

Labortemperiereinrichtung

Hochpräziser TFT Forciertester zur künstlichen Alterung*

Wolfgang Zaremski, Bottrop, sowie als Koautoren Holger Schmidt und Peter Dowidat, Dortmund

Mündige, gut informierte Verbraucher mit entsprechend kritischem Bewusstsein, sachkundige Verbraucherschutz-Organisationen und immer weiter verschärfte EU-Richtlinien und -Gesetze zwingen insbesondere die Hersteller von Lebensmitteln und leicht verderblichen Waren verlässlich die Haltbarkeit ihrer Produkte deutlich zu kennzeichnen. Die laufende, zeitnahe Überwachung und Kontrolle der Waren schon während der einzelnen Produktionsschritte ist daher zur Vorabbestimmung der Haltbarkeit unerlässlich. Moderne Labortemperiereinrichtungen simulieren im Zeitraffer die künstliche Produktalterung und ermöglichen somit präzise Aussagen zur Mindesthaltbarkeit. Am Beispiel der Mindesthaltbarkeitsbestimmung (MHD) von Bier soll ein neu entwickelter, hochpräziser TFT Forciertester vorgestellt werden.

Der Forciertest in Brauereien

Zur Vorhersage der zu erwartenden chemisch-technischen Haltbarkeit eines Bieres führt man in Brauereien den so genannten „Forciertest“ durch. Im Laufe der Lagerung eines Bieres in dem abgefüllten Gebinde setzt ein Alterungsprozess des Bieres ein. Dabei lässt die Geschmacksstabilität des Bieres nach und gleichzeitig nimmt die Trübung zu. Diese Trübung ist hauptsächlich auf Ausfällen von im Bier befindlichen Eiweißen zurückzuführen.

Die Intensität dieses Alterungsprozesses hängt sehr stark von äußeren Einflüssen, wie Temperatur und Belastung durch Lichteinstrahlung, ab. Aus diesem Grunde ist ein Bier, welches in einem kühlen dunklen Keller lagert viel länger haltbar (meist sogar länger als auf dem MHD angegeben) als ein Bier, welches hell und warm lagert (z. B. im Schaufenster einer Tankstelle).

Um in einer Brauerei recht zeitnah nach der Abfüllung eine Vorhersage über die zu erwartende Haltbarkeit des Bieres machen zu können, versucht man den Alterungsprozess unter definierten Bedingungen zu forcieren und von der Trübungszunahme des geprüften Bieres auf die zu erwartende Haltbarkeit der Charge unter Praxisbedingungen zu schließen.

Da die Zunahme der Trübung vom Kunden optisch wahrgenommen werden kann

(und als negativ empfunden wird) und außerdem im Brauereilabor auch einfacher gemessen werden kann, als die Abnahme der Geschmacksstabilität, wird die Trübung als Indikator für den Alterungsprozess herangezogen.

Entsprechend der international üblichen Analysevorschrift geht man bei diesem Forciertest folgendermaßen vor:

- Chargenrepräsentative Probenabnahme.
- Messung der Ausgangstrübung mit einem Trübungsphotometer. Angabe der Trübungsergebnisse in [EBC]. Übliche Ausgangswerte sind dabei 0,2–0,6 EBC.
- Definierte Forcierung des Alterungsprozesses durch abwechselnde Lagerung des Bieres bei +60 °C und 0 °C.

Diese definitive Forcierung des Alterungsprozesses ist in der allgemein üblichen Analysenvorschrift wie folgt beschrieben:

- 24h Haltephase bei +60 °C
- 24h Haltephase bei 0 °C
- Jeweils am Ende der 0 °C – Phase wird die Trübungszunahme gemessen.

Der Temperierzyklus wird so lange wiederholt, bis eine Trübungszunahme von 2 EBC vom Ausgangswert gemessen wird.

Die Anzahl der benötigten Zyklen (man spricht hier von „Warmtagen“) multipliziert mit einem produktspezifischen Faktor gibt einen Rückschluss auf die zu erwartende Haltbarkeit in der Praxis. Der genaue jeweilige Faktor muss für jedes

zum Autor

Dipl.-Ing.
Wolfgang
Zaremski,
Geschäftsführer der
Frigo-Sol GmbH,
Bottrop



Produkt erstellt werden, grob kann man sagen, dass ein Warmtag etwa einer Haltbarkeit in der Praxis von 30 Tagen entspricht.

