graphique, on peut estimer ce sommet à 700 hPa, où  $T = 2^\circ\text{C}$  et  $T_d = -1^\circ\text{C}$ . T et Td à 700 hPa croisent respectivement les isolignes  $r = 6$  et  $5 \text{ g/kg}$ . Par conséquent,  $H = 5/6 = 83\%$  au sommet de la CC. Encore une dernière remarque: en observant la courbe des Td entre 900 et 700 hPa, c'est-à-dire dans la CC, on peut constater qu'elle est parallèle aux isolignes de rapport de mélange  $r$ . Cela signifie que l'humidité dans la CC est homogène. C'est logique, puisque dans la CC il y a de forts brassages convectifs verticaux. On comprend maintenant pourquoi le gradient de Td dans la CC est proche de celui des  $r$ , c'est-à-dire environ  $-0.2^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ .

Ces procédés graphiques peuvent paraître compliqués au premier abord, car je les ai décortiqués. Mais si vous vous créez quelques

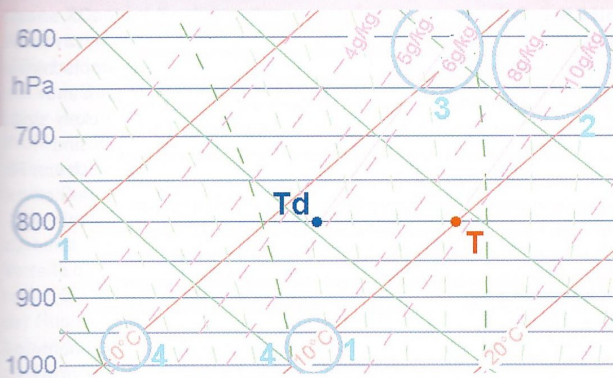


Abb. 3: Auszug aus dem Emagramm (Abb. 2) für das erste Berechnungsbeispiel.  
 Figure 3 : Extrait de l'émagramme de la figure 2 pour le premier exemple de calcul.

Dieses graphische Vorgehen mag sicher etwas kompliziert erscheinen, weil ich es stark zerlegt habe. Wer aber anhand der Abbildung 2 ein paar Beispiele und Übungen zusammenstellt, wird schnell Spass am einfachen Spiel bekommen. Wer lieber auf das Emagramm verzichtet oder eine genauere Berechnung bevorzugt, findet auf [www.vaisala.com](http://www.vaisala.com) gratis einen Rechner, der die Luftfeuchtigkeit umrechnet.

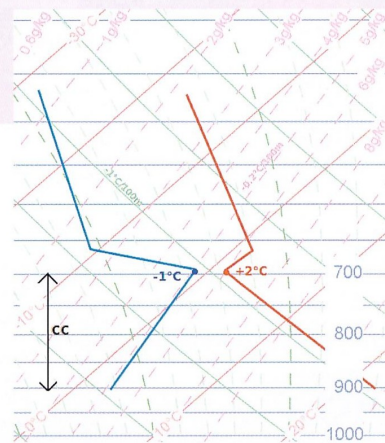


Abb. 4: Auszug aus dem Emagramm (Abb. 2) für das zweite Berechnungsbeispiel. CC = konvektive Grenzschicht.  
 Figure 4 : Extrait de l'émagramme de la figure 2 pour le deuxième exemple de calcul. CC = couche convective.

exemples et exercices à l'aide de la figure 2, vous allez vite trouver le jeu facile et rapide. Pour ceux qui veulent être plus précis ou se passer de l'émagramme, le site <http://www.vaisala.com> fournit un calculateur (convertisseur) d'humidité en ligne et gratuit.