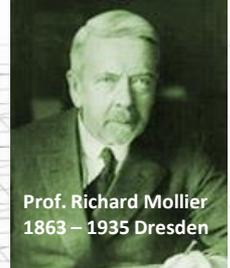


Potential für technologische und energetische Optimierung, dargestellt anhand des Mollier-Diagramms



Doemens 

54. Mälzereitechnische
Arbeitstagung, Oktober 2018

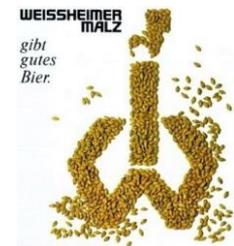
- Curriculum Vitae
- Die Luft und Charakterisierung des Luftzustands
- Das Mollier-Diagramm
- Anwendungsbeispiel Weichhaus-Erwärmung
- Anwendungsbeispiel Keimkasten-Befeuchtung
- Anwendungsbeispiel Schwelkprozess
- Anwendungsbeispiel Entscheidungshilfe Austausch WRG
- Zusammenfassung

Curriculum Vitae (short version)



Karl Weigt, Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing.

- 1974 – 1979 Weihenstephan, Brauwesen und Getränketechnologie
- 1979 – 1984 Air Fröhlich AG, Projektierung, Entwicklung
- 1992 – 2002 Weissheimer Malz, Betriebsleiter
- 2002 – 2017 Malteurop Deutschland, Geschäftsführer
- Seit April 2017 bmt Weigt, Handelsvertreter Malteurop



Letzter Vortrag bei Doemens....

...vor 37 Jahren zur 17. Mälzereitechnischen Arbeitstagung 1981

354
BRAVINDUSTRIE

Praxiserfahrungen mit Wärmerückgewinnungsanlagen und Darrenbeheizung mit dem Kreuzstrom-Wärmetauscher-System

Wärmerückgewinnung in Malzdarren

Anfang 1977, d. h. vor noch nicht ganz 5 Jahren, ist die erste Anlage zur Wärmerückgewinnung in Malzdarren nach dem heute bekannten System in einer deutschen Mälzerei in Betrieb gegangen. Die damaligen Energiepreise lagen bei etwa der Hälfte des heutigen Niveaus. Die Kapitalrückflußdauer für eine Wärmerückgewinnungsanlage in Malzdarren betrug ca. 4 Jahre. Durch die gestiegenen Energiepreise kann hingegen heute mit einer Amortisationszeit von etwa 2 Jahren gerechnet werden.

Eine Wärmerückgewinnungsanlage in der Abluft von Malzdarren ist heute auf Grund dieser wirtschaftlich interessanten Tatsache zur Standardausrüstung von Mälzereien geworden. Unseres Wissens sind auf der ganzen Welt weit über 200 Malzdarren mit diesen Systemen bereits ausgerüstet. Dies entspricht einem sehr hohen Sättigungsgrad, mindestens in westlichen Ländern. Lediglich in Anlagen mit sehr kleiner Benutzungsdauer, d. h. meist sehr kleinen Darren oder in Mälzereien



Dipl. - Ing. K. Weigt*

eines kreislaufverbundenen Systems ebenfalls aus korrosionsbeständigem Material und zugleich in Glattrohrausführung gebaut werden muß, hat dieses früher als erheblich kostengünstiger geltende Prinzip keinen wirtschaftlichen Vorteil bringen können. Der kreislaufverbundene Wärmetauscher wurde deshalb lediglich dort eingesetzt, wo aus baulichen Gründen ein Kreuzstrom-Wärmetauscher kaum realisierbar war. Der Energieeinsparungsverlust gegenüber dem Kreuzstrom-Wärmetauscher ist aber beim kreislaufverbundenen System im allgemeinen so hoch, daß damit auch größere bauliche Änderungen amortisiert werden können.

Leistungsstarke Dimensionierung

Bezüglich der leistungsmäßigen Ausführung hat sich in der Praxis nur der wirtschaftlich optimal ausgelegte Wärmetauscher durchsetzen können. Wie dies auch von wissenschaftlicher Seite von jeher gefordert wurde, bedeutet dies den Einsatz einer Austauschfläche von ca. 20 bis 25 m² je 1000 m³ Abluft. Nur mit dieser leistungsstarken Dimensionierung ist es möglich, einen

rückgewinnungssysteme verfügen, produziert. Die Praxis hat demnach den Beweis erbracht, daß eine Wärmerückgewinnung für Malzdarren zu einem unverzichtbaren Anlagenteil geworden ist.

Systemwahl

In den weitaus meisten Anlagen hat sich das Kreuzstrom-Wärmerückge-

Die Luft...

Unabdingbarer Gehilfe des Mälzers:

- Bringt Sauerstoff, führt Kohlendioxid ab
- Befeuchtet und trocknet das Keimgut
- Führt dem Keimgut Wärme zu und ab
- Verbraucht bei der Behandlung den größten Kostenanteil bei der Malzproduktion in Form von Wärme und Strom

Direkt messbar:

- Temperatur in °C
allen bekannt und oft gemessen
- Relativer Feuchtegehalt in %
vielen bekannt, in der Außenluft gut messbar, aber mangels geeigneten Systemen im Mälzungsprozess kaum gemessen, dennoch indirekt gut bestimmbar, mittels Mollier-Diagramm !
- Noch was ?!

