

Als Alternative zur Warmlufttrocknung bietet sich die Trocknung mit Luftentfeuchter für die Gewinnung von hochwertigem Heu an. Ein markanter Vorteil liegt im geringeren Energieverbrauch. Allerdings ist für den Erfolg eine sorgfältige Planung und Abstimmung der Komponenten entscheidend.



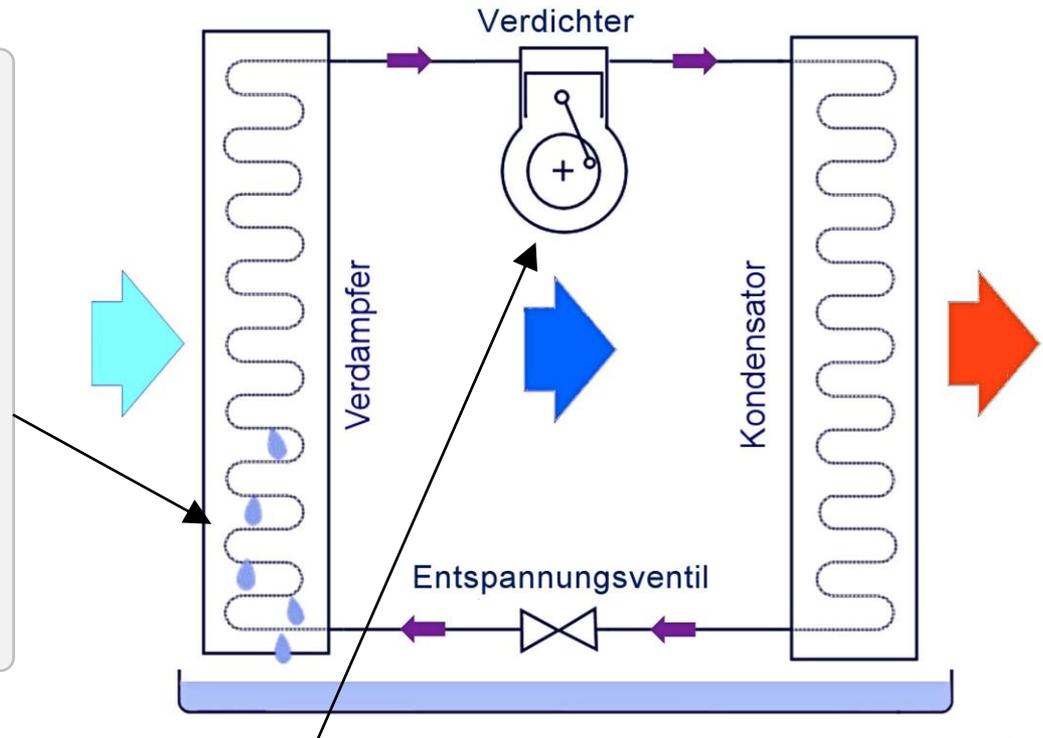
Heutrocknung mit Luftentfeuchtung

technische Voraussetzungen

Ventilator	Gebäude, Trocknungsein- heit, Luftführung	Luftentfeuchter
Luft-Volumenstrom möglichst steuerbar bei Heu 0,07 bis 0,12 m ³ /s und m ² , Druck je nach Trockengut und Anlagenbauart 600 bis 1.600 Pa, Auswahl nach Hersteller- Kennlinienfeld	je nach Bauart und Verfahren z.B. Gebäude- Entlüftung, Umschaltklappen, Kanalweichen, Steuerung, Krananlage, Stromanschluss, Dachabsaugung	Verdichterleistung von Entfeuchtern auf die Luftleistung abstimmen! Anströmgeschwindigkeit 1,5 bis 4 m/s, achten auf gute Reinigungsmöglichkeit der Wärmetauscher und effektiven Verdampfer für gute Kondensleistung, Luftanwärmung möglichst über 5 °C



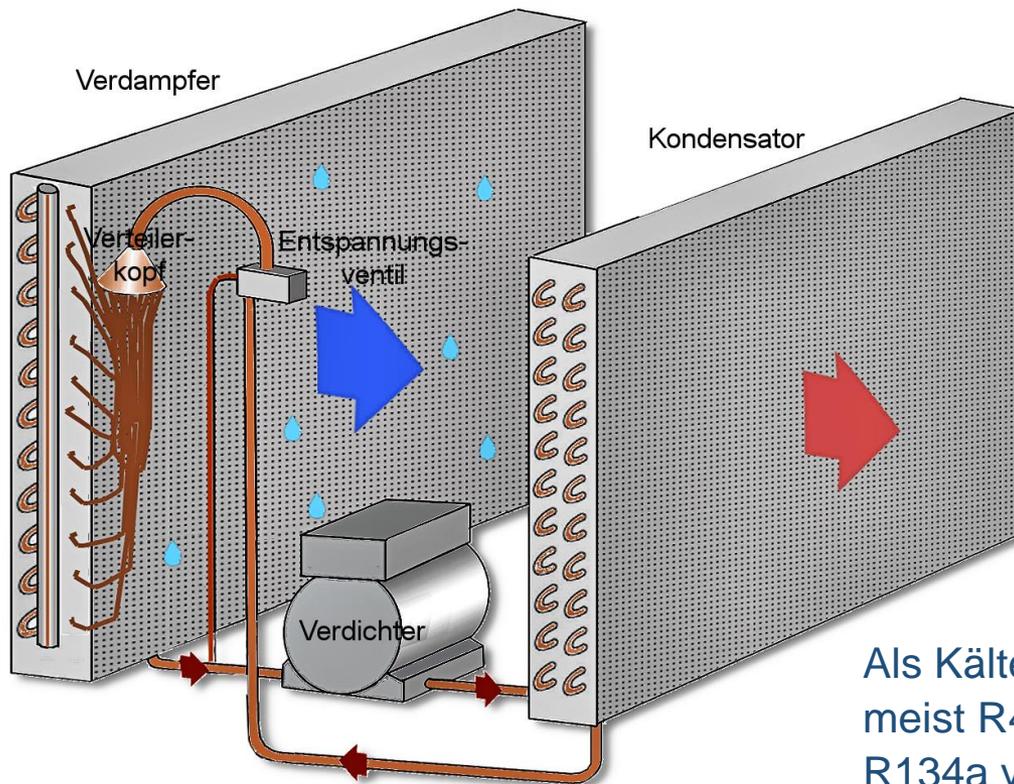
Im Verdampfer geht ein flüssiges Kältemittel nach Passieren eines Entspannungsventils durch den verringerten Druck in den gasförmigen Zustand über. Die dazu erforderliche Verdampfungswärme wird der anströmenden Luft entzogen und kühlt diese (zusätzlich mit der Entspannungsenergie) bis unter den Taupunkt ab, so dass sich an der Oberfläche Kondenswasser bildet.



Das vorerst gasförmige Kältemittel wird vom Verdichter so stark komprimiert bis es flüssig wird. Dabei wird im nachfolgenden Kondensator Wärme frei. Diese Wärme entspricht der Verdampfungswärme des Kältemittels, dazu kommt noch die Kondensationswärme des an der Oberfläche abgeschiedenen Wassers.

Im Gegensatz zu Heizwärmepumpen wird bei Entfeuchtern dieselbe Luft zuerst abgekühlt und dann im Kondensator wieder erwärmt. Neben der relativen Luftfeuchtigkeit verringert sich durch das Kondenswasser auch der absolute Wassergehalt der Luft, zugleich erhöht sich die Lufttemperatur über die der zuströmenden Luft.



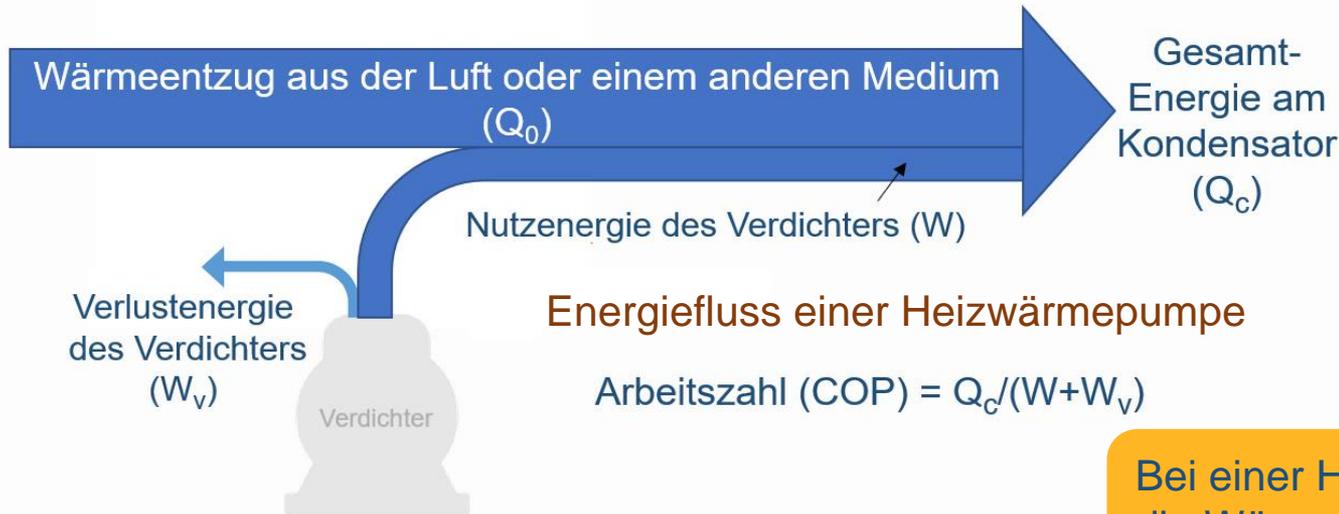


Bei einer typischen Anströmgeschwindigkeit von 1,5 bis 4 m/s kondensiert Wasser an den kalten Lamellen des Verdampfers. Anschließend passiert die kalte Luft den Kondensator und wird hier wieder angewärmt. Die Anströmfläche des Verdampfers in m^2 soll rund $1/6$ der Verdichterleistung in kW betragen.

Als Kältemittel wird für Luftentfeuchter derzeit meist R407c oder für höhere Temperaturen R134a verwendet. R134a hat allerdings eine geringere Verdampfungswärme, daher muss bei gleicher Leistung mehr Kältemittel umgewälzt werden.