Die Mindesthaltbarkeit (MHD) kann demnach nach folgender Formel errechnet werden:

$$\text{MHD} = f \times n$$

MHD = Mindest-Haltbarkeits-Datum
f = Produktspezifischer Faktor
n = Anzahl Zyklen künstliche Alterung („Warmtage“)

Forciertest gestern

In der Praxis wurde bisher der Forciertest nach folgenden drei Methoden durchgeführt:

1. Temperierung der Prüflinge in zwei separaten Wasserbädern mit konstanten Temperaturen von +/- 0 °C bzw. + 60 °C. Die Flaschen werden hierbei zu jeweils festen Uhrzeiten manuell umgesetzt.
2. Automatische Temperierung der Flaschen in einem Klimaschrank.
3. Automatische Temperierung der Flaschen in einem handelsüblichen Wechselltemperierbad.

* Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 18. 11. 2005 in Würzburg

Praxisproblematik beim Forciertest

Die Problematik bestand hauptsächlich in der schlechten Reproduzierbarkeit der Proben.

Zurückzuführen ist dies auf die in der Analysenvorschrift nicht genau beschriebene Phase des Temperaturwechsels sowie der großen feststellbaren Inhomogenitäten innerhalb der verwandten Messsysteme:

1. Beim manuellen Umsetzen der Prüflinge wurde in der Regel die Flasche zunächst bei Raumtemperatur stehen gelassen, um ein Platzen durch zu schnelles Umsetzen von Wasserbad mit z.B. +60 °C nach 0 °C zu vermeiden.

In der Praxis wurde somit die Phase des Umsetzens jedes Mal etwas anders durchgeführt (z. B. vor der Frühstückspause Flasche aus erstem Bad nehmen, nach der Frühstückspause wieder ins nächste Bad setzen; was

aber wenn ein Telefonat oder sonstiges dazwischenkommt?). Des Weiteren wird beim manuellen Umsetzen die Badtemperatur für einen nicht zu spezifizierenden Zeitraum von der erforderlichen Solltemperatur abweichen. Der Grund ist relativ einfach nachvollziehbar: Durch das Einsetzen der Prüflinge mit der Temperatur X abweichend von der Ist/Soll-Badtemperatur und der Wärmemenge Q_{Fl} in das Tauchbad, wird sich in dem jeweiligen Tauchbad für eine gewisse Zeit eine neue Mischtemperatur einstellen. Die Zeitspanne für das Wiederabkühlen des Tauchbades auf 0 °C bzw. für das Wiederaufheizen auf +60 °C geht als undefinierter Fehler mehr oder weniger unkontrollierbar mit in die Bewertung ein.

2. Bei den automatisierten Systemen werden diese Probleme zwar vermieden, jedoch wurden bisher bei den verschiedenen Systemen sehr unterschiedliche Wechselzeiten erreicht. Je nach Kältekapazität der Schränke oder Wasserbäder wurden Temperierzeiten zum Abkühlen von 60 °C auf 0 °C von bis zu 12 Stunden benötigt, während andere Systeme den Wechsel in 3 Stunden oder nach noch kürzeren Zeitspannen erzielten.

Dies führte dazu, dass Tests, welche mit verschiedenen Gerätschaften durchgeführt wurden, nicht miteinander vergleichbar sind. Dies ist von den großen Brauereikonzernen mit verschiedenen Braustätten nicht länger toleriert worden.

Ein weiteres Praxisproblem war die mangelhafte Homogenität innerhalb der Systeme. Vor allem bei den Wechseltemperaturschränken war die Homogenität innerhalb des Systems so schlecht, dass z.B. bei der Untersuchung von 36 Flaschen aus einer Charge je nach Positionierung der Flasche im Tauchbad stark unterschiedliche Ergebnisse mit einer Abweichung von bis zu 20% zum Mittelwert gemessen wurden. Ergebnisse mit diesen Prüfeinrichtungen konnten demnach getrost als „unbrauchbar“ bezeichnet werden.