... der Druck der Luft:

- **Luftdruck der Atmosphäre in hPa**
gegeben, nicht beeinflussbar und ständigen Veränderungen unterworfen
Relevant bei der Auslegung der Mälzerei hinsichtlich Standorthöhe ü.d.M.
Beispiel Malteurop Rostock Meereshöhe, Malteurop Langerringen 570 m ü.d.M.
Luftdruck normal: MER 1013 hPa, MEL absolut 941 hPa entspr. 93%
Extrem: z.B. Malteria Tropical, Bogota, Kolumbien, 2600m, 725 hPa, 72%
-> plakativ: viele unnütze Kubikmeter mit wenig nutzbarem Massenstrom
Auswirkung auf Auslegung aller Lufttechnik und Stromverbrauch!
- **Druckdifferenzen bei bewegter Luft in Pa**
wenig beachtet, selten gemessen und doch verantwortlich für den wesentlichen Stromverbrauch einer Mälzerei.
Für Fortgeschrittene: Unterscheidung in statischen und dynamischen Druck

Heute: Betrachtungen der Luftzustände im Mollier-Diagramm isobar bei Normaldruck

Das Mollier-Diagramm

auch h,x-Diagramm (früher i-x-Diagramm)

Kurvenschar in einem Koordinatensystem beschreibt Luftzustände (isobar) für folgende Parameter:

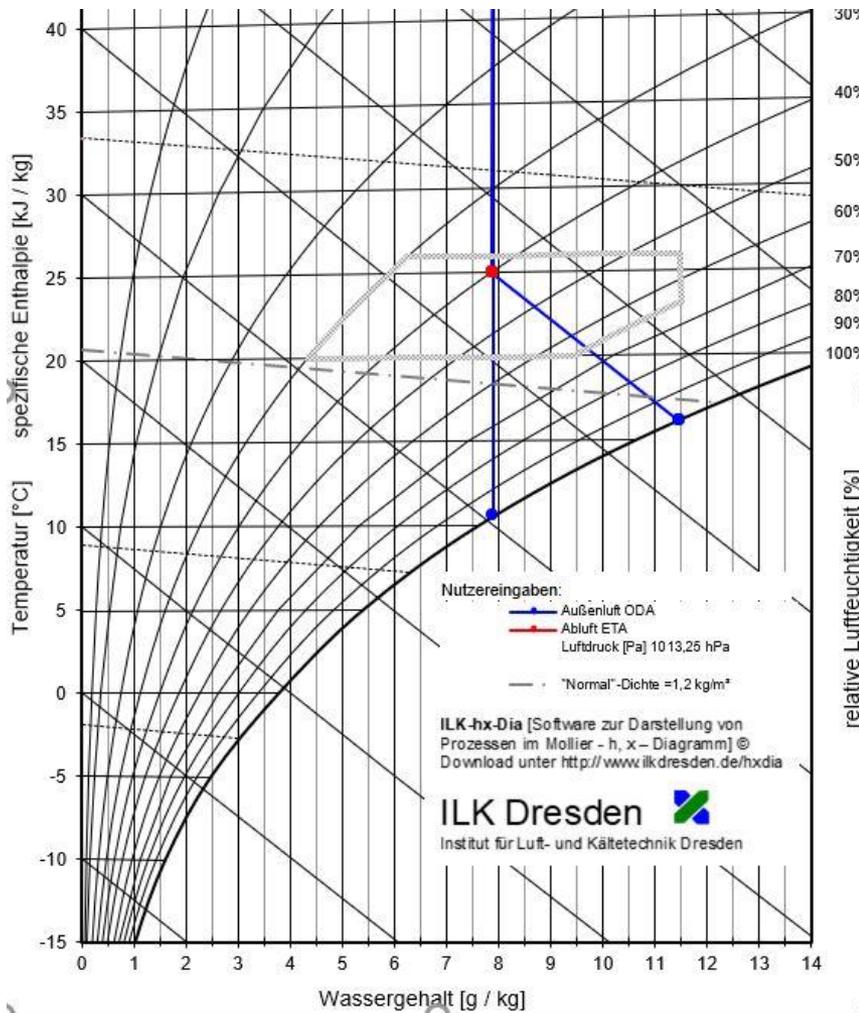
			Relevanz u.a. für:
• Temperatur		t in °C	Basiswert
• Relative Luftfeuchte (Phi)		φ in %	Basiswert
• Enthalpie (Energieinhalt) der Luft		h in kJ/kg	Energieberechnungen
• Wassergehalt (Beladung, absolute Feuchte)		x in g/kg	Darrprozess
• Dichte der Luft (Rho)		ρ in kg/m ³	Energie für Ventilatoren

Abgeleitete Informationen aus einem Zustandspunkt:

