

Standards für Mess-, Regel-, Kontroll- und Sicherheitseinrichtungen von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Milchpasteurisieranlagen. Auslegung von Heißhaltern und verfahrenstechnische Weiterentwicklung.

von Dr.-Ing. Christian Kiesner

**Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel,
Institut für Sicherheit und Qualität bei Milch und Fisch, Kiel**

Inhalt:

1. Vorwort
2. Wärmebehandlungsverfahren zum Pasteurisieren von Konsummilch
3. Milchpasteurisieranlagen im kontinuierlichen Durchfluss
 - 3.1 Regeleinrichtung (Regler) für die Erhitzungstemperatur, Anforderungen
 - 3.2 Temperaturmess- und Registriereinrichtung für die Erhitzungstemperatur
 - 3.3 Sicherheitseinrichtung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur, Umlaufzeitbegrenzung
 - 3.4 Schutzeinrichtung gegen Vermischen von wärmebehandelter Milch mit unzureichend erhitzter Milch
 - 3.5 Auslegung von Heißhaltern und Heißhaltezeitbegrenzung
 - 3.6 Wärmerückgewinn
4. Diskontinuierliche Milchpasteurisieranlagen
 - 4.1 Verteilung der Temperatur im Milchbehandlungsraum
 - 4.2 Sicherheitseinrichtung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur und gegen unkontrollierten Zulauf bzw. Ablauf von Milch während der Wärmebehandlung
5. Verfahrenstechnische und technologische Weiterentwicklungen der Pasteurisierung von Konsummilch
6. Formelzeichen
7. Literatur
8. Zusammenfassung

1. Vorwort

Eine ordnungsgemäße Arbeitsweise von Erhitzungseinrichtungen, insbesondere der Milchpasteurisanlagen, wurde bislang durch die Richtlinie „Mess-, Regel-, Kontroll- und Sicherheitseinrichtungen für Milcherhitzungsanlagen“ [1], Stand 1998, und ihre Vorläufer geregelt. Damit wurde sichergestellt, dass sowohl die anlagentechnische Ausrüstung als auch deren Betriebsweise in deutschen den Molkereien nach einheitlichen Vorgaben abläuft. Im August 2011 wurde eine überarbeitete DIN 11488-Teil 1 bis 3 [2] als Ersatz für die DIN 11488: 1987-08 veröffentlicht. In dem Teil 3: Anlagentechnik dieser Norm wurden die wesentlichen Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen bei Milchpasteurisanlagen aus der Richtlinie [1] in überarbeiteter Form übernommen. Wie alle DIN – Normen, unterliegt in der Zukunft auch die DIN 11488: 2011-08 dem durch den Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN vorgesehenen Aktualisierungsprozedere.

Die aktuellen Normwerke bezüglich der Anforderungen an die Zulassung von Betrieben zur Verarbeitung von Milch sind die Verordnung zur Durchführung von Vorschriften des gemeinschaftlichen Lebensmittelrechts von 2007 [3], die Allgemeine Verwaltungsvorschrift über die Durchführung der amtlichen Überwachung der Einhaltung von Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs und zum Verfahren zur Prüfung von Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis von 2007 [4] sowie die Direktiven der Codex Alimentarius Commission von 2004 und 2008 [5,35].

In der vorliegenden Veröffentlichung werden Sicherheitsstandards für Milchpasteurisanlagen beschrieben, wie sie z. Z. in Deutschland in der Milchwirtschaft angewendet werden. Ergänzend wurden die technischen Neuentwicklungen und Auslegungsmethoden sowie die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf diesem Gebiet, die speziell am Max Rubner-Institut und an der ehemaligen Bundesanstalt für Milchforschung in Kiel erarbeitet wurden, mit aufgenommen.

2. Wärmebehandlungsverfahren zum Pasteurisieren von Konsummilch

Die Wärmebehandlung zur Pasteurisierung von Rohmilch kann nach mehreren, in der Praxis hinsichtlich der Produktsicherheit erprobten Verfahren durchgeführt werden. Dazu zählen Wärmebehandlungsverfahren mit folgenden Temperatur-Zeit-Kombinationen nach [3]:

- Dauererhitzen auf 63°C mit einer Heißhaltezeit von 30 Minuten. Nach dem Erhitzen muss der Phosphatasenachweis negativ, der Peroxidasenachweis positiv sein.
- Kurzzeiterhitzen im kontinuierlichen Durchfluss auf mindestens 72°C mit einer effektiven Heißhaltezeit von 15s. Nach dem Erhitzen muss der Phosphatasenachweis negativ, der Peroxidasenachweis positiv sein.

Nach den Vorschriften der inzwischen nicht mehr gültigen Milchverordnung [6] war ein weiteres Wärmebehandlungsverfahren des Hocherhitzens im kontinuierlichen Durchfluss auf 85°C bis 127°C unter solchen Temperatur-Zeit-Bedingungen, dass der Peroxidasenachweis negativ ausfällt (z.B. bei 85°C / 4s Heißhaltezeit), definiert. Dieses Verfahren wird gegenwärtig für die Herstellung von länger haltbarer s.g. ESL-Milch nach dem ausschließlich thermischen Verfahren angewendet. Die Definition der Kurzzeiterhitzung in der Milchverordnung [6] enthielt auch obere Grenzwerte von max.