Zusätzlich ist bei den bisher handelsüblichen Wechseltemperaturwasserbädern häufig



Bild 1 Optimisiertes Tauchbad mit Edelstahl-Direktverdampfer für 40 Prüflinge bei konstanter Homogenität

TFT Diagramm Trübungsverteilung Serien -Nummer: 04010 20.05.2005

EBC -Mittelwert 3,42

3,4 99%	3,42 100%	3,46 101%	3,35 98%	3,4 99%	3,39 99%	3,41 100%
3,4 99%	3,44 101%	3,45 101%	3,49 102%	3,36 98%	3,4 99%	3,47 101%
3,47 101%	3,43 100%	3,41 100%	3,44 101%	3,37 98%	3,42 100%	3,4 99%
3,34 98%	3,3 98%	3,4 99%	3,4 99%	3,36 98%	3,49 102%	3,47 101%
3,42 100%	3,4 99%	3,42 100%	3,34 98%	3,41 100%	3,4 99%	3,36 98%

Farbe Gelb = 100% = Mittelwert

Bild 2 Während der Temperaturwechselphasen garantiert der neue TFT Forciertester die gleiche Homogenität der Prüflinge

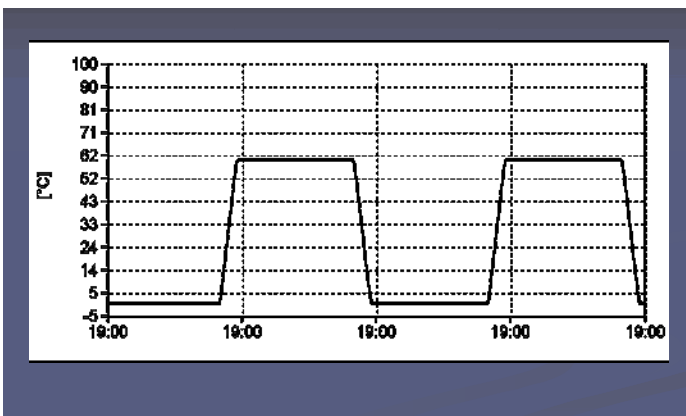


Bild 3 Temperaturwechselphase während der Testläufe für die differenzierten Betriebspunkte

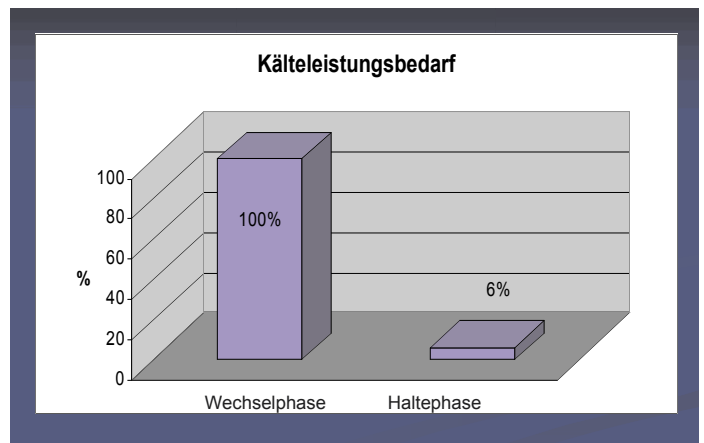


Bild 4 Erforderliche Leistungserhöhung um 15%

die Anpassung der Umwälzmenge des Trägermediums zur Kälteleistung so mangelhaft aufeinander abgestimmt, dass auch hier eigentlich nur unbrauchbare Werte produziert und bewertet wurden.

Auf Basis dieser Negativerfahrungen wird von den Anwendern schon lange ein einheitlich, überall auf der Welt reproduzierbarer, Standard-Forciertest gefordert. Der hier vorgestellte neue TFT Forciertester erfüllt diese Forderung.