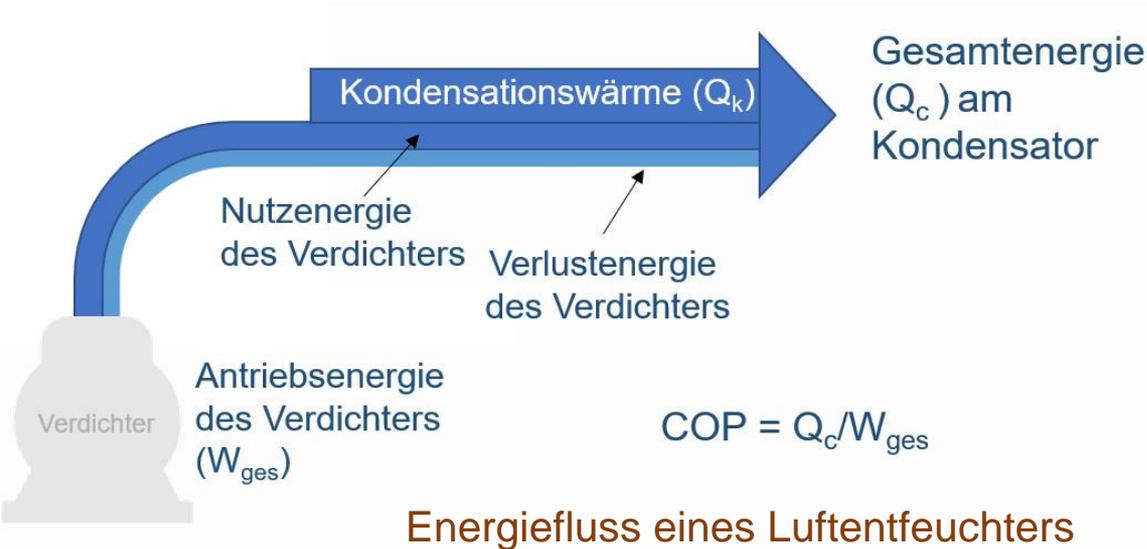
Entscheidend für die Funktion ist die Abstimmung der Luftgeschwindigkeit: zu geringe Luftgeschwindigkeit beeinträchtigt die Wasserabscheidung im Verdampfer, bei zu hoher werden Wassertropfen im Luftstrom wieder verteilt.





Bei einer Heizwärmepumpe wird die Wärme einem Medium entzogen und dann einem anderen Medium unter Aufwendung von Verdichterenergie zugeführt. Bei einem Luftentfeuchter wird dagegen dieselbe Luft zuerst abgekühlt und dann wieder erwärmt!

Die Anwärmung der Luft im Entfeuchter wird fast nur durch die Kondensationswärme des abgeschiedenen Wassers bestimmt!



Die **Arbeitszahl (Coefficient of Performance, COP)** gibt bei Wärmepumpen an, wieviel Wärmeenergie am Kondensator (Q_c) im Vergleich mit der aufgewendeten Verdichterenergie (W_{ges}) abgegeben wird: $COP = Q_c / W_{ges}$.

Bei Wärmepumpen äußert sich die aufgewendete Energie W_{ges} auch als Differenz der absoluten Temperatur zwischen warmer und kalter Seite, weil Wärme proportional zur absoluten Temperatur ist. Damit kann man die praktische Arbeitszahl (auch Leistungszahl genannt) auch grob errechnen aus:

$$COP = T_o / (T_o - T_u) * 0,5$$

dabei ist T_o die obere Temperatur (am Kondensator), T_u die untere Temperatur (am Verdampfer), der Faktor 0,5 gibt einen Wirkungsgrad an. Die Temperaturen sind in Kelvin (= °C + 273) einzusetzen!

Entfeuchter-Wärmepumpen arbeiten mit einem geringen Temperaturunterschied zwischen Verdampfer und Kondensator ($T_o - T_u$) und erreichen damit gegenüber Heizwärmepumpen eine hohe Arbeitszahl um 5 bis 8.

Die Wirksamkeit eines Luftentfeuchters wird aber nicht nur durch die Arbeitszahl bestimmt, sondern auch durch dessen Kondensleistung. Diese hängt besonders von der Feuchtigkeit und Temperatur der Luft ab. Bei einer Lufttemperatur unterhalb von 8 bis 13 °C kann der Verdampfer durch den Wärmeentzug je nach Luftdurchsatz vereisen!



Luftentfeuchter arbeiten nur gut ...



- **bei hoher Luftfeuchtigkeit.** Ohne Luftfeuchtigkeit gibt es keine Kondenswärme und damit nur eine geringe Lufterwärmung durch die Verlustenergie des Verdichters!
- **bei warmer Eingangsluft.** Unterhalb von 20°C ist daher ein Umluftbetrieb empfehlenswert. Bei Lufttemperaturen unter 8 bis 13°C kann es sogar zu einer Vereisung des Verdampfers kommen! Kalte Luft enthält auch nur wenig Feuchtigkeit!
- **wenn zwischen Verdampfer und Kondensator wenig Temperaturunterschied herrscht** – also bei warmer Eingangsluft und nicht zu hoher Kondensatortemperatur.
- **bei guter Abstimmung der durchströmenden Luftmenge auf die Verdichterleistung** (z.B. Verdichterleistung = 0,8 bis 3-fache Ventilatorleistung)
- **bei einer Anström-Luftgeschwindigkeit von 1,5 bis 4 m/s** (der Bereich ist je nach Bauart der Wärmetauscher etwas verschieden)
- **wenn die Wärmetauscher nicht verschmutzt sind**



Luft-Volumenstrom bei Entfeuchtern

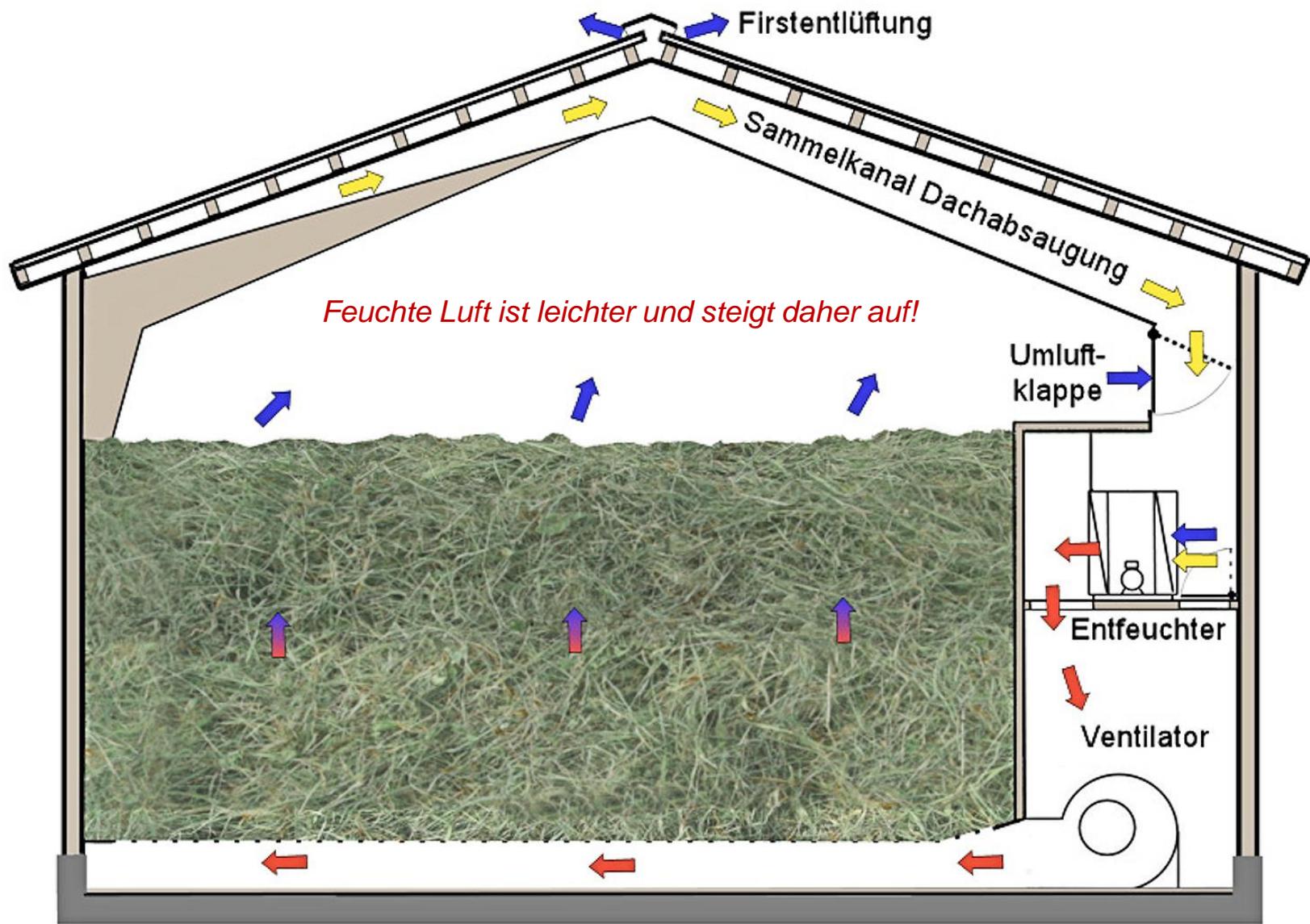
gering	mittel	hoch
hoher Temperaturunterschied Verdampfer/Kondensator, geringe Arbeitszahl	mittlerer Temperaturunterschied Verdampfer/Kondensator, mittlere Arbeitszahl	geringer Temperaturunterschied Verdampfer/Kondensator, hohe Arbeitszahl
hoher Kältemitteldruck	mittlerer Kältemitteldruck	Wasserabscheidung mangelhaft
Taupunkt leicht erreichbar, Vereisung möglich	Taupunkt erreichbar	eventuell Taupunkt nicht erreichbar!

Die Arbeitszahl nimmt mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator ab. Ohne Drehzahlregelung des Verdichters steigt dessen Leistungsaufnahme mit dem Kältemitteldruck!

Ein zu geringer Luftdurchsatz führt zu einem hohen Kältemitteldruck (damit eventuell sogar zur Überdruckabschaltung). Ein zu hoher Luftdurchsatz führt dagegen zu einer schlechten Kondenswasserabscheidung. Im Extremfall wird der Taupunkt nicht mehr erreicht, so dass sich kein Kondenswasser mehr bildet.

