

Wasserbeladung und Flüssigwasser in AUSTAL und BESTAL

U. Janicke, 2024-03-07

1 Kenngrößen

Feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft, Wasserdampf und Flüssigwasser. Massen und Volumina addieren sich zur Gesamtmasse und zum Gesamtvolumen:

$$m = m_d + m_v + m_l \quad (1)$$

$$V = V_d + V_v + V_l = \frac{m_d}{\rho_d} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_l}{\rho_l} \quad (2)$$

mit den Dichten von trockener Luft und Wasserdampf

$$\rho_d = \frac{p}{R_d T} \quad (3)$$

$$\rho_v = \frac{p}{R_v T} \quad (4)$$

und den Gaskonstanten $R_d = 287,05 \text{ J}/(\text{kg K})$ und $R_v = 461,52 \text{ J}/(\text{kg K})$ [1].

Eingangsgrößen für die Fahrenrechnung mit dem Überhöhungsmodell PLURIS nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 [2] sind der spezifische Wasserdampfgehalt und der spezifische Flüssigwassergehalt:

$$q = \frac{m_v}{m_d + m_v + m_l} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{m_l}{m_d + m_v + m_l} \quad (6)$$

In der TA Luft Nummer 5.5 [3] wird zur Bestimmung von q und η die Wasserbeladung als Eingangsgröße festgelegt:

$$x = \frac{m_v + m_l}{m_d} \quad (7)$$

Statt der Volumina und Massen können auch die Volumenströme \dot{V} (Volumen pro Zeiteinheit) und Massenströme \dot{m} (Masse pro Zeiteinheit) herangezogen werden, die durch den Austrittsquerschnitt einen Schornsteins gehen. Bezieht man den Volumenstrom auf den Druck $p_0 = 101,3 \text{ kPa}$ und die Temperatur $T_0 = 273,15 \text{ K}$, so ist es der Normvolumenstrom \dot{V}_N nach TA Luft.

2 Wasserbeladung

Aus

$$\dot{m}_v = (\dot{V}_N - \dot{V}_{N,d} - \dot{V}_{N,l}) \rho_{N,v} \quad (8)$$

$$\dot{m}_d = \dot{V}_d \rho_{N,d} \quad (9)$$

folgt

$$x = \frac{\dot{V}_N - \dot{V}_{N,d} - \dot{V}_{N,l}}{\dot{V}_d} \frac{\rho_{N,v}}{\rho_{N,d}} + \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_d} \quad (10)$$

oder

$$x = \frac{\dot{V}_N - \dot{V}_{N,d}}{\dot{V}_{N,d}} \frac{R_d}{R_v} + \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_d} \left(1 - \frac{\rho_{N,v}}{\rho_{N,l}} \right) . \quad (11)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite hängt vom Flüssigwassergehalt ab. Soweit kein Flüssigwasser vorliegt, kann die Wasserbeladung aus dem Normvolumenstrom (feucht) \dot{V}_N und dem Normvolumenstrom (trocken) $\dot{V}_{N,d}$ bestimmt werden:

$$x = \frac{\dot{V}_N - \dot{V}_{N,d}}{\dot{V}_{N,d}} \frac{R_d}{R_v} \quad \text{für } \eta = 0 \quad (12)$$

3 Konventionen in PLURIS

Aus der Wasserbeladung berechnet PLURIS den für die Erhaltungsgleichungen benötigten spezifischen Gesamtwassergehalt

$$\zeta = \frac{m_v + m_l}{m_d + m_v + m_l} = \frac{x}{1 + x} \quad (13)$$

und daraus q und η mit Hilfe des spezifischen Wasserdampfgehalts bei Sättigung \tilde{q}_s (Masse Wasserdampf pro Masse feuchter Luft ohne Flüssigwasser, festgelegt in *Berichte zur Umweltphysik* Nr. 9, [4]).

