

Beschreibung des Kühlprozesses und Herleitung der Einsparungen durch den Einsatz der SmartSaver Technologie

Mit dieser hier vorgestellten Technologie lassen sich dauerhaft Energieeinsparungen zwischen 15% und 25% erzielen und Wartungsaufwände deutlich reduzieren. Die Anbringung ist sehr einfach und Resultate stellen sich in der Regel sofort ein.

Inhaltsübersicht

- 1. Einleitung**
- 2. Untersuchungen des SP Swedish National Testing and Research Institute**
- 3. Modellhafte Lösung (grafisch / mathematisch) eines Klimatisierungsbeispiels**
 - a. Vorbetrachtungen
 - b. Ziel- und Ausgangszustand
 - c. Ideale Zustandsänderung mit Entfeuchten
 - d. Ideale Zustandsänderung ohne Entfeuchten
 - e. Erforderliche Zustandsänderung mit herkömmlicher Kältetechnik
 - f. Veränderung des Kühlprozesses durch kontinuierliche Adsorption und Desorption bei Einsatz von SmartSaver Molekularfiltern
- 4. Adsorption und Desorption**
- 5. Partialdruckunterschiede in Gasgemischen**

Hinweis:

Sie lesen zusammenfassende Betrachtungen der Auswirkungen durch den Einsatz von SmartSavern in einer gekühlten Umgebung. SmartSaver können keine beschädigte Kältetechnik, fehlerhafte Regelung oder falsche Benutzung eines Kühlraumes kompensieren. Die Ausführungen dienen beispielhaft der Veranschaulichung und ersetzen kein persönliches Gespräch. Gezeigte Resultate sind Potenziale, die in Abhängigkeit der tatsächlichen Umgebungsbedingungen so gut wie möglich realisiert werden können. Es können Anpassungen der Temperaturregelung der jeweiligen Kühlumgebung erforderlich sein.

1 Einleitung

Die benötigte Kälteleistung einer Kältemaschine für Klimatisierung, Kühlung und Tiefkühlung wird durch die abzuführenden Wärmemengen bestimmt. Diese Wärme teilt sich auf sensible Wärme (Temperatur) und latente Wärme (Feuchtigkeit) auf. Dabei kann der Betrieb einer Kältemaschine in zwei Zustände unterteilt werden. Im Lastfall 1 führt die Kältemaschine ausschließlich Wärme (Q_{L1}) ab, die sich aufgrund der Isolationseigenschaften der gekühlten Umgebung ergeben. Im Lastfall 2 hingegen werden sowohl die Energiemengen aus Lastfall 1 sowie zusätzlich die von außen zugeführten Wärmemengen (Q_{L2}) durch z.B. Türöffnungen und Produkteinlagerungen abgeführt.

Es gilt: $Q_{L1} \ll Q_{L2}$

Im Zuge der üblichen Benutzung (Lastfall 2) der gekühlten Umgebung, muss die Kältemaschine mit derzeitiger Technologie über den Verdampfer beide Wärmemengen gleichzeitig abführen. Dies stellt eine Belastungsspitze dar. Da SmartSaver in Abhängigkeit von Temperatur und Druck Feuchtigkeit aufnehmen und auch wieder abgeben können, verringern sie deutlich den Energieaufwand für Lastfall 2 und verteilen den Energieaufwand zur Entfeuchtung dosiert auf den Lastfall 1.

Dadurch läuft der Kühlprozess wesentlich ausgeglichener, Kühlung findet effizienter statt und Belastungsspitzen werden vermieden. Entsprechende mathematische Veranschaulichung finden Sie nachfolgend.

2 Untersuchung des SP Swedish National Testing and Research Institute

Schon 2003 hat das schwedische SP Swedish National Testing and Research Institute, die Effizienz der Mineralien nachgewiesen. Nachfolgend werden deren Untersuchungen kurz zusammengefasst:

In einer Klimakammer wurde die Temperatur auf 8°C und die relative Feuchtigkeit auf 70%-80% eingestellt. Der Luftstrom über die Oberfläche betrug 0,85m/s. Anschließend wurden die klimatischen Veränderungen gemessen. Dabei reduzierte sich die relative Luftfeuchtigkeit um 35 Prozentpunkte, was einer Energieeinsparung von ca. 27% entspricht, da diese Leistung sonst von der Kältemaschine erbracht werden müsste. Die Kalkulationen berücksichtigen die Enthalpieveränderungen und das Gefrieren der Feuchtigkeit am Verdampfer.