• Taupunkt-Temperatur		t in °C	Keimkasten-Kühlung
• Feuchtkugel-Temperatur		t in °C	Trocknung, Befeuchtung

Jeweils 2 Parameter charakterisieren den Luftzustand eindeutig und damit auch alle anderen Parameter

Beispiel: Zustandspunkt Mollier-Diagramm



- **Ausgangspunkt: 25 °C, 40 % r.F.**

daraus ergeben sich:

- Enthalpie: 45,3 kJ/kg
- Wassergehalt: 7,9 g/kg
- Dichte: 1,18 kg/m³

und die abgeleiteten Informationen bzw. Vorgänge:

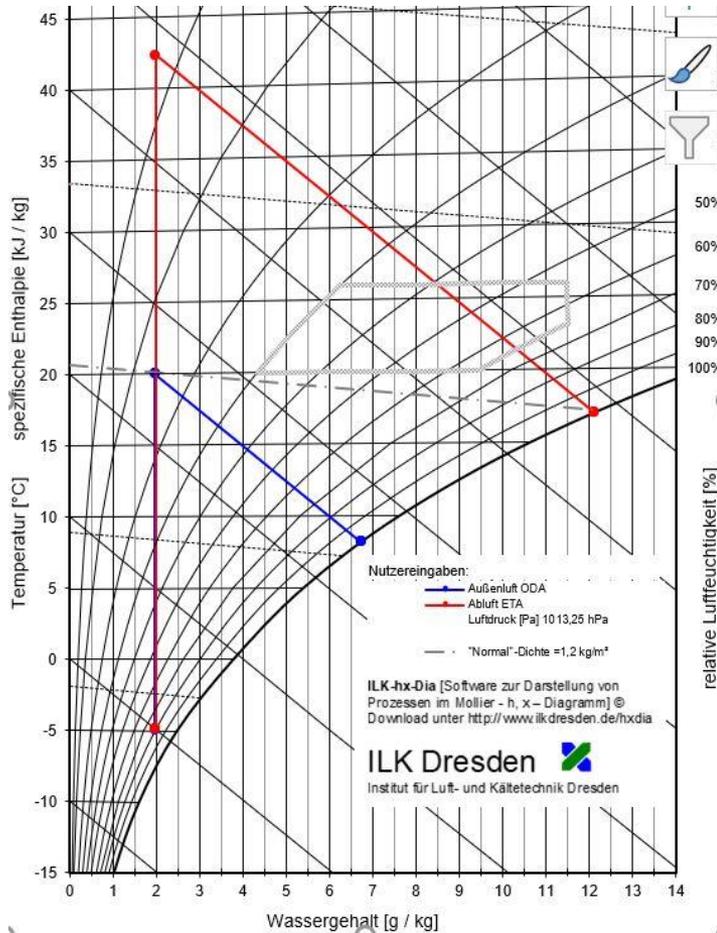
- Abkühlung: Linie gleichen Wassergehalts bis 100% r.F.
-> Taupunkt-Temp.: 10,5 °C
- Befeuchtung: Linie gleicher Enthalpie bis 100% r.F. (adiabate Wasseraufnahme)
-> Feuchtkugel-Temp.: 16,6 °C
- Erwärmung: Linie gleichen Wassergehalts

Winterprobleme:

- Weichgut zu kalt
 - > verzögerte Wasseraufnahme
- Nach dem Ausweichen Keimgut im KK zu kalt
 - > verzögerte Wärmeentwicklung
 - > verzögerte Ankeimung
 - > Zeit- und Qualitätsprobleme

Hilft ein Anwärmen des Weichhauses ?

-> Es lohnt einen Blick ins Mollier-Diagramm !



Beispiel: Außenluft -5 °C, 80 % r.F.

Maßnahme: Temperieren des Weichhauses auf 20 °C

Auswirkung: Mälzer fühlt sich wohl

Das Weichgut jedoch nicht:

Feuchtkugel-Temperatur 8 °C,

-> **Heizung sparen**

Theoretische Lösung:

Es müsste die Luft auf über 40°C angewärmt werden, damit im Weichgut über 16 °C ankommen

Praktische Lösung:

Erwärmung des Weichwassers, z.B. vorzüglich aus Abgas-Wärmenutzung des Luftherhitzers