Die Standardwerte sind $T = 10^\circ\text{C}$, $x = 0$, $q = 0$, $\eta = 0$. Danach folgt eine Abfrage, ob diese Werte vom Benutzer geändert wurden:

Wenn $T \geq 100^\circ\text{C}$:

Wenn $x > 0$: $q = x/(1 + x)$

$\eta = 0$

Sonst:

Wenn $x > 0$:

$\zeta = x/(1 + x)$

Wenn $\zeta > \tilde{q}_s$:

$q = (1 - \eta)\tilde{q}_s$

$\eta = \zeta - q = (\zeta - \tilde{q}_s)/(1 - \tilde{q}_s)$

Sonst:

$q = \zeta$

$\eta = 0$

Bilder 1 und 2 zeigen Werte des spezifischen Wasserdampfgehalts bei Sättigung als Funktion von Druck und Temperatur, des spezifischen Gesamtwassergehalts als Funktion der Wasserbeladung (aufgrund der grafischen Routinen formal auch der Temperatur) sowie des spezifischen Flüssigwassergehalts als Funktion von Wasserbeladung und Temperatur.

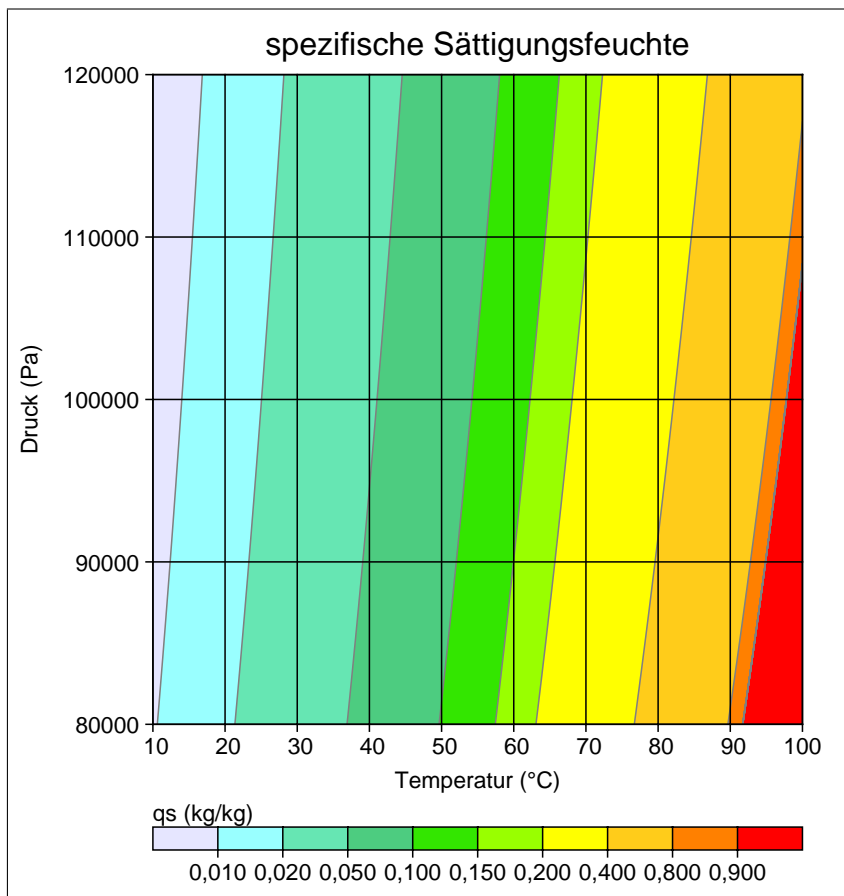


BILD 1: Spezifischer Wasserdampfgehalt bei Sättigung \tilde{q}_s als Funktion von Druck und Temperatur (nach *Berichte zur Umweltphysik* Nr. 9).