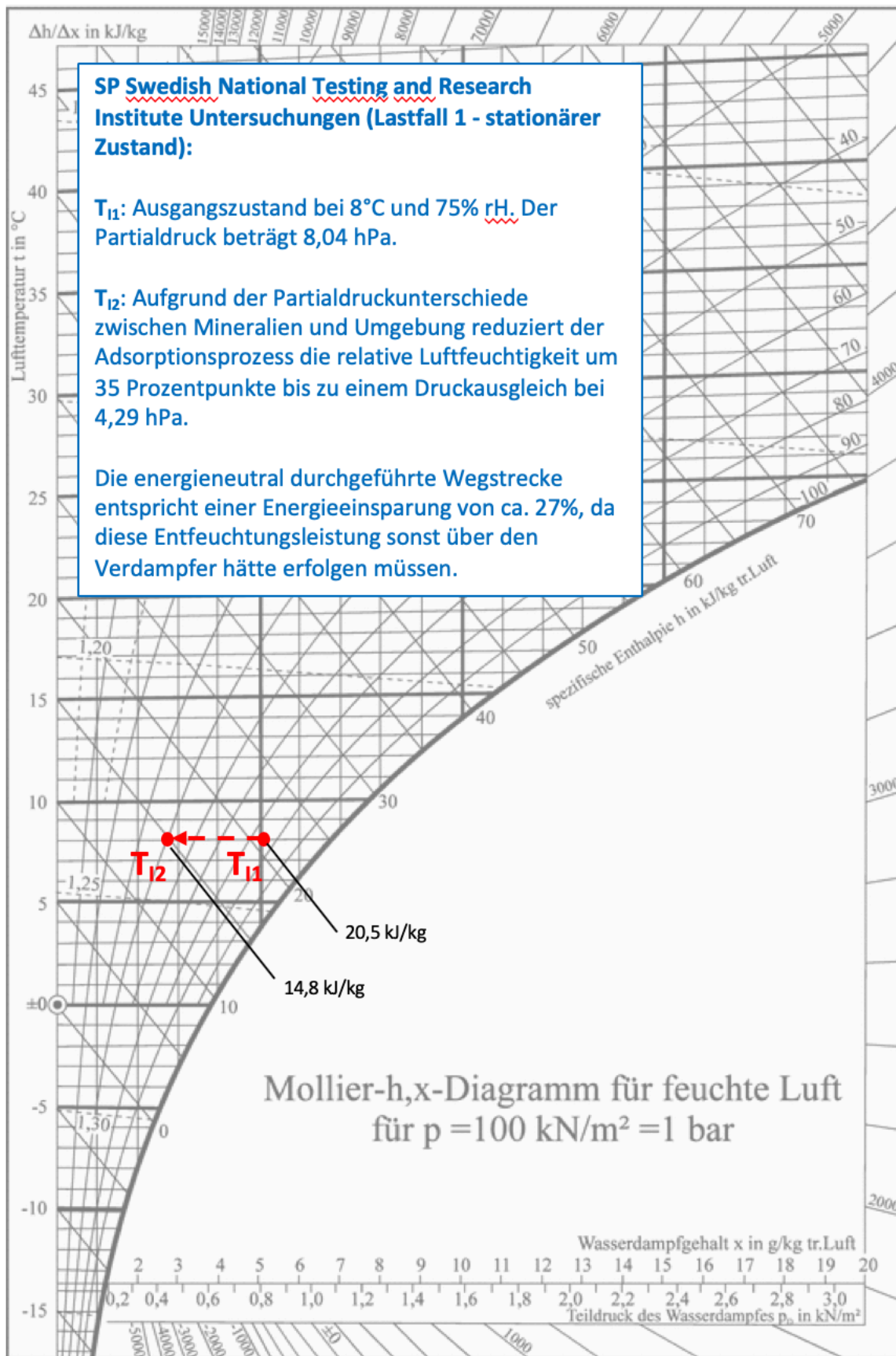


Abbildung 1: Darstellung im Mollierdiagramm der Untersuchung des SP Swedish National Testing and Research Institute

Sie sehen deutlich eine aufwandsneutrale klimatische Veränderung, die einer Energieeinsparung von ca. 27% entspricht. Da dieser Schritt jedoch nur einem Teilschritt des gesamten

Kühlprozesses entspricht und letztlich der Wasserdampf dennoch den Kühlraum verlassen muss, veranschaulichen die nachfolgenden Ausführungen woher das letztlich erzielte Einsparungspotenzial rührt. Anhand einer komplexen Klimatisierungsaufgabe wird dies modellhaft aufgezeigt. Es wurde absichtlich der Klimatisierungsfall gewählt, damit die Veränderungen im Mollierdiagramm ersichtlich werden. Die Schlussfolgerungen und Potenziale gelten analog auch für Kühlung und Tiefkühlung.

Sie werden feststellen, dass der einströmenden warmen Luft die Feuchtigkeit entzogen, somit der Entfeuchtungsaufwand verringert wird und dies in einer Energieeinsparung resultiert.

3 Modellhafte Lösung (grafisch / mathematisch) eines Klimatisierungsbeispiels

a. Vorbetrachtungen

Vorab werden die energetischen Grundlagen sowie die mathematische Beschreibung kurz vorgestellt. Abbildung 2 stellt die Wärmebilanz eines Kühlraums dar, wobei die Systemgrenzen durch die äußeren Wände (schraffierter Bereich) des Kühlraumes definiert sind.

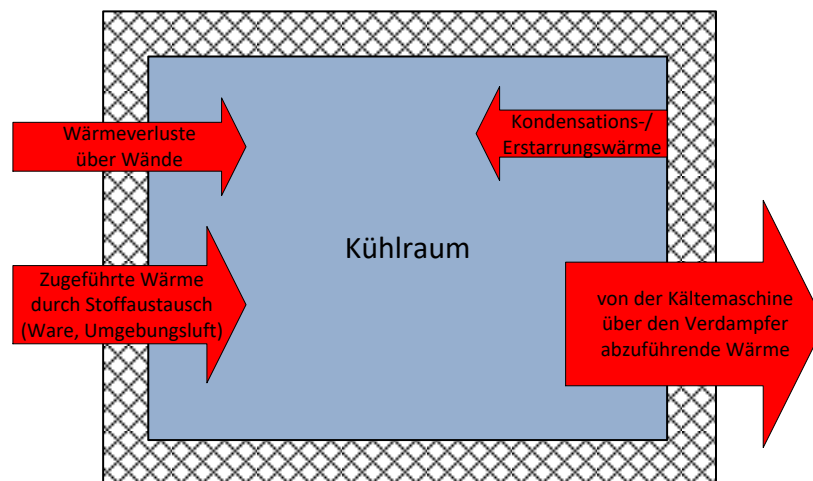


Abbildung 2: Energiebilanz im Kühlraum, auftretende Wärmeflüsse.

Die von der Kältemaschine aus dem Kühlraum abzuführende Wärme entspricht der Summe aller in den Kühlraum eingebrachten Wärmelasten. Die mathematische Beschreibung über den Verdampfer der Kältemaschine abzuführenden Wärme lautet:

$$q_{L,ab} = \frac{Q_{L,ab}}{m_L} = (c_{P,L} + x_1 c_{P,D})(T_1 - T_0) - (c_{P,L} + x_2 c_{P,D})(T_2 - T_0) + (x_1 - x_2) h_{Kond}$$

mit: m_L ... Masse trockener Luft, x ...absolute Luftfeuchte im Zustand i , $T_0 = 273,16$ K...Bezugstemperatur (Tripelpunkt von Wasser) $c_{P,L} = 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$...spez. Wärmekapazität trockener Luft, $c_{P,D} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$...spez. Wärmekapazität Wasserdampf, $h_{Kond} = 2500,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$...spez. Kondensationsenthalpie von Wasser

