

# Optimierungspotential beim Mälzen liegt in der Luft

**MOLLIER-DIAGRAMM** | Beim Mälzungsprozess stellt die aufzuwendende Energie in Form von Strom und Wärme den größten Kostenfaktor dar – grob 40 Prozent der gesamten Herstellkosten, über 60 Prozent der variablen Kosten. Kein Wunder, dass sich die Mälzungsbranche schon seit Jahrzehnten erfolgreich dem Energiethema widmet und die Einsparpotentiale weitgehend ausgeschöpft sind. Wer hier noch weiter optimieren will, muss mit einem ausgeprägten technologischen und technischen Sachverstand ins Detail gehen.

**OHNE LUFT** kann nicht gemälzt werden, sie ist der unabdingbare Gehilfe des Mälzers, bringt Sauerstoff ins Keimgut und führt Kohlendioxid ab, befeuchtet oder trocknet das Keimgut und führt diesem Wärme zu oder ab. Bis zu 90 Prozent der gesamten Energiekosten wandern in die Prozessluft, die mit dieser Energie bewegt, erwärmt und gekühlt wird. Somit bietet es sich an, die Luftprozesse noch genauer unter die Lupe zu nehmen. Zunächst einmal stellt sich die Frage: Wie kann man einen Luftzustand überhaupt charakterisieren?

Die Lufttemperatur in Grad Celsius als Parameter ist wohl jedem bekannt und einfach, exakt und überall zu messen. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die relative Luftfeuchte in Prozent, welche die Wasserdampfbeladung der Luft bei einer bestimmten Temperatur im Verhältnis zum maximal möglichen Wasserdampfgehalt, Sättigung genannt, angibt. Für normale Umgebungsverhältnisse gibt es ebenfalls einfache und zuverlässige Messsysteme. Problematisch wird die Messung allerdings an zahlreichen, durchaus interessanten Stellen in der Prozessluft der Mälzerei aufgrund der dort herrschenden, für die Sensorik ungünstigen Verhältnisse bezüglich Nässe, Temperatur, korrosiver und mikrobieller Angriffe. Wie später noch näher erläutert wird, kann die relative Feuchte aber auch sehr gut indirekt mit Hilfe des Mollier-Diagramms bestimmt werden.

## ■ Der Druck der Luft

Ein weiterer sehr wichtiger, aber häufig in der Praxis nicht beachteter Parameter zur Charakterisierung der Luft ist deren Druck. Dabei nimmt der vorherrschende Luftdruck am Anlagenstandort aufgrund der geographischen Höhe der Mälzerei Einfluss auf die Anlagenauslegung. Je höher die Anlage steht, umso ungünstiger wird aufgrund der abnehmenden Luftdichte das Verhältnis von Massenstrom zu Volumen-

strom und damit von Wirkparameter und Transportenergie der Prozessluft (Extrem-Beispiel: Mälzerei in Bogota, Kolumbien, auf 2600 m Höhe ü.d.M.; normaler Luftdruck 725 hPa oder 72 % von „unseren“ 1013 hPa und entsprechend niedrige Luftdichte).

Neben diesem, nach der Standortauswahl festgelegten Parameter beeinflusst der zur Überwindung von Luftwiderständen von den Ventilatoren aufzubauende Druck ganz wesentlich den Stromverbrauch. In vielen Anlagen findet eine Erfassung des Betriebsdrucks, wenn überhaupt, meist nur unter der Darrhorde statt. Mit wenig Aufwand – oft würde ein einfaches U-Rohr- oder Schrägrohr-Manometer ausreichen – sollten aber an allen Stellen, wo Differenzdrücke entstehen, diese im Sinne einer energetischen Betriebskontrolle aufgezeigt werden. An Filtern und vor allem aber an Wärmetauschern, Kühl- und Heizregister sorgen nicht entfernte Ablagerungen für einen unnötigen und am Entstehungsort nicht erkannten Anstieg der Differenzdrücke. Physikalisch bedingt und in dieser Betrachtung unglücklicherweise steigen die Luftwiderstände und damit verbunden die Stromverbräuche auch noch im Quadrat zum Verhältnis der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit bzw. des auf einem Kanal-Querschnitt beaufschlagten Volumenstroms.