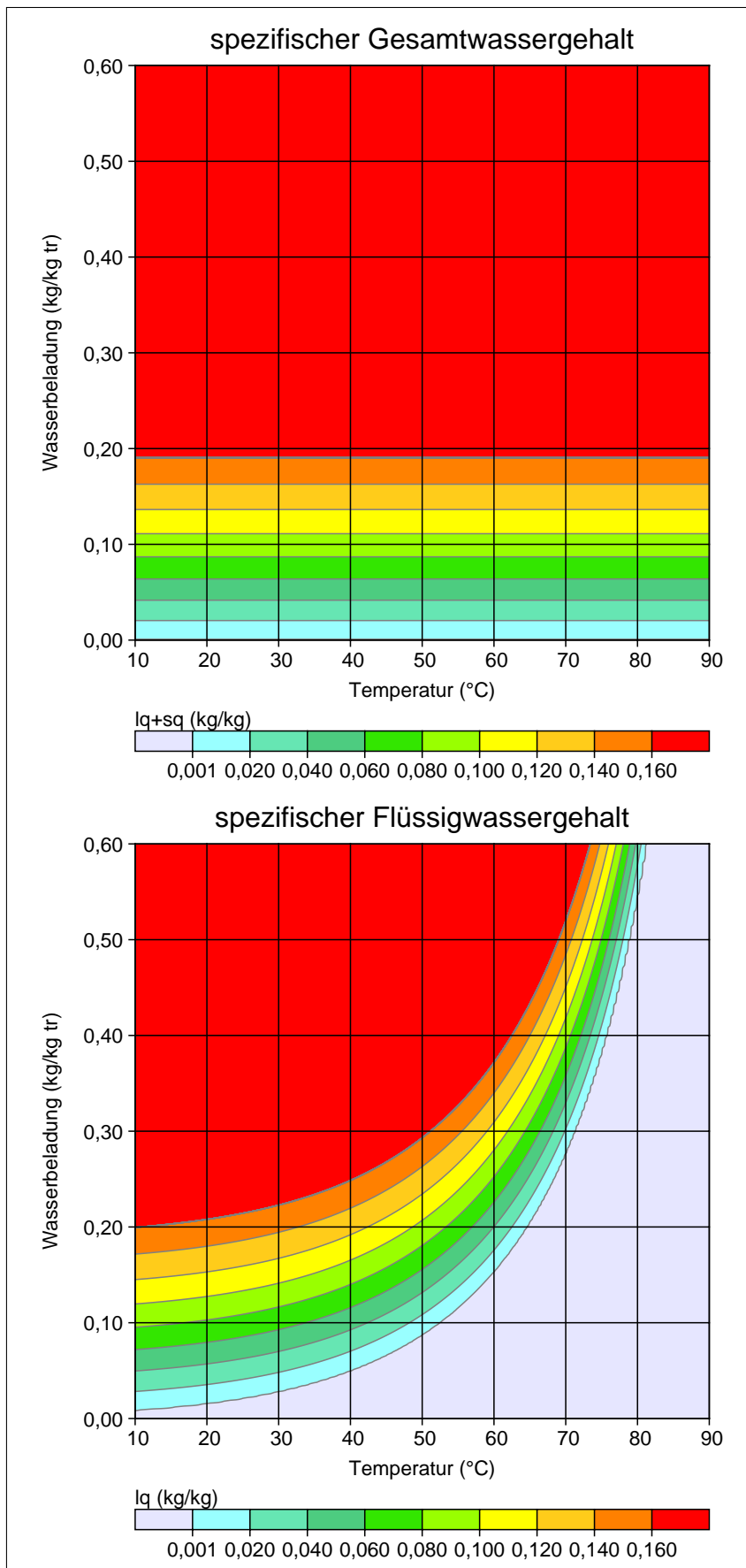


BILD 2: Spezifischer Gesamtwassergehalt ζ (oben) und spezifischer Flüssigwassergehalt η (unten) als Funktion von Wasserbeladung x und Temperatur.

4 Problemstellung Flüssigwasser

Bei einem sehr hohen Flüssigwassergehalt können im Rahmen von PLURIS folgende Probleme auftreten:

Zum einen können physikalische Effekte auftreten, die in PLURIS nicht abgebildet sind. Das ist insbesondere die Bildung von sedimentierenden Wassertropfen, die zu einem Verlust von Flüssigwasser in der Fahne führen.

Zum anderen betrachtet PLURIS als integrales Fahnenmodell nur die mittleren Verhältnisse über den Fahnenquerschnitt. Bei einer sehr raschen Verdünnung mit Umgebungsluft kann es dabei zu einem sehr schnellen Verdunsten des Flüssigwassers verbunden mit einer starken Abkühlung der Fahne kommen, während in der Realität dieser Prozess langsamer von außen in das Fahnenzentrum hinein wirkt. Durch den Ansatz von Ähnlichkeitsprofilen kann dem näherungsweise Rechnung getragen werden (siehe [5]), allerdings nur in begrenztem Rahmen.

Daher ist es sinnvoll, den für eine Quelle vorgegebenen Flüssigwassergehalt auf einen Maximalwert zu begrenzen. Der Flüssigwassergehalt in natürlichen Wolken liegt in der Regel unter $\eta = 0,03$ [6]. Die Grenze für das Ausregnen von Wasser aus natürlichen Wolken wird in [7] mit Werten um $\eta = 0,05$ angegeben (das ist eine Vermutung, denn die Einheiten sind dort nicht konsistent vermerkt). Der Flüssigwassergehalt bei Kühltürmen liegt für den Datensatz Philippsburg [8] bei $\eta = 0,001$ oder darunter (siehe auch Beispielrechnung in [9]).