b. Ziel- und Ausgangszustand

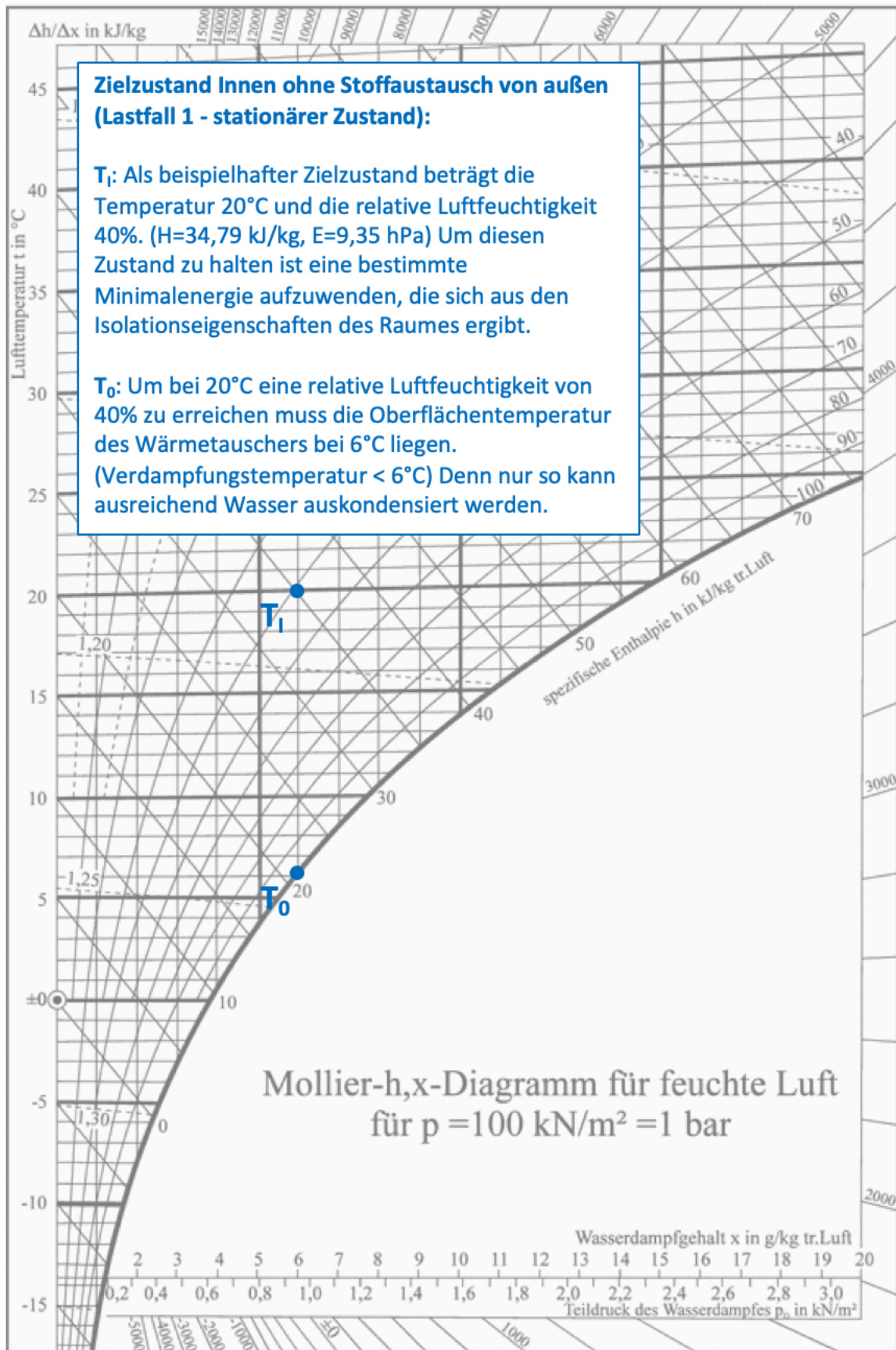


Abbildung 3: Angestrebter Zustand im Innenraum und dazugehörige, mindestens notwendige Verdampfungstemperatur

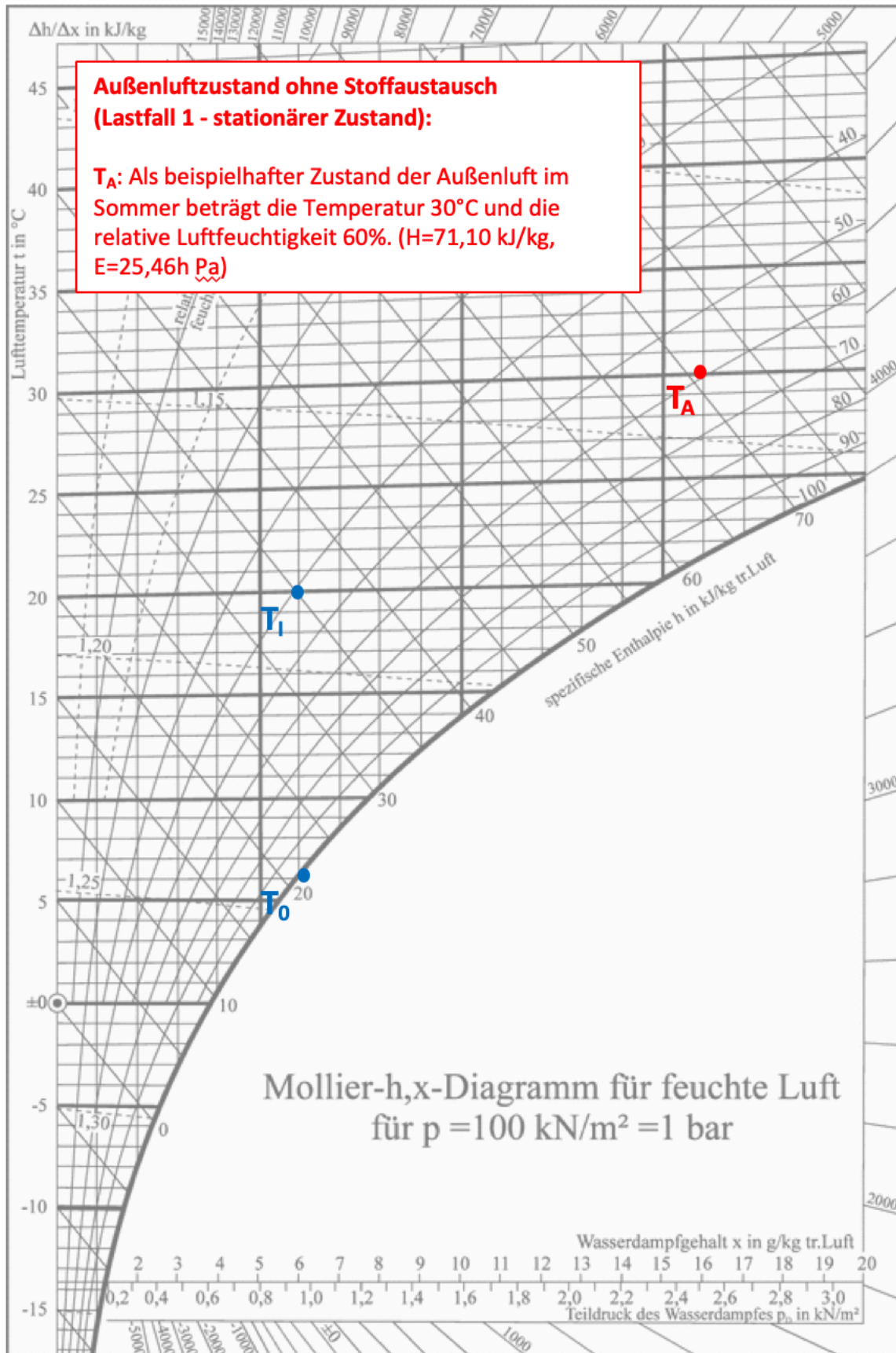


Abbildung 4: Ausgangszustand der Außenluft, die bei Türöffnungen in die gekühlte Umgebung eindringt