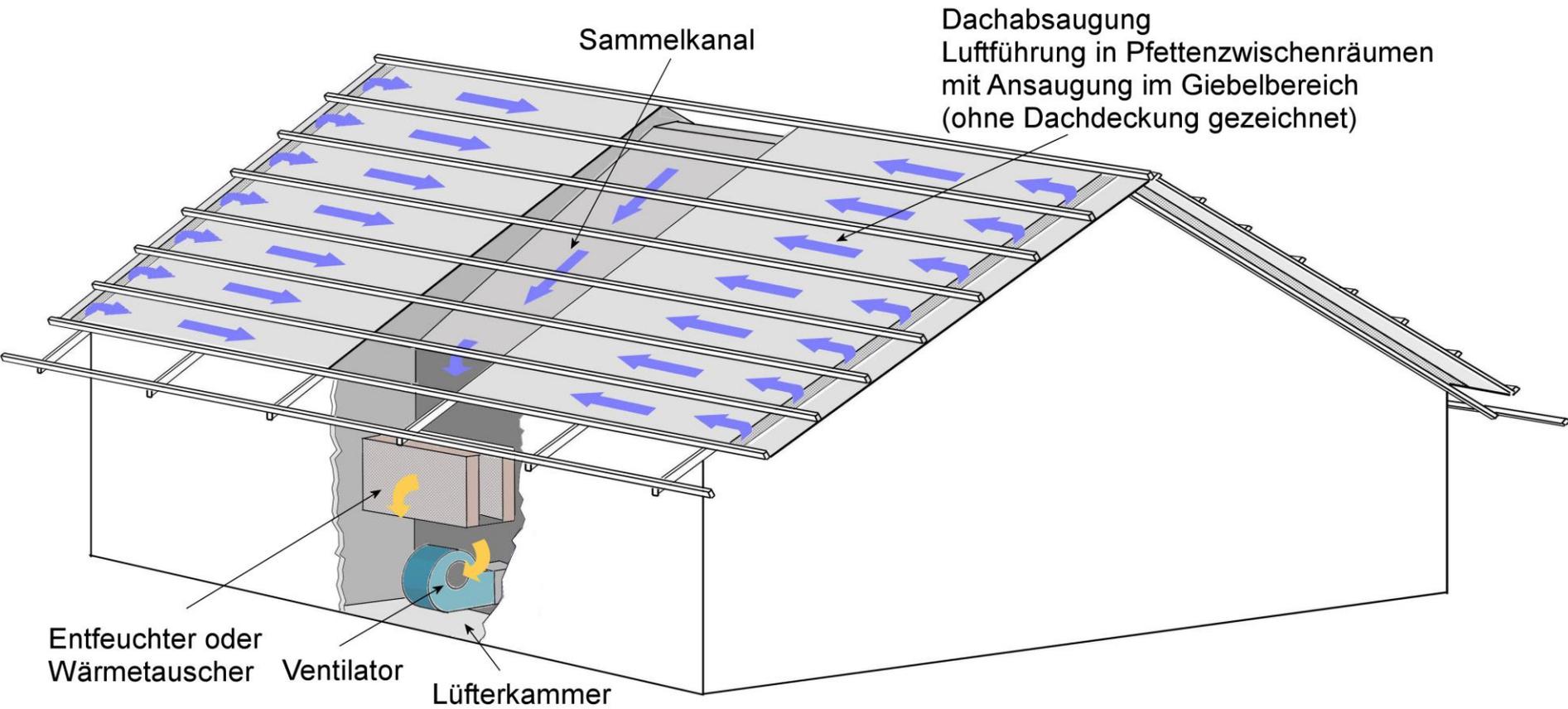
Wichtig: die Abstimmung des Luft-Volumenstromes





Schema einer Boxentrocknung mit Entfeuchtung





Das Bild zeigt die Kombination eine Luftentfeuchtung mit einer Dachabsaugung mit mittigem Sammelkanal

Zweckmäßigerweise wird mit einer Dachabsaugung kombiniert



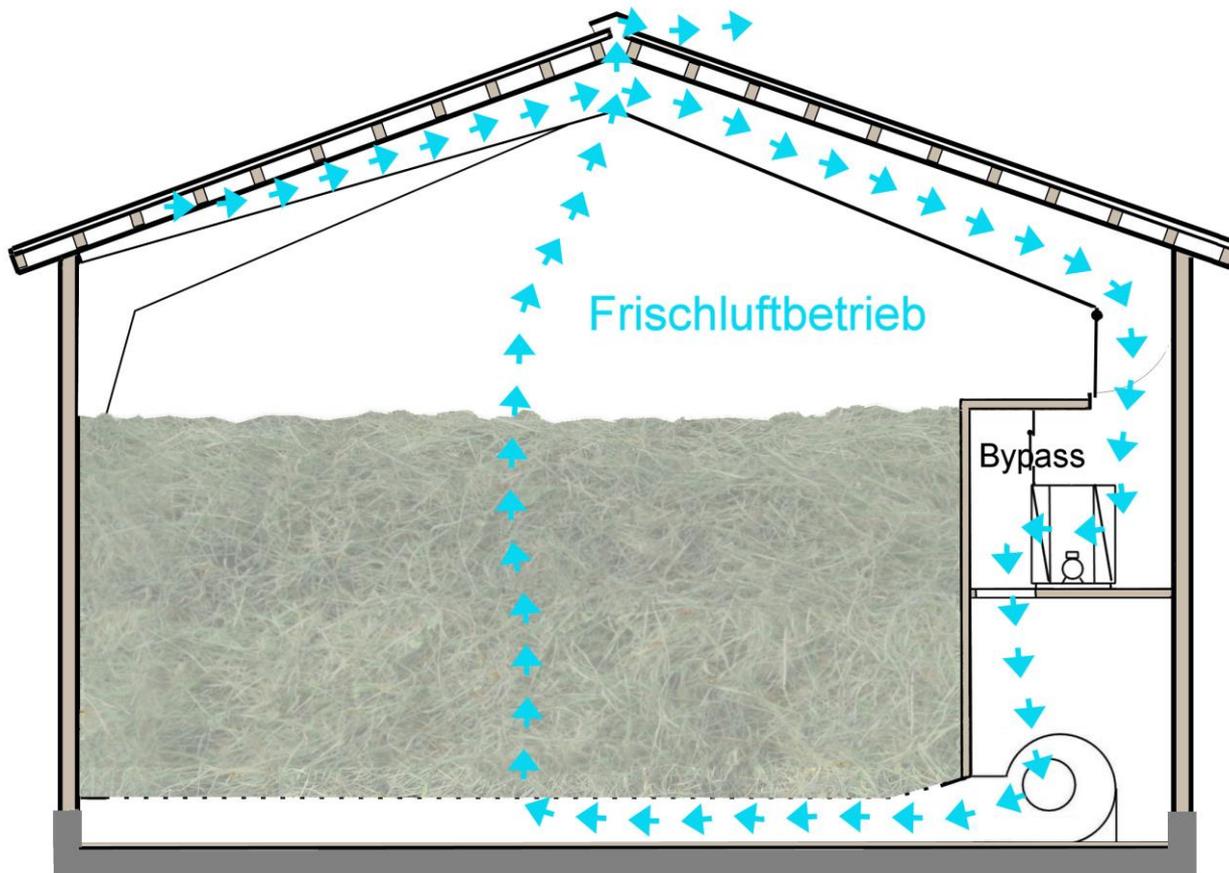
Betriebsarten

Frischluf ttrocknung	Umluf ttrocknung
Trocknungsleistung wird durch Wasseraufnahme der Luft und Luftvolumenstrom bestimmt	Trocknungsleistung wird wesentlich durch die Kondensleistung des Entfeuchters begrenzt
zweckmäßig bei über 25°C Außentemperatur oder bei überschüssiger PV-Leistung	zweckmäßig bei geringer Außentemperatur (z.B. unter 20°C) und zum Erhalt von flüchtigen Inhaltsstoffen
gute Abluftabfuhr wichtig! z.B. Firstentlüftung	Abtrennung des Trocknungsbereiches und Wärmedämmung ist vorteilhaft!
auch bei kleinem Leistungsverhältnis von Lüfter/Entfeuchter möglich	Leistungsverhältnis Lüfter/Entfeuchter von 1 : 2 bis 1 : 3 zweckmäßig

Eine Trocknung mit Umluft macht also bei schlechtem Wetter oder während der Nacht Sinn, allerdings wird die Trocknungsleistung wesentlich von der Kondensleistung begrenzt. Wegen eines geringen Luftaustausches durch übliche, nicht vollkommen dichte Gebäude kann aber erfahrungsgemäß die Trocknungsleistung um rund 30% über der Kondensleistung liegen.



Ähnlich wie bei Warmlufttrocknungen werden Entfeuchteranlagen bei gutem Wetter mit **Frischluf**t betrieben. Dabei ist eine wirksame Abfuhr der Trocknungsluft (z.B. durch eine Firstentlüftung) funktionswichtig.

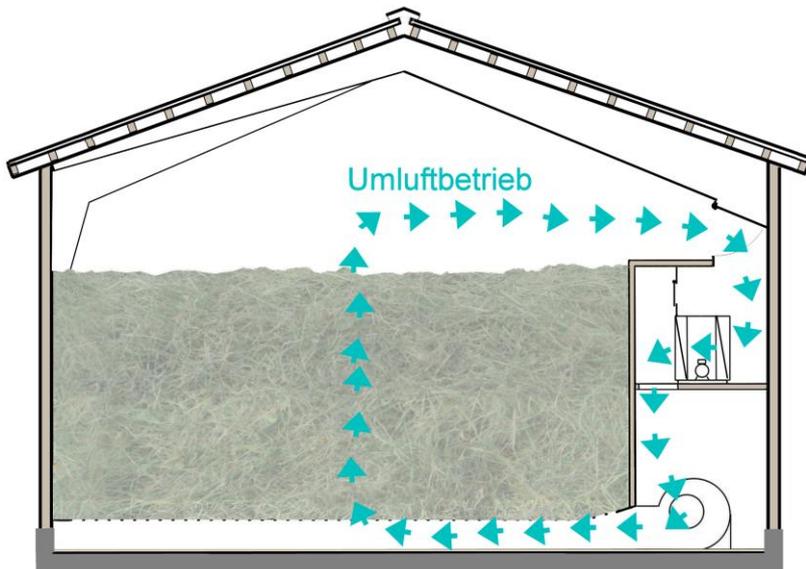


Bei der Firstentlüftung wird Dachdeckung und Unterschalung über der Heubox (außer an einem Sammelkanal) im Firstbereich auf einer Breite von ca. 15 bis 20cm unterbrochen. Dieser Lüftungsschlitz wird durch eine Dachhaube abgedeckt. Weil feuchte Abluft durch die geringere Dichte aufsteigt, ist diese Lüftung besonders wirksam.

