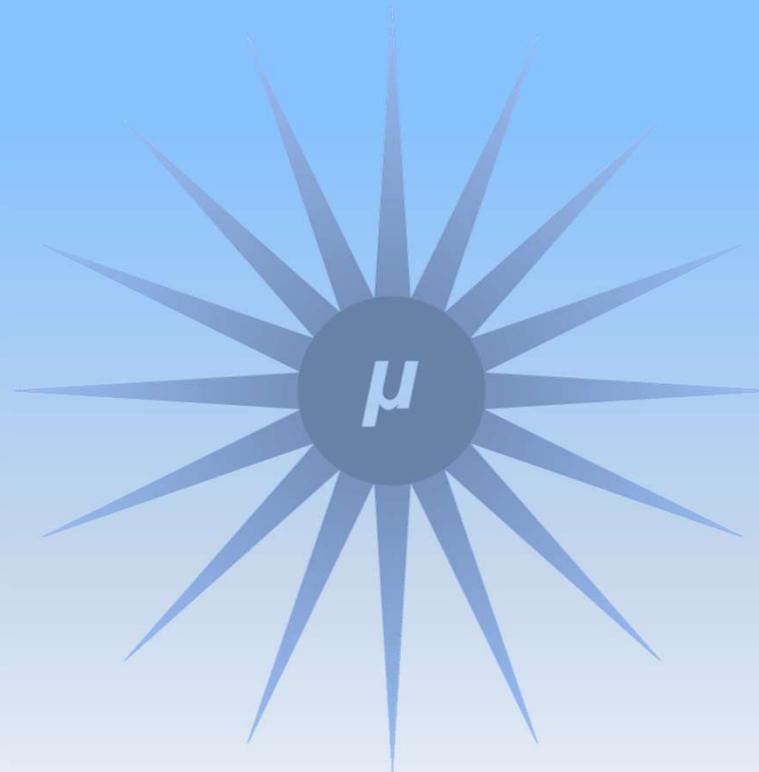


12. Feuchte Luft



Feuchte Luft

Holz fast immer in Luft-Wasserdampf-Gemisch getrocknet

⇒ thermodynamische Betrachtung von feuchter Luft sehr wichtig



jeder kennt die folgenden Phänomene: aus einer Kaffeetasse steigen Schwaden auf, beim Kochen laufen Wassertropfen an der Fensterscheibe herunter und obwohl es nicht geschneit hat, bildet sich im Winter Raureif auf den Scheiben des Autos

alle diese Phänomene hängen mit sog. *Luftfeuchtigkeit* zusammen: Umgebungsluft enthält immer gewisse Menge an Wasser in Form von Dampf, sichtbar wird diese Feuchtigkeit immer dann, wenn mehr Wasser vorhanden als Luft aufnehmen kann und es je nach Temperatur als flüssiges Wasser (als winzige Tröpfchen im Nebel oder beim Kochen am beschlagenen Fenster) oder Eis (Raureif) abgegeben wird

Trockene Luft

trockene Luft Gemisch aus verschiedenen reinen Stoffen im Gaszustand, im Wesentlichen Stickstoff, Sauerstoff und Argon

	N ₂	O ₂	Ar	Luft
<i>x</i>	0,781	0,210	0,009	1,000
<i>M</i> / g mol ⁻¹	28,01	32,00	39,95	28,96

betreffende Gase verhalten sich unter interessierenden Bedingungen (Umgebungstemperatur plus minus 100 °C und ungefähr Umgebungsdruck) wie ideale Gase

⇒ **trockene Luft**, abgekürzt L, als ideales Gas, als Art „reiner Stoff“ mit zugehöriger molarer Masse von 28,96 g mol⁻¹ behandelt

Feuchte Luft

feuchte Luft Gemisch aus trockener Luft und Wasser

Wasser, abgekürzt **W**, kann in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen: entweder nur als *Wasserdampf*, d.h., es liegt tatsächlich nur feuchte Luft vor oder zusätzlich als *Flüssigkeit* oder als *Eis*, es können also auch mehrere Aggregatzustände zugleich auftreten, wenn z.B. an einer Fensterscheibe flüssiges Wasser kondensiert, ist gleichzeitig in der Luft immer noch Wasserdampf vorhanden

zur Kennzeichnung Bezeichnungen g, l und s an das W angefügt

Wovon hängt es nun ab, ob Wasser als Dampf, als Flüssigkeit oder als Eis vorliegt?

drei Einflussgrößen: *Anteil an Wasser*, der in der Luft vorliegt, gleichgültig in welchem Aggregatzustand, *Temperatur* und theoretisch auch *Druck*, bei vergleichsweise niedrigen Drücken in technischen Anwendungen spielt Druckabhängigkeit jedoch keine Rolle

Wassergehalt

Anteil an Wasser in der Luft gegeben durch **Wassergehalt ζ** (Wasserbeladung):

$$\zeta = \frac{m_W}{m_L} = \frac{m_{W|g} + m_{W|l} + m_{W|s}}{m_L}$$



Wassergehalt also Verhältnis von gesamter Wassermasse (in Luft enthaltener Wasserdampf plus als flüssiges Kondensat oder auch Eis vorliegendes Wasser) zur Masse der *trockenen* Luft

für trockene, wasserfreie Luft ergibt diese Definition $\zeta = 0$, für reines Wasser mit m_L gegen null geht ζ gegen unendlich

Definition gilt auch für Massen**ströme** in einem offenen System

$$\zeta = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_L} = \frac{\dot{m}_{W|g} + \dot{m}_{W|l} + \dot{m}_{W|s}}{\dot{m}_L}$$

$\dot{m} = dm/dt$: Masse eines Mediums, die sich in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt bewegt (Einheit: kg s^{-1})

Wasserdampfbeladung

zunächst auf dampfförmiges Wasser in der Luft beschränkt \Rightarrow

Wasserdampfbeladung (oder auch **Wasserdampfgehalt**) $\zeta_{w|g}$: Masse an Wasserdampf, bezogen auf Masse der *trockenen* Luft

$$\zeta_{w|g} = \frac{m_{w|g}}{m_L}$$

Berechnung des Partialdrucks von Wasserdampf und Luft mittels allgemeinem Gasgesetz:

$$p_{w|g}V = n_{w|g}RT = \frac{m_{w|g}}{M_w}RT \quad \text{bzw.} \quad p_LV = n_LRT = \frac{m_L}{M_L}RT$$



$$\zeta_{w|g} = \frac{(p_{w|g} \cancel{V/RT})M_w}{(p_L \cancel{V/RT})M_L} = \frac{p_{w|g}M_w}{p_L M_L}$$

Wasserdampfbeladung

Gesamtdruck ergibt sich als Summe der Partialdrücke:

$$p = p_{W|g} + p_L$$



$$\zeta_{W|g} = \frac{M_W}{M_L} \left(\frac{p_{W|g}}{p - p_{W|g}} \right)$$

mit den bekannten Stoffwerten für $M_W = 18,016 \text{ g mol}^{-1}$ und $M_L = 28,964 \text{ g mol}^{-1}$ folgt:

$$\zeta_{W|g} = 0,622 \cdot \frac{p_{W|g}}{p - p_{W|g}}$$

Wasserdampfbeladung im Sättigungszustand

Luft von gegebener Temperatur kann nicht unbegrenzt Wasser als Dampf aufnehmen, sondern nur ganz bestimmte Menge, die bei gegebenem Gesamtdruck nur von Temperatur der Luft abhängt

⇒ Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft kann bei vorgegebener Temperatur bestimmten Maximalwert, *Sättigungspartialdruck* p_s , nicht überschreiten (Erreichen der Taulinie), bei weiterer Zufuhr von Wasserdampf kondensiert Wasser *oberhalb Temperatur des Tripelpunktes* ($T = 273,16$ K bzw. $\vartheta = 0,01$ °C) als *Flüssigkeit* (Nebel, Tau, Niederschlag) oder desublimiert *unterhalb* $T = 273,16$ K als *Feststoff* (Eis oder Eisnebel)

Wasserdampfgehalt im Sättigungszustand erhält man, indem man Wasserdampfpartialdruck durch Sättigungspartialdruck ersetzt

$$\zeta_s = 0,622 \cdot \frac{p_s}{p - p_s}$$

Wasserdampfbeladung im Sättigungszustand

Sättigungspartialdruck entspricht (oberhalb 273,16 K) Dampfdruck des (flüssigen) Wassers im Gleichgewicht bei Temperatur der feuchten Luft:

$$p_{lg} = p_{W|g} = 100 \text{ kPa} \cdot \exp\left(\frac{-8560 + 118,9 \cdot (T/\text{K} - 298,15)}{8,314 \cdot T/\text{K}}\right)$$

bzw. formuliert mittels in Technik noch üblicher Temperatureinheit °C:

$$p_s = 100 \text{ kPa} \cdot \exp\left(\frac{-8560 + 118,9 \cdot (\vartheta/^\circ\text{C} - 25)}{8,314 \cdot (\vartheta/^\circ\text{C} + 273,15)}\right)$$

$\vartheta/^\circ\text{C}$	0,01	10	20	30	40	50	60
p_s / kPa (gerechnet)	0,62	1,24	2,34	4,24	7,41	12,49	20,43
p_s / kPa (gemessen)	0,61	1,23	2,34	4,24	7,37	12,33	19,92

unterhalb 273,16 K muss anstelle der Siededruckkurve die Sublimationsdruckkurve berücksichtigt werden

Relative Feuchte

weitere Größe zur Kennzeichnung des Wasseranteils in der Luft:
relative Feuchte φ : Verhältnis von tatsächlichem Wasserdampf-Partialdruck zum Wasserdampf-Partialdruck im Sättigungszustand

$$\varphi = \frac{p_{w|g}}{p_s}$$

Zahlenwerte liegen im Bereich $0 \leq \varphi \leq 1$, es bedeutet

- $\varphi = 0$, dass *trockene Luft* vorliegt,
- $0 < \varphi < 1$, dass *ungesättigte feuchte Luft* vorliegt,
- $\varphi = 1$, dass *gesättigte feuchte Luft* vorliegt, wobei gilt für
 - $T > 273,16$ K: gesättigter Wasserdampf mit Siededruck $p_s(T)$ und (flüssiges) Wasser in Form von Nebel oder flüssigem Niederschlag
 - $T < 273,16$ K: gesättigter Wasserdampf mit Sublimationsdruck $p_s(T)$ und Eis, meist in Form von Reif oder Eisnebel
 - $T = 273,16$ K: Dreiphasensystem

Exkurs: Technische Thermodynamik

Gegenstand: Theorie der „thermischen Kraft- und Arbeitsmaschinen“

Besonderheiten (verglichen mit chemischer Thermodynamik):

Maschinen in technischen Anlagen, z. B. Trockner, Verdampfer u. a. von einem oder mehreren Stoffströmen meist stationär durchflossen

⇒ Stofftransport über „größere“ Entfernungen ($l > 10^{-2}$ m) durch Rohre, Kanäle ...