c. Ideale Zustandsänderung mit Entfeuchten

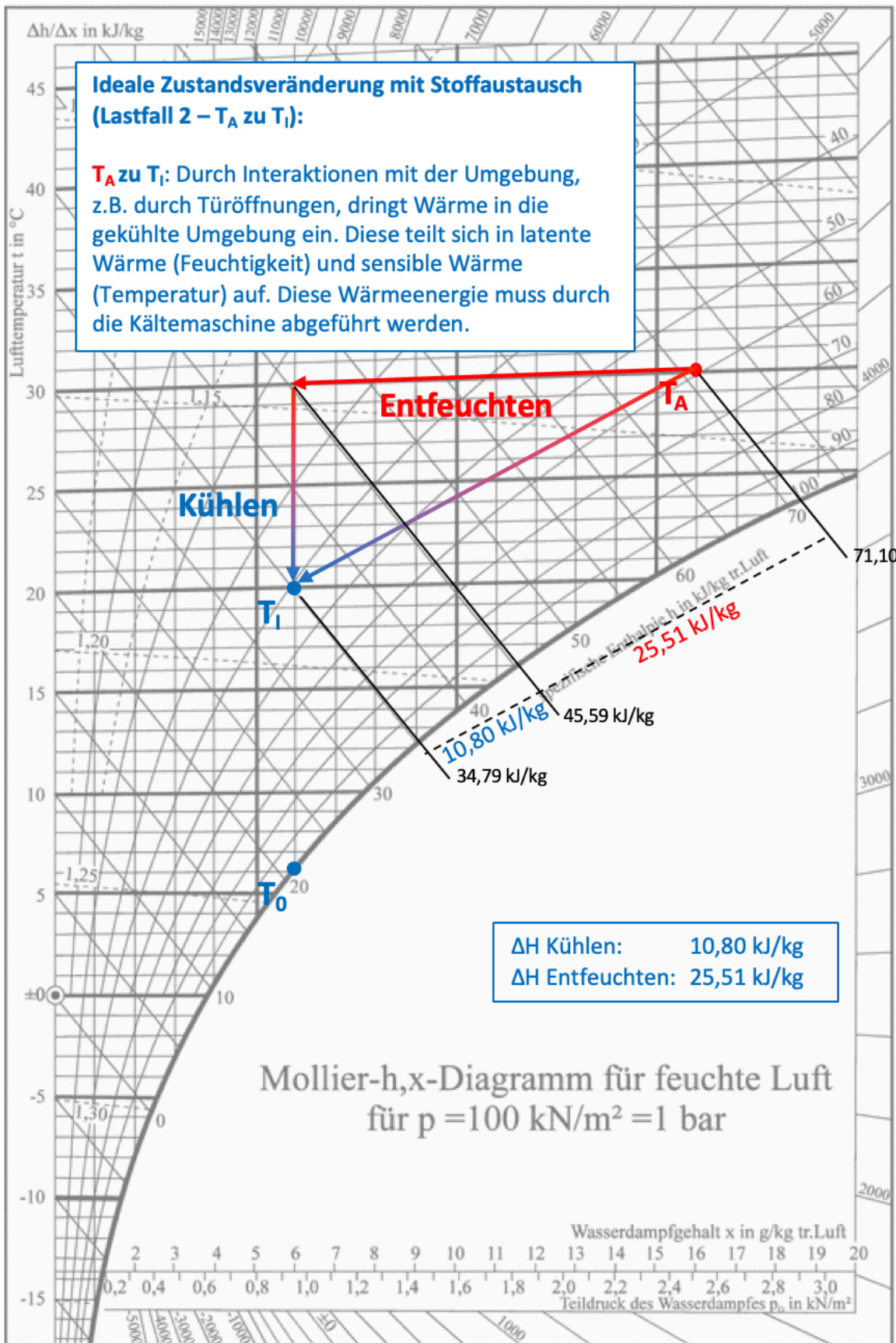


Abbildung 5: Modellhaft dargestellt, welcher Minimalaufwand erforderlich wäre. Dieser lässt sich jedoch nicht mit herkömmlicher Technik umsetzen. Dennoch ist ersichtlich, dass rund 70% des Energieaufwandes allein auf die Entfeuchtung entfallen.

Die dazugehörige mathematische Beschreibung des erforderlichen Energieaufwandes sieht folgendermaßen aus:

$$q_{L,ab} = \frac{Q_{L,ab}}{m_L} = (c_{P,L} + x_1 c_{P,D})(T_1 - T_0) - (c_{P,L} + x_2 c_{P,D})(T_2 - T_0) + (x_1 - x_2) h_{Kond}$$

$$q_{L,ab} = \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 16,03 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (303,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) - \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 5,79 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (293,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) + 10,24 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 2500,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{\underline{36,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

d. Ideale Zustandsveränderung ohne Entfeuchtung

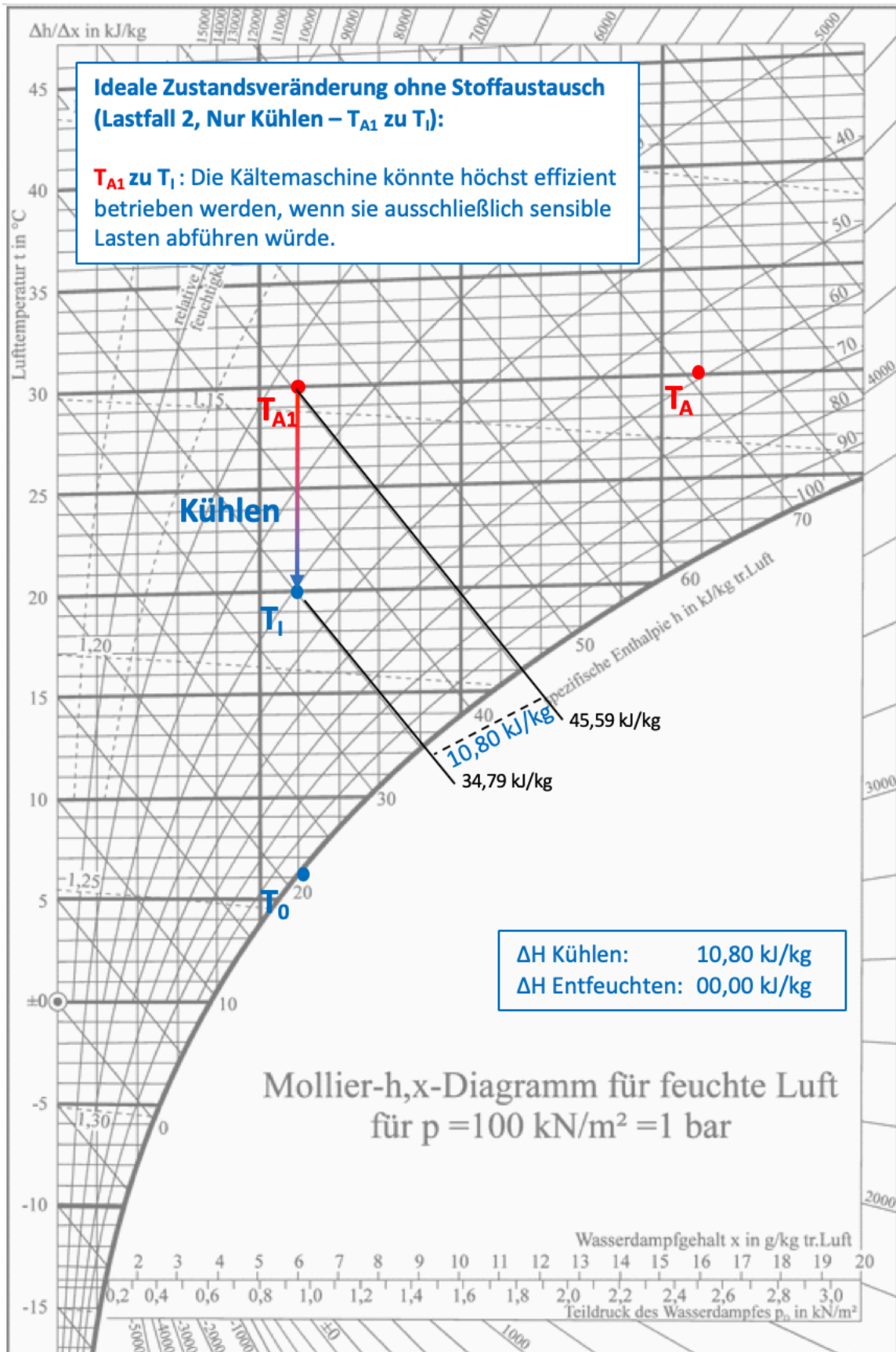


Abbildung 6: Könnte man die Kondensation der Luftfeuchtigkeit vernachlässigen, würde man eine ideale Effizienz bei der Abkühlung erreichen.