Anforderungen an Brauerei Standard-Forciertester

Aufgrund der vorbeschriebenen Praxis-Problematiken wurden die Anforderungen an ein neues Brauerei Standard Forciertestsystem neu definiert. Gefordert wird:

1. Ausreichende Wasserbadkapazität für 20 bis 40 Prüflinge
2. Durchführung der Tests mit genau definierten, reproduzierbaren Temperaturwechseln von exakt 3 Stunden Dauer

3. Zeitgenaue Haltephasen bei genau definierter Temperatur mit minimal zulässigen Abweichungen
4. Konstante Homogenität der Prüflinge während der Messung
5. Automatisierter Testlauf nach Standard Programmen
6. Einfache Generierung von kundenspezifischen Programmabläufen
7. Einfache und übersichtliche Ergebnisverwaltung und Auswertung
8. Einfaches und fehlertolerantes Handling durch die Betreiber

Auf Grundlage des gewünschten Anforderungsprofils wurde das neue Brauerei-Standard Forciertestsystem entwickelt.

Forciertest im Kompaktgehäuse mit integriertem Wasserbad

Umfangreiche strömungstechnische Versuche schufen die Grundlagen für das optimierte (Bild 1) Wasserbad, in dem bis zu 40 Prüflinge unter Behaltung konstanter Homo-

genität getestet werden können. Eine integrierte Umwälzpumpe pumpt permanent über die speziell entwickelten Aus- und Einläufe die Trägerflüssigkeit mit konstanter Geschwindigkeit über den Edelstahl-Direktverdampfer, die elektrischen Heizelemente, so wie über die eingesetzten Prüflinge. Die konstante Umlaufmenge und Geschwindigkeit garantieren besonders während der Temperaturwechselphasen die gleiche Homogenität (Bild 2) aller eingesetzten Prüflinge.

Anforderungen an die Regeltechnik und den Kältekreislauf

Interdisziplinär mussten für folgende Anforderungen neue technische Lösungen entwickelt werden:

- Ausreichende Kälteleistung für den garantierten Temperaturwechsel von +60°C auf 0°C innerhalb von 3 Stunden, d.h. exakt 1 Kelvin Temperatursenkung in 3 Minuten.