⇒ Entropie *konvektiv* im Materiestrom mitgeführt (S_k), Entropieaustausch durch Leitung (*konduktiv*, S_λ) unerheblich

⇒ Energiedurchsatz durch Querschnitt



$$\begin{array}{l} \Delta W = \mu \cdot \Delta n \quad \rightarrow \\ \Delta W = T \cdot \Delta S \quad \rightarrow \end{array}$$

$$\begin{aligned} \Delta W &= \mu \cdot \Delta n + T \cdot \Delta S \\ &= (\underbrace{\mu + T \cdot S_m}_{H_m}) \cdot \Delta n \end{aligned}$$

$$\Delta W = H_m \cdot \Delta n$$

⇒ **molare Enthalpie** als „*thermochem. Potenzial*“

Enthalpie H

prinzipiell auch Beiträge der kinetischen und potenziellen Energie, die ebenfalls konvektiv befördert werden, einbeziehbar, wie z. B. bei Berechnung von Düsenströmungen, Strahltriebwerken, ..., diese werden aber in der Thermodynamik meist vernachlässigt

$$\Delta W = \underbrace{\mu \cdot \Delta n + T \cdot \Delta S}_{\text{thermisch}} + \cancel{\frac{1}{2} v^2 \cdot \Delta m}_{\text{kinetisch}} + \cancel{gh \cdot \Delta m}_{\text{gravitativ}}$$

gravitativ
kinetisch
thermisch
chemisch

$$\Delta W = \underbrace{H_m \cdot \Delta n}_{\Delta H}$$

Enthalpie H beschreibt eine auf bestimmte Weise beförderte Energiemenge, gleichsam eine „*thermochemisch*“ transportierte

Spezifische Enthalpie h

Stärke des durch den Querschnitt mit der Fläche A fließenden Energiestroms ergibt sich zu:

$$\dot{W}_A = \frac{dW_A}{dt} = H_A \cdot \frac{dn_A}{dt} = H_A \cdot \dot{n}_A$$

in der technischen Thermodynamik bezieht man Größen meist nicht auf die Stoffmenge n , sondern auf die *Masse* m

⇒ statt von molaren Größen spricht man von *spezifischen* Größen, verdeutlicht durch Kleinschreibung des zugehörigen Symbols:

$$\dot{W}_A = h_A \cdot \dot{m}_A \quad \text{bzw.} \quad h_A = \frac{\dot{W}_A}{\dot{m}_A}$$

mit *spezifischer Enthalpie* h_A (Einheit: J kg^{-1}) als auf die bewegte Masse bezogene beförderte Energie W_A , h_A also nichts anderes als die „(spezifische) *Energiefracht*“ des betrachteten Materiestroms

Spezifische Enthalpie feuchter Luft

Enthalpie H der feuchten Luft setzt sich aus Enthalpien von trockener Luft und Wasser zusammen:

$$H = m_L h_L + m_W h_W$$

h_L : spezifische Enthalpie der trockenen Luft, h_W : spezifische Enthalpie des Wassers

Enthalpie der feuchten Luft nicht wie sonst üblich auf Gesamtmasse, sondern **auf kleinere Masse der in ihr enthaltenen trockenen Luft bezogen!**; Vorteil: Bezugsgröße bleibt bei fast allen Prozessen konstant, weil sich in der Regel nur die Masse m_W des Wassers ändert

$$h^* := \frac{H}{m_L} = h_L + \frac{m_W}{m_L} h_W = h_L + \zeta_W h_W$$

h^* : Enthalpie der feuchten Luft, bezogen auf die Masse der darin enthaltenen *trockenen* Luft

Nullpunktwahl

spezifische Enthalpie hängt nur von Temperatur T und zwei frei wählbaren Größen, Temperatur des Nullpunktes T_0 und Nullpunkt-Enthalpie h_0 , ab:

$$h(T) = \int_{T_0}^T c_p(T) dT + h_0$$

- willkürliche Festlegung des Nullpunkts: spezifische Enthalpie der *trockenen Luft* bei Temperatur $T_0 = 273,16$ K des Tripelpunktes von Wasser gleich null gesetzt
- Annahme: (isobare) Wärmekapazitäten wie z.B. c_L von trockener Luft temperaturunabhängig



$$h_L(T) = c_L(T - T_0)$$

$$\text{mit } c_L = 1,0046 \text{ kCt kg}^{-1}$$

bei derselben Temperatur spezifische Enthalpie von **flüssigem!** Wasser ebenfalls gleich null gesetzt:



$$h_{W||}(T) = c_{W||}(T - T_0)$$

$$\text{mit } c_{W||} = 4,191 \text{ kCt kg}^{-1}$$



Berücksichtigung der Aggregatzustände



Wasser kann nicht nur in flüssiger Form, sondern auch als Wasserdampf oder aber als Eis auftreten

Wasser im Gaszustand, d.h. *Wasserdampf*: Übergang



geht mit Änderungen der Energie einher, d.h. $h_{0,l}$ und $h_{0,g}$ können nicht beide gleich null gesetzt werden:

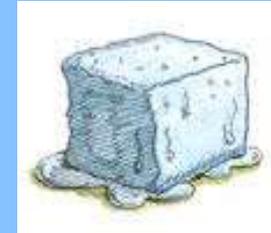


$$h_{w|g}(T) = \Delta_{lg}h(T_0) + c_{w|g}(T - T_0)$$

$\Delta_{lg}h(T_0) = h_{0,g} - h_{0,l} = 2500,9 \text{ kJ kg}^{-1}$: *spezifische Verdampfungsenthalpie* des Wassers bei Tripelpunkttemperatur $T_0 \equiv$ erforderlicher Enthalpiebetrag, um flüssiges Wasser bei T_0 in Wasserdampf umzuwandeln
 zweiter Term (mit $c_{w|g} = 1,863 \text{ kCt kg}^{-1}$) gibt Änderung der spezifischen Enthalpie des Wasserdampfes bei Übergang von diesem Zustand zum Zustand mit Temperatur T an

Berücksichtigung der Aggregatzustände

bei Temperaturen unterhalb der Tripelpunkttemperatur tritt Wasser in fester Form als Eis auf



$$\curvearrowright h_{W|s}(T) = -\Delta_{sl}h(T_0) + c_{W|s}(T - T_0)$$

$\Delta_{sl}h(T_0) = 333,4 \text{ kJ kg}^{-1}$: *spezifische Erstarrungsenthalpie* von Wasser am Tripelpunkt $T_0 \equiv$ Enthalpiebetrag, der flüssigem Wasser bei T_0 entzogen werden muss, um es in Eis umzuwandeln

$c_{W|s} = 2,07 \text{ kCt kg}^{-1}$: spezifische Wärmekapazität von Eis

spezifische Enthalpie $h_{W,s}$ stets kleiner als spezifische Enthalpie von flüssigem Wasser bei T_0 , die gleich null gesetzt wurde $\Rightarrow h_{W|s}$ negativ

in allen Gleichungen vertreten ist Temperaturdifferenz $T - T_0 = \vartheta - \vartheta_0$

Lufttemperaturen selten auf 0,01 K genau angebar \Rightarrow in der Regel $\vartheta_0 = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber Celsius-Temperatur ϑ vernachlässigbar

$$\curvearrowright T - T_0 \approx \vartheta$$

Ungesättigte feuchte Luft

$$\zeta_{W|g} \leq \zeta_s \text{ und } \zeta_{W|l} = \zeta_{W|s} = 0:$$

Luft enthält nur dampfförmiges Wasser \Rightarrow ideales Gasgemisch

$$h^*(\vartheta, \zeta_w) = h_L + \zeta_w h_{W|g} = c_L \cdot \vartheta + [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + c_{W|g} \cdot \vartheta] \cdot \zeta_w$$

$$\vartheta \text{ vorg.: } y = b + m \cdot x \quad \text{Gerade}$$

Sättigungswert ζ_s der Wasserdampfbeladung: $\zeta_s = 0,622 \cdot [p_s / (p - p_s)]$

\Rightarrow Sättigungswert von h^* :

$$h_s^* = h^*(\vartheta, \zeta_s) = c_L \cdot \vartheta + [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + c_{W|g} \cdot \vartheta] \cdot \zeta_s$$

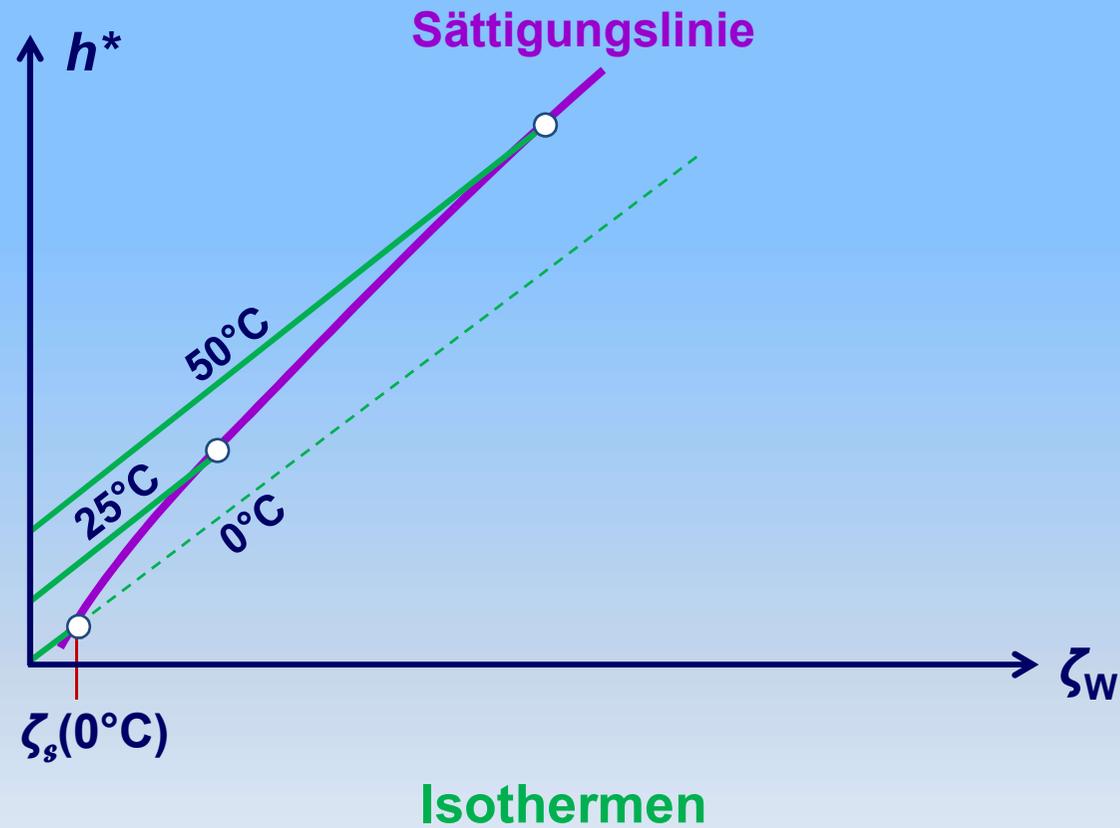
ϑ vorg.: *Punkt*

Tabelle:

(für $p = 100 \text{ kPa}$)

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60
p_s / kPa	0,62	1,24	2,34	4,24	7,41	12,49	20,43
$\zeta_s / \text{g kg}^{-1}$	3,9	7,8	14,9	27,5	49,8	88,8	159,7
$h_s^* / \text{kJ kg}^{-1}$	9,8	29,6	57,8	100,3	168,3	280,4	477,4