Frischluftbetrieb



Bei niedrigen Außentemperaturen arbeiten Entfeuchter schlecht, daher empfiehlt sich hier ein Umluftbetrieb. Dabei soll die Verdichterleistung deutlich höher als die Antriebsleistung des Trocknungsventilators sein. Oft wird das per Frequenzwandler durch eine verminderte Ventilator Drehzahl erreicht. Bewährt ist bei Boxentrocknung ein spezifischer Luftdurchsatz von 0,07 bis 0,11 (eventuell bis 0,13) m^3/s und m^2 Boxenfläche wobei im Umluftbetrieb oder gegen Ende der Trocknung ein geringer Luftstrom Sinn macht. Eine Umschaltung zwischen den beiden Betriebsarten lässt sich durch Umschaltklappen oder -Jalousien bei einer Außentemperatur zwischen 20 und 25°C erreichen.

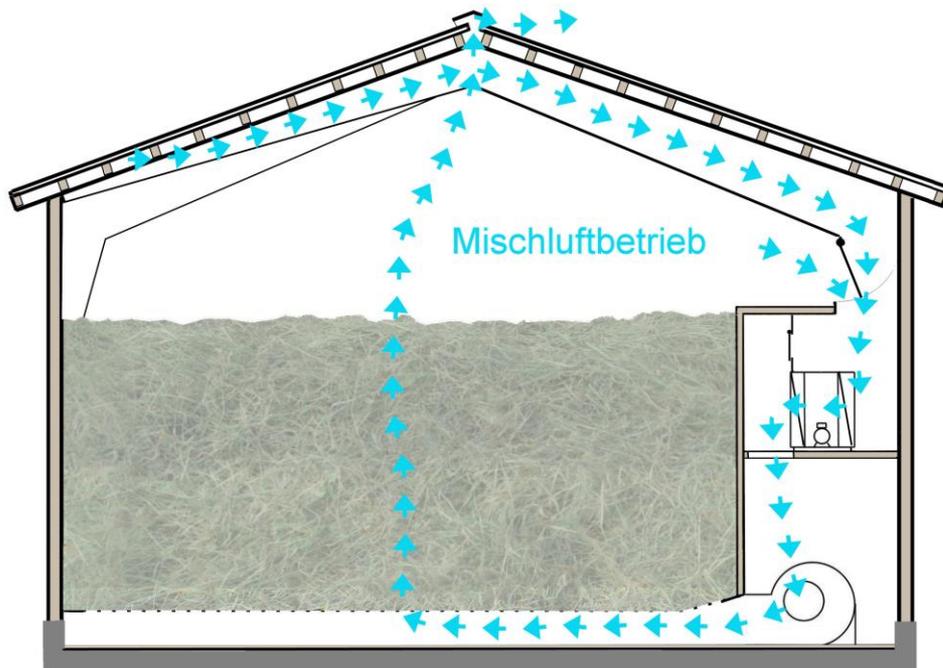


Umschaltklappe über Lüfterkammer

Umluftbetrieb



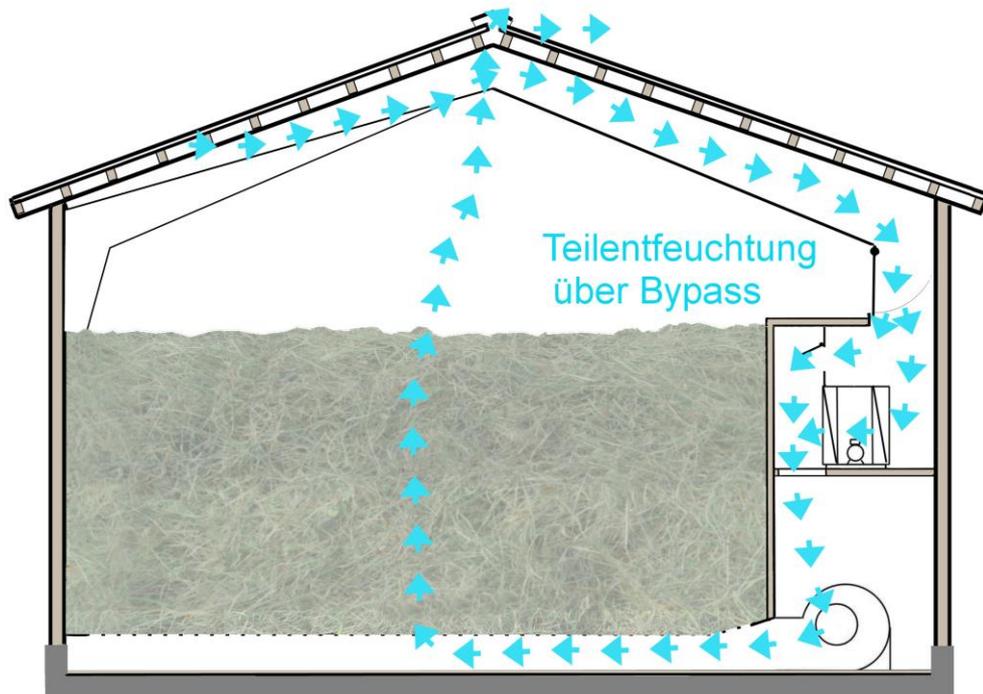
Ein **Mischluftbetrieb** erscheint für die Heutrocknung nur bei sehr hoher Verdichterleistung des Entfeuchters im Verhältnis zur Luftleistung des Trocknungsventilators oder bei hohen Außentemperaturen zweckmäßig. Beim Mischluftbetrieb verbleibt eine Umschaltklappe oder Jalousie in einer Mittelstellung anstatt in einer Endlage. Kräuter werden auf kleinen Anlagen teilweise mit Mischluft getrocknet.



In der Praxis hat es sich bei üblich moderater Verdichterleistung bewährt nach einem Frischluftbetrieb bei Tag und gutem Wetter abends oder bei Schlechtwetter rasch und vollständig auf einen Umluftbetrieb umzuschalten um die Temperatur im Trocknungsbereich halten zu können.



In der Regel wird die ganze Trocknungsluft entfeuchtet (**Vollentfeuchtung**). Es werden aber auch Systeme mit einem Entfeuchter im Nebenstrom (**Teilentfeuchtung**) angeboten. In diesem Fall wird der Entfeuchter meist von einem Hilfslüfter versorgt. Möglich ist auch eine teilweise Umgehung des gesamten Entfeuchters oder dessen Verdampfers („Bypass“).



Durch Teilentfeuchtung kann bei kleiner Anströmfläche und Verdichterleistung der Entfeuchter trotzdem effizient laufen oder eine Verdampfervereisung verhindert werden. Insgesamt ist dies aber durch eine längere Laufzeit von Ventilatoren eher eine Notlösung.