Aus diesen Überlegungen heraus scheint es gerechtfertigt, als Obergrenze für den spezifischen Flüssigwassergehalt für Rechnungen mit PLURIS bzw. dem Überhöhungsmodell nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 den Wert

$$\eta_{\max} = 0,040 \quad (14)$$

festzulegen.

5 Konventionen in BESTAL und AUSTAL

In den BESTAL-Routinen Besmin und Besmax werden einzelne Quellen mit konstanten Emissionseigenschaften betrachtet. Bisher (Version 1.0) wird neben Durchmesser und Temperatur die Austrittsgeschwindigkeit und die Wasserbeladung vorgegeben.

Als Erweiterung (ab Version 1.1) wurde als Alternative zu Austrittsgeschwindigkeit und Wasserbeladung die Vorgabe von Normvolumenstrom (feucht) und Normvolumenstrom (trocken) implementiert. Aus dem Normvolumenstrom (feucht) kann die Austrittsgeschwindigkeit und aus der Differenz der beiden Volumenströme nach Gleichung (12) die Wasserbeladung bestimmt werden, soweit kein Flüssigwasser vorliegt.

Mit diesen Optionen werden folgende Kontrollen in Bezug auf den Wassergehalt erforderlich: Bei vorgegebener Wasserbeladung muss geprüft werden, ob hieraus $\eta \leq \eta_{\max}$ mit $\eta_{\max} = 0,040$ folgt; bei vorgegebenen Volumenströmen muss geprüft werden, ob hieraus $\eta = 0$ folgt. Ist eine dieser Forderungen nicht erfüllt, wird ein entsprechender Hinweis ausgegeben und die Rechnung ist nicht möglich.

In einer Ausbreitungsrechnung mit AUSTAL gestaltet sich die Kontrolle schwieriger, da einige der Parameter zeitabhängig vorgegeben werden können. Zum anderen dauern die Rechnungen erheblich länger, so dass ein Abbruch erst im Laufe der Rechnung benutzerunfreundlich wäre. Ein weiterer Aspekt ist, dass AUSTAL im Gegensatz zu BESTAL nicht von einer grafischen Benutzeroberfläche unterstützt wird, die den Benutzer auf einfache Weise zur Festlegung konsistenter und verträglicher Quellparameter anleitet.

Daher wird in AUSTAL (ab Version 3.3) der Wert von η automatisch auf Werte kleiner oder gleich $\eta_{\max} = 0,040$ begrenzt und es wird in der Protokolldatei ein Warnhinweis zum maximal aufgetretenen Wert von η vermerkt.

Literatur

- [1] H.-K. Baehr und S. Kabalec. *Thermodynamik*. Springer Vieweg, 2012.
 - [2] VDI 3782 Blatt 3. *Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre; Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung*. Beuth, Berlin, September 2022.
 - [3] TA Luft 2021. *Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)*, 14.09.2021. GMBI. Nr. 48–54, 1050–1192, 2021.
 - [4] U. Janicke u. a. „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“. In: *Berichte zur Umweltphysik* 9/1 (2017). ISSN 1439-8222, Ingenieurbüro Janicke, Überlingen, Deutsche Nationalbibliothek urn:nbn:de:101:1-201709132627.
 - [5] U. Janicke und L. Janicke. „A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes“. Englisch. In: *Atmos. Environ.* 35 (2001), S. 877–890.
 - [6] J.H. Seinfeld und S.N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Englisch. Wiley & Sons New York, 2006.
 - [7] S. Kida u. a. „Cloud liquid water path for the rain/no-rain classification method over ocean in the GSMap algorithm“. Englisch. In: *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* 8 (2010), S. 19–23.
 - [8] G. Ernst und G. Schnabel. „Naturzug-Nasskühlturm des Kernkraftwerkes Philippsburg (Block I): Ergebnisse der Schwadenausbreitungsrechnungen“. In: *Fortschr.-Ber. VDI-Z.* 15/30 (1984).
 - [9] VDI 3784 Blatt 2. *Umweltmeteorologie; Ausbreitungsrechnung bei Ableitung von Rauchgasen über Kühltürme*. Beuth, Berlin, März 1990.
-