Konstruktion des h^*, ζ_w -Diagrammes (1)



Übersättigte feuchte Luft im Nebelgebiet

$$\zeta_w > \zeta_s, \vartheta \geq 0 \text{ °C und } \zeta_{w|s} = 0$$

Luft ist mit Wasserdampf gesättigt und enthält außerdem noch flüssiges Wasser

⇒ zur spezifischen Enthalpie der gesättigten Gasphase ist die spezifische Enthalpie des flüssigen Kondensats zu addieren



$$h^*(\vartheta, \zeta_w) = h_L + \zeta_s h_{w|g} + \zeta_{w||} h_{w||}$$

$$= c_L \cdot \vartheta + \zeta_s \cdot [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + c_{w|g} \cdot \vartheta] + (\zeta_w - \zeta_s) \cdot c_{w||} \cdot \vartheta$$

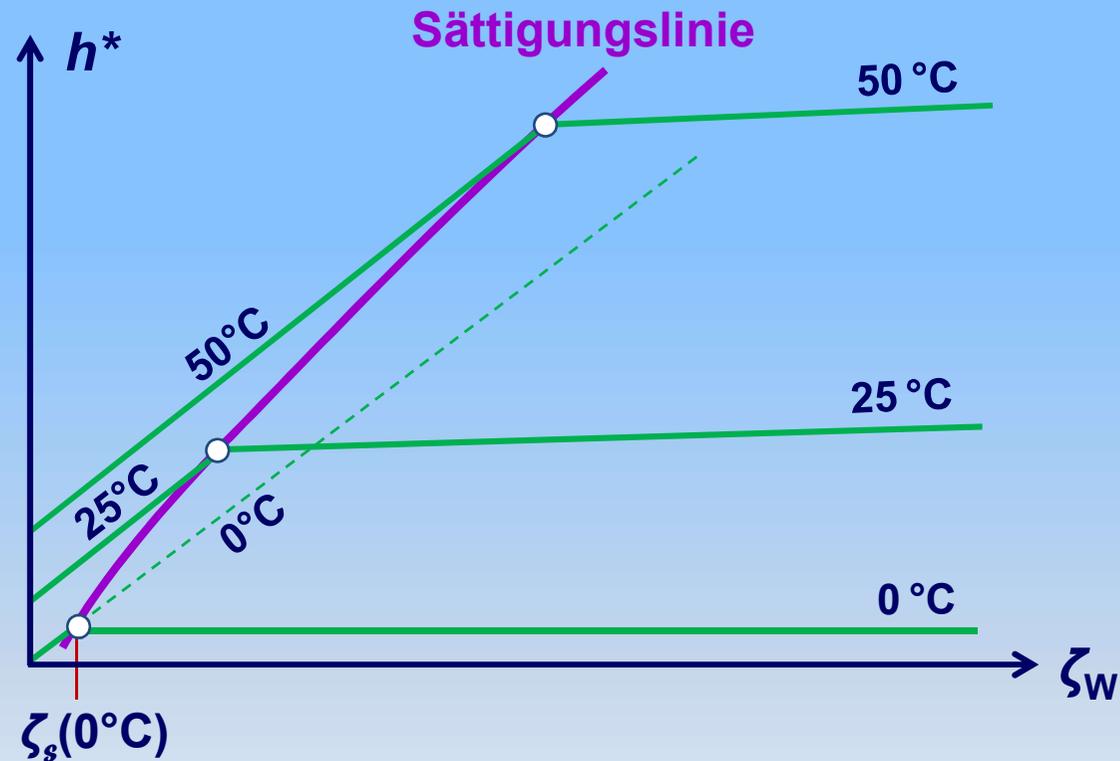
$$h^*(\vartheta, \zeta_w) = c_L \cdot \vartheta + \zeta_s \cdot [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + (c_{w|g} - c_{w||}) \cdot \vartheta] + c_{w||} \cdot \vartheta \cdot \zeta_w$$

ϑ vorg.:

$$y = b + m \cdot x \quad \text{Gerade}$$

Nebelisotherme für flüssiges Wasser hat für $\vartheta = 0 \text{ °C}$ Steigung null ⇒
Parallele zur ζ_w -Achse

Konstruktion des h^*, ζ_w -Diagrammes (2)



Isothermen
(erscheinen als geknickte Geraden)

Übersättigte feuchte Luft im Eisnebelgebiet

$$\zeta_w > \zeta_s, \vartheta \leq 0 \text{ °C und } \zeta_{w|l} = 0$$

Luft ist mit Wasserdampf gesättigt und enthält außerdem noch festes Wasser in Form von Eis

⇒ zur spezifischen Enthalpie der gesättigten Gasphase ist nun die spezifische Enthalpie des **festen!** Kondensats zu addieren



$$h^*(\vartheta, \zeta_w) = h_L + \zeta_s h_{w|g} + \zeta_{w|s} h_{w|s}$$

$$= c_L \cdot \vartheta + \zeta_s \cdot [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + c_{w,g} \cdot \vartheta] + (\zeta_w - \zeta_s) \cdot [-\Delta_{sl} h(\vartheta_0) + c_{w|s} \cdot \vartheta]$$

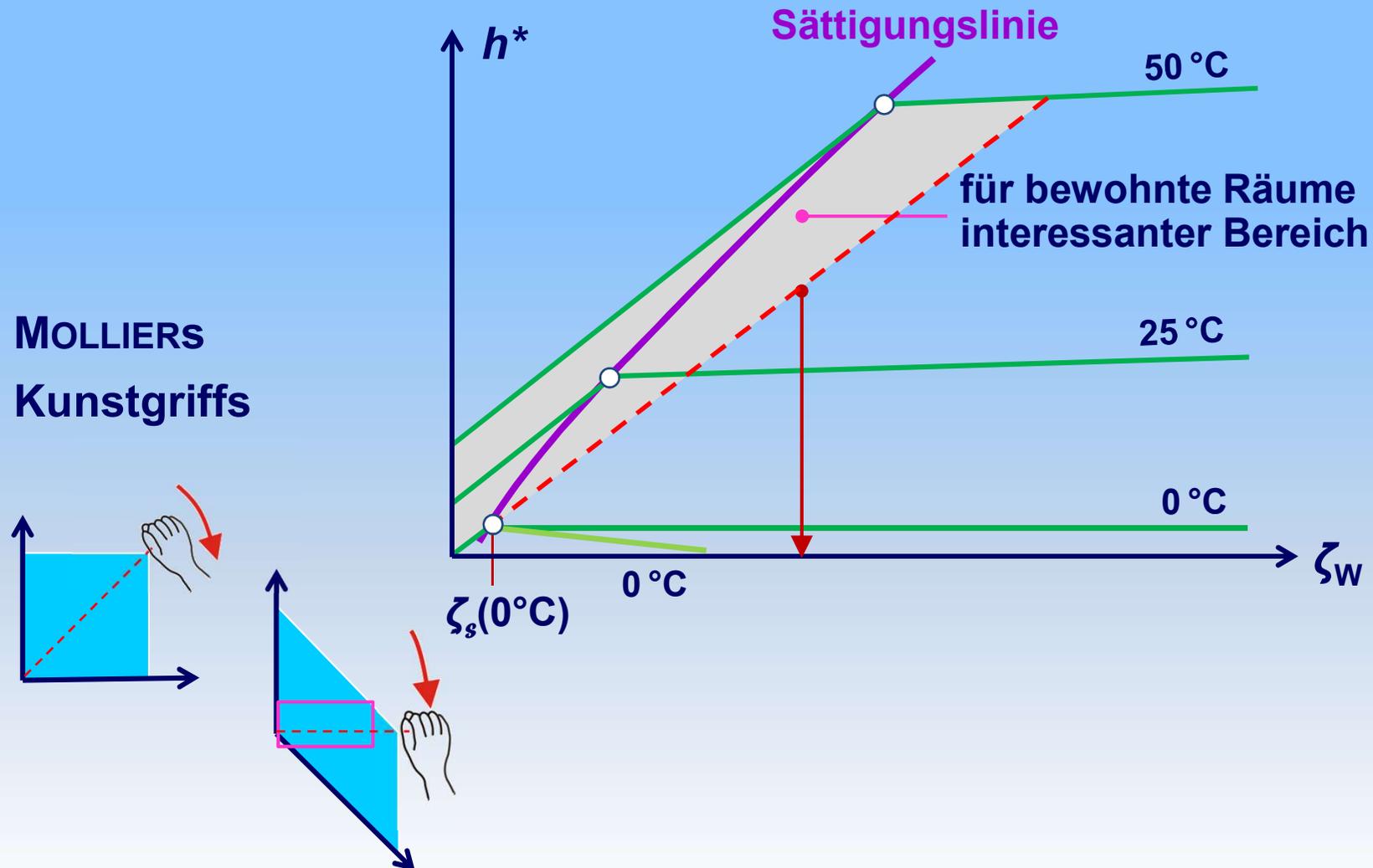
$$h^*(\vartheta, \zeta_w) = c_L \cdot \vartheta + \zeta_s \cdot [\Delta_{lg} h(\vartheta_0) + (c_{w|g} - c_{w|s}) \cdot \vartheta] + [-\Delta_{sl} h(\vartheta_0) + c_{w|s} \cdot \vartheta] \cdot \zeta_w$$

ϑ vorg.:

$$y = b + m \cdot x \quad \text{Gerade}$$

Nebelisotherme für Wassereis hat für $\vartheta = 0 \text{ °C}$ negative Steigung

Konstruktion des h^*, ζ_w -Diagrammes (3)