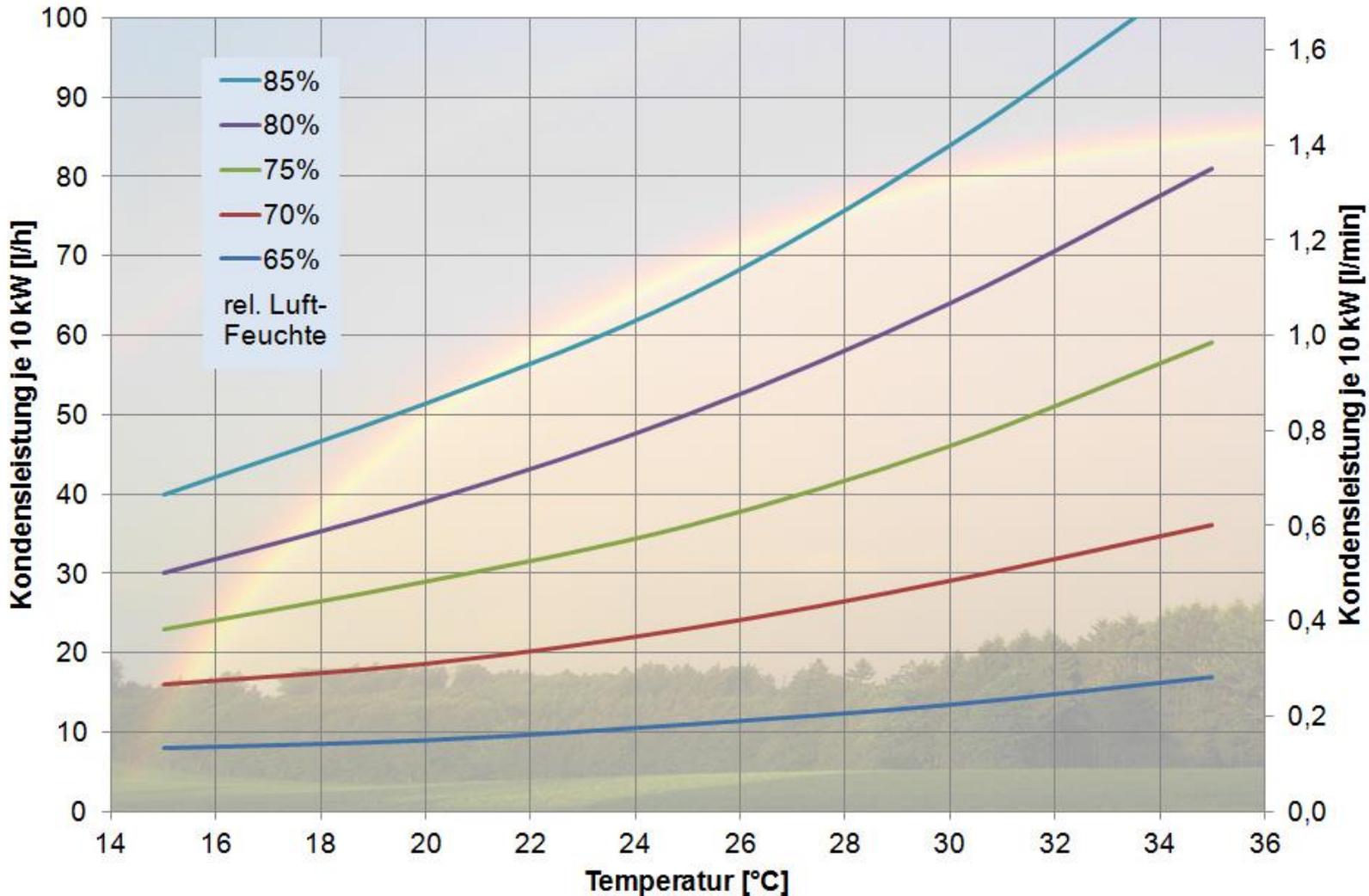
Luftführung am Entfeuchter

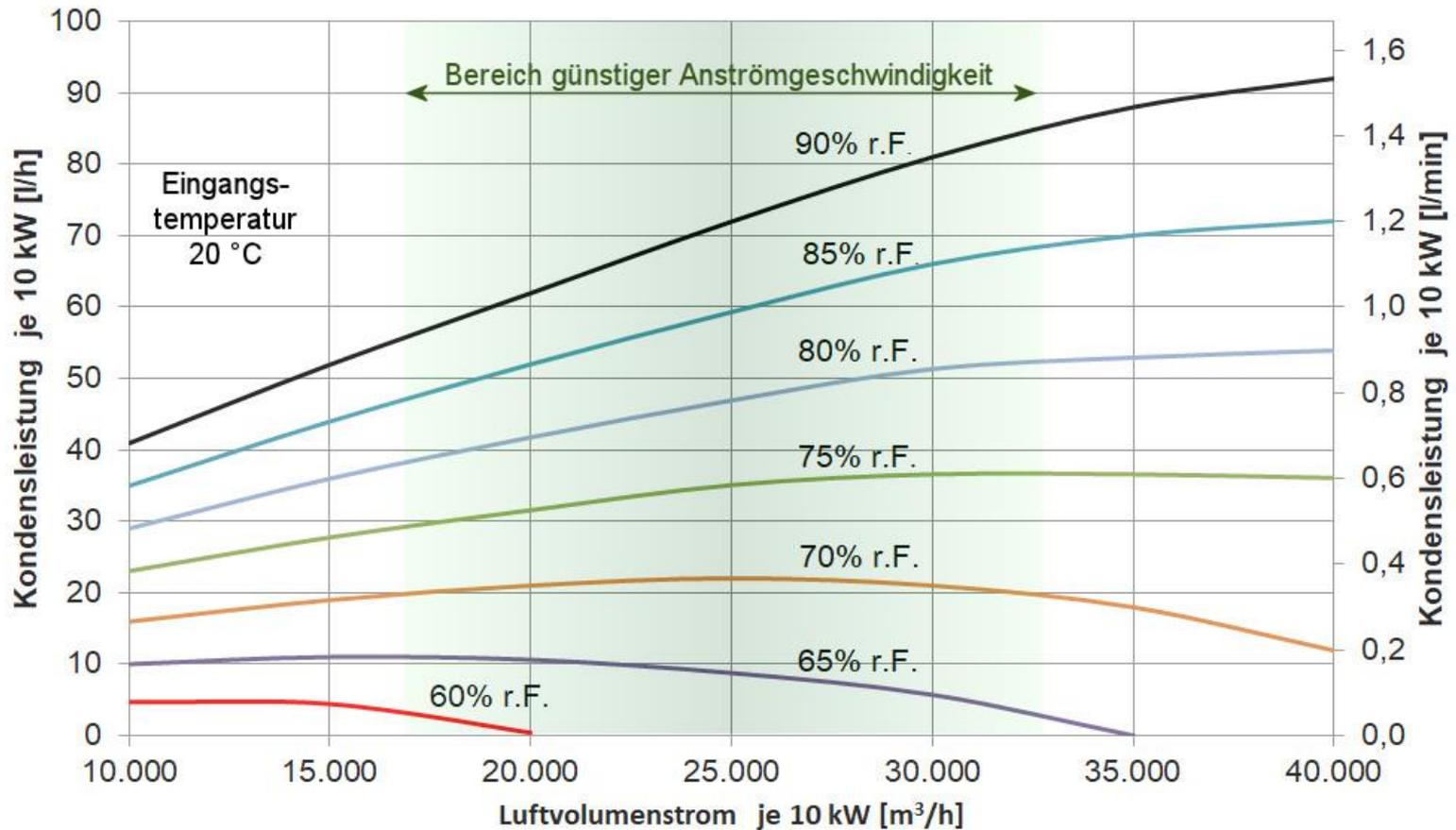
Vollentfeuchtung die ganze Trocknungsluft wird entfeuchtet	Teilentfeuchtung ein Teil der Trocknungsluft wird entfeuchtet	
	Bypass des ganzen Entfeuchters	Bypass des Verdampfers
große Anströmfläche und Verdichterleistung erforderlich, kein Hilfslüfter nötig, kein Mischproblem, einfache Luftführung	meist Hilfslüfter erforderlich, kleinere Anströmfläche und Verdichterleistung möglich	möglich zur Regulierung der Anströmgeschwindigkeit, kann eventuell Trocknungswirkung verbessern

Bei einer geringen Verdichterleistung im Verhältnis zur Leistung des Ventilators kann eine Teilentfeuchtung zweckmäßig sein. Diese lässt sich aber besser durch einen Verdichter mit variabler Leistung vermeiden.



Die Kondensleistung von Luftentfeuchtern ist stark von Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängig. Im Diagramm sind typische Werte auf je 10 kW Verdichterleistung bezogen!





Bei feuchter Luft (also auch bei Trocknungsbeginn) ist ein hoher Luftdurchsatz zweckmäßig, dagegen ein geringer bei trockener Luft und gegen Ende der Trocknung. Eine niedrige Eingangstemperatur verlangt ähnlich einen geringeren Luftdurchsatz.

Die Kondensleistung kann je nach Konstruktion variieren!

Empfehlenswerter Luftdurchsatz



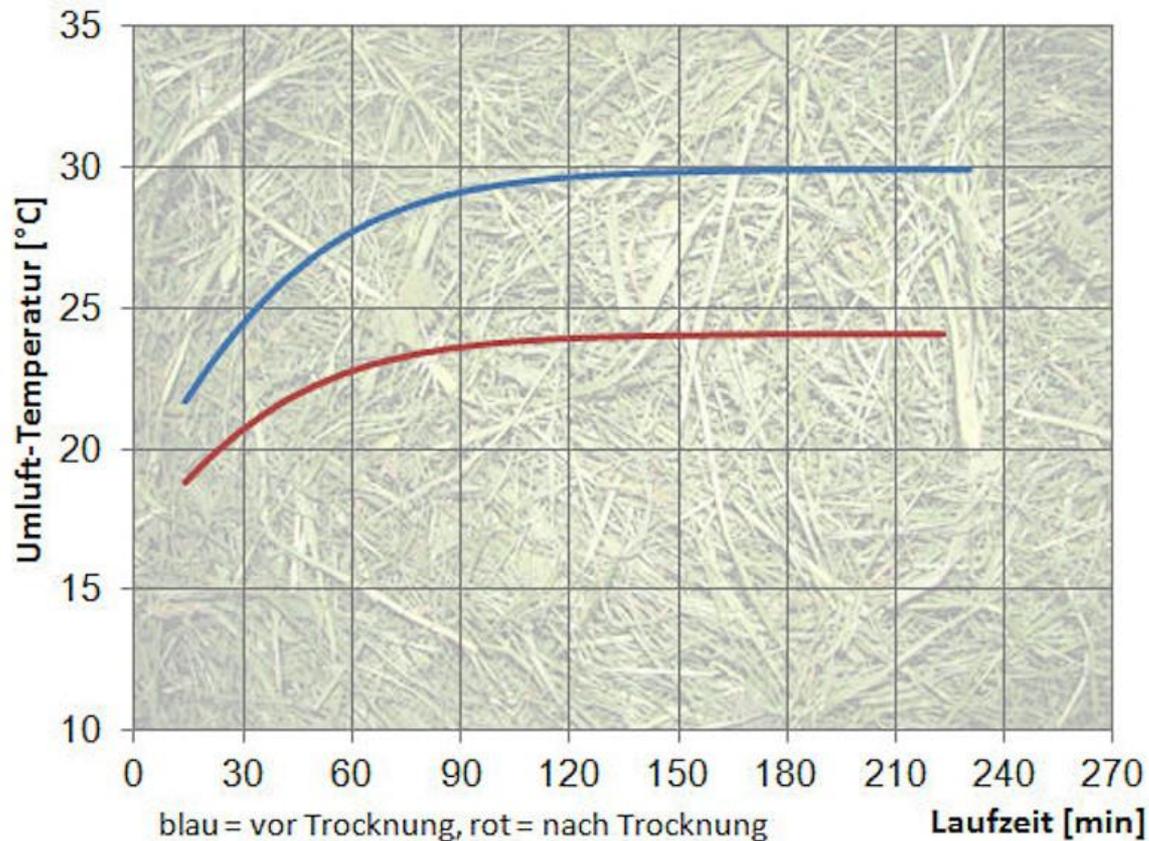
Neben der Kondensleistung ist die Wärmeleistung des Entfeuchters ein wichtiges Kriterium. Diese ist aber weitgehend von der Kondensleistung abhängig, weil der wesentliche Anteil von der Kondensationswärme des abgeschiedenen Wasser kommt.

Für die **Anwärmung der Luft** durch die Wärmeleistung ist natürlich der Luft-Volumenstrom maßgeblich. Funktionsentscheidend ist die Lufterwärmung durch Entfeuchter besonders bei kaltem Wetter im Umluftbetrieb.

Vorteilhaft ist eine Lufterwärmung ab 5°C. Damit wird im Umluftbetrieb ein „Aufschaukeln“ der Trocknungstemperatur über die Umgebungstemperatur und in der Folge eine raschere Trocknung erreicht.

Günstig auf Kondensleistung und Luftanwärmung eines Entfeuchters wirkt sich ein aufwendiger Verdampfer mit guter Kältemittelführung und großer Lamellenfläche aus. Damit wird der Anteil nichtkondensierter Feuchtigkeit der Luft („Bypassfaktor“ des Verdampfers) verringert.