Diese Darstellung ist rein hypothetisch und ist nur unter extrem trockenen Ausgangsbedingungen wahrscheinlich. Die dazugehörige mathematische Beschreibung des erforderlichen Energieaufwandes sieht folgendermaßen aus:

$$q_{L,ab} = \frac{Q_{L,ab}}{m_L} = (c_{P,L} + x_1 c_{P,D})(T_1 - T_0) - (c_{P,L} + x_2 c_{P,D})(T_2 - T_0)$$

$$\begin{aligned} q_{L,ab} &= \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 16,03 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) (303,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) \\ &\quad - \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 5,79 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) (293,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) + \\ &= \underline{\underline{10,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}} \end{aligned}$$

e. Erforderliche Zustandsänderung mit herkömmlicher Kältetechnik

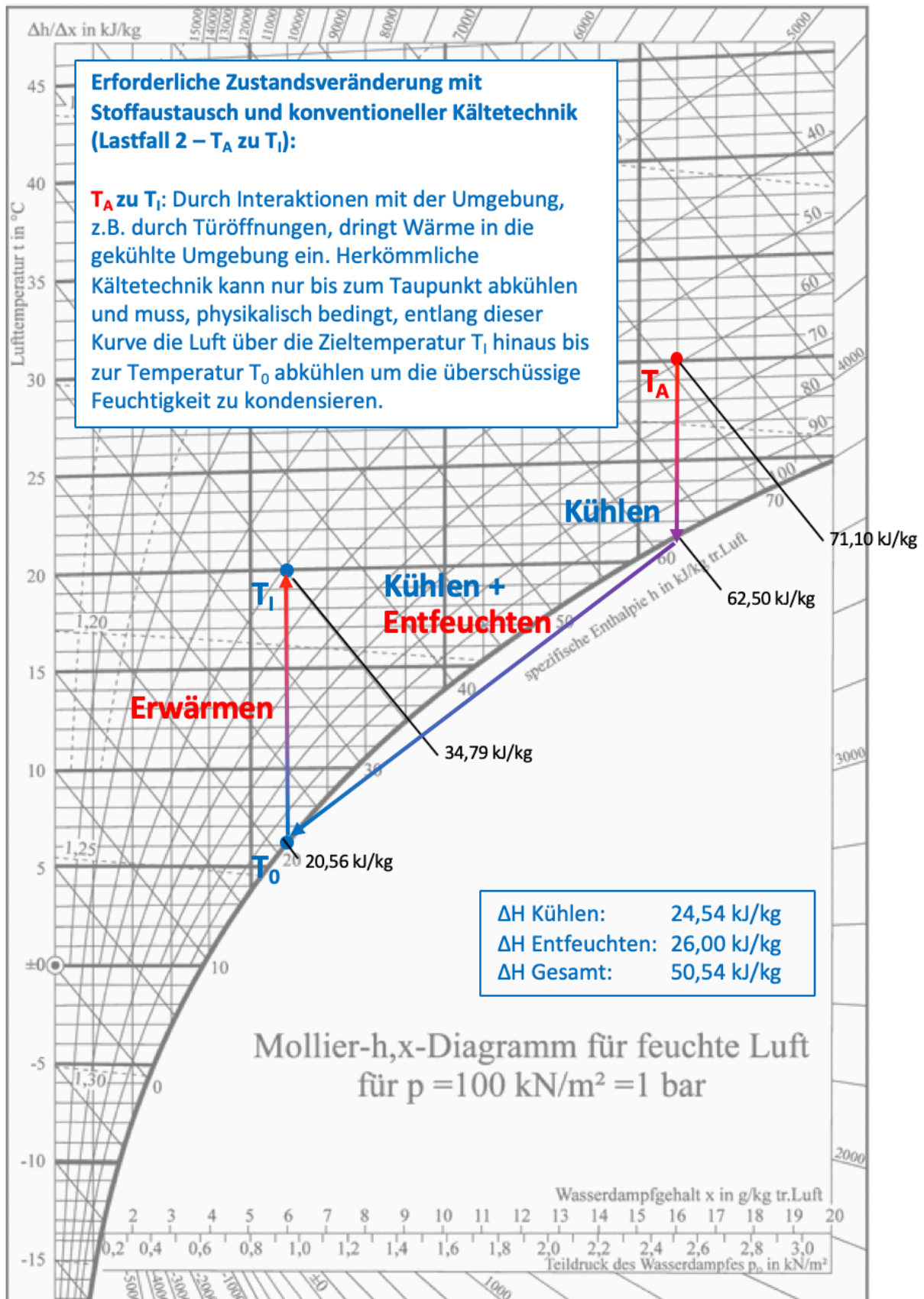


Abbildung 7: Es ist ersichtlich, dass deutlich mehr gekühlt werden muss, um die notwendige Entfeuchtung zu erreichen, welche immer noch über 50% des Energieaufwandes ausmacht.

Die dazugehörige mathematische Beschreibung des erforderlichen Energieaufwandes sieht folgendermaßen aus:

$$q_{L,ab} = \frac{Q_{L,ab}}{m_L} = (c_{P,L} + x_1 c_{P,D})(T_1 - T_0) - (c_{P,L} + x_2 c_{P,D})(T_2 - T_0) + (x_1 - x_2) h_{Kond}$$

$$q_{L,ab} = \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 16,03 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (303,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) - \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 5,79 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (279,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) + 10,24 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 2500,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{\underline{50,54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

f. Veränderung des Kühlprozesses durch kontinuierliche Adsorption und Desorption bei Einsatz von SmartSaver Molekularfiltern.