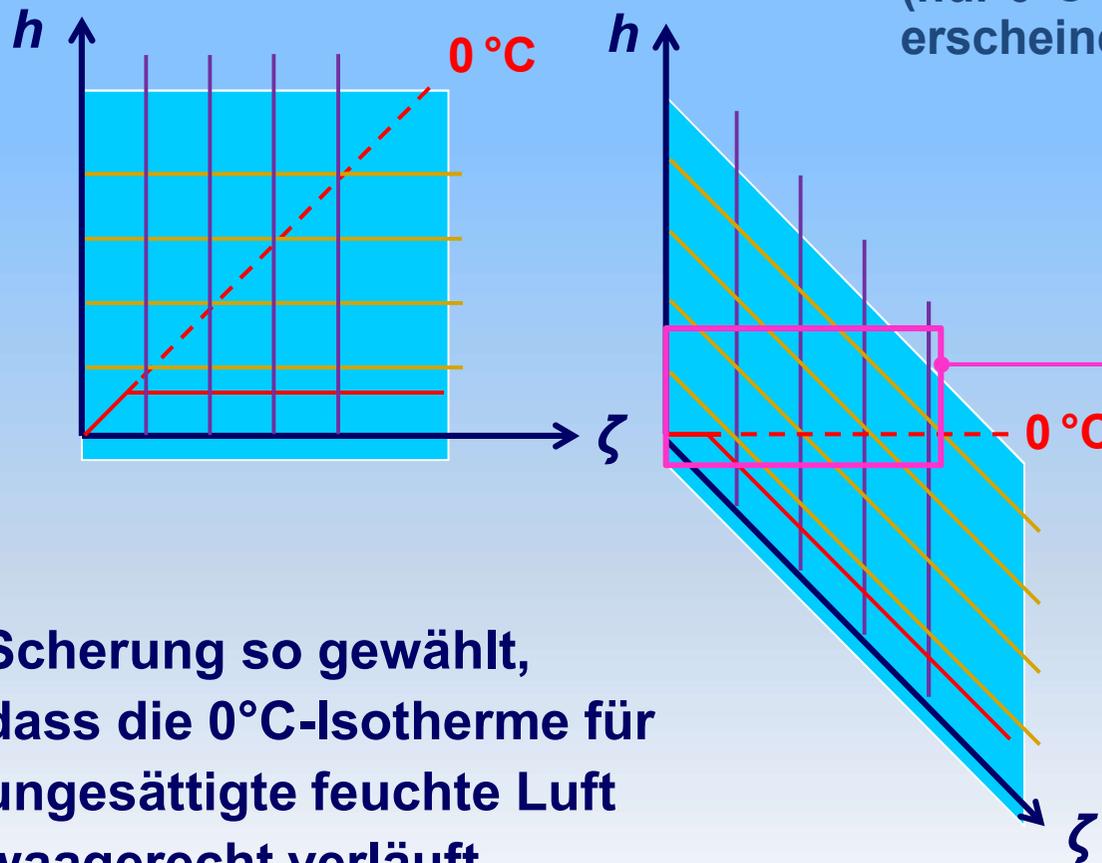
MOLLIERS h^* , ζ_w -Diagramm

Isenthalpen

ζ -Isoplethen

Isothermen

(nur 0°C -Isotherme gezeichnet)
erscheinen als geknickte Geraden



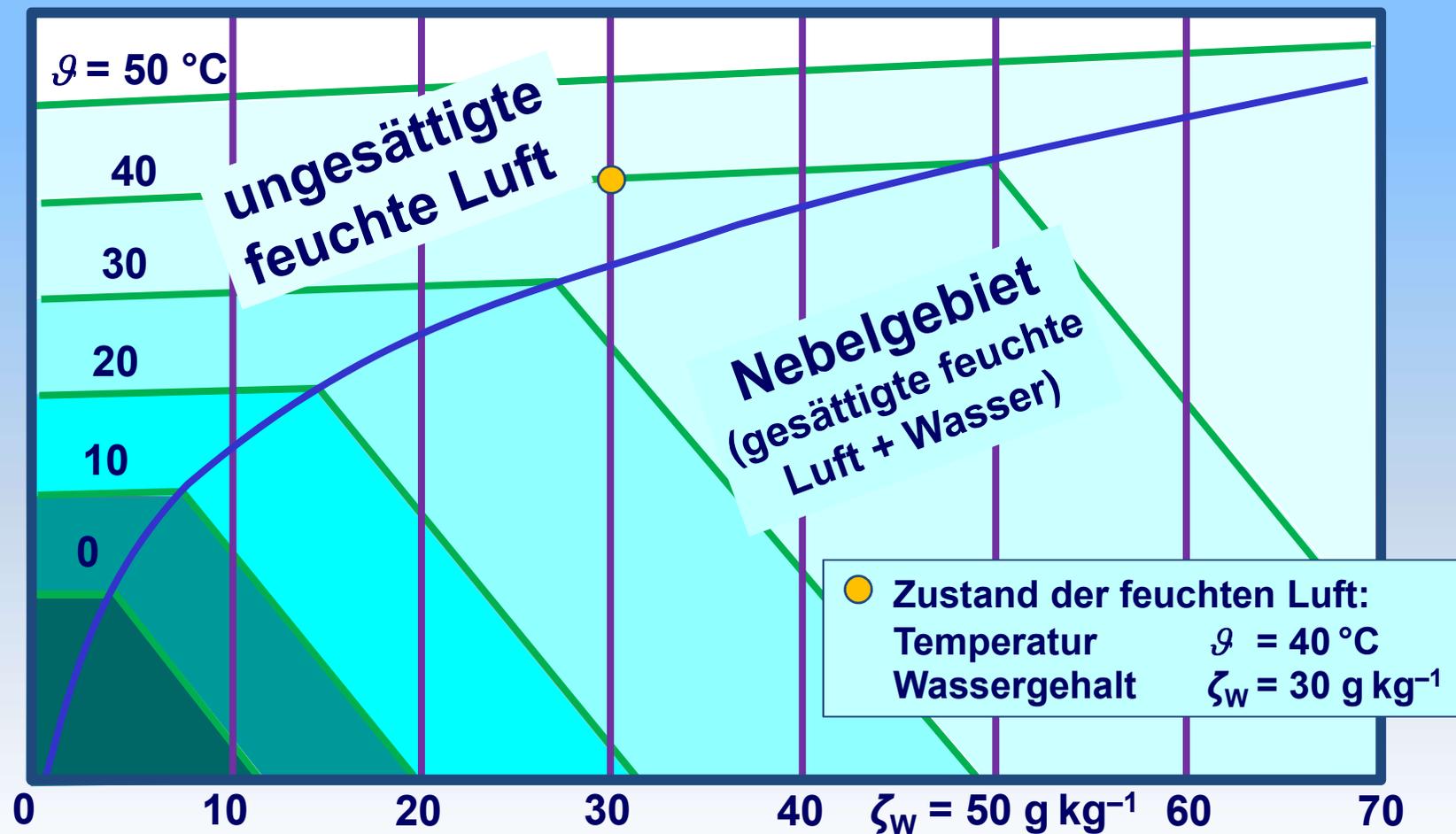
für bewohnte Räume
interessanter Bereich

Scherung so gewählt,
dass die 0°C -Isotherme für
ungesättigte feuchte Luft
waagerecht verläuft

MOLLIER-Diagramm

(h^* , ζ_w -Diagramm im schiefwinkligen Koordinatensystem)

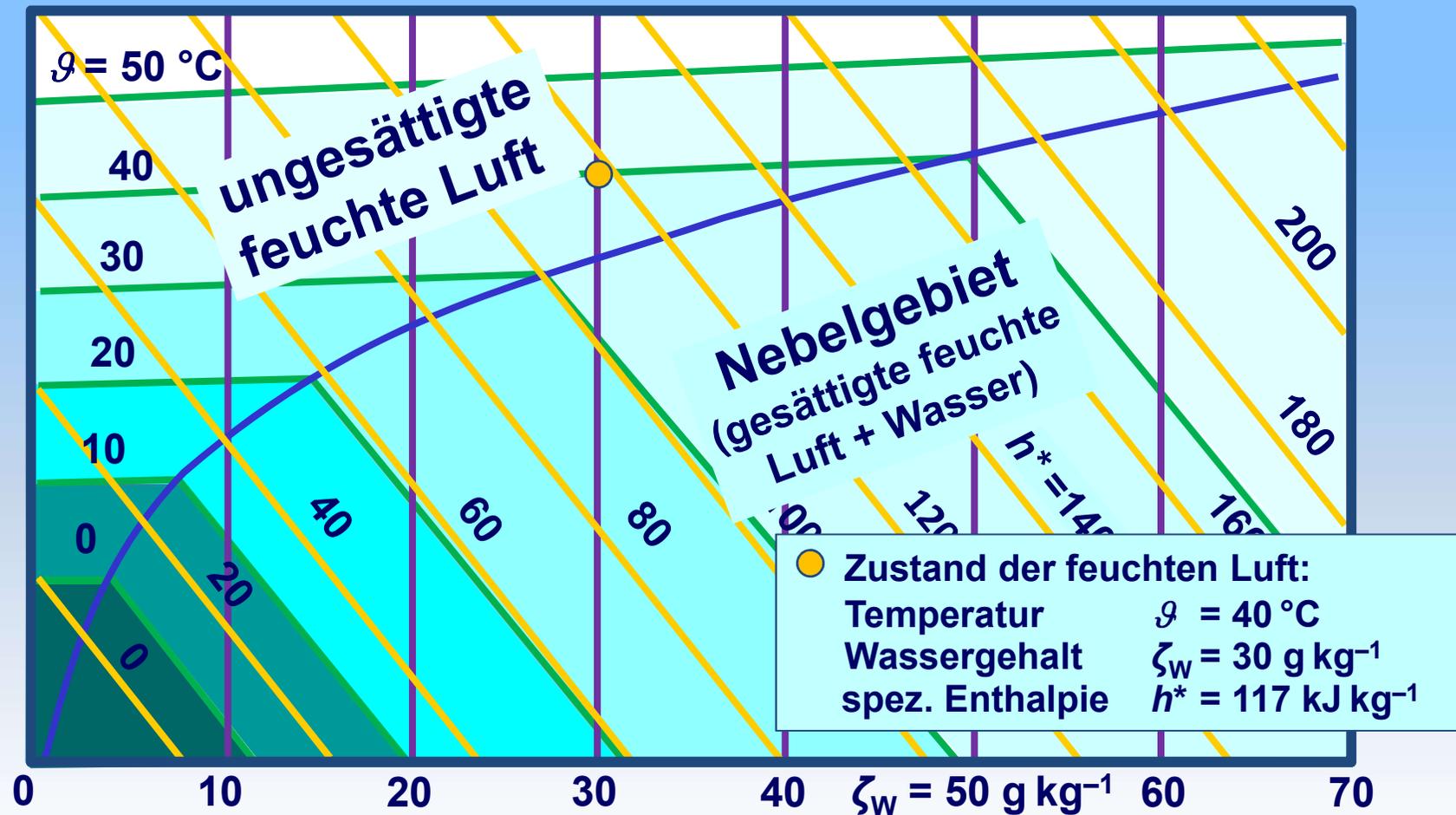
Einstieg: Isothermen (unges. feuchte Luft u. Nebelgebiet) ($p = 100 \text{ kPa}$)



MOLLIER-Diagramm

(h^* , ζ_w -Diagramm im schiefwinkligen Koordinatensystem)