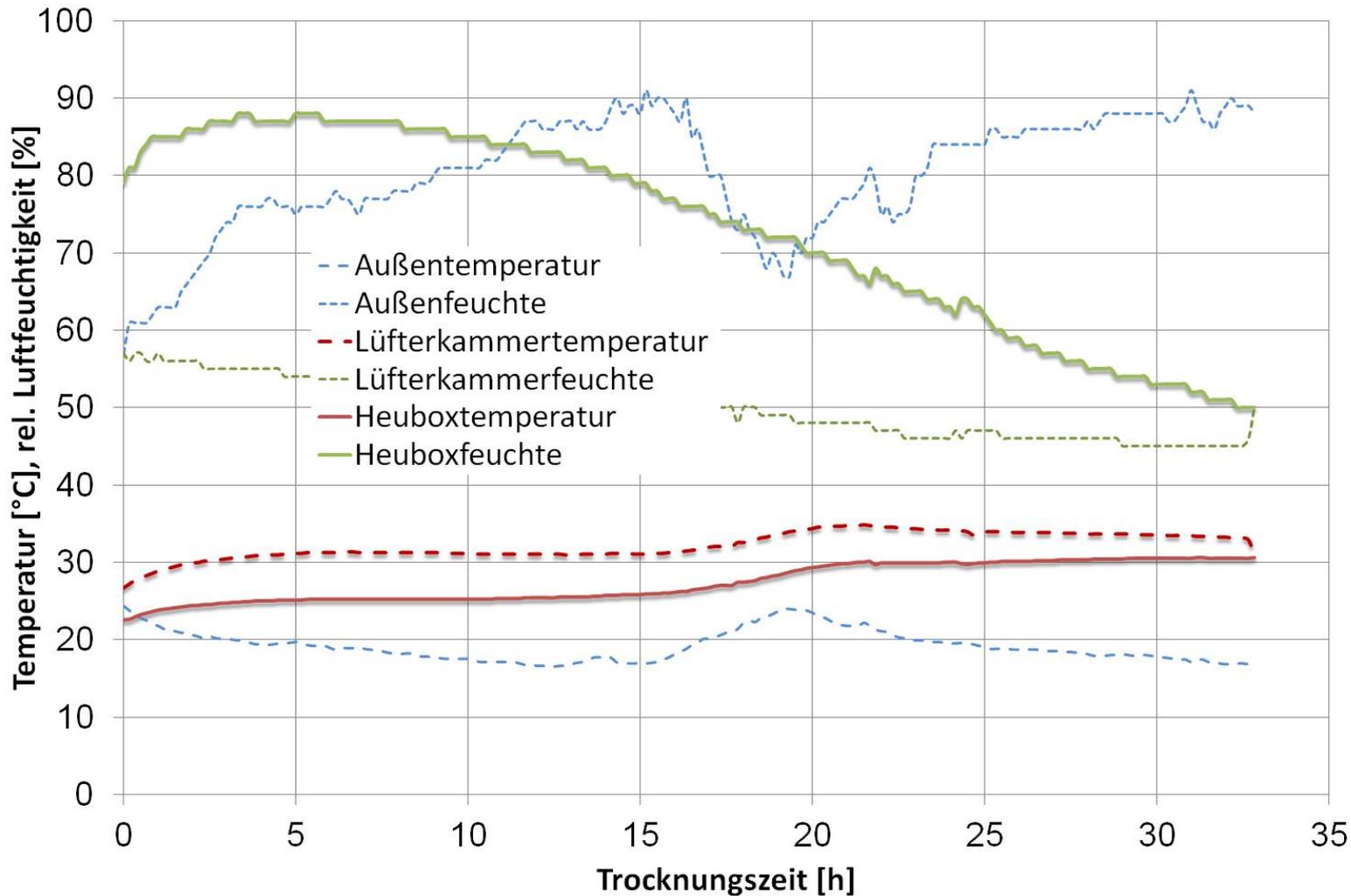




Je nach Verdichterleistung, Luftdurchsatz und Wärmeverlust im Gebäude erreicht man im Umluftbetrieb auch bei schlechtem Wetter günstige Bedingungen für Luftentfeuchter und ein „Aufschaukeln“ der ursprünglichen Trocknungstemperatur. Die vertikale Differenz beider Linien des obenstehenden Diagramms zeigt die Lufterwärmung im Entfeuchter. Diese kann bei großer Verdichterleistung auch deutlich größer sein, als im Diagramm dargestellt, umgekehrt kann sich bei undichtem/schlecht gedämmtem Gebäude oder geringer Verdichterleistung kein Anstieg der Umlufttemperatur einstellen.

Temperaturanstieg im Umluftbetrieb



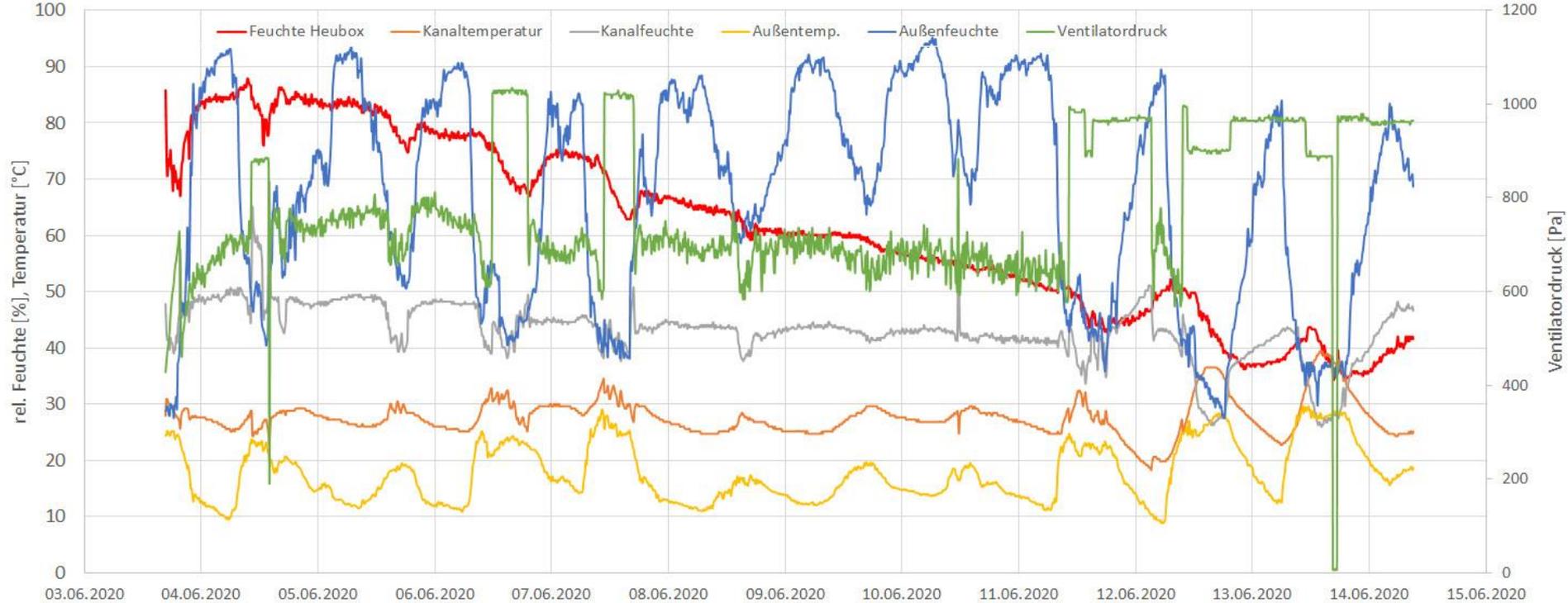


Die Temperaturdifferenz zwischen den roten Linien zeigt die Erwärmung im Entfeuchter an. Nach dem Unterschreiten einer Abluftfeuchtigkeit von 50% ist die Haupttrocknung beendet.

Verlauf von Temperatur und Luftfeuchte bei Umluftbetrieb (Daten M. KITTL)



Werte aus der Versuchsanlage Raumberg-Gumpenstein bei über 5 m Füllhöhe!



Die rote Linie zeigt den Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit über der Heubox, die blaue Linie die Außenluftfeuchte. Es wurde also hier bei fast durchgehendem Schlechtwetter bei überlasteter Anlage getrocknet. Das zeigt auch der gelbe Außentemperaturverlauf. Grün dargestellt ist der Druckverlauf des Ventilators.

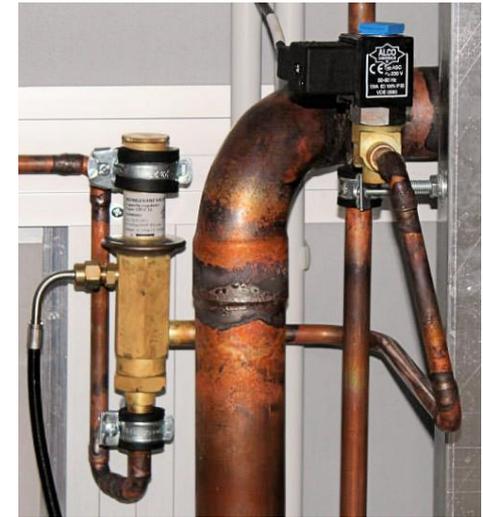
Eine derart starke Überlastung wie oben dargestellt sollte vermieden werden um die Trocknungsdauer möglichst unter 80 Stunden zu halten!

Praktischer Trocknungsverlauf bei gemischtem Umluft/Frischlufbetrieb



Bei kaltem Wetter ist eine Vereisung des Verdampfers möglich. Das kann durch einen geregelten Heißgasbypass verhindert werden (CPCE-Regelung), ebenso durch Drehzahländerung des Verdichters.

Zur Anpassung an die Betriebsbedingungen und zur Vermeidung einer Vereisung werden Verdichter von Entfeuchtern zweckmäßig mit Frequenzwandler bei variabler Drehzahl und/oder Heißgasbypassregelung betrieben. Damit ist ein breiterer Bereich der Anströmgeschwindigkeit möglich.