Furcht vor Austrocknung des Keimguts

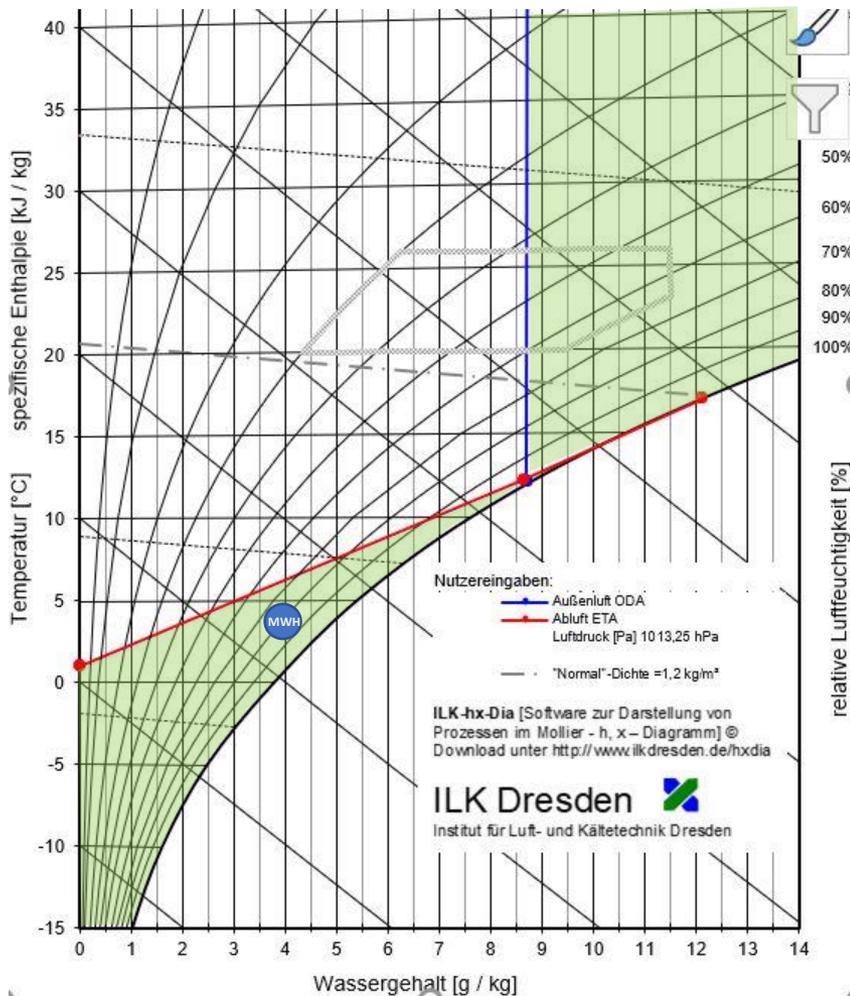
-> Wasserverdüsung unter Druck

Kosten für:

- Frischwasser
- Pumpenenergie
- Abwasseraufbereitung

Wirklich immer nötig ?

-> Es lohnt einen Blick ins Mollier-Diagramm !



Beispiel:

KK-Eintritts-/Austritts-Temp. 12/17 °C, je 100% r.F.

Rote Linie:

Mischungs-Linie Außenluft/KK-Abluft zur Temp-Regelung

-> Jeder Außenluftzustand unterhalb der roten Linie führt in der Mischung zu einem gesättigten Luftzustand am KK-Eintritt

Blaue Linie:

Grenzlinie Wassergehalt

-> Jeder Außenluftzustand mit einem höheren Wassergehalt führt nach der Kühlung auf KK-Eintrittstemperatur zur Sättigung der Luft

MWH: Mittelwert Winterhalbjahr 3 °C, 82% r.F.

296

Das Darren des Grünmalzes

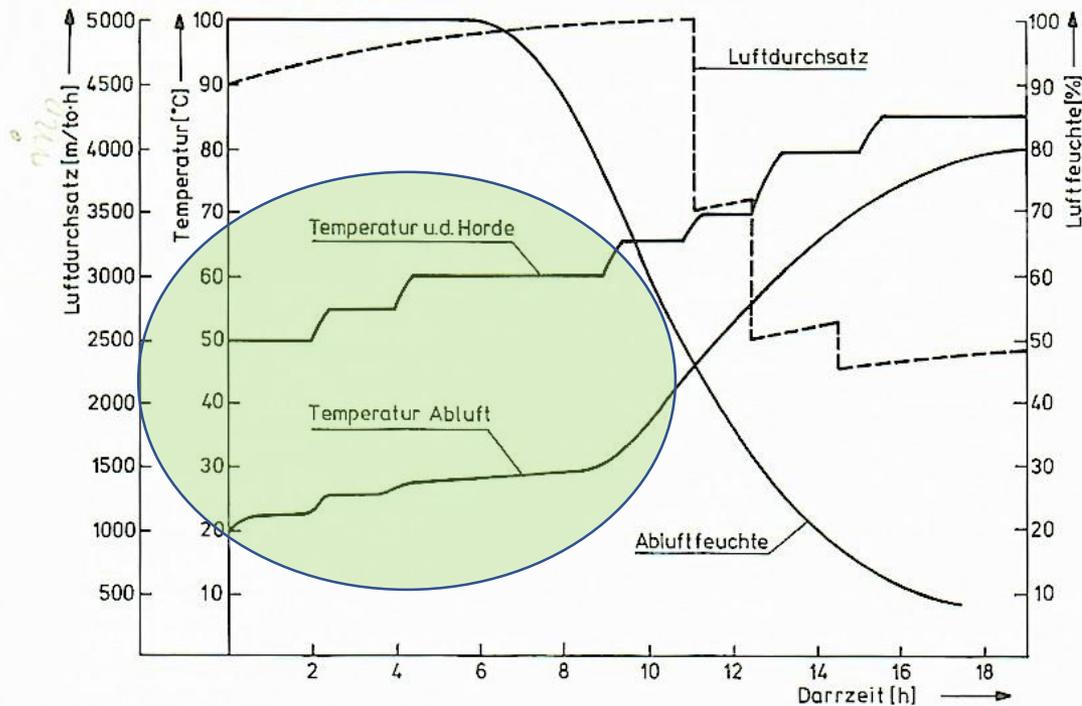


Abb. 216 Darrschema helles Malz: Einhordenhochleistungsdarre (ohne Rückluftverwendung)