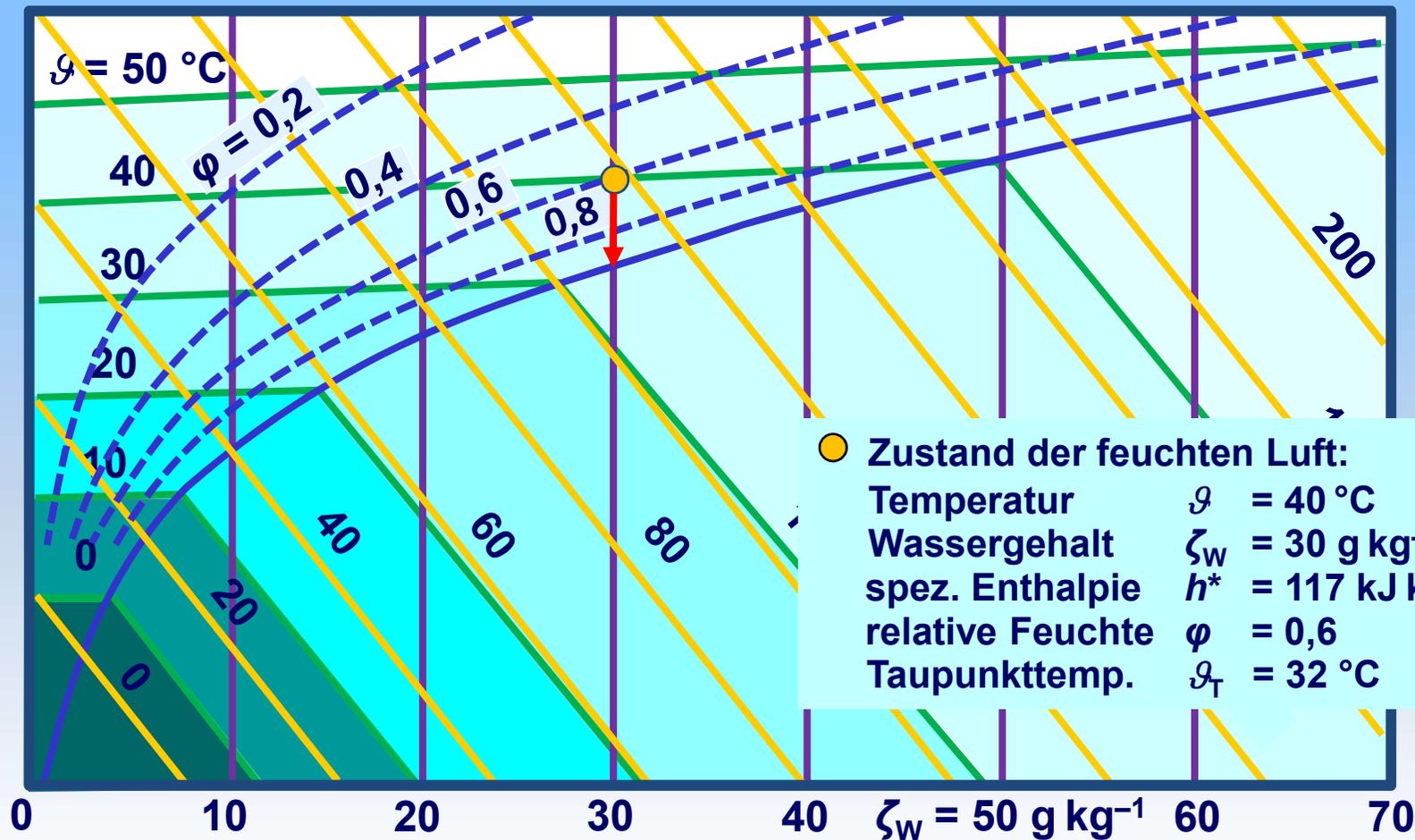
Isenthalpen (Linien gleicher „Energiefracht“) ergänzt



MOLLIER-Diagramm

(h^* , ζ_w -Diagramm im schiefwinkligen Koordinatensystem)

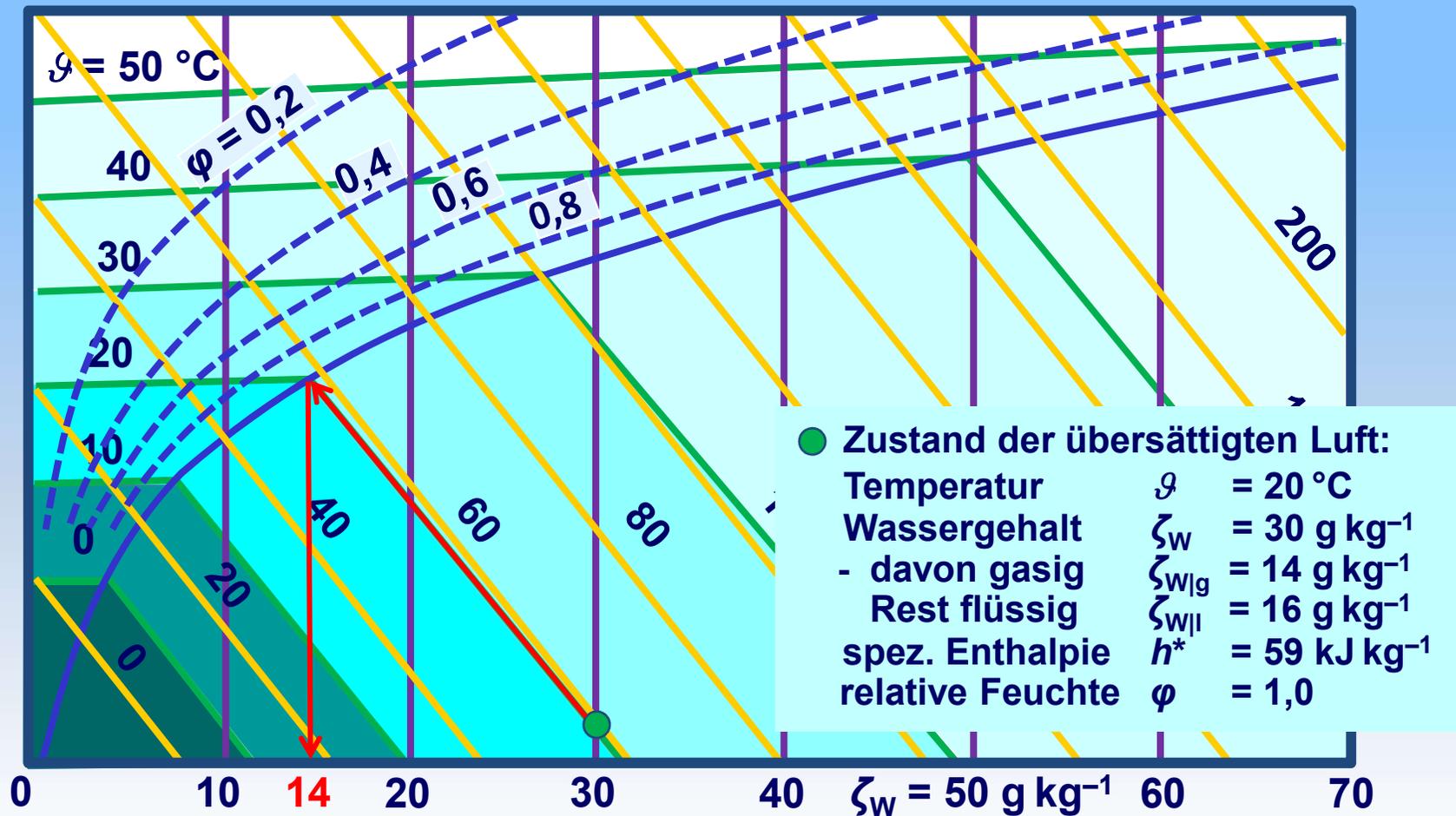
φ -Isoplethen (Linien gleicher relativer Feuchte) ergänzt



MOLLIER-Diagramm

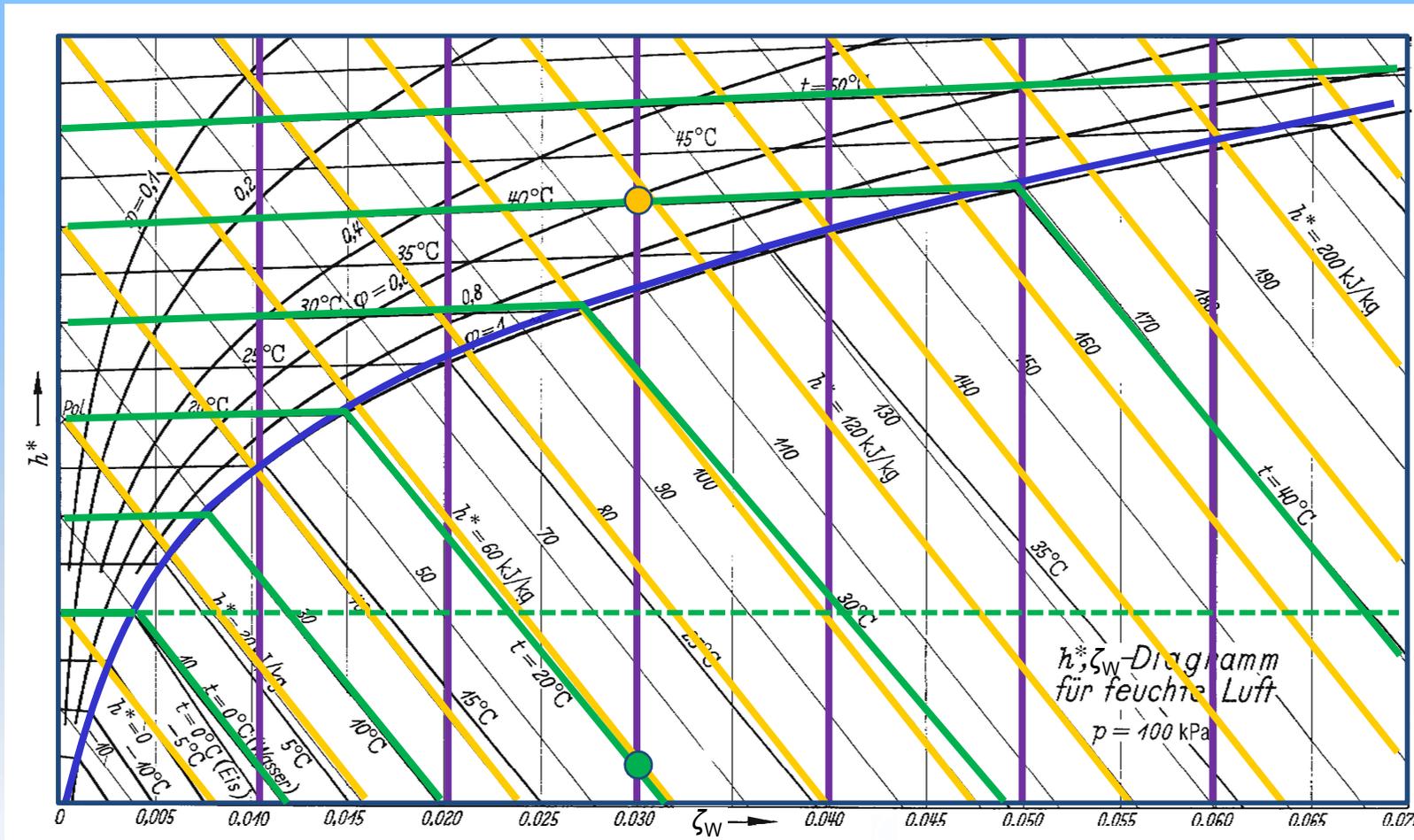
(h^* , ζ_w -Diagramm im schiefwinkligen Koordinatensystem)

φ -Isoplethen (Linien gleicher relativer Feuchte) ergänzt



MOLLIER-Diagramm

Liniennetz verdichtet, um Werte leichter ablesen zu können ¹⁾



¹⁾ H. D. Baehr, S. Kabelac: Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen, 2009

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Lufterwärmung:

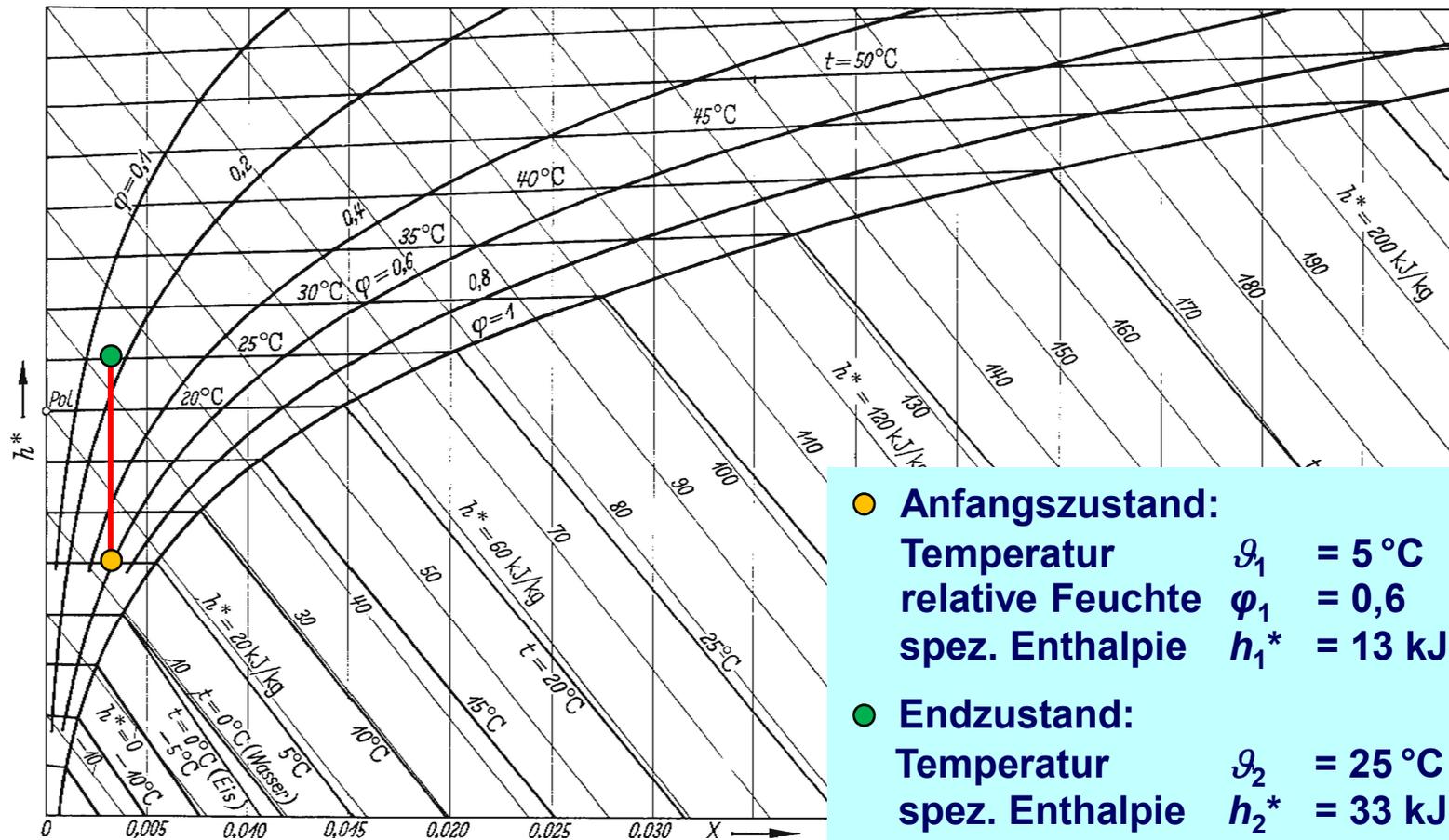
einfachster Fall einer Zustandsänderung, weil dabei der Luft weder Wasser zugeführt noch entzogen wird ($\zeta_w = \text{const}$)

⇒ Vorgang verläuft im h^*, ζ_w -Diagramm auf einer senkrechten Linie, wobei aber die relative Feuchtigkeit geringer wird
um die gewünschte Lufttemperatur zu erreichen, ist der Luft die Energiemenge Δh^* zuzuführen

Beispiel: Erwärmungsvorgang, wobei der Massenstrom $\dot{m}_L = 1 \text{ kg s}^{-1}$ (= 3600 kg h^{-1}) an Luft von $\vartheta_1 = 5 \text{ °C}$ und $\varphi_1 = 0,6$ auf $\vartheta_2 = 25 \text{ °C}$ erwärmt wird

MOLLIER-Diagramm

Lufterwärmung:



- **Anfangszustand:**
 - Temperatur $\vartheta_1 = 5^\circ\text{C}$
 - relative Feuchte $\varphi_1 = 0,6$
 - spez. Enthalpie $h_1^* = 13 \text{ kJ kg}^{-1}$
- **Endzustand:**
 - Temperatur $\vartheta_2 = 25^\circ\text{C}$
 - spez. Enthalpie $h_2^* = 33 \text{ kJ kg}^{-1}$

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Lufterwärmung:

einfachster Fall einer Zustandsänderung, weil dabei der Luft weder Wasser zugeführt noch entzogen wird ($\zeta_w = \text{const}$)

⇒ Vorgang verläuft im h^*, ζ_w -Diagramm auf einer senkrechten Linie, wobei aber die relative Feuchtigkeit geringer wird um die gewünschte Lufttemperatur zu erreichen, ist der Luft die Energiemenge Δh^* zuzuführen

Beispiel: Erwärmungsvorgang, wobei der Massenstrom $\dot{m}_L = 1 \text{ kg s}^{-1}$ (= 3600 kg h^{-1}) an Luft von $\vartheta_1 = 5 \text{ °C}$ und $\varphi_1 = 0,6$ auf $\vartheta_2 = 25 \text{ °C}$ erwärmt wird

vom Lufterwärmer ist die Leistung

$$P = \dot{m}_L \cdot (h_2^* - h_1^*) = 1 \text{ kg s}^{-1} \cdot (33 \text{ kJ kg}^{-1} - 13 \text{ kJ kg}^{-1}) = 20 \text{ kJ s}^{-1} = 20 \text{ kW}$$

aufzubringen; berechnete Wärmeleistung von 20 kW kann dem Lufterwärmer z.B. mit Warmwasser oder Dampf zugeführt werden

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Adiabates Mischen zweier Ströme ungesättigter feuchter Luft:

in der Klimatechnik häufig erforderlich, zur Einstellung der gewünschten Raumtemperatur und eines gesunden Raumklimas (Luftfeuchtigkeit), verschiedene Massenströme mit unterschiedlichen Temperaturen und verschiedenen relativen Feuchten miteinander zu mischen

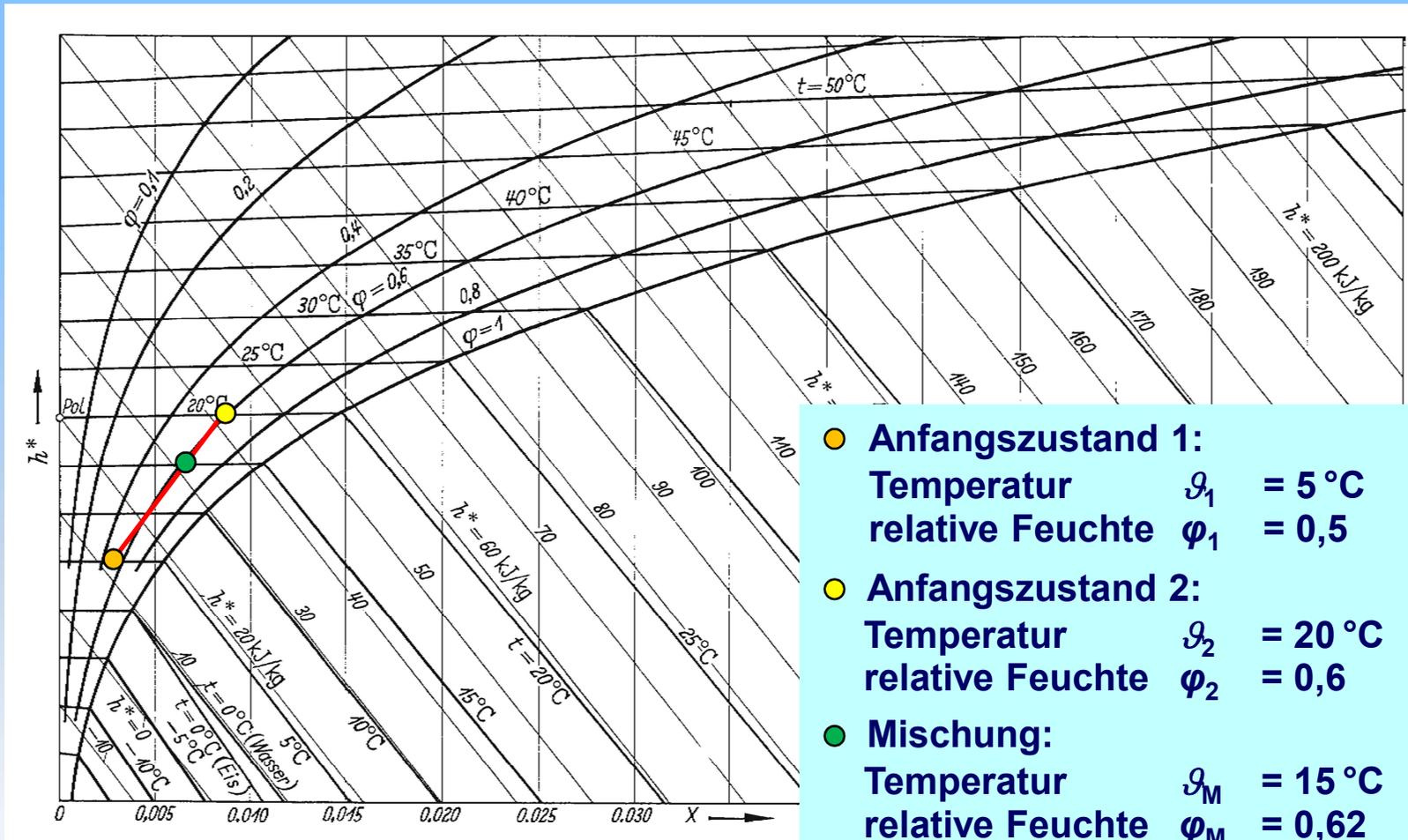
Beispiel: in Mischkammer einer Lüftungsanlage kühle Außenluft ($\dot{m}_{L,1} = 1000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_1 = 5 \text{ °C}$ und $\varphi_1 = 0,5$ mit wärmerer Umluft ($\dot{m}_{L,2} = 2000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_2 = 20 \text{ °C}$ und $\varphi_2 = 0,6$ zusammengemischt

Vorgehensweise: Markierung von Punkt 1 und 2 im h^*, ζ_w -Diagramm; Verbindung durch eine Gerade; Mischpunkt teilt Verbindungsgerade in zwei Abschnitte, die sich umgekehrt proportional zu beiden beteiligten Luftmengen verhalten \Rightarrow „*Gesetz der abgewandten Hebelarme*“

Beispiel: Mischpunkt um Anteil des kalten Luftstromes am Mischstrom vom Punkt des warmen entfernt [$1.000 \text{ kg h}^{-1} = 1/3$ von $3.000 \text{ kg h}^{-1} (= 1.000 \text{ kg h}^{-1} + 2.000 \text{ kg h}^{-1})$]