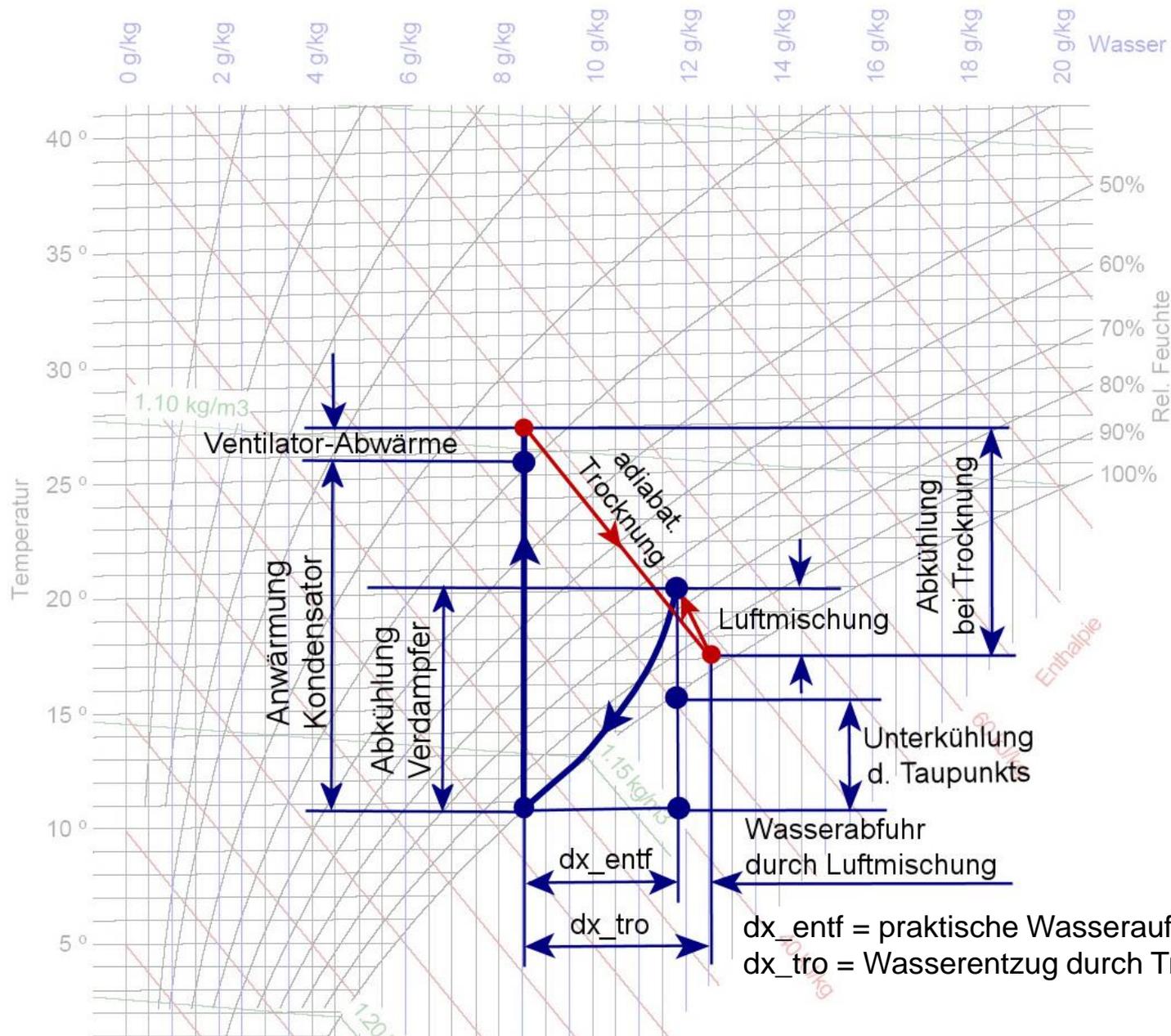


Heißgasbypassventil
(links, rechts geregeltes
Entspannungsventil)

Bei älteren Entfeuchtern sind oft Heizstäbe im Verdampfer zum Abtauen eingebaut. In diesem Fall oder bei einer Kältemittelumkehr wird während des Abtauens die Entfeuchtung unterbrochen. Dies kann zu einer wesentlichen Verlängerung der Trocknungszeit führen.

Als Folge einer Verdampfervereisung kann es durch Beeinträchtigung des Luftdurchsatzes zu einem Kältemittelüberdruck und zum Abschalten des Entfeuchters durch den Überdruckschalter kommen.





Der Betrag der Ventilatorabwärme und Luftmischung kann in Wirklichkeit deutlich kleiner sein!

Luftentfeuchtung im h/x-Diagramm bei nicht hermetischem Gebäude



Abluft-Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung sind beim Entfeuchter-Umluftbetrieb unnötig, im Frischluftbetrieb ist die Wirkung bei der Heutrocknung wegen der üblichen niedrigen Trocknungstemperatur und der Abkühlung der Luft während der Trocknung (rund 2°C je g Wasseraufnahme pro m³ Luft!) kaum vorhanden. Bei Warmlufttrocknungen kann jedoch ein nennenswerter Teil der Wärme zurückgewonnen werden.

Zur Erhaltung der Wärme im Umluftbetrieb ist eine Abtrennung des Trocknungsbereiches (z.B. durch Rollplanen, besonders beim ersten Schnitt und niedrigen Temperaturen) nützlich, ebenso wie eine Wärmedämmung von Luftkanälen, Boxenböden oder Wand/Deckenbereichen.

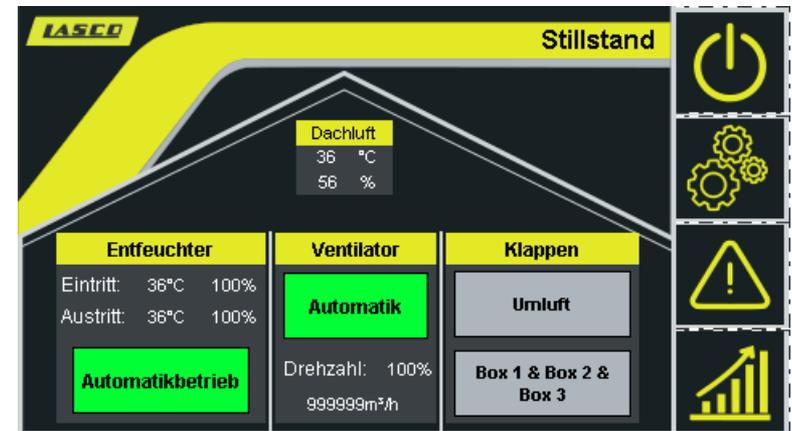
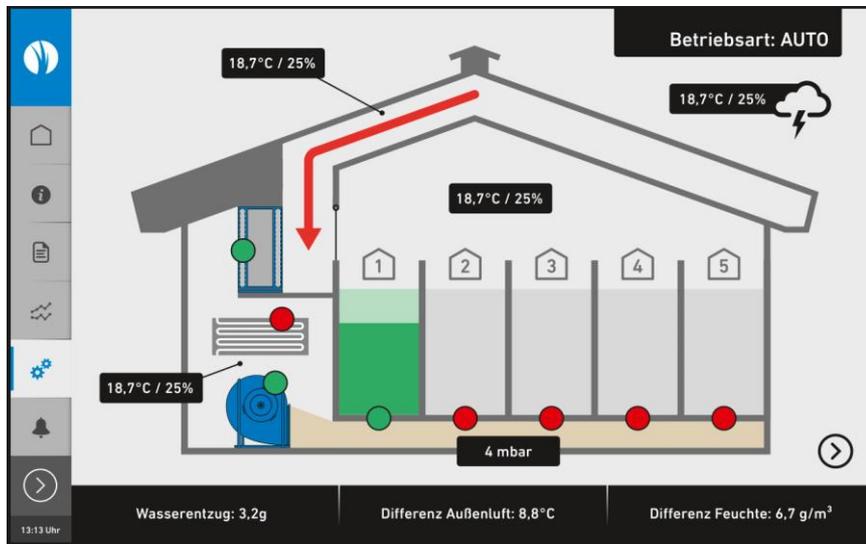


Wärmerückgewinnung, Abtrennung des Trocknungsbereiches



Bedienungshilfen

- Anzeige von Temperatur und Feuchtigkeit der Trocknungsluft
- Geregelte Lüfterdrehzahl je nach Luftzustand oder Entfeuchter-Betriebsart
- Automatische Umschaltung zwischen Frischluft- und Umluftbetrieb
- Steuerung des Entfeuchters nach Luftzustand und Erfassung des Luft-Volumenstromes
- Laufzeitsteuerung nach Trocknungszustand



Bildschirm von speicherprogrammierbaren Steuerungen mit Funktionsanzeige (Bildquelle links HSR rechts LASCO)



*Für die Funktion der Anlage ist besonders das laufende Reinigen von Wärmetauschern oder deren Staubschutzgitter wichtig!
Je nach Vorschrift ist vor Inbetriebnahme des Entfeuchters eine Ölvorwärmung einzuschalten.*



Beim Betrieb von Luftentfeuchtern ist in Österreich weiter die **Kälteanlagenverordnung** (letzte Fassung 2021) zu beachten: Der Betriebsinhaber hat dafür Sorge zu tragen, dass nur Kälteanlagen aufgestellt und in Verwendung genommen werden, die den Vorschriften dieser Verordnung entsprechen. Dieser Verpflichtung ist der Betriebsinhaber jedenfalls dann nachgekommen, wenn er eine entsprechende Bescheinigung des Unternehmens, das die Kälteanlage aufgestellt hat, vorweist.



Der Betriebsinhaber hat ferner dafür Sorge zu tragen, dass die Kälteanlagen in einem den Vorschriften dieser Verordnung entsprechenden Zustand erhalten, ordnungsgemäß gewartet und überprüft werden.



Kältemitteldruck
überwachen!

Dieser Verpflichtung hat der Betriebsinhaber jedenfalls dann entsprochen, wenn die rechtzeitige Behebung von Störungen oder festgestellten Mängeln an Kälteanlagen sowie die Wartung und Überprüfung derselben durch befugte, fachkundige Personen nachweislich erfolgt ist.

Nach der EU-Vorschrift EU-VO 517/2014 wird ein Prüfintervall je nach Kältemittelmenge von einem Jahr (oder einem halben Jahr bei sehr großen Anlagen) vorgeschrieben.



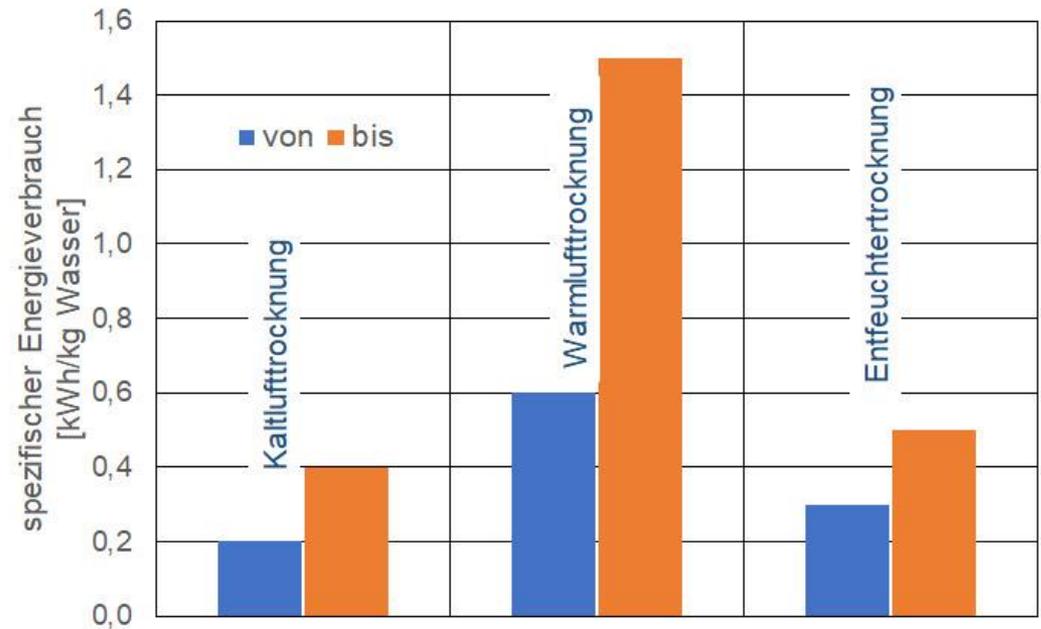


Die **Investitionskosten** für eine Entfeuchtertrocknung sind vergleichbar mit jenen für eine Trocknung mit Hackgut-Warmluftofen.