Aus diesen Erkenntnissen heraus muss bereits bei der Auslegung einer Mälzerei-Anlage und deren Komponenten großer Wert auf entsprechende Strömungsquerschnitte sowie Reinigungsfähigkeit und Zugänglichkeit von Wärmetauschern gelegt werden. Nicht selten verhindern dies die entweder limitierten Investitionsbudgets oder Herstellerangebote, die sich mit knapper Dimensionierung einen Preisvorteil verschaffen wollen. Eine vernünftige Betrachtung der Nachhaltigkeit und ein ehrliches Bekenntnis dazu, welches nicht nur am Messestand plakatiert wird, schont auf Dauer den Geldbeutel und die Umwelt.



**Autor:** Karl Weigt, Inhaber bmt Weigt, Augsburg

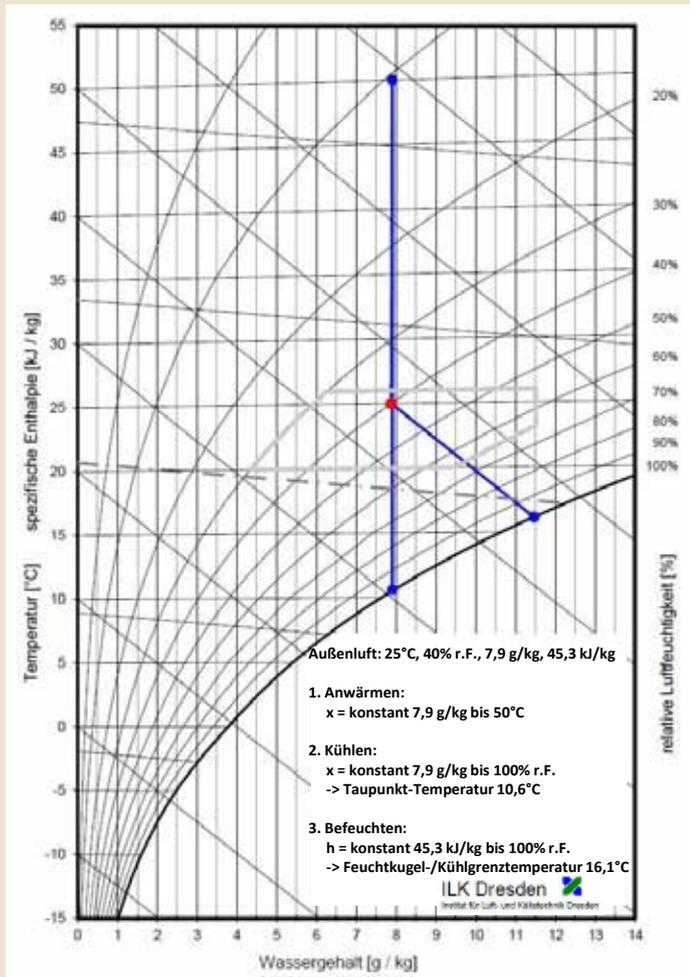


Abb. 1 Luftzustände und relevante Prozesse im Mollier-Diagramm

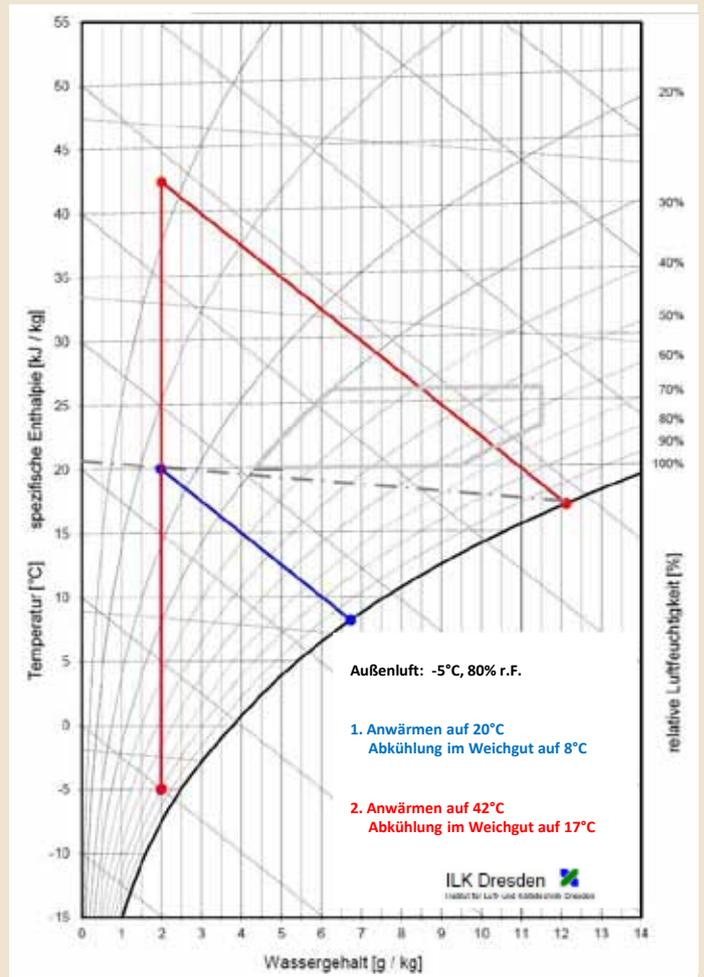


Abb. 2 Lufterwärmung im Weichhaus und Auswirkungen im Keimgut

■ Das Mollier-Diagramm hilft

Für die Charakterisierung von Luftzuständen und die Beschreibung von Prozessen in der Mälzerei, an denen Luft beteiligt ist, steht dem Mälzer mit dem Mollier-Diagramm ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Verfügung. Auch das Mollier-Diagramm ist vom Druck der Luft abhängig und wird z.T. auch für unterschiedliche Meereshöhen dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen in unseren Breiten genügt es aber mit ausreichender Genauigkeit, wenn ein Mollier-Diagramm isobar für Normluftdruck von 1013 hPa verwendet wird.