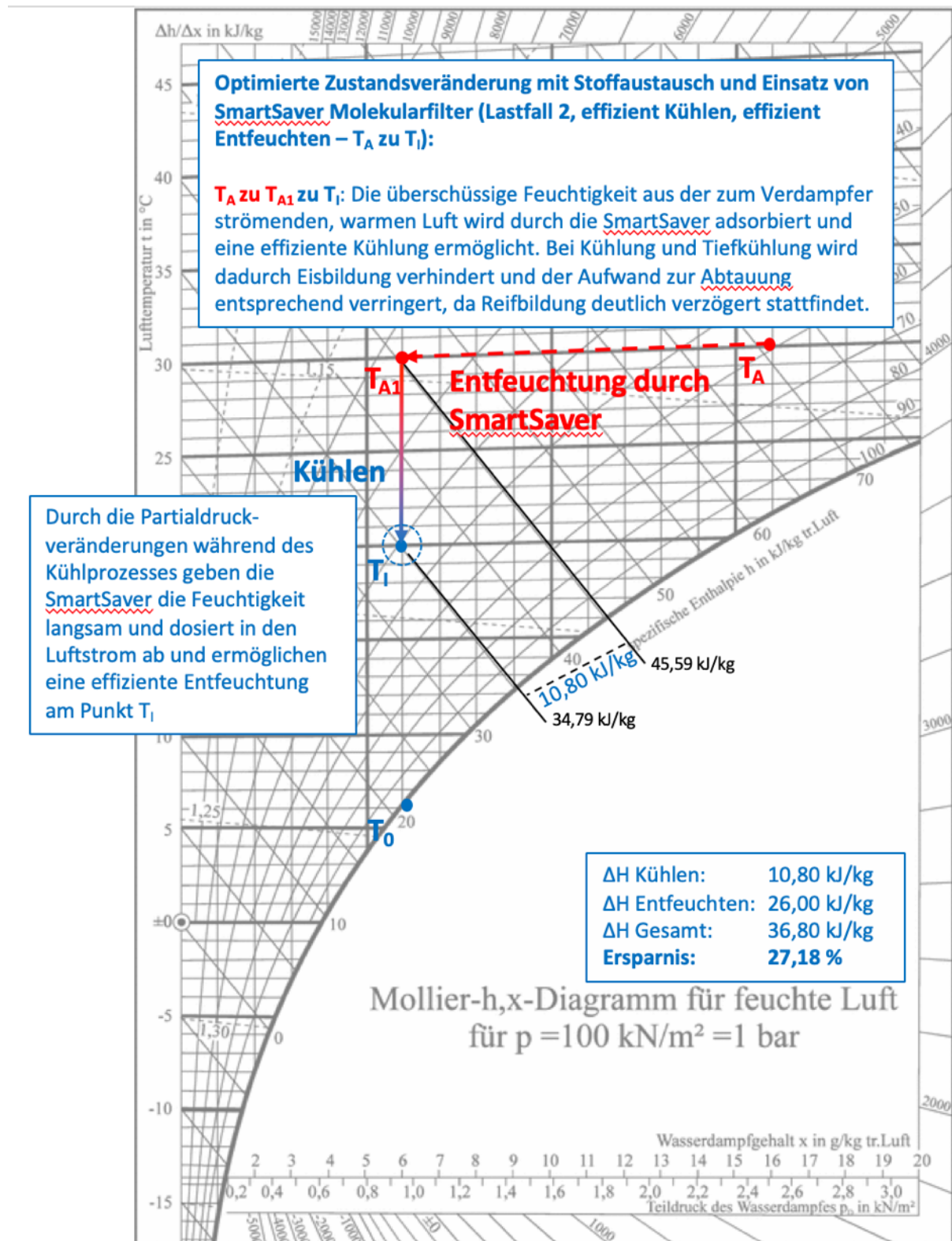


Abbildung 8: Zyklus aus Adsorption und Desorption optimiert den Kühlprozess und verschiebt den Entfeuchtungsaufwand. Effizient kühlen und später effizient entfeuchten. Als Resultat verkürzt sich die Laufzeit der Kältemaschine und/oder Verdampfungstemperatur- sowie Thermostatanpassungen können vorgenommen werden.

Die dazugehörige mathematische Beschreibung des erforderlichen Energieaufwandes sieht folgendermaßen aus:

$$q_{L,ab} = \frac{Q_{L,ab}}{m_L} = (c_{P,L} + x_1 c_{P,D})(T_1 - T_0) - (c_{P,L} + x_2 c_{P,D})(T_2 - T_0) + (x_1 - x_2) h_{Kond}$$

$$q_{L,ab} = \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 16,03 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (303,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) - \left(1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 5,79 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (293,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) = \underline{10,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} + 10,24 \frac{\text{g}}{\text{kg}} 2500,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \mathbf{36,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

Rechnerisch wird gezeigt, dass im Lastfall 2, in dem gleichzeitig gekühlt und entfeuchtet werden müsste, die Verschiebung der Entfeuchtung auf den späteren Lastfall1 eine Einsparung von bis zu 28,11% ($50,54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow 36,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$) ermöglicht. Die Abweichung von 1% begründet sich durch die Ungenauigkeit der grafischen Lösung. Durch die langsame Abgabe der Wassermoleküle zurück in den Raum verzögert sich der Zeitraum einer möglichen Eisbildung in einer Tiefkühlumgebung drastisch.

Bisher unbeachtet sind die Wärmeübergangsverhältnisse an der Verdampferoberfläche vom Kühlrauminneren hin zum Kältemittel, welches durch den Verdampfer strömt. Verschlechtern sich die Wärmeübergangsverhältnisse z. B. durch Eisbildung, verringert sich der von der Kältemaschine abführbare Wärmestrom. Die Folge ist eine längere Betriebszeit und damit ein höherer Energiebedarf der Kältemaschine.

Einen weiteren Energieaufwand stellen die turnusmäßigen Abtauvorgänge dar, die zur Beseitigung von Eisschichten an der Verdampferoberfläche erforderlich sind. Dabei wird das Eis geschmolzen und über den Kondensatablauf des Verdampfers abgeführt. Der dafür benötigte Energiebedarf entspricht der Schmelzenthalpie (= Erstarrungsenthalpie) von Wasser. Die Eisbildung erfordert demnach mehrfach einen zusätzlichen Energieaufwand:

- bei der Eisbildung aufgrund der zusätzlich abzuführenden Erstarrungsenthalpie
- der infolgedessen längeren Betriebszeiten durch Verschlechterung der Wärmeübergangsverhältnisse zwischen Kühlraum und Verdichter
- sowie die zum Abtauen erforderliche Wärmezufuhr.

Über diese mathematische Betrachtung hinaus fließen zahlreiche Einflussfaktoren in die energetische Performance einer Kältemaschine ein und können hier nicht abschließend theoretisch betrachtet werden. Um ein Höchstmaß an Potenzial auszuschöpfen ist ein individuelles Gespräch zur Analyse der aktuellen Situation erforderlich.

Wenn Sie darüber hinaus noch an der konkreten Funktionsweise des Adsorptions- und Desorptionsprozesses interessiert sind, lesen Sie bitte weiter.

4 Adsorption und Desorption

Um die Wirkungsweise der Smartsaver verstehen zu können, ist ein mikro- und ein makroskopischer Ansatz erforderlich. Auf mikroskopischer Ebene spielen fundamentale Adsorptions- und Desorptionsprozesse eine Rolle. Deshalb soll an dieser Stelle zumindest eine kurze Einführung in das Themengebiet der Adsorption gegeben werden. Adsorption kann nicht auf eine einheitliche Art und Weise beschrieben werden. Der zugrundeliegende Mechanismus und die Art der Adsorption hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Entscheidend sind dabei die Art und die Struktur des Moleküls, welches adsorbieren soll (Adsorbat), und der Oberfläche (Adsorbens). Grundsätzlich wird zwischen Physisorption und Chemisorption (Abbildung 9) unterschieden, wobei die Unterscheidung nicht immer trennscharf erfolgen kann. Der Unterschied zwischen Physisorption und Chemisorption liegt, vereinfacht ausgedrückt, in der Stärke der Wechselwirkung zwischen Adsorbens und Adsorbat. Bei der Physisorption dominieren vergleichsweise schwache Wechselwirkungen (z. B. van der Waals Kräfte), während bei der Chemisorption chemische (kovalente) Bindungen ausgebildet werden. Dies hat zur Folge, dass Desorption im Fall der Chemisorption nur möglich ist, wenn die kovalenten Bindungen wieder aufgebrochen werden. Dies erfordert spezielle Bedingungen (Druck, Temperatur) oder chemische Reaktionen. In einigen Fällen ist sie sogar irreversibel, da während des Sorptionsprozesses eine dissoziative Reaktion stattfindet. Aufgrund der Ausbildung von kovalenten Bindungen ist die Chemisorption oftmals nur an jenen fest definierten Stellen einer Oberfläche möglich, die mit speziellen funktionellen Gruppen versehen sind (Abbildung 9).