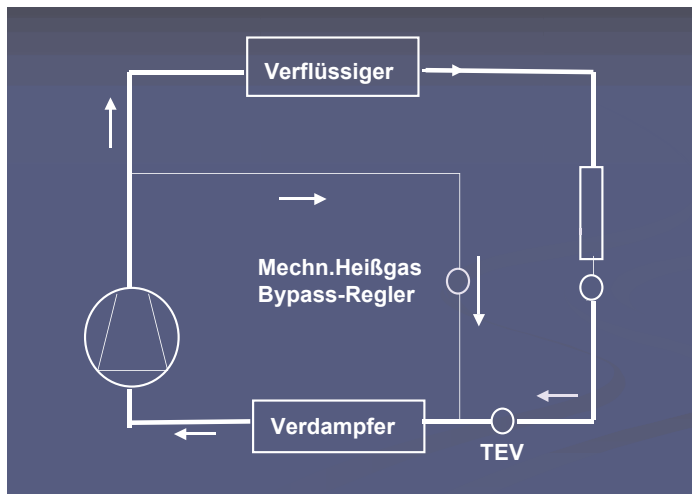


Bild 5 Klassische Heißgas-Bypass-Leistungsregelung

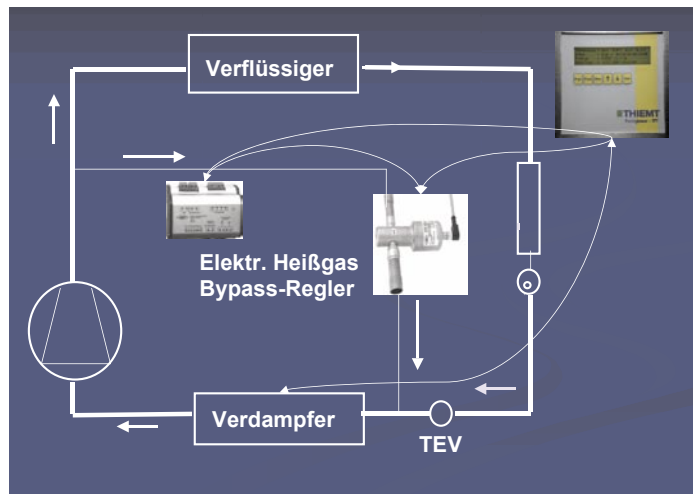


Bild 6 Elektronische Heißgas-Bypass-Regelung

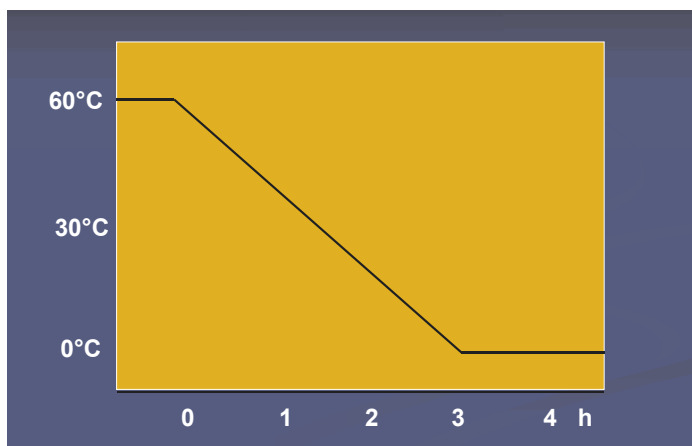


Bild 7 Temperaturvorgaben Tauchbad

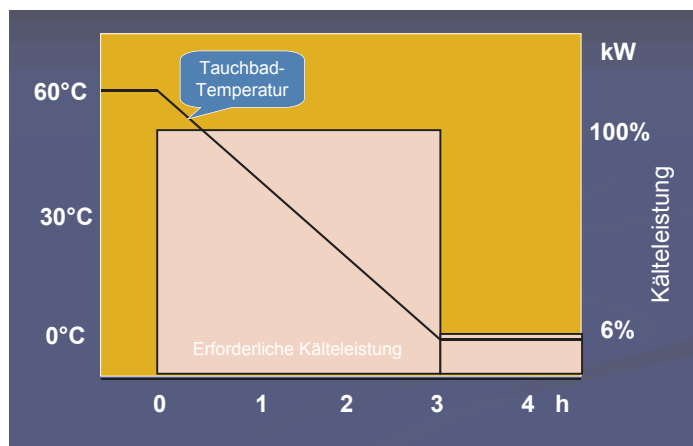


Bild 8 Erforderliche Kälteleistung

Auf Kundenanforderung gegebenenfalls Realisierung auch in noch kürzeren Zeitabschnitten.

- Ausreichende Heizleistung für den garantierten Temperaturwechsel von 0°C auf +60°C innerhalb von 3 Stunden, d. h. exakt 1 Kelvin Temperaturanstieg in 3 Minuten. Auf Kundenanforderung gegebenenfalls auch in noch kürzeren Zeiträumen.
- Einhaltung einer maximal zulässigen Temperaturabweichung von +/-0,1 K während der Wechselphasen.
- Konstante Temperatur (+/-0,1 K) während der 24-stündigen Haltephasen bei 0°C oder bei + 60°C Badtemperatur.
- Verwendung eines weltweit verfügbaren Trägermedium für das Tauchbad, hier wurde H₂O gewählt.
- Einhaltung einer konstanten Homogenität aller Prüflinge während der Versuchsreihen.
- Automatisierter Testlauf nach Standard- oder Kundenspezifischen-Programmen.
- Integriertes Probenhandling inklusive automatisches Einlesen der Trübungswerte und deren Auswertung.