Für die variablen Kosten ist der jeweilige Energiepreis je kWh entscheidend. Die Elektrizitätsversorger bieten oft regional günstige Stromtarife (z.B. Wärmepumpentarif, unterbrechbarer Tarif) an. Allerdings sind diese Tarife regional verschieden. In Zukunft ist mit variablen Tarifen in Verbindung mit elektronischen Smartmeter-Zählern sowie mit vermehrter Nutzung eigener PV-Anlagen zu rechnen.



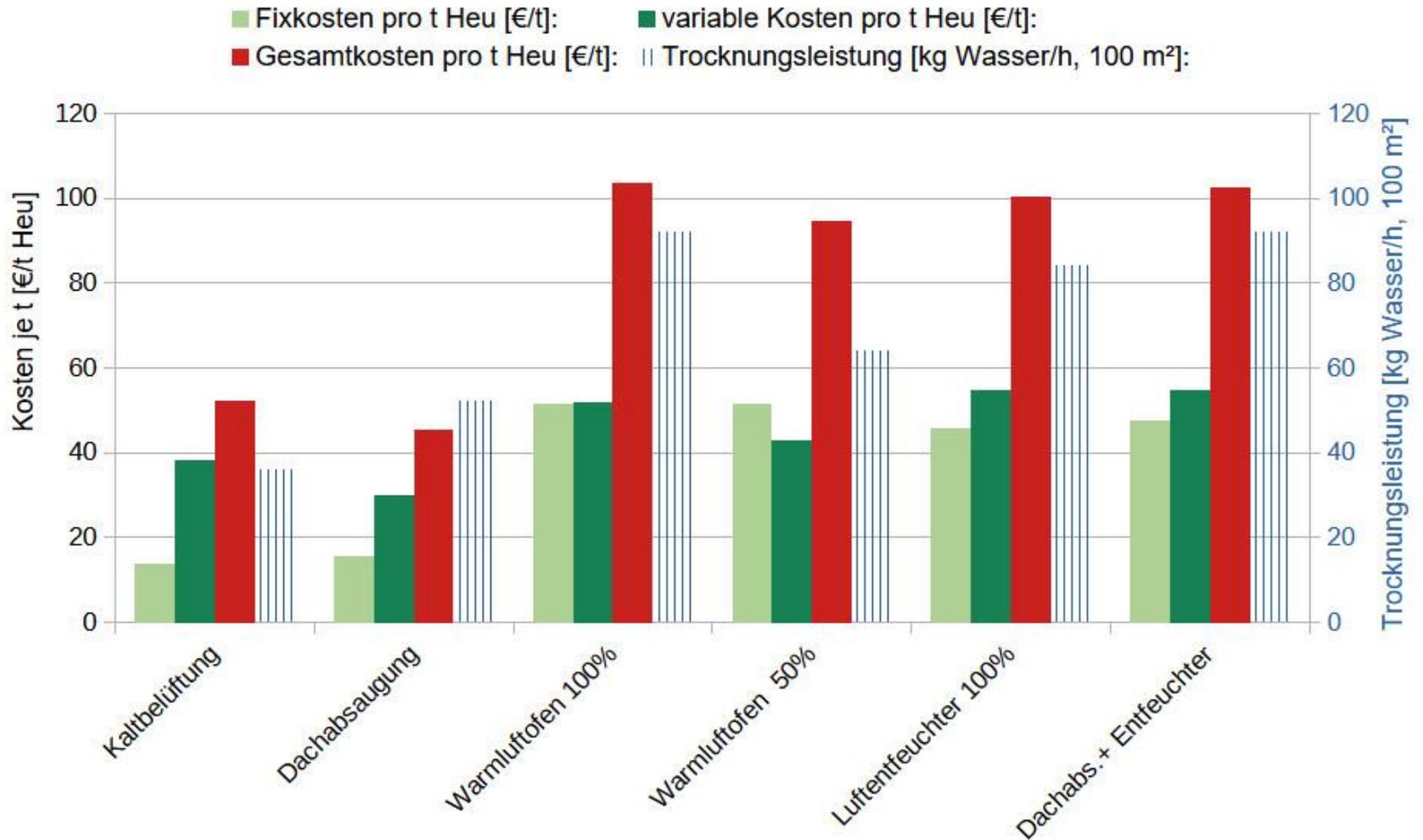
Der Energieverbrauch von Entfeuchtertrocknungen liegt typisch um 0,3 bis 0,5 kWh pro kg abgetrocknetes Wasser und ist damit wesentlich geringer als bei einer Warmlufttrocknung. Allerdings ist der Energiepreis je kWh bei elektrischem Strom erheblich höher als jener von Holzhackgut oder Scheitholz.



Kostenmäßig wird damit der Vorteil einer Entfeuchtertrocknung im Energieverbrauch durch den höheren Preis für eine kWh elektrischen Strom gegenüber jenem für Holz wieder vermindert. Bei einem sehr niedrigen Preis für Holzhackgut und nur teilweisem Betrieb des Warmluftofens kann diese Variante kostenmäßig sogar günstiger liegen.



Strompreis 0,30 €/kWh, Hackgutpreis 0,045 €/kWh

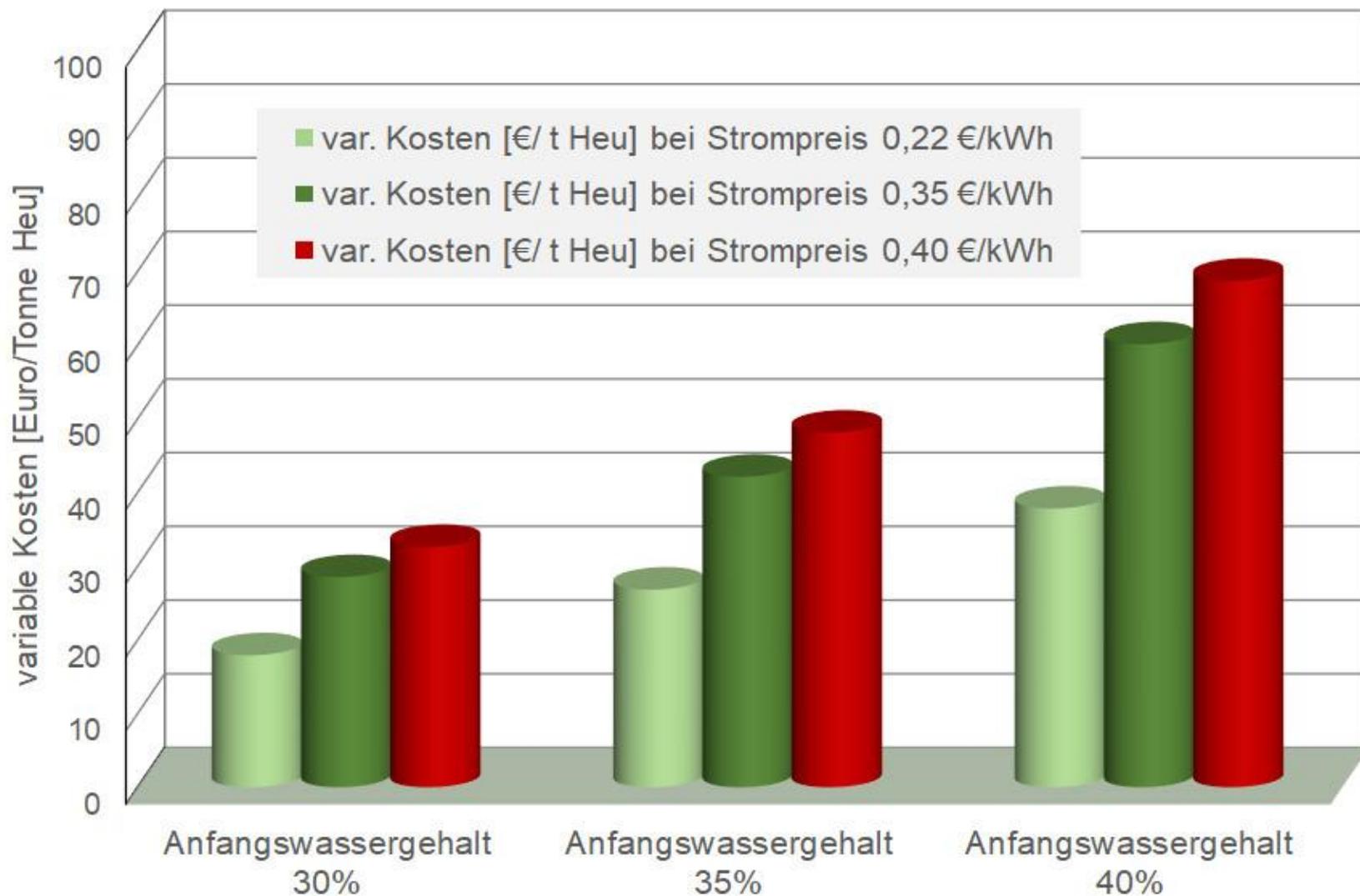


Berechnung ohne Gebäudekosten, aber samt Abschreibung, Kapitalverzinsung, Versicherung und Reparatur, Stand Ende 2023

Variable Kosten und Gesamtkosten verschiedener Verfahren



Auswirkung des Strompreises auf die variablen Kosten



Der Strompreis und Feuchtegrad als Einflussfaktor



Auswahlkriterien für Luftentfeuchter

- Gibt es Angaben zur Leistungsaufnahme und zur Kondensleistung je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit?
- Durch welche Vorrichtung wird eine Verdampfervereisung bei niedriger Lufttemperatur vermieden?
- Ist die Verdichterdrehzahl stufenlos veränderbar?
- Ist ein Steuerprogramm für den Entfeuchter vorhanden?
- Verfügt der Verdampfer über eine große Anströmfläche und Lamellenfläche?
- Wie viele Verteilerköpfe für das Kältemittel sind am Verdampfer vorhanden?
- Wie leicht ist eine Reinigung der Wärmetauscher und deren Schutzgitter möglich?
- Wird der Verdichter schwingungsmäßig durch flexible Verbindungen von Rohrleitungen abgekoppelt?
- Ist eine Manometeranzeige für die Kältemitteldrücke vorhanden?





Dachabsaugung unterhalb von regendichten, leicht überlappenden PV-Modulen im Bau
(Bild Alexander Huber)

Ideal ist die Kombination mit einer Dachwärmenutzung





so kann gutes Entfeuchterheu aussehen