Das Mollier-Diagramm, auch h,x-Diagramm oder i-x-Diagramm genannt, wurde von dem in Dresden wirkenden Professor für Physik Richard Mollier (1863 - 1935) entwickelt und ermöglicht es, in einem Koordinatensystem mit Kurvenscharen Luftzustände und Zustandsänderungen von feuchter Luft zu bestimmen (Abb. 1).

Bei dem als Beispiel gewählten Ausgangspunkt eines Luftzustands von 25°C

und 40 Prozent rel. Feuchte können durch diese zwei Parameter alle anderen relevanten Parameter dieses Luftzustands bestimmt werden: Wasserbeladung 7,9 g/kg, Enthalpie 45,3 kJ/kg, Dichte 1,18 kg/m<sup>3</sup>. Wesentliche für die Mälzerei relevante Prozesse sind dabei:

1. Die Erwärmung der Luft auf einer Linie mit konstantem Wassergehalt, hier 7,9 g/kg senkrecht nach oben bis zur 50°C-Linie, dabei Zunahme des Energieinhalts von 45,3 kJ/kg auf 71,0 kJ/kg. Im Mälzungsprozess: Aufheizen der Darrluft.
2. Die Abkühlung der Luft, ebenfalls auf der Linie mit konstantem Wassergehalt senkrecht nach unten bis zur Sättigungslinie bei 100 Prozent relativer Luftfeuchtigkeit; dabei nimmt der Energieinhalt der Luft von 45,3 kJ/kg auf 30,6 kJ/kg ab. Dieser Schnittpunkt der beiden Linien beschreibt die Taupunkt-Temperatur des Ausgangszustands der Luft, hier 10,6°C. Im Mälzungsprozess: Abkühlung der Keimkasten-Zuluft.

3. Die adiabatische Befeuchtung der Luft auf einer Linie gleicher Enthalpie, hier 45,3 kJ/kg bis zur 100-Prozent-Sättigungslinie. Dieser Schnittpunkt beider Linien beschreibt die Kühlgrenztemperatur, genannt Feuchtkugel-Temperatur, hier 16,1°C. Im Mälzungsprozess: Befeuchtung der Weichen-Zuluft, Keimkasten-Zuluft und Wasserentzug in der Darre.

■ Anwendungsbeispiele

Das Weichgut ist zu kalt

Es herrscht strenger Winter, das Weichhaus ist kalt, es wird kühle Gerste mit kühlem Wasser eingeweicht und es findet keine Temperaturentwicklung in der Weiche statt, mit negativen Folgen: Die Wasseraufnahme der Gerste erfolgt zu langsam und anschließend im Keimkasten setzt die Ankeimung und die Wärmeentwicklung verzögert ein. Die vorgesehene Aufenthaltszeit im Keimkasten reicht nicht aus, um das nötige Lösungsziel zu erreichen. Der Mälzungsrythmus ist gestört und es

entstehen Kapazitäts- und/oder Qualitätsprobleme.

Ein in der Praxis immer wieder anzutreffender Lösungsansatz für diese Problematik ist die Aufheizung des Weichhauses. Bringt das wirklich den erhofften Effekt? Es lohnt einen Blick ins Mollier-Diagramm (Abb. 2):

In diesem Beispiel wurde eine Außenluft von  $-5^{\circ}\text{C}$  mit 80 Prozent rel. Feuchte gewählt. Diese wird z.B. mit einem Bau- oder Zeltheizer auf  $20^{\circ}\text{C}$  erwärmt und ins Weichhaus eingeblasen. Der Arbeiter fühlt sich wohl und es frieren keine Leitungen ein, das war es dann schon. Trifft diese erwärmte Luft auf das feuchte Getreide im Weichbehälter während der Trockenweiche, findet eine adiabatische Befeuchtung statt bis zur Kühlgrenztemperatur, in diesem Fall von  $8^{\circ}\text{C}$ . Das ist zu wenig, um die physiologischen Keimvorgänge merklich zu starten. Theoretisch müsste die Luft auf über  $40^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden, damit im Weichgut noch  $16^{\circ}\text{C}$  ankommen. Selbst dann reicht der Volumen- bzw. Massenstrom des Ventilators für die  $\text{CO}_2$ -Absaugung nicht aus, um die benötigte Wärmemenge ins Keimgut einzutragen. Praktisch kann das Problem nur gelöst werden, indem das Weichwasser z.B. auf  $20^{\circ}\text{C}$  erwärmt wird, damit bei Vermischung mit der kalten Gerste eine „Wohlfühltemperatur“ um die  $16^{\circ}\text{C}$  entsteht. Idealerweise sollte man dafür vorhandene Abwärme-Quellen nutzen. So werden z.B. Wasser-Rauchgas-Wärmetauscher angeboten, welche die Restenergie im Rauchgas nach dem Darrlufterhitzer genau für diesen Zweck ins Weichwasser übertragen können.

### Konditionierung der Keimkasten-Zuluft

Während der Keimung soll das Keimgut möglichst vor Austrocknung bewahrt werden. Zu diesem Zweck wird die Keimkasten-Zuluft mit Wasserdüsen bis zur Sättigung befeuchtet, damit ein vorhandenes Trocknungspotential der Zuluft nicht unnötig Wasser abführen kann. Hier sollte darauf geachtet werden, dass die Düsen möglichst fein zerstäuben und mit relativ wenig Druck und Wassermenge auskommen. Solche technisch bewährten Lösungen findet man z.B. in Gewächshäusern. Dennoch verwendet ein solches System die Ressource Wasser, produziert Abwasser, das aufbereitet werden muss, verbraucht Pumpenenergie und muss gewartet werden. In der Regel läuft ein solches Befeuchtungssystem das ganze Jahr. Muss das wirklich sein?

Auf der anderen Seite führt das Zerstäuben von Wasser in nicht gesättigter Luft zur adiabaten Wasseraufnahme und zur Abkühlung bis zur Kühlgrenz-Temperatur. Liegt diese unterhalb der gewünschten Eintrittstemperatur in den Keimkasten, kann auf eine Luftabkühlung durch die Kälteanlage verzichtet und Strom gespart werden, obwohl die gemessene Außenluft z.T. deutlich über der Solltemperatur am Keimkasten Eintritt liegt. Bei der Entscheidung Wasserverdüsung oder Kälteanlage ein oder aus hilft wiederum ein Blick ins Mollier-Diagramm.

Für die folgenden Betrachtungen wurde angenommen, dass die Eintrittstemperatur in den Keimkasten  $12^{\circ}\text{C}$  bei 100 Prozent rel. Feuchte betragen soll, die Austrittstemperatur beträgt  $17^{\circ}\text{C}$ , ebenfalls 100 Prozent gesättigt. Im Mollier-Diagramm (Abb. 3) sind drei unterschiedliche Fälle eingetragen:

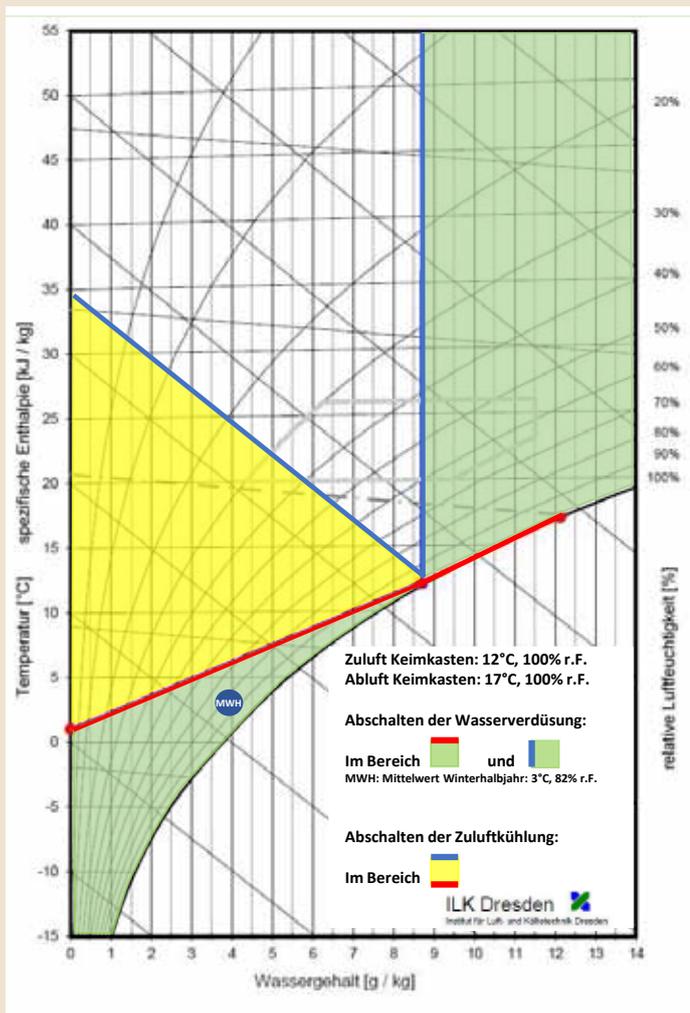
1. Die Außenluft-Temperatur liegt unterhalb der gewünschten Solltemperatur am Keimkasten Eintritt. Die Kälteanlage wird abgeschaltet. Die automatische Temperaturregelung der Eintrittstemperatur öffnet die Rückluftklappe und dosiert entsprechend warme Keimkasten-abluft ( $17^{\circ}\text{C}$  und 100 % r.F.) zur angesaugten Frischluft, bis die Solltemperatur ( $12^{\circ}\text{C}$ , 100 % r.F.) erreicht ist. Liegt nun der Außenluftzustand im Mollier-Diagramm unterhalb der eingezeichneten roten Linie im grünen Feld, führt die Luftmischung zu einem gesättigten Luftzustand am Keimkasteneintritt und die Luftbefeuchtung kann abgeschaltet werden. Der in unseren Breiten herrschende mittlere Luftzustand im Winterhalbjahr beträgt derzeit  $3^{\circ}\text{C}$  und 82 Prozent r.F. (blauer Punkt) und liegt im „grünen Bereich“.
2. Die Außenluft-Temperatur liegt über der Solltemperatur und es muss diese mit der Kälteanlage gekühlt werden. Wenn nun der Wassergehalt der Außenluft höher liegt als der Wassergehalt der gesättigten Eintrittstemperatur, in diesem Fall  $8,7\text{ g/kg}$ , wird im Kühlregister die Außenluft bis unter die Taupunkt-Temperatur abgekühlt und Wasser abgeschieden. Die abgekühlte Luft ist zu 100 Prozent gesättigt und die Luftbefeuchtung kann abgeschaltet werden. Im Mollier-Diagramm liegt dieser Bereich rechts neben der blauen Linie ebenfalls im grünen Feld.

3. Der Außenluftzustand erlaubt es nicht, auf eine Wasserverdüsung zu verzichten, um auf 100 Prozent Sättigung am Keimkasteneintritt zu kommen. Liegt dieser aber bzgl. der Enthalpie niedriger als die Enthalpie des gewünschten Luftzustands am Keimkasteneintritt, hier  $34,2\text{ kJ/kg}$ , führt die Wasserverdüsung wiederum zu einer adiabatischen Wasseraufnahme und zu einer Abkühlung der Luft bis zur Kühlgrenztemperatur, die unterhalb der Solltemperatur liegt. Jetzt kann auf den Betrieb der Kälteanlage verzichtet werden. Im vorliegenden Mollier-Diagramm liegen diese Luftzustände im gelben Feld.

### Relativierung des Austrocknungspotentials

Man sieht, wie die Kenntnisse der Luftzustände – Messung erforderlich! – und die richtige Interpretation mit Hilfe des Mollier-Diagramms zu Optimierungen und Einsparungen führen können. Jedoch ist die Angst vor Austrocknung des Keimguts im Keimkasten häufig nur auf die Austrocknung durch Trocknungspotential einer nicht gesättigten Zuluft fokussiert. Selbst wenn dieses gemäß obenstehenden Ausführungen mehr oder weniger vorhanden ist, findet diese Austrocknung nur innerhalb weniger Zentimeter in der untersten Schicht im Keimkasten statt, danach ist die Luft schon wieder gesättigt. Das Maß hierfür ist die Differenz der Wasserbeladung der Einströmluft in  $\text{g/kg}$  zum gewünschten Sättigungsstand, welches bei normalen Wetterbedingungen und periodischer Überprüfung akzeptabel sein kann. Das mindestens genauso große, aber meist noch größere Austrocknungspotential ist die Differenz der Wasserbeladung am Eintritt und am Austritt der Keimkastenluft.

Im oben genannten Beispiel liegt die Differenz des Wassergehalts zwischen ein- und austretender Luft  $12^{\circ}\text{C}$  auf  $17^{\circ}\text{C}$ , jeweils 100 Prozent r.F., bei  $3,4\text{ g/kg}$ . Das bedeutet, dass die durchströmende Luft im Keimkasten (mit der Dichte umgerechnet auf die Masse in  $\text{kg}$ )  $3,4\text{ g/kg}$  Wasser austrägt. Bei einer Standard-Luftleistung der Keimkasten-Ventilatoren von  $400\text{ m}^3/\text{h}$  und t Gerste als Grünmalz werden innerhalb eines Tages ca.  $40\text{ kg}$  Wasser pro Tonne Gerste als Grünmalz ausgetragen und der Weichgrad von angenommen  $45,0$  Prozent sinkt dadurch auf ca.  $43,5$  Prozent. Sollte jedoch mal man-



**Abb. 3**  
**Einsparpotential bei der Konditionierung der Keimkasten-Zuluft**

peratur ohne Qualitätsnachteile erhöhen, wird dadurch unmittelbar der Darrprozess bei gleicher Ventilatorleistung kürzer. Wenn man diesen Zeitvorteil nicht benötigt, könnte man auch im gleichen Verhältnis den Volumenstrom des Ventilators verringern. Wie schon eingangs beschrieben, verändert sich dadurch der Stromverbrauch merklich im Quadrat zum Verhältnis der Volumenstromänderung.

Und wer es ganz genau wissen und beurteilen möchte, kann darüber hinaus mit den Werten aus dem Mollier-Diagramm spezifische Kennzahlen bilden, z. B. wieviel Wärme bei verschiedenen Darrprozessvarianten eingesetzt werden muss, um eine gewisse Menge Wasser auszutreiben (z. B. kJ Wärme/g Wasser aus dem Quotienten  $\Delta h$  in kJ/kg und  $\Delta x$  in g/kg).