75°C und eine Heißhaltezeit von 30s. Sie wurde eingeführt, um eine schonende Behandlung von pasteurisierter Milch zu gewährleisten.

Es können auch Verfahren mit gleicher Wirkung wie die der Temperatur-Zeit-Kombinationen 63°C/30min oder 72°C/15s eingesetzt werden [3]. Die gleiche Wirkung bezieht sich auf die Reduktion von 5-log Phasen von *Coxiella burnetti* [5]. Die Festlegung dieser Abtötungsrate basiert auf Untersuchungen in den fünfziger Jahren in den USA [7]. Die Anwendung von anderen Temperatur-Zeit-Kombinationen als 63°C/30 min oder 72°C/15s und anderer Stoffzusammensetzung als die der Rohmilch bedarf des Nachweises einer Reduktion von 5-log Phasen *Coxiella burnetti*. Wobei man davon ausgehen kann, dass jede Temperaturerhöhung über 72°C und eine Heißhaltezeitverlängerung über 15s die Abtötungsrate von 5-log Phasen erhöhen wird. Diese Aussage trifft aber nicht zu, wenn die Stoffzusammensetzung eine andere ist als die der Rohmilch. In einem solchen Fall sind weiterführende Wärmebehandlungs-Untersuchungen im Labor notwendig.

3. Milchpasteurisieranlagen im kontinuierlichen Durchfluss

Anlagen zur Pasteurisierung von Rohmilch im kontinuierlichen Durchfluss sind aus mehreren in Serie geschalteten Wärmeübertragern aufgebaut, in denen die Wärmebehandlung die aus einer Aufheizphase und einer Abkühlphase besteht, durchgeführt wird. Zwischen der Aufheizphase und Abkühlphase erfolgt eine Heißhaltephase in der die Milch verfahrensbedingt bei der vorgegebenen Erhitzungstemperatur für vorgegebene Zeit heißgehalten wird.

Apparatetechnisch gesehen, setzt sich die Pasteurisieranlage aus den Wärmerückgewinnabteilungen (mindestens zwei, z. B. *W1* und *W2*), der Erhitzungsabteilung *E* und der Kühlabteilung *K* zusammen. Zusätzlich befindet sich noch ein Heißwasser-Erhitze *H*, in dem heißes Wasser für die Erhitzungsabteilung mittels Wasserdampf bereitgestellt wird, s. **Abb.1**. Die Aufheizphase und die Abkühlphase finden zum einen Teil in den Wärmerückgewinnabteilungen statt. Die kalte Vorlaufmilch wird durch die bereits erhitze heiße Rücklaufmilch vorgewärmt. Die letztere kühlt sich dabei ab. Der hierdurch erzielbare Wärmerückgewinn wird unter dem Pkt. 3.6 behandelt. Die Aufheizphase wird in der Erhitzungsabteilung *E* durch Wärmezufuhr aus dem Heißwasser weiter fortgesetzt und endet mit dem Erreichen der erforderlichen Erhitzungstemperatur. Die Abkühlphase wird in der Kühlabteilung eingeleitet und sie endet mit dem Erreichen der vorgeschriebenen Abfülltemperatur von 6°C.

Die Wärmeübertragung erfolgt in der Regel indirekt, d.h. durch die Trennwände der Wärmeübertragerplatten. Es kann auch eine direkte Wärmeübertragung eingesetzt werden. Dabei wird die Milch durch direkten Kontakt mit Wasserdampf erhitzt. Bei einem solchen Verfahren darf nur Dampf aus Wasser von Trinkwasserqualität verwendet werden und die Milch nach der Wärmebehandlung in ihrem Wassergehalt nicht verändert sein.

Die zugeführte Rohmilch wird in der Milchpasteurisieranlage in einem zwischengeschalteten Entrahmungsseparator entrahmt, d.h. in Magermilch und Rahm getrennt. Wegen der angestrebten möglichst hohen Trennschärfe Fett/Magermilch, wird der Entrahmungsvorgang bei ca. 55°C durchgeführt. Die Temperatur von 55°C wird durch die entsprechende Auslegung der ersten Wärmerückgewinnabteilung *W1* erzielt.

Nach dieser Abteilung gelangt die Rohmilch zum Entrahmungsseparator. Die Zulaufmenge und der Druck werden durch die Einstellung der Verdrängungspumpe, die unmittelbar nach dem Vorlaufbehälter VB installiert ist, bestimmt, **Abb.1**. Nach der Trennung der Rohmilch in Magermilch und Rahm kann die Pasteurisation der Milch nach dem Entrahmungsseparator in drei unterschiedlichen Verfahrensschritten erfolgen:

- Es wird ausschließlich Magermilch in der Anlage pasteurisiert und der Rahm getrennt in einer Rahmpasteurisanlage behandelt. Man produziert in diesem Fall pasteurisierte Magermilch und pasteurisierten Rahm. Beide Fraktionen werden getrennt gelagert. Für weitere Verarbeitungsschritte wird die Milch im Fettgehalt eingestellt indem die entsprechenden Mengen von Magermilch und Rahm miteinander vermischt werden, **Abb. 1**.
- Bei der Herstellung von Trinkmilch erfolgt die Einstellung des Fettgehaltes unmittelbar nach dem Entrahmungsseparator, indem eine bestimmte Menge von Rahm mit Magermilch, entsprechend des gewünschten Fettgehaltes der Trinkmilch, automatisch miteinander vermischt wird. Die Regelung der Mengen beider Fraktionen erfolgt über eine Dichtewaage. Der Überschussrahm wird getrennt pasteurisiert, **Abb. 2**.
- Soll das Aufrahmen des Milchfettes begrenzt werden, so wird eine s.g. „Teilhomoogenisierung“ von Rahm eingesetzt. Dabei wird der Rahm nach dem Entrahmungsseparator mit Magermilch auf ca. 15% Fettgehalt eingestellt und homoogenisiert (150 bis 200 bar). Der homoogenisierte Rahm wird der restlichen Magermilch zugeführt und damit der gewünschte Fettgehalt der Trinkmilch eingestellt. Der Überschussrahm wird getrennt pasteurisiert, **Abb. 3**.
- Der Entrahmungsseparator kann auch im Rücklauf der Milchpasteurisanlage, s. **Abb. 4**, eingebaut werden. In einem solchen Fall wird sowohl die Magermilch als auch der Rahm bereits pasteurisiert, da beide Fraktionen aus pasteurisierter Rohmilch gewonnen wurden. Eine zusätzliche Rahmpasteurisanlage ist, im Gegensatz zu den Varianten **Abb.1-3**, nicht mehr erforderlich. Um die in der Rohmilch eventuell enthaltenen Verunreinigungen, wie Stroh oder Insekten, schon zu Beginn des Prozesses zu entfernen, kann unmittelbar nach dem Vorlaufbehälter entweder eine Reinigungszentrifuge bzw. ein Filter eingebaut werden. Die Reinigung von Rohmilch kann aber schon vorweg beim Abpumpen aus den Tanksammelwagen in die Stapelbehälter erfolgen. Dies war schon vor einigen Jahren Stand der Technik.

Bei dem Pasteurisierprozess werden stets Prozessparameter, wie Temperatur, Druck und Volumenstrom automatisch geregelt und überwacht. Diese Aufgabe übernehmen an der Anlage installierte Mess- und Regelsysteme, die nachfolgend detailliert beschrieben werden.

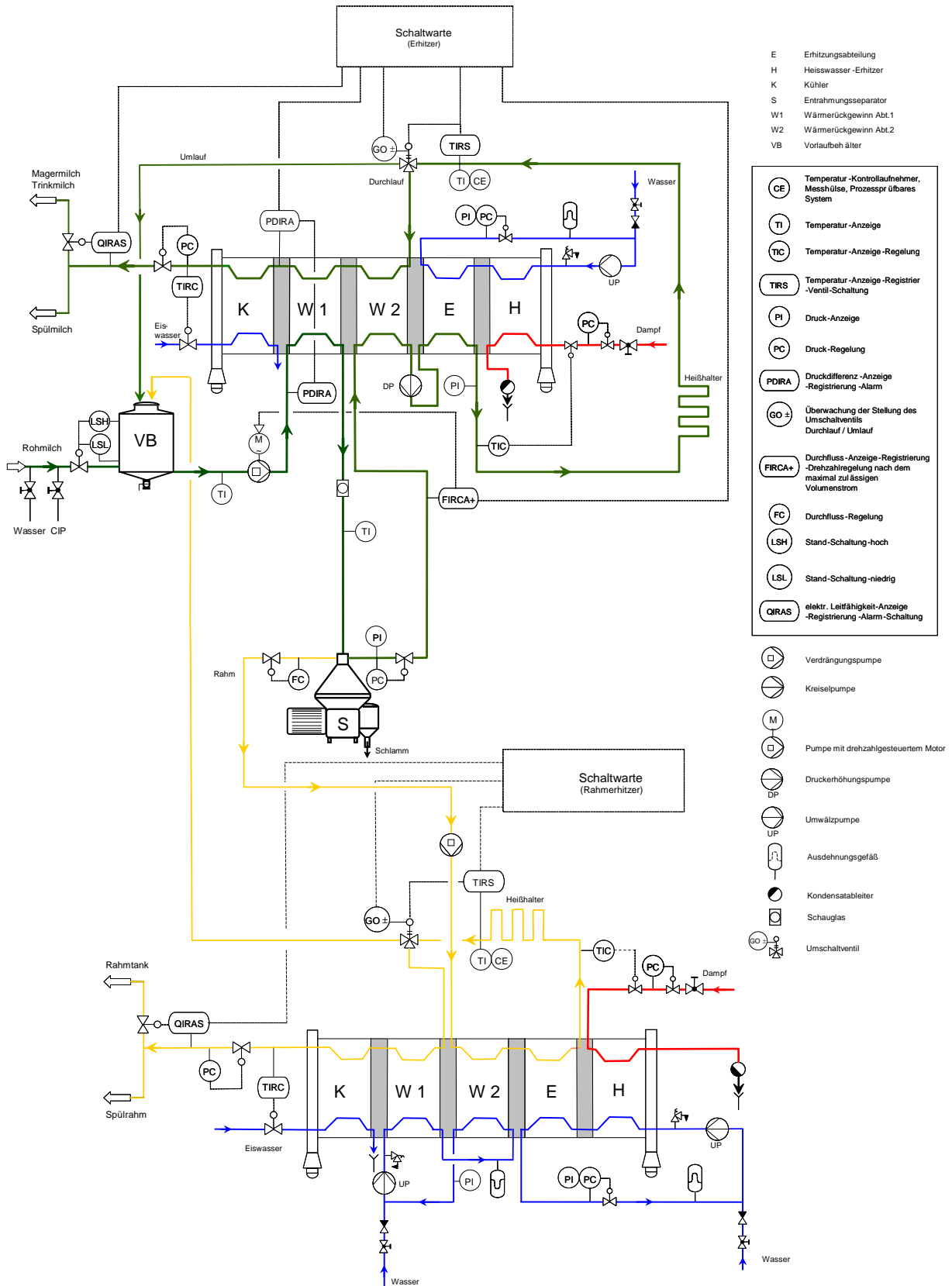
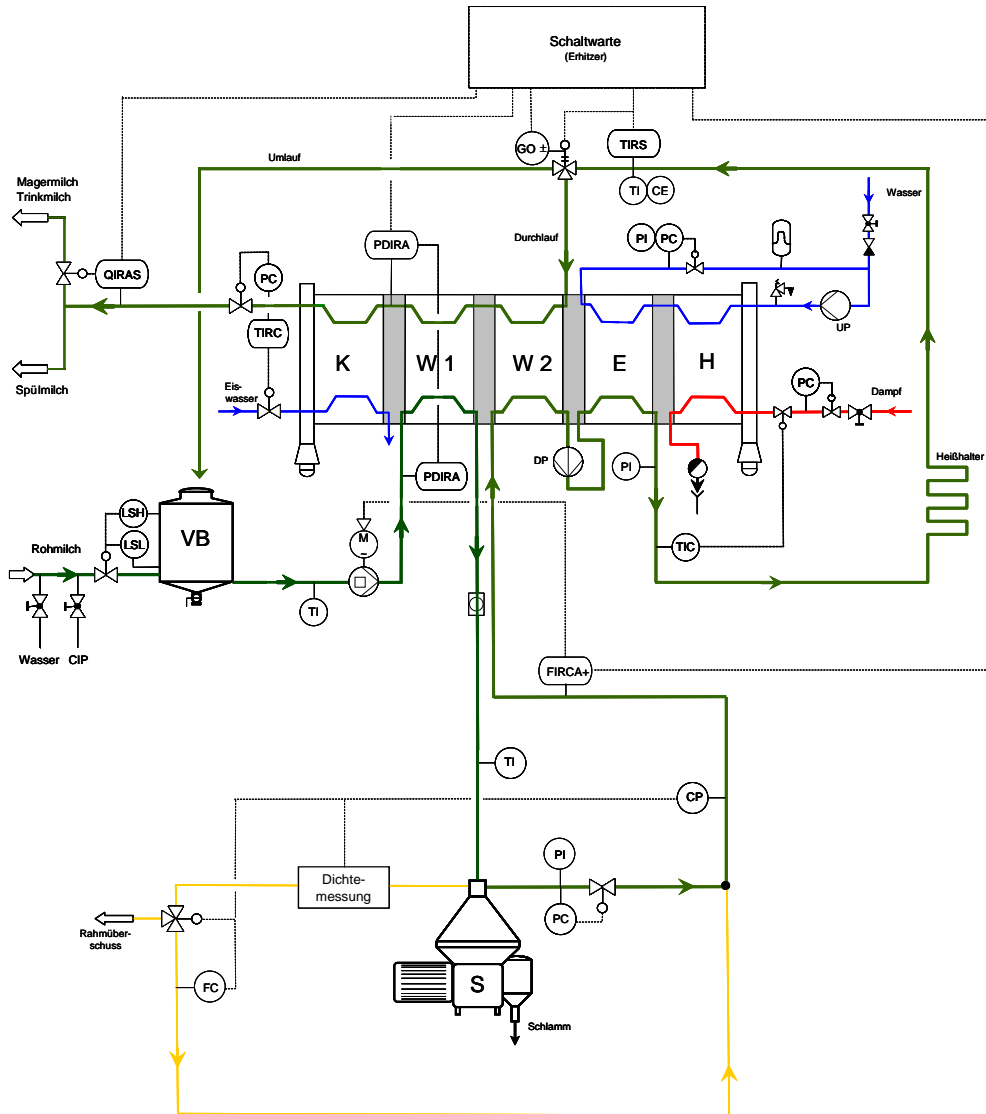


Abb.: 1 Fließschema einer Milchpasteurisanlage mit getrennter Behandlung von Magermilch und Rahm. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.



E Erhitzungsabteilung
 H Heisswasser-Erhitzer
 K Kühler
 S Entrahmungsseparator
 W1 Wärmerückgewinn Abt.1
 W2 Wärmerückgewinn Abt.2
 VB Vorlaufbehälter

⊖ Verdrängungspumpe
 ⊕ Kreiselpumpe
 M Pumpe mit drehzahl-
 gesteuertem Motor
 DP Druckerhöhungspumpe
 UP Umwälzpumpe
 AG Ausdehnungsgefäß
 K Kondensatableiter
 SG Schauglas
 GO Umschaltventil

CE Temperatur-Kontrollaufnehmer,
 Messhülse, Prozessprüfbares System
 TI Temperatur-Anzeige
 TIC Temperatur-Anzeige-Regelung
 TIRS Temperatur-Anzeige-Registrier
 -Ventil-Schaltung
 PI Druck-Anzeige
 PC Druck-Regelung
 PDIRA Druckdifferenz-Anzeige
 -Registrierung-Alarm

GO Überwachung der Stellung des
 Umschaltventils Durchlauf / Umlauf
 FIRCA+ Durchfluss-Anzeige-Registrierung
 -Drehzahlregelung nach dem
 maximal zulässigen Volumenstrom
 FC Durchfluss-Regelung
 LSH Stand-Schaltung-hoch
 LSL Stand-Schaltung-niedrig
 QIRAS elektr. Leitfähigkeit-Anzeige
 -Registrierung-Alarm-Schaltung
 CP Control point (Fettgehalt)

Abb.: 2 Fließschema einer Milchpasteurisanlage für fertige Trinkmilch mit automatischer Fetteinstellung. Der überschüssige Rahm wird getrennt wärmebehandelt. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

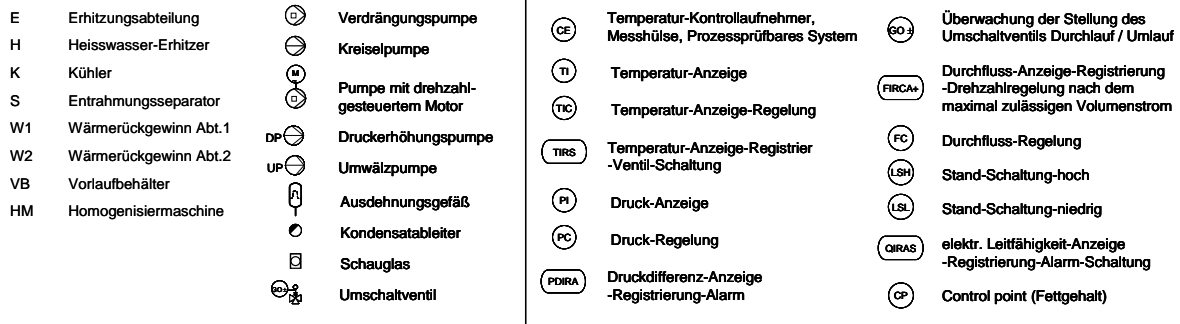
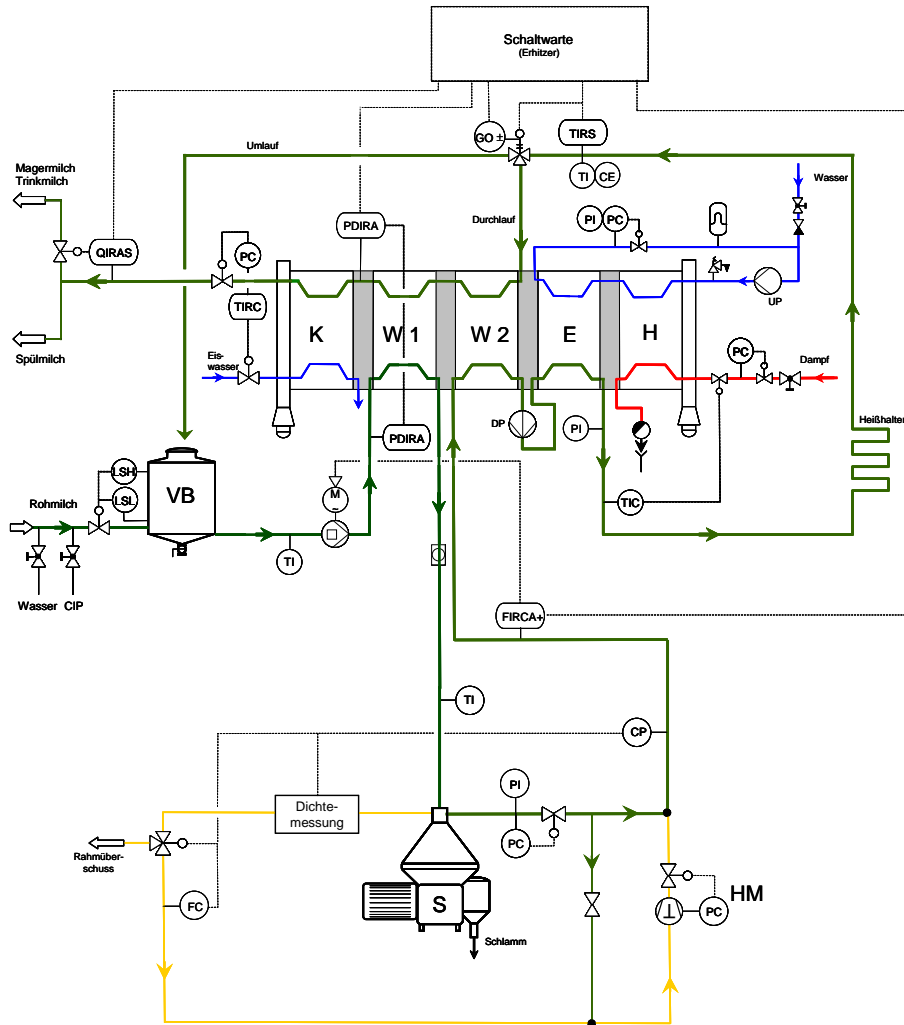


Abb.: 3 Fließschema einer Milchpasteurisanlage mit automatischer Fetteinstellung und „Teilhomonisierung“. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

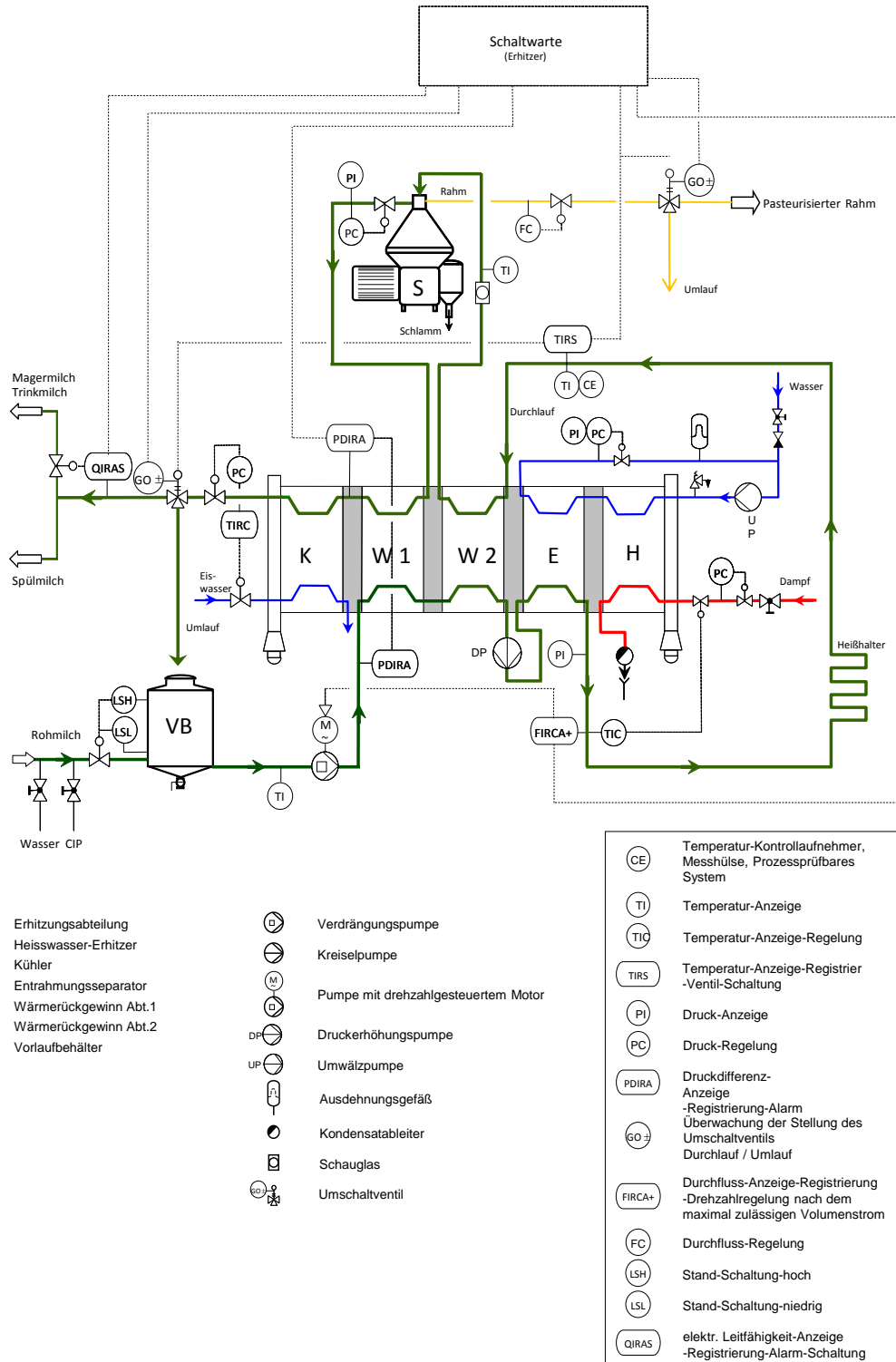


Abb.: 4 Fließschema einer Milchpasteurisanlage mit im Rücklauf eingebauten Entrahmungsseparator. Das Umschaltventil befindet sich am Auslauf der Anlage. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

3.1 Regeleinrichtungen (Regler) für die Erhitzungstemperatur, Anforderungen

Die von der Milch unmittelbar nach dem Ausgang aus der Erhitzungsabteilung *E* erreichte Erhitzungstemperatur wird automatisch geregelt. **Abb. 5** stellt den Ausschnitt der Anlage dar, in dem diese Regelung erfolgt. Zu dem Regelungssystem der Erhitzungstemperatur zählen ein geschlossener Heißwasserkreislauf mit Umwälzpumpe (UP), Ausdehnungsgefäß sowie ein Sicherheit- und Druckhalteventil. Das Wasser im Heißwasserkreislauf wird in dem Heißwassererhitzer *H* mittels Dampf erhitzt. Die eingestellte Erhitzungstemperatur wird über die zugeführte Dampfmenge geregelt, s. Dampfregelventil, **Abb. 5**. Ausschlaggebend für eine ausreichende Erhitzung der Milch ist die Temperatur, die am Ende der Heißhaltestrecke gemessen wird. Die Erhitzungstemperatur unmittelbar nach der Erhitzungsabteilung wird wegen Abkühlung in der Heißhaltestrecke und Regelschwankungen des Reglers entsprechend höher eingestellt sein als die geforderte Mindesttemperatur für die Kurzzeiterhitzung von 72°C, s. Pkt. 2.

Zum ordnungsgemäßen Durchführen dieser Aufgabe sind folgende Anforderungen an die Regelung der Erhitzungstemperatur zu erfüllen:

- Der Temperaturfühler des Reglers ist in die Milchleitung unmittelbar am Austritt aus der Erhitzungsabteilung einzubauen.
- An der Stelle des Fühlereinbaus sollte möglichst turbulente Strömung herrschen ($Re > 2300$).
- Eine Temperaturbelastung des Temperaturmeßsystems darf sich nicht negativ auf die Regeleigenschaften auswirken.
- Bei Einsatz elektrischer Temperaturfühler sind Schaltungen zu wählen, die von der Kabellänge nicht beeinflusst werden (z.B. Dreileiterschaltung bei Pt-100-Fühlern).
- Es wird empfohlen, eine Drahtbruchüberwachung vorzusehen.
- Die Einstellung der Solltemperatur am Regler ist unter Beachtung der gesetzlich vorgeschriebenen Mindest-Erhitzungstemperatur mit dem tolerierten Messfehler und der auftretenden Abkühlung in der Heißhaltestrecke vorzunehmen.

Eine Typprüfung ist nicht vorgesehen.

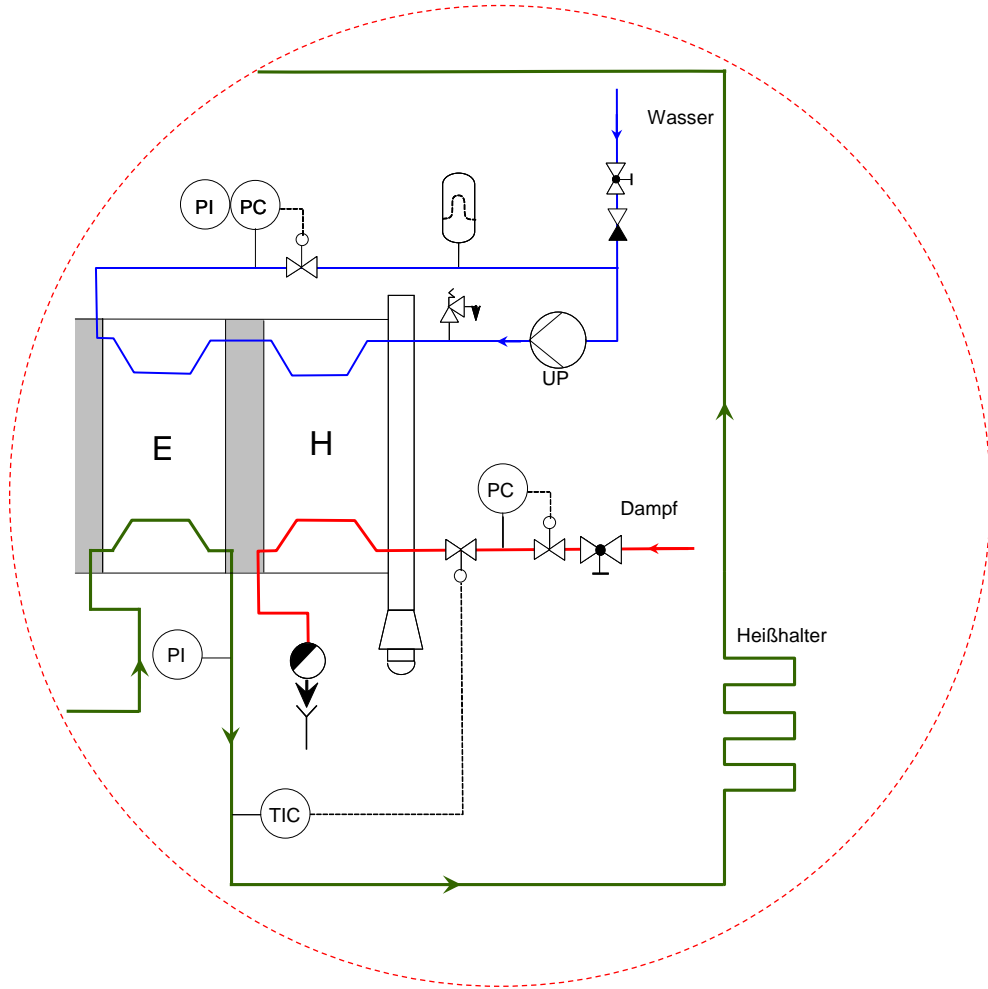


Abb.: 5 Erhitzungsabteilung *E* mit Heißwassererhitzer *H* und Heißwasserkreislauf mit Temperaturregler. Detailausschnitt aus Abb. 1.

3.2 Temperaturmess- und Registriereinrichtung für die Erhitzungstemperatur

Analog wie bei der Regeleinrichtung, werden als Temperaturfühler Pt-100-Fühler unterschiedlicher Bauart verwendet. Als Registriereinrichtungen werden Schreiber oder andere elektronische Datenspeicher eingesetzt, deren Eignung im Rahmen eines Gutachtens nachgewiesen worden ist. **Abb. 6** stellt den Ausschnitt der Anlage dar, in dem die Registrierung erfolgt. Die Erhitzungstemperatur stellt einen kritischen Lenkungspunkt (CCP) nach dem inzwischen für die Milchverarbeitungsbetriebe obligatorischen HACCP-Konzept [8] dar. In diesem Zusammenhang, stellt die Erfassung und Registrierung dieser Erhitzungstemperatur für den Hersteller den Nachweis einer ausreichenden Pasteurisierung von Milch dar. Wegen der Haftung des Herstellers für die Produktsicherheit ist ein solcher Nachweis von entscheidender Bedeutung.

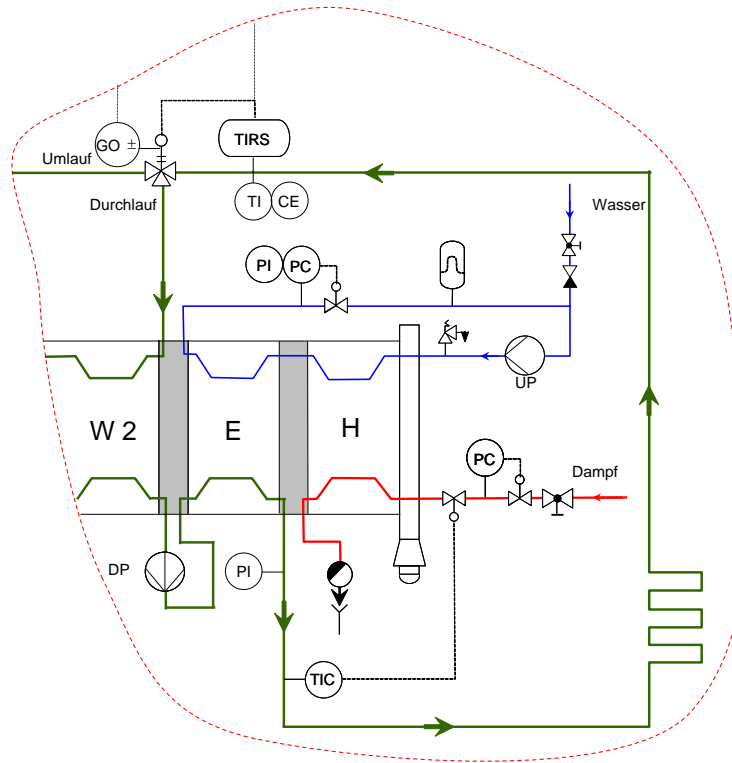


Abb.: 6 Registrierungs- und Sicherheitseinrichtung für die Erhitzungstemperatur.
 Detailausschnitt aus Abb. 1.

Mit der Temperaturmess- und Registriereinrichtung [1] soll:

- Die Erhitzungstemperatur der Milch überwacht werden, indem sie fortlaufend gemessen, angezeigt und registriert wird.

Empfehlungen

Außer der Erhitzungstemperatur sollten folgende Betriebsdaten ebenfalls erfasst werden;

1. die Temperatur in der Milchaustrittsleitung ([Abb.7](#)), um die ebenfalls betriebsrelevante Milchrückkühl- bzw. Reinigungs- oder Desinfektionstemperatur zu überwachen,
 2. ein Belagbildungskennwert - z.B. die Heißwassertemperatur am Eintritt in die Erhitzungsabteilung zur Kontrolle der Belagbildung und der Reinigungswirkung,
 3. die Produktart zur Unterscheidung zwischen Milch, Wasser, Reinigungslösung.
- Bei Unterschreitung der Mindest-Erhitzungstemperatur eine Sicherheitsschaltung ausgelöst werden.

- Der jeweilige Betriebszustand der Erhitzungsanlage wie Milchbetrieb, Reinigen, Umlauf oder Durchlauf voneinander unterscheidbar, so dass auf dem Diagramm die Erhitzungstemperatur und der jeweilige Betriebszustand in zeitlicher Zuordnung zueinander eindeutig auswertbar sind.