Die Realisierung

Grundannahmen

Auf Basis der rechnerisch ermittelten Kälteleistungen für die differenzierten Betriebspunkte während der Testläufe (Bild 3), Temperaturwechsel (Start bei + 60°C), kontinuierliche Abkühlung um 1 Kelvin innerhalb 3 Minuten, Haltephase bei +/- 0°C für drei Stunden, musste die Kälteanlage in der Leistung um den Faktor 15 (Bild 4) regelbar werden

Es galt daher eine Kälteanlage mit folgenden Eigenschaften zu realisieren:

- Ausreichende Kälteleistung in der Start- und Temperaturwechselphase
- Automatische Reduzierbarkeit der Kälteleistung ca. um den Faktor 15 während der Temperaturwechselphase bis zum Erreichen der Haltephase
- Garantie der Anlagenbetriebsicherheit durch ausreichende Verdichterlauf- und -Stillstandszeiten
- Entwicklung einer hochpräzisen Steuer- und Regelsoftware mit P/I-Charakteristik

Die Umsetzung

Folgende grundlegende Kälteanlagenkonzepte wurden angedacht:

- Verbundanlage
 - Verbundanlage mit einem oder mehreren frequenzgeregelten Verdichtern
 - Einzelverdichter im Frequenzumrichterbetrieb
 - Digital Scroll
 - Klassische Heißgas-Bypass Leistungsregelung mit mechanischem Regler
 - Innovative Heißgas-Bypass Leistungsregelung mit elektronischem Regelventil
- Auf Basis vorgenommener Systemvergleiche Kältetechnik mussten nach den theoretischen Vorüberlegungen u. a. aus Kosten-, Platz-, und Gewichtsgründen viele Lösungsansätze ausscheiden. Es wurden daher nur noch folgende Versuche gefahren:
- Klassische Heißgas-Bypass Leistungsregelung mit mechanischem Bypass-Regler (Bild 5)
 - Punktgenaue Heißgas-Bypass Leistungsregelung mit elektronischem Regelventil (Bild 6)

Die Versuchsphase

- Die klassische Heißgas-Bypass Leistungsregelung mit mechanischem Regler konnte die gestellten Anforderungen an die Regelgüte nicht erfüllen. Insbesondere die geforderte maximale Temperaturtoleranz von $\pm 0,1$ K zur Solltemperatur konnte nicht eingehalten werden. Des Weiteren reduzierte sich durch die unvermeidbare Eisbildung am Verdampferpaket bei einer Tauchbadtemperatur nahe $+2$ bis $+1$ °C die Kälteleistung so rapide, dass der Haltepunkt ± 0 °C Tauchbadtemperatur gar nicht erreicht werden konnte.

Dieser Lösungsansatz wurde daher nach den ersten Testreihen verworfen. Alle weiteren Lösungsansätze wurden jetzt auf die elektronische Heißgasbypass Variante fokussiert.

Dabei kristallisierten sich als besondere Praxisprobleme heraus:

- Das Erreichen und Halten von ± 0 °C Tauchbadtemperatur
- Die punktgenaue Anpassung der Kälteleistung an den tatsächlichen Bedarf während der 24-stündigen Haltephasen bei der definierten Tauchbad-Solltemperatur von ± 0 °C
- Der gravierende Einfluss der Eisbildung am Verdampferpaket während der Abkühlphasen vor dem Erreichen der Haltetemperatur auf die Kälteleistung

Der Regler

Die gewünschte Einhaltung der Tauchbad-Temperaturvorgaben (Bild 7) während der Prozessdauer erforderte die Entwicklung vollkommen neuer Regelstrategien und -Techniken.

Unter der Annahme, dass während der Abkühlphase die erforderliche Kälteleistung pro Zeiteinheit (Bild 8) nahezu konstant bleibt, reicht es hier schon aus, wenn der Controller mit seiner P/I-Charakteristik die durch die niedriger werdenden Sauggasttemperaturen reduzierte Verdichterleistung (Bild 9) permanent an den tatsächlich erforderlichen Kältebedarf anpasst.

Erst beim Wechsel von der Kühl- zur Haltephase muss der Regler die Kälteleistung schlagartig an den dann stark reduzierten Kältebedarf von jetzt nur noch ca. 6% anpassen.

Durch Kopplung des Kälteerzeugungsprozesses an die Anwendung wird über den Regler die hierzu notwendige Dynamik erzeugt. Durch das Erstellen einer mathematischen Modellbildung konnten die entsprechenden Steuer- und Regelalgorithmen optimal auf das System abgestimmt werden. Hierdurch wurde das dynamische Verhalten anwendungsspezifisch entscheidend gesteigert.