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Adiabates Mischen zweier Ströme ungesättigter feuchter Luft:



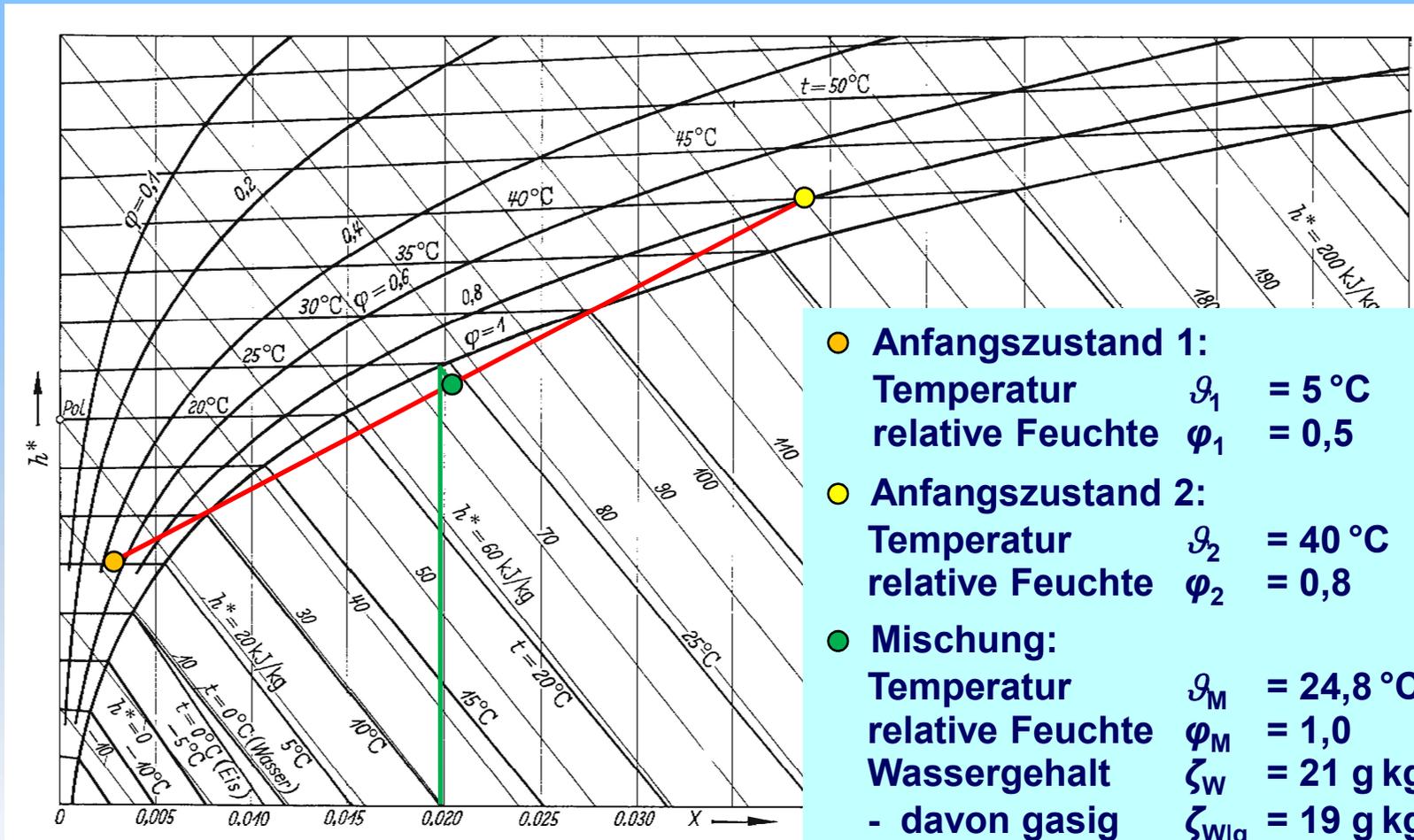
MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Adiabates Mischen zweier Ströme ungesättigter feuchter Luft:

weiteres Beispiel: kühle Außenluft ($\dot{m}_{L,1} = 1000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_1 = 5 \text{ °C}$ und $\varphi_1 = 0,5$ mit sehr warmer und feuchter Umluft ($\dot{m}_{L,2} = 1000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_2 = 40 \text{ °C}$ und $\varphi_2 = 0,8$ zusammengemischt

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Adiabates Mischen zweier Ströme ungesättigter feuchter Luft:



- **Anfangszustand 1:**
 Temperatur $\vartheta_1 = 5^\circ\text{C}$
 relative Feuchte $\varphi_1 = 0,5$
- **Anfangszustand 2:**
 Temperatur $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$
 relative Feuchte $\varphi_2 = 0,8$
- **Mischung:**
 Temperatur $\vartheta_M = 24,8^\circ\text{C}$
 relative Feuchte $\varphi_M = 1,0$
 Wassergehalt $\zeta_W = 21 \text{ g kg}^{-1}$
 - davon gasig $\zeta_{W|g} = 19 \text{ g kg}^{-1}$
 Rest flüssig $\zeta_{W|l} = 2 \text{ g kg}^{-1}$

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Adiabates Mischen zweier Ströme ungesättigter feuchter Luft:

weiteres Beispiel: kühle Außenluft ($\dot{m}_{L,1} = 1000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_1 = 5 \text{ °C}$ und $\varphi_1 = 0,5$ mit sehr warmer und feuchter Umluft ($\dot{m}_{L,2} = 1000 \text{ kg h}^{-1}$) mit $\vartheta_2 = 40 \text{ °C}$ und $\varphi_2 = 0,8$ zusammengemischt

wegen Krümmung der Sättigungslinie ($\varphi = 1$) kann es beim Mischen zweier ungesättigter Massenströme ($\varphi < 1$) passieren, dass anscheinend „aus dem Nichts heraus“ flüssiges Wasser entsteht; im Mischpunkt ist die Luft übersättigt, sie enthält Wasser als Nebel; beim Ablesen der Mischtemperatur beachte man, dass Isothermen an der Sättigungslinie nach rechts unten abknicken

Phänomen tritt z.B. im Winter in Schwimmbadanlagen auf, aber auch beobachtbar, wenn warme, feuchte Atemluft mit kalter Außenluft zu sichtbarem Atemhauch führt



MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung:

konventionelle Holztrockenkammern führen Luftstrom dauernd im Kreis; nach Bedarf dieser Umluft kleine Menge an Zuluft hinzugemischt; gleiche Menge verlässt Kammer als Abluftstrom, er führt Feuchte aus Holz ab



Beispiel: in Frischluft-Abluft-Trockenkammer Luft auf Temperatur von 67 °C und relative Luftfeuchte von 30 % eingestellt, sie durchströmt als Zuluft den Stapel:

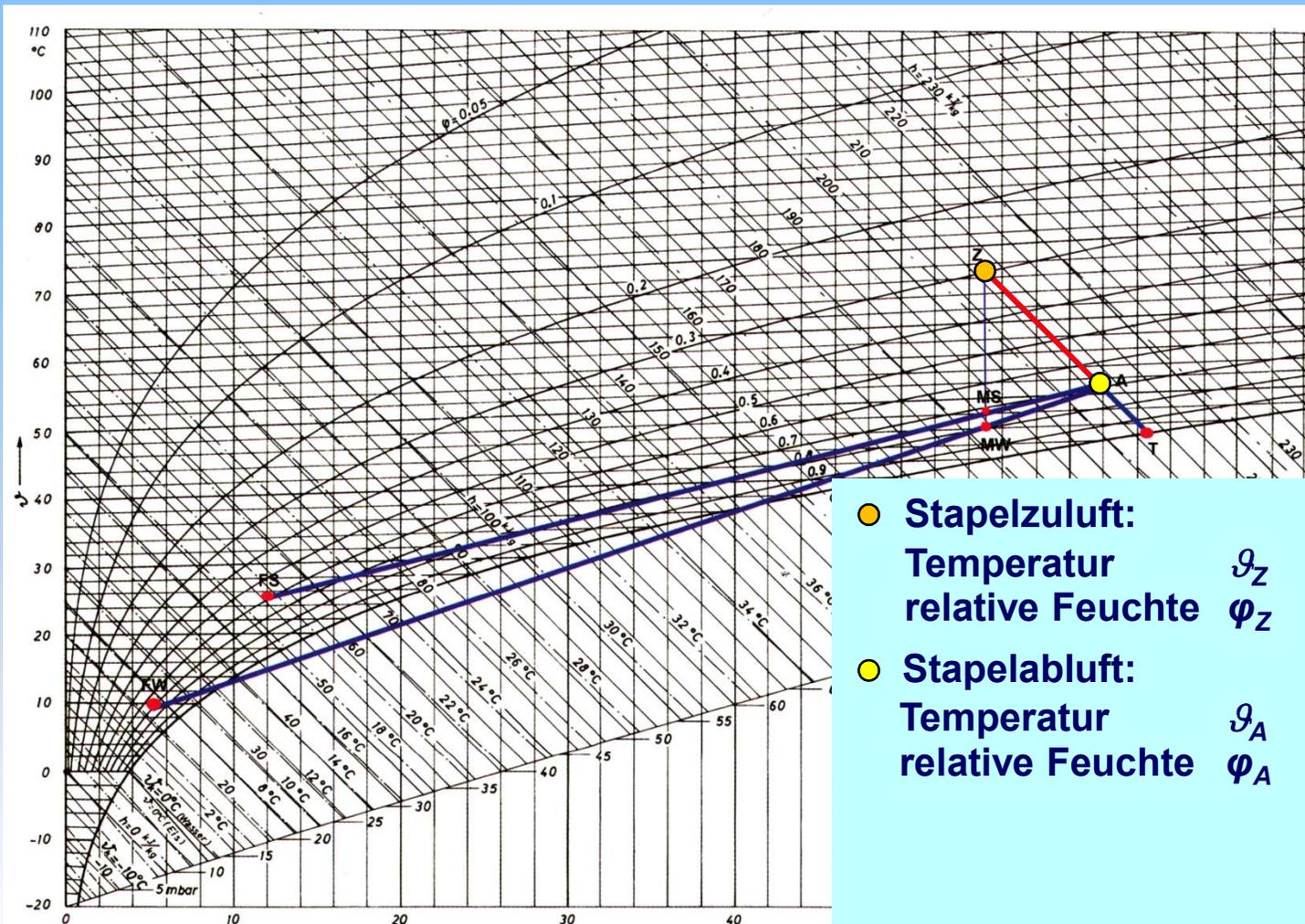
Stapelzuluft Z: $\vartheta_Z = 67 \text{ °C}$ $\varphi_Z = 0,3$ $\zeta_{w,Z} = 55 \text{ g kg}^{-1}$ $h_Z^* = 212 \text{ kJ kg}^{-1}$

Luft beim Passieren des Stapels angefeuchtet; „Energiefracht“, d.h. Enthalpie bleibt gleich; Abluft A hinter dem Stapel habe nun Temperatur von 50 °C und relative Luftfeuchte von 70 %

Stapelabluft A: $\vartheta_A = 50 \text{ °C}$ $\varphi_A = 0,7$ $\zeta_{w,A} = 62 \text{ g kg}^{-1}$ $h_A^* = 212 \text{ kJ kg}^{-1}$