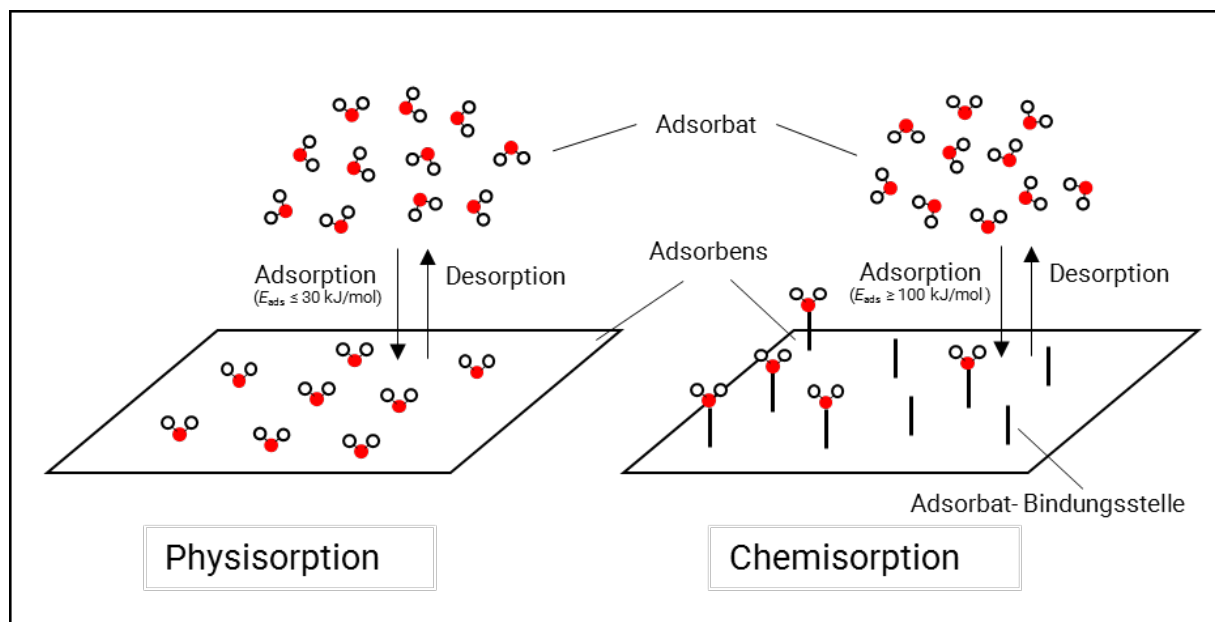


Abbildung 9: Physisorption (links) und Chemisorption (rechts) von Wassermolekülen auf unterschiedlichen Substratoberflächen.

Der gesamte Adsorptionsmechanismus, also der Übergang von der Gasphase bis zur Adsorption an der Oberfläche des betrachteten Materials, ist dem Mechanismus einer heterogenen katalytischen Reaktion sehr ähnlich (Abbildung 10).

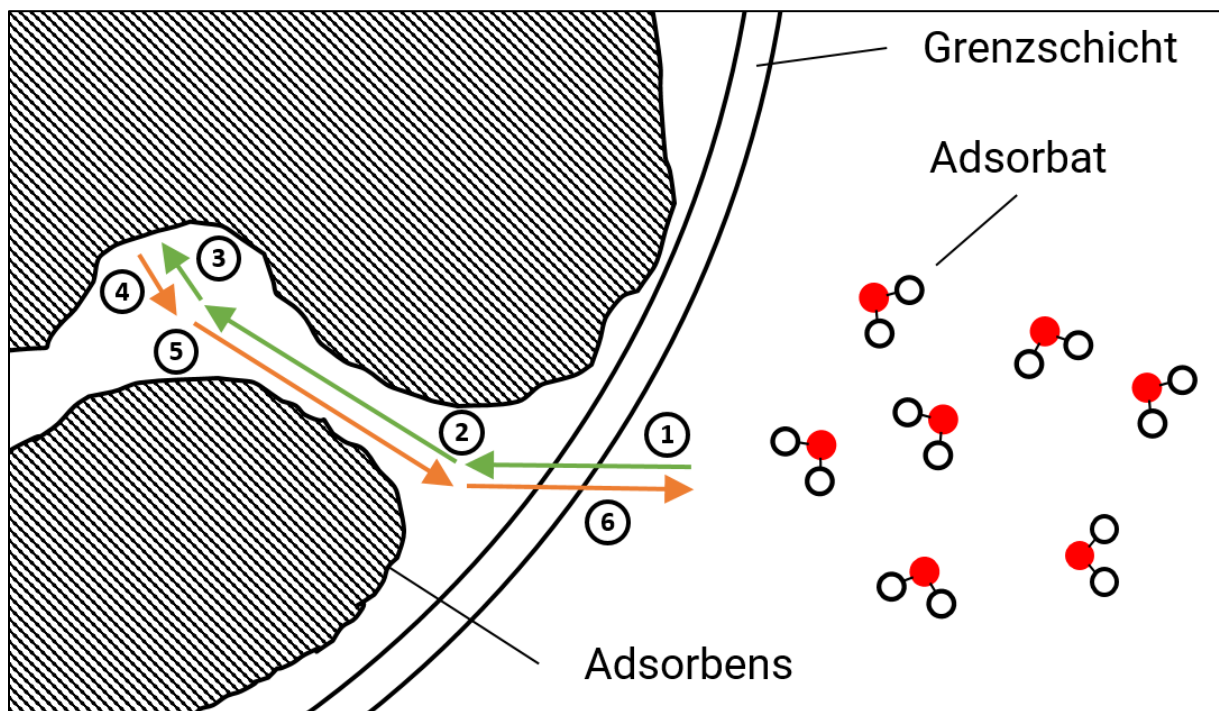


Abbildung 10: Adsorptions- und Desorptionsprozess eines Wassermoleküls am Zeolith. 1. Diffusion durch die Grenzschicht zur Zeolithoberfläche, 2. Diffusion der Wassermoleküle in die Poren des Zeoliths, 3. Adsorption des Wassers an der Oberfläche des Zeoliths, 4. Desorption des Wassers von der Oberfläche, 5. Diffusion des Wassers aus den Poren; 6. Diffusion durch die Grenzschicht

Zunächst kommt es zur Diffusion durch die Grenzschicht des Adsorbens, ehe das Molekül (im betrachteten Fall Wasser) in die Poren des Zeoliths diffundiert. Dort kommt es dann zur eigentlichen Adsorption. Ändern sich die Umgebungsbedingungen, z.B. aufgrund von Partialdruckunterschieden des Wasserdampfes oder während der Regeneration des Adsorbens, läuft der Prozess in umgekehrter Richtung ab. (Vgl. Druckwechseladsorption)

Adsorptions- und Desorptionsprozesse laufen immer gleichzeitig ab bis sich ein Gleichgewichtszustand, der sich aus den Umgebungsbedingungen ergibt, eingestellt hat. Aufgrund von Temperatur- und Druckunterschieden kann dieses Gleichgewicht stärker in Richtung Adsorption oder Desorption verschoben werden. Das Sorptionspotenzial des jeweiligen Systems wird häufig in Diagrammen dargestellt, die das Energiepotenzial eines Moleküls im Abstand zur Oberfläche zeigen. Kurvenverläufe setzen sich aus abstoßenden und anziehenden Wechselwirkungen zusammen und sind abhängig vom Molekül sowie der Oberflächengeometrie; diese können z. B. über quantenchemische Berechnungen und Molekulardynamiksimulationen bestimmt werden.