Die neu entwickelte P/I-Pulspaketregelung steuert sicher und zuverlässig den Öffnungsgrad des elektronischen Alco-Bypass-Regler EX 5 über eine entsprechende Schrittmotorsteuerung bedarfsgerecht nach der momentan tatsächlich erforderlichen Kälteleistung. Der Öffnungsgrad des Bypass-Reglers kann dabei stufenlos zwischen 0% und 100% variiert werden.

Zur Definition des optimalen Betriebspunktes kommuniziert der Regler permanent mit der Schrittmotorsteuerung und adaptiert selbständig die Regelcharakteristik auf die erforderlichen Betriebsbedingungen. Die vorgegebenen gewünschten Betriebszustände werden somit gezielt einreguliert.

Die unvermeidbare Eisbildung am Verdampferpaket während der Kühlphase stellte ein besonders schwerwiegendes technisches Problem dar.

Wie bereits vorbeschrieben, führte die übermäßige Eisbildung zu einer Reduzierung der Kälteleistung, mit der Folge, dass die Tauchbad-Haltetemperatur nicht erreicht werden konnte.

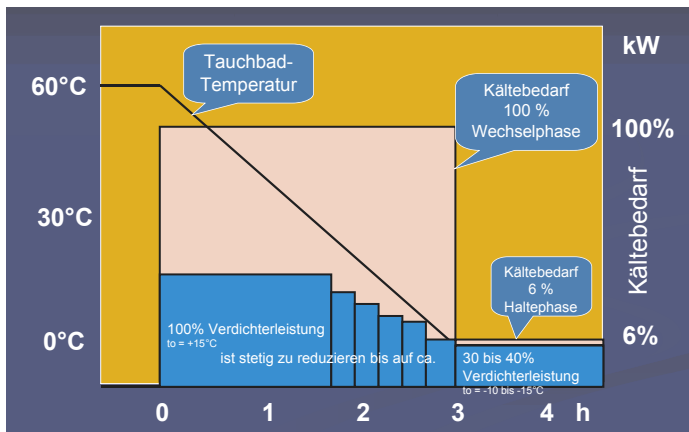


Bild 9 Verdichterleistung bei $t_0 = +15^\circ\text{C}$ bis -15°C

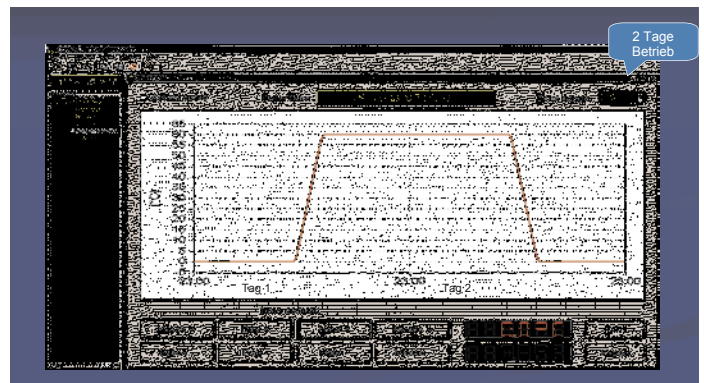


Bild 10 Soll-/Istwert-Regelungsverlauf über die Dauer von 2 Tagen

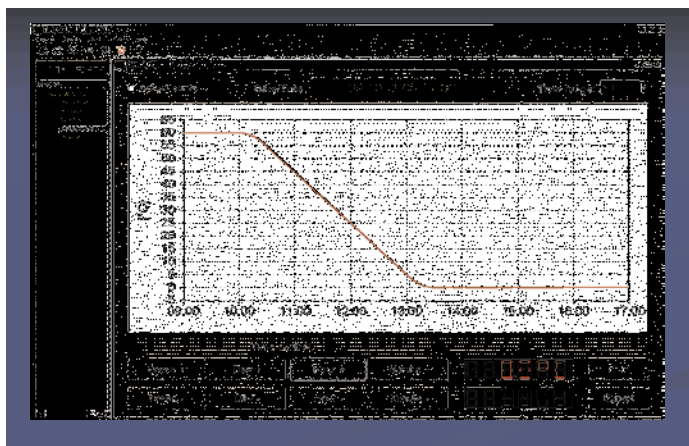


Bild 11 Soll-/Istwert-Regelungsverlauf über die Dauer von 8 Stunden

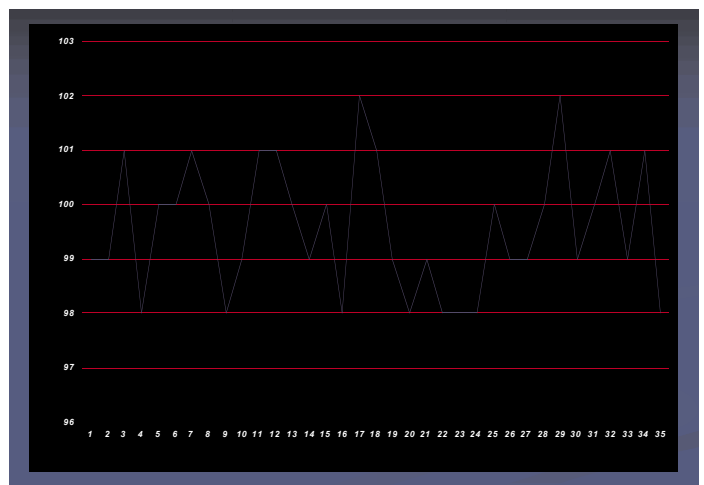


Bild 12 Trübungsverteilung nach durchgeführtem Test

Durch einen Verfahrenstrick konnte das Problem behoben werden und gleichzeitig das Eis sinnvoll zur Tauchbadtemperaturstabilisierung genutzt werden.

So registriert die Regler-Software bereits bei Beginn der Eisbildungsphase am Verdampfer die Tendenz eines Temperaturanstiegs über den maximal zulässigen Toleranzbereich hinaus. Die Pulspaketregelung reagiert. Auf Basis dieser Tendenzmeldung wird definiert durch die Pulspaketregelung die dem Verdampfer zugeleitete