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung: (Diagramm aus: T. Trübswetter: „Holztrocknung“, 2009)



- **Stapelzuluft:**
 Temperatur $\vartheta_Z = 67\text{ °C}$
 relative Feuchte $\varphi_Z = 0,3$
- **Stapelabluft:**
 Temperatur $\vartheta_A = 50\text{ °C}$
 relative Feuchte $\varphi_A = 0,7$

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung:

Stufe 1: durch Zumischen von Frischluft Wassergehalt beeinflusst

Beispiel: Frischluft im Sommer *FS* mit Temperatur von 25 °C und relativer Luftfeuchte von 60 %

Frischluft *FS*: $\vartheta_{FS} = 25 \text{ °C}$ $\varphi_{FS} = 0,6$ $\zeta_{w,FS} = 12 \text{ g kg}^{-1}$ $h_{FS}^* = 55 \text{ kJ kg}^{-1}$

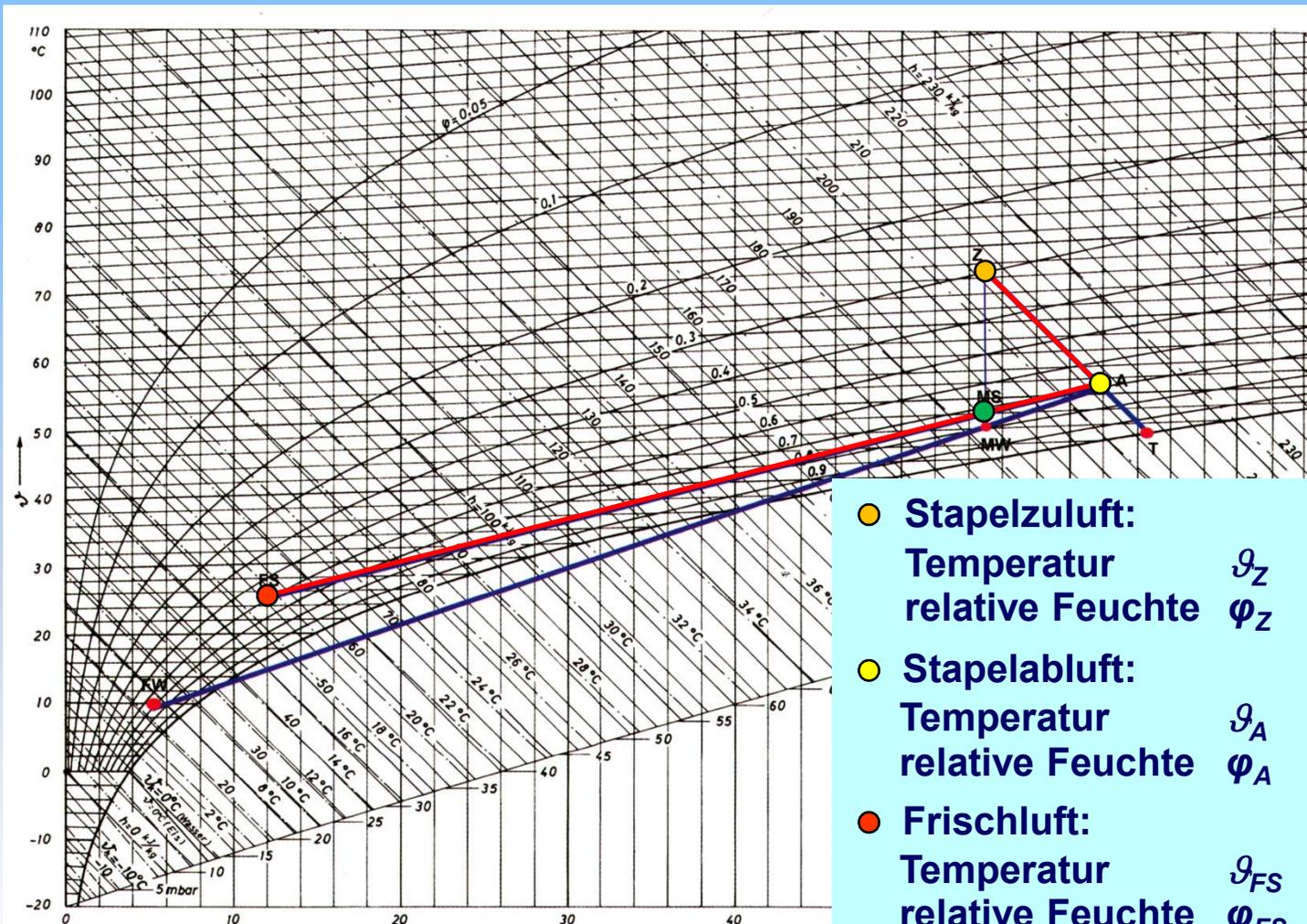
Luft kontrolliert durch Schächte in geringem Anteil der feuchten Stapelluft zugeführt \Rightarrow Gerade zwischen Punkten *FS* und *A*

Mischluft *MS* muss Wassergehalt der Zuluft mit annehmen ($\zeta_{w,MS} = \zeta_{w,z} = 55 \text{ g kg}^{-1}$) \Rightarrow Punkt *MS* ergibt sich aus Schnittpunkt der Geraden mit diesem Wassergehalt

Mischluft *MS*: $\vartheta_{MS} = 47 \text{ °C}$ $\varphi_{MS} = 0,8$ $\zeta_{w,MS} = 55 \text{ g kg}^{-1}$ $h_{MS}^* = 190 \text{ kJ kg}^{-1}$
 aus dem Verhältnis, in dem die Gerade geteilt wird, kann geschlossen werden, dass das Verhältnis von Abluftmenge zu Frischluftmenge ungefähr 7,3:1 sein sollte, um gewünschten Wassergehalt einzustellen

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung: (Diagramm aus: T. Trübswetter: „Holztrocknung“, 2009)



- **Stapelzuluft:**
 Temperatur $t_Z = 67\text{ °C}$
 relative Feuchte $\phi_Z = 0,3$
- **Stapelabluft:**
 Temperatur $t_A = 50\text{ °C}$
 relative Feuchte $\phi_A = 0,7$
- **Frischluff:**
 Temperatur $t_{FS} = 25\text{ °C}$
 relative Feuchte $\phi_{FS} = 0,6$

MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung:

Stufe 2:

Mischluft muss auf geforderte Zulufttemperatur von 67 °C aufgeheizt werden, Vorgang wird durch Gerade zwischen *MS* und *Z* dargestellt

zur Erwärmung ist die Energie

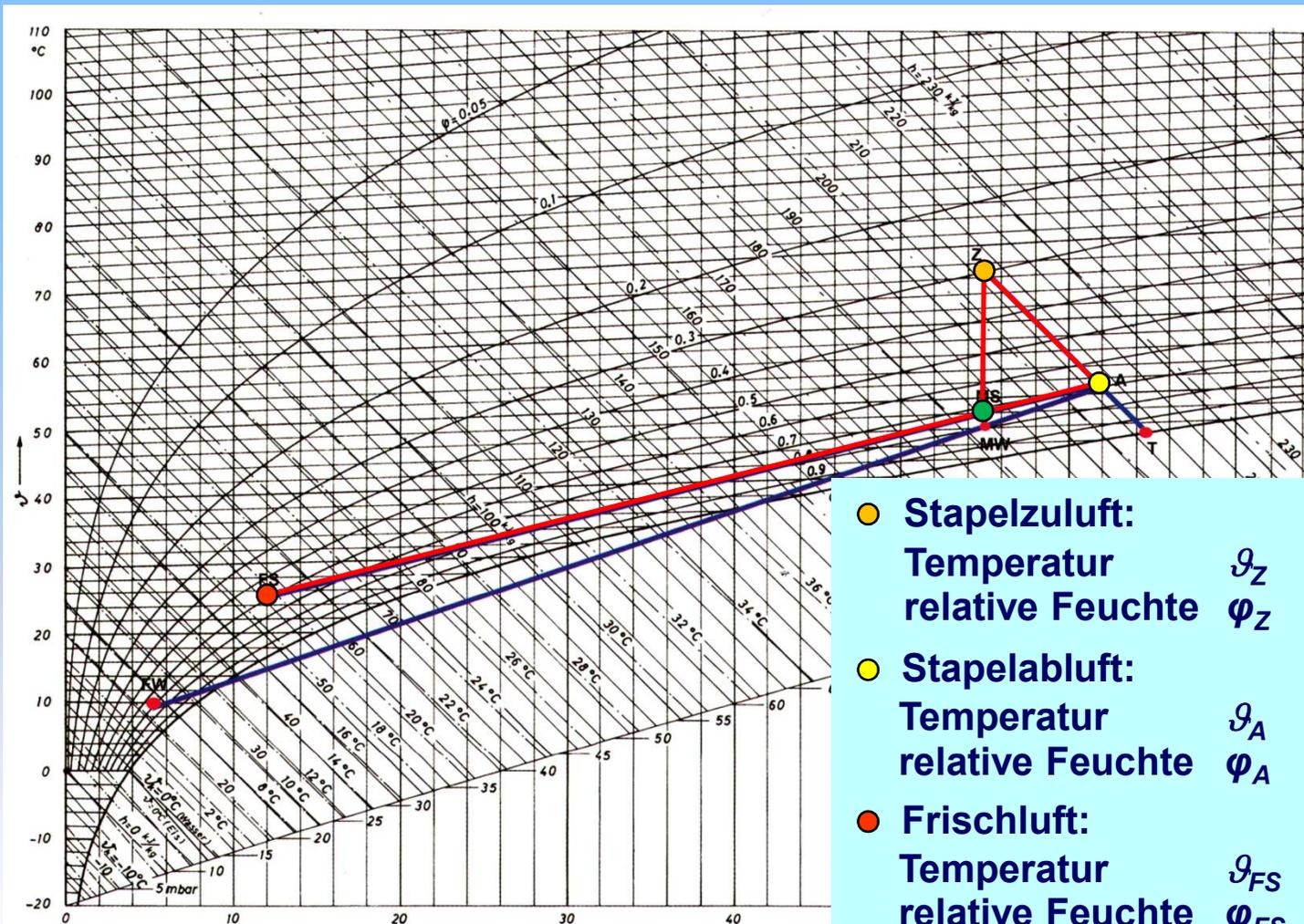
$$W = h_Z^* - h_{MS}^* = 212 \text{ kJ kg}^{-1} - 190 \text{ kJ kg}^{-1} = 22 \text{ kJ kg}^{-1}$$

aufzubringen



MOLLIER-Diagramm: Anwendung

Holztrocknung: (Diagramm aus: T. Trübswetter: „Holztrocknung“, 2009)



- **Stapelzuluft:**
 Temperatur $\vartheta_Z = 67\text{ °C}$
 relative Feuchte $\varphi_Z = 0,3$
- **Stapelabluft:**
 Temperatur $\vartheta_A = 50\text{ °C}$
 relative Feuchte $\varphi_A = 0,7$
- **Frischlufte:**
 Temperatur $\vartheta_{FS} = 25\text{ °C}$
 relative Feuchte $\varphi_{FS} = 0,6$