Aufgrund von van der Waals Wechselwirkungen kommt es zu einer Anziehung zwischen der Materialoberfläche und den Molekülen. Ein zu geringer Abstand zwischen Molekül und Oberfläche führt jedoch zu Überlagerungen von Wellenfunktionen, die wiederum zu abstoßenden Effekten zwischen dem Molekül und der Oberfläche führen. Da Moleküle bestrebt sind ein Energieminimum anzunehmen, kommt es zu einem minimalen Abstand zwischen Molekül und Oberfläche während der Physisorption

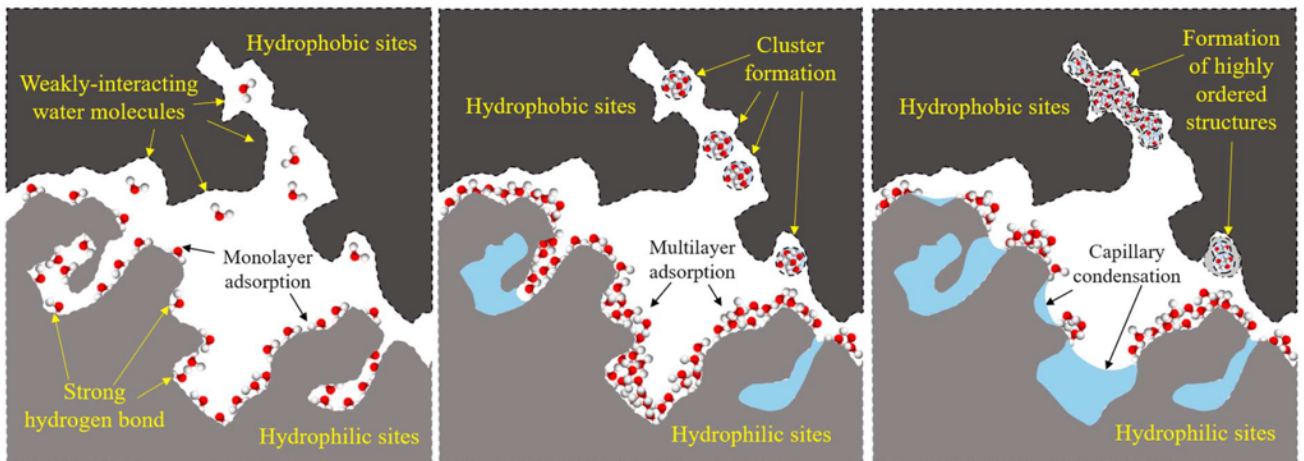


Abbildung 11: Unterschiedliches Adsorptionsverhalten von Wasser bei hydrophiler und hydrophober Oberflächenbeschaffenheit des Adsorbens. Unterscheidung zwischen ein- (links) bzw. mehrschichtiger Adsorption (Mitte) und Kapillarkondensation (rechts) [4-6].

Physisorption ist nicht auf eine Adsorptionsschicht begrenzt. Durch die Anziehungskräfte kann es zu mehrschichtiger Adsorption kommen. Diese ist jedoch abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Adsorbens und der Polarität des Adsorbats. In einigen Fällen, z. B. bei natürlichen Zeolithen, kann die Oberflächenbeschaffenheit modifiziert werden, um das Adsorptionsverhalten zu verändern. Hydrophobe Oberflächen führen zu einer zusätzlichen abstoßenden Wechselwirkung auf Wassermoleküle, was zur Bildung von Clustern oder Mizell-ähnlichen Strukturen führen kann.

5 Partialdruckunterschiede in Gasmischungen

Ein Gasmischung in zwei miteinander verbundenen Räumen hat zwar überall den gleichen Gesamtdruck, jedoch kann in jedem Raum eine andere Konzentration der einzelnen Gase (Gaskomponenten) vorhanden sein. Dies führt zu unterschiedlichen Gasteildrücken. Es erfolgt dann so lange ein Austausch der Moleküle eines jeden Gases zwischen den Räumen, bis auch die einzelnen Konzentrationen (Gasteildrücke) überall gleich sind.

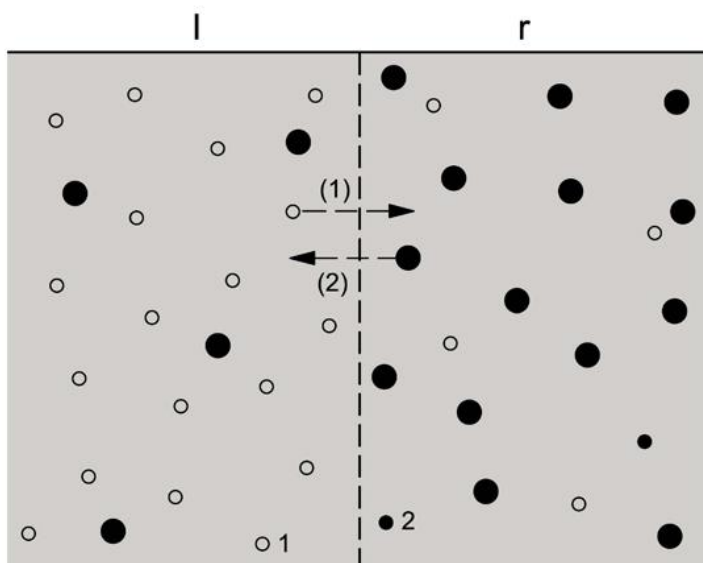


Bild 12: Austausch der Gasmoleküle zwischen zwei abgegrenzten Bereichen

$$t = 0 : p_{1l} + p_{2l} = p_{1r} + p_{2r} \quad p_{1l} > p_{1r} \quad p_{2l} < p_{2r}$$

$$t \rightarrow \infty : p_{1l} + p_{2l} = p_{1r} + p_{2r} \quad p_{1l} = p_{1r} \quad p_{2l} = p_{2r}$$

Der gleiche Vorgang spielt sich mit dem Wasserdampf-Luft-Gemisch bezüglich des Wasserdampftransports durch die SmartSaver ab, bei dem zu beiden Seiten (innen /außen) unterschiedliche Wasserdampfteildrücke im Zuge des Kühlprozesses und dem Wechsel der Lastfälle herrschen können. Es setzt dann aufgrund des Dampfdruckunterschiedes zwischen beiden Seiten die Dampfdiffusion, der Adsorptions- und Desorptionsprozess, ein.

Diffusion entspricht somit dem Teilchentransport zwischen Bereichen unterschiedlicher Teilchendichte. Die Wasserdampfdiffusion durch ein Bauteil, hier SmartSaver, hindurch erfolgt durch unterschiedliche Wasserdampfpartialdrücke in den verschiedenen Bereichen.