Die Technologie der Malzbereitung, Prof. Dr. Ludwig Narziß, 6. Auflage 1976

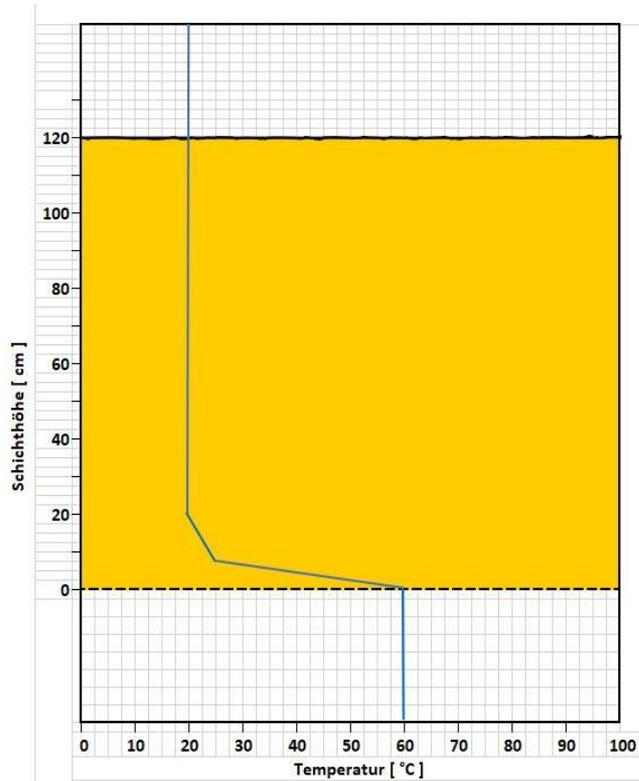
Physikalischer Aspekt:

Erwärmter Luft-Massenstrom strömt durch das feuchte Grünmalz, nimmt adiabatisch freies Wasser auf bis hin zur Sättigung. Das Grünmalz erwärmt sich bis zur Feuchtkugel-Temperatur

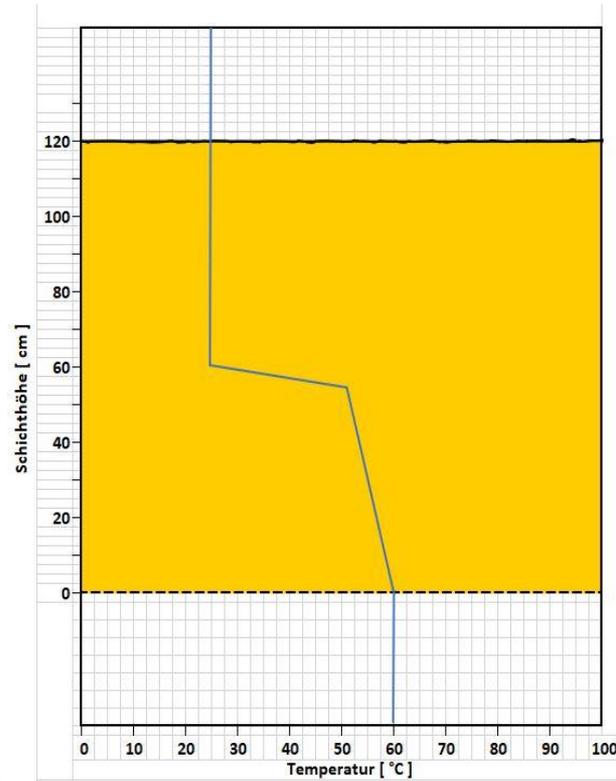
Wichtig: Dieser Vorgang findet innerhalb weniger Zentimeter in der Schütthöhe statt und schreitet von unten nach oben. Oben angekommen ist das gesamte freie Wasser verdampft -> "Durchbruch"

Dieser "Durchbruch" findet aber schon nach kurzer Zeit in der untersten Schicht statt und wandert nach oben.