Heißgasmenge überproportional erhöht und zeitlich länger zugeführt. Hierdurch kommt es zu einem Absprennen des bereits um die Verdampferrohre gebildeten Eispanzers. Das Eis verteilt sich im Tauchbad, so dass die im Eis gespeicherte Schmelzenthalpie als latenter Kältespeicher genutzt wird und die Tauchbad-Temperatur bei 0°C mit konstant hält.

Das Ergebnis

Der Kältekreislauf mit elektronischer Heißgas-Bypass Leistungsregelung, gesteuert über eine neue, speziell für diese Anwendung entwickelte P/I-Pulspaketregelung wurde als ideale Endversion für die Serienproduktion übernommen.

Punktgenau können ab sofort alle vorgegebenen oder gewünschten Sollwertverläufe (Bild 10/11) optimal eingeregelt werden. Die jeweils nach der 0°C -Phase gemessene Trübungsverteilung der eingesetzten Prüflinge ist in Bild 12 dargestellt. Alle 35 getesteten Prüflinge liegen mit den EBC Werten innerhalb der zulässigen Abweichungen vom Mittelwert.

Das Ergebnis dieser Testreihe zur künstlichen Alterung von Bier kann damit als verlässliche Grundlage zur Festlegung des **Mindest-Haltbarkeits-Datums** (MHD) genutzt werden.

Ausblick

Der neu entwickelte TFT Brauerei Standard Forciertest liefert überall auf der Welt reproduzierbare Testergebnisse. Die erzielten Resultate sind durch die Einhaltung der genau spezifizierten Temperaturvorgaben bei absoluter Homogenität vergleich- und reproduzierbar.

Das neu entwickelte Gesamtkonzept ist universell einsetzbar und damit für andere Anwendungen leicht adaptierbar. So können Klimaschränke oder Klimakammern ebenfalls mit diesem Regel-System ausgestattet werden.

Der TFT-Regler mit der neu entwickelten P/I-Pulspaketregelung-Software kann als Einzelkomponente für vielfältige Anwendungen genutzt werden.

Anwenderspezifische Sonderwünsche sind so mit ohne großen Aufwand leicht und schnell realisierbar. ■