**Zusammenfassung**

Im Mälzungsprozess spielt Luft eine entscheidende Rolle und auf die Behandlung dieser Luft entfallen dabei bis zu 90 Prozent der gesamten Energiekosten einer Mälzerei in Form von Strom und Wärme. Eine relevante Charakterisierung eines Luftzustandes ist der Druck der Luft in ruhendem und bewegtem Zustand. Des Weiteren werden die in der Mälzerei vorkommenden Luftzustände und Prozesse wie Kühlen, Erwärmen, Befeuchten und Trocknen bei konstantem Druck im Mollier-Diagramm dargestellt. Werden einzelne Prozessschritte im Mollier-Diagramm dargestellt, können technologische, technische oder energetische Optimierungspotentiale erkannt werden.

Es kann z. B. aufgezeigt werden, dass die übliche Aufwärmung des Weichhauses im Winter, um zögerliche Ankeim-Vorgänge schneller in Gang zu setzen, eher eine Energieverschwendung darstellt. Des Weiteren können aus dem Mollier-Diagramm Bereiche für Außenluft-Zustände definiert werden, die es erlauben, bei der Konditionierung der Keimkasten-Zuluft auf den Betrieb der Luftbefeuchtungsdüsen und der Kälteanlage zu verzichten. Auch die Betrachtung des Darrprozesses im Mollier-Diagramm bietet die Möglichkeit, Optimierungspotentiale bezüglich Darrzeit, Strom- und Wärmeverbrauch unter technologischen Aspekten aufzuzeigen.

Somit lautete das Fazit: Das Mollier-Diagramm leistet wertvolle Dienste in der Mälzerei und sollte daher für den Mälzer immer als Hilfsmittel griffbereit zur Verfügung stehen. ■

gels Kälteleistung der Keimkastenkühlung oder durch andere Umstände der Keimkasten „durchgehen“ und die Ablufttemperatur dadurch statt auf 17°C auf z. B. 20°C ansteigen, werden in der „Einfangphase“ statt 3,4 g/kg nunmehr 6,0 g/kg (14,7 - 8,7 g/kg) ausgetragen und der Weichgrad sinkt in diesem Beispiel auf 42,5 Prozent. Dieser hohe Wasserverlust kann den Keimprozess mehr stören als eine nicht gesättigte Zuluft. Letztlich dreht es sich wieder um grundsätzliche Fragen der Dimensionierung, Auslegung und Investitionskosten, sowie auch Steuerungsmöglichkeiten und vorausschauende, kenntnisreiche Fahrweise.

**Weitere Optimierungsmöglichkeiten**

Das Mollier-Diagramm leistet auch hervorragende Dienste für fast alle Energiebetrachtungen bei der Behandlung von Prozessluft. Zu jedem Luftzustand kann im Mollier-Diagramm auch die Enthalpie und die Dichte der Luft herausgelesen werden. Bildet man

die Enthalpie-Differenz des Luftzustands vor und nach einem Prozessschritt, z. B. Kühlen oder Anwärmen der Luft, weiß man, wieviel Energie in kJ pro kg Luft hierfür benötigt wird. Ist der Volumenstrom in m<sup>3</sup>/h z. B. als Betriebspunkt in der Ventilator-Kennlinie bekannt, ergibt sich über die aus dem Mollier-Diagramm entnommene Dichte in kg/m<sup>3</sup> der Massenstrom der Prozessluft in kg/h, bzw. kg/s. Das Produkt aus Enthalpie-Differenz in kJ/kg und Massenstrom in kg/s ergibt direkt die für diesen Prozessschritt benötigte Leistung in kW (zur Erinnerung: 1kW = 1kJ/s).

Besonders interessant wird es, wenn man die Auswirkungen verschiedener technologisch möglicher Mälzungsvarianten vergleichen will. Um z. B. in der Darre das Grünmalz zu trocknen, muss über die Luft eine vorhandene Menge Wasser abtransportiert werden. Aus dem Mollier-Diagramm wird ersichtlich, dass die Aufnahme-Kapazität der Luft ( $\Delta x$  in g/kg) mit steigender Eintrittstemperatur zunimmt. Kann man im Darrprozess die Eintrittstem-