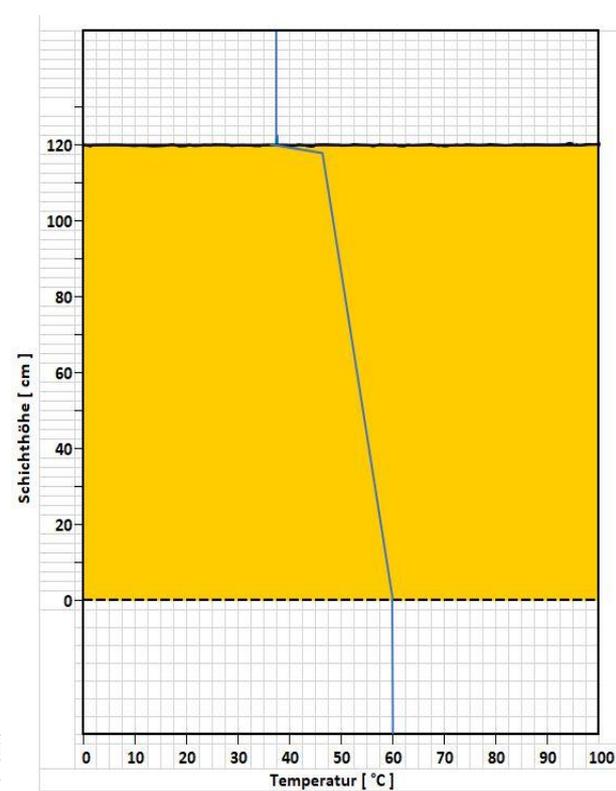
Temperaturverlauf in der Grünmalzschicht der Darre



Start Darre



Schwelken



Durchbruch

Technologischer Aspekt:

Nachlösevorgänge im Grünmalz in Abhängigkeit der Feuchtkugel-Temperatur und Dauer, bis hin zur teilweisen Überlösung mit z.B. Zufärbung.

Die gebildeten Enzyme sind in Abhängigkeit des Wassergehalts im Korn temperaturempfindlich.

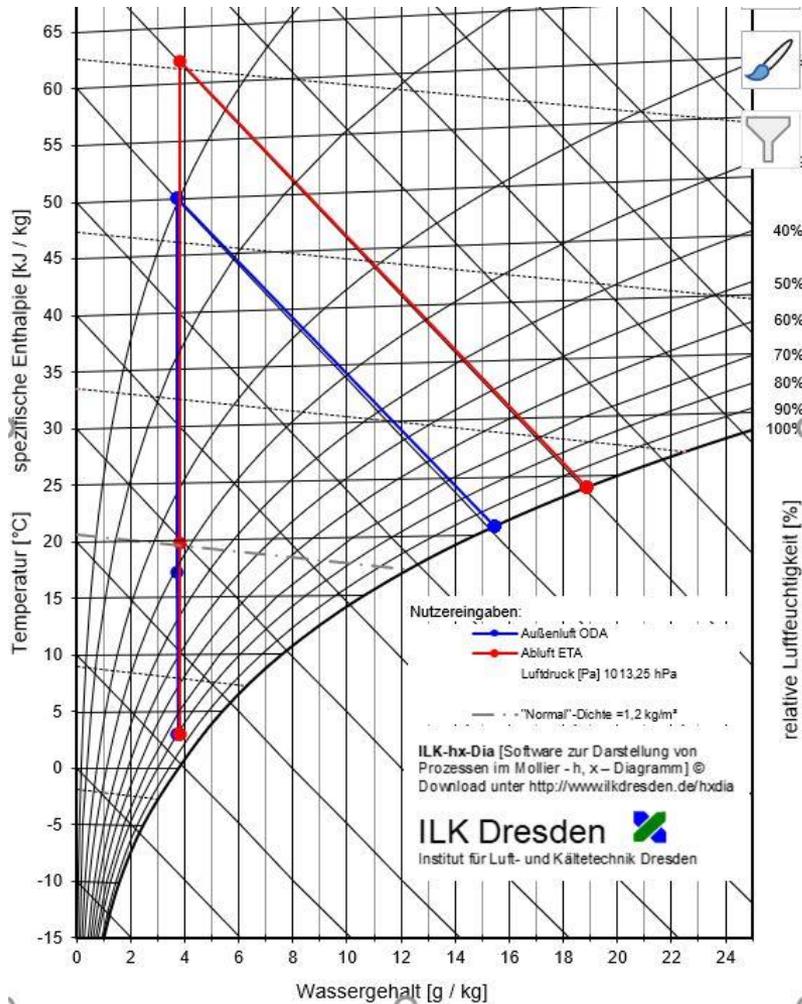
“Selbstschutz“: Solange freies Wasser vorhanden ist, kann die Korntemperatur aufgrund der Verdunstungskälte nicht überhitzen !

“Schonende“ Trocknung:

Aufgrund des “Selbstschutz“-Mechanismus und des stets vorhandenen Durchbruchs in der entsprechenden Schicht weniger ein Problem der Einströmtemperatur, sondern der Grünmalztemperatur (Feuchtkugel-Temperatur) und der Dauer der Nachlösung. Individuelle Grenzwerte -> Erfahrung aus Extrembedingungen im Sommer

-> Die Zunahme des Wassergehalts der Luft ist ein Maß für die Trocknung und wieder ein Fall für das Mollier-Diagramm

Das Schwelken im Mollier-Diagramm



Basis Frischluft:

Mittelwert Winterhalbjahr 3 °C, 82 % r.F., 3,7 g/kg

Vergleich:

1. “Schonende” Trocknung **50,0 °C**, 60,1 kJ/kg

-> Feuchtkugel-Temperatur **20,6 °C**, 15,3 g/kg

Frischlufte nach WRG **17,2 °C**, 26,7 kJ/kg

2. “Forcierte” Trocknung **62,0 °C**, 72,3 kJ/kg

-> Feuchtkugel-Temperatur **24,0 °C**, 18,8 g/kg

Frischlufte nach WRG **19,8 °C**, 29,4 kJ/kg

Auswertung: Die höhere Schwelktemperatur bewirkt:

Wasseraufnahme steigt: von Δx 11,6 g/kg auf Δx 15,1 g/kg

Heizbedarf steigt: von Δh 33,4 kJ/kg auf Δh 42,9 kJ/kg

Auswirkung: (in der Unterschieds-Periode)

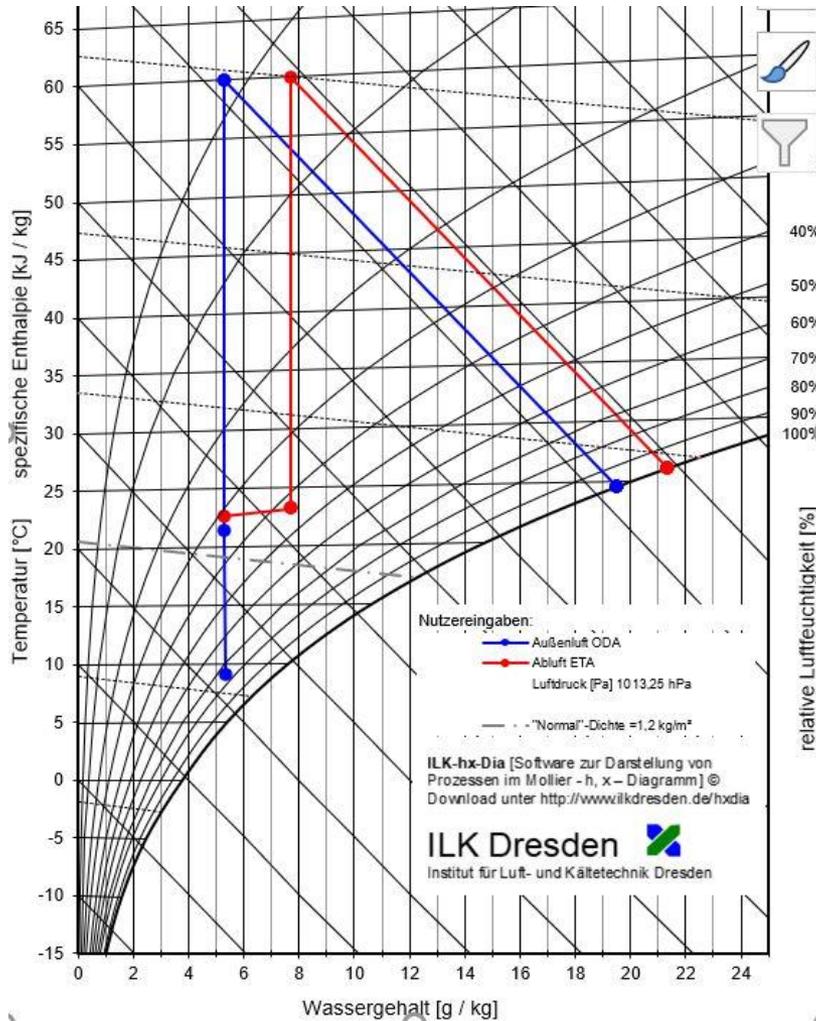
bei konstanter Lüfterleistung: **Zeitgewinn 23%** oder

bei konstanter Zeit: **Stromersparnis 40%**

Spez. Wärmebedarf: $\Delta h/\Delta x=2,88$ kJ/g, $\Delta h/\Delta x=2,84$ kJ/g

Wärmeersparnis 1,3%

Entscheidungshilfe Austausch WRG



Glasrohr-WT Darre Rohre irreparabel gebrochen:

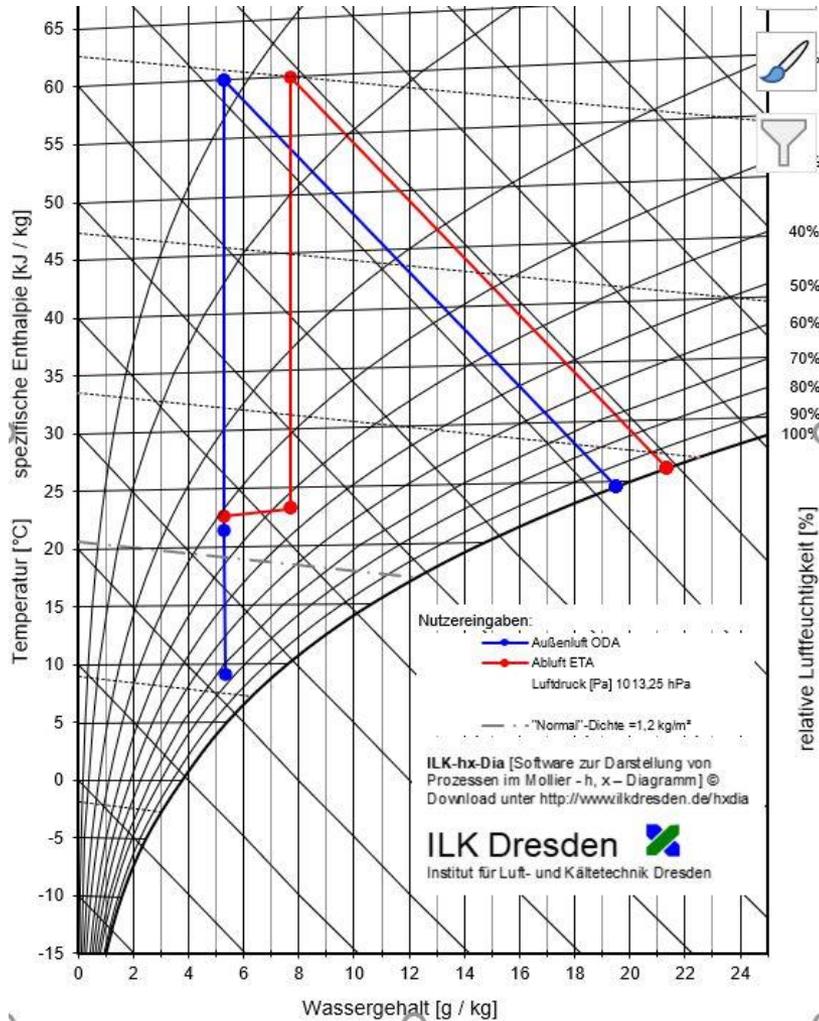
Beispiel: Mittleres Ausmaß -> entsprechend 15% Rückluftanteil

Befürchtungen:

- Zufärbung des Malzes, abhängig von individuellen Erfahrungen
- Höherer Stromverbrauch
- Höherer Wärmeverbrauch

-> Objektive Beurteilung mit Mollier-Diagramm

Entscheidungshilfe Austausch WRG



Basis Frischluft: Jahres-Mittelwert: 9°C, 75 % r.F

Datenpunkte Mollier-Diagramm	ohne Rückluft			mit 15% Rückluft		
	Temperatur °C	Wassergehalt g/kg	Enthalpie kJ/kg	Temperatur °C	Wassergehalt g/kg	Enthalpie kJ/kg
Außenluft	9,0	5,3	22,5	9,0	5,3	22,5
nach WT (80%)	21,4	5,3	35,1	22,6	5,3	36,3
vor Erwärmung	21,4	5,3	74,4	23,2	7,7	43,0
Schmelktemp.	60,0	5,3	74,4	60,0	7,7	80,7
Ablufttemp.	24,5	19,5	74,4	26,0	21,3	80,7
Diff. Wassergeh.		14,2			13,6	
Diff. Enthalpie			39,3			37,7
Spez. Energie kJ/g		2,768			2,772	
Energieverbrauch %		100			100,16	
Trocknungsleistung %		100			95,77	
Stromverbrauch %		100			109,02	

Auswertung der Erkenntnisse aus dem Mollier-Diagramm:

Beispiel Mälzerei:

- Malzproduktion: 30.000 t/a
- Stromdaten: Spez. Stromverbrauch Darre 40 kWh/t FM, Strompreis 150 €/MWh
- Wärmedaten: Spez. Wärmeverbrauch Darre 700 kWh/t FM, Gaspreis 42 €/MWh (unterer Heizwert)

Finanzielle Auswirkungen:

- Stromkosten: Mehrverbrauch 3,6 kWh/t, Mehrkosten pro Jahr 16.200 €
- Gaskosten: Mehrverbrauch 1,1 kWh/t, Mehrkosten pro Jahr 1.386 €

-> Mit einer Einsparung von ca. 18.000 €/a kann eine Ersatzanschaffung des Glasrohr-Wärmetauschers nicht sinnvoll amortisiert werden

Empfehlung:

Statt Ersatz-Investition, Einbau eines Glasrohr-WT neuester Generation ("HiF", 94% Erwärmungsgrad)

-> Wärmeverbrauch sinkt auf 94,4 % oder 661 kWh, Einsparung 39 kWh/t oder 50.000 €/a

-> Damit lässt sich der Mehrpreis "HiF" vernünftig amortisieren.

Das Mollier-Diagramm als täglicher Helfer des Mälzers bei allen Fragen rund um die Luft

- Technologie
- Energieverbrauch
- Investition

Dringende Empfehlung:

- Tagsüber auf dem Schreibtisch
- Nachts unter dem Kopfkissen

Vortrag zum Download unter: www.bmt-weigt.de

....Alles klar ?



Vielen Dank fürs aufmerksame Zuhören



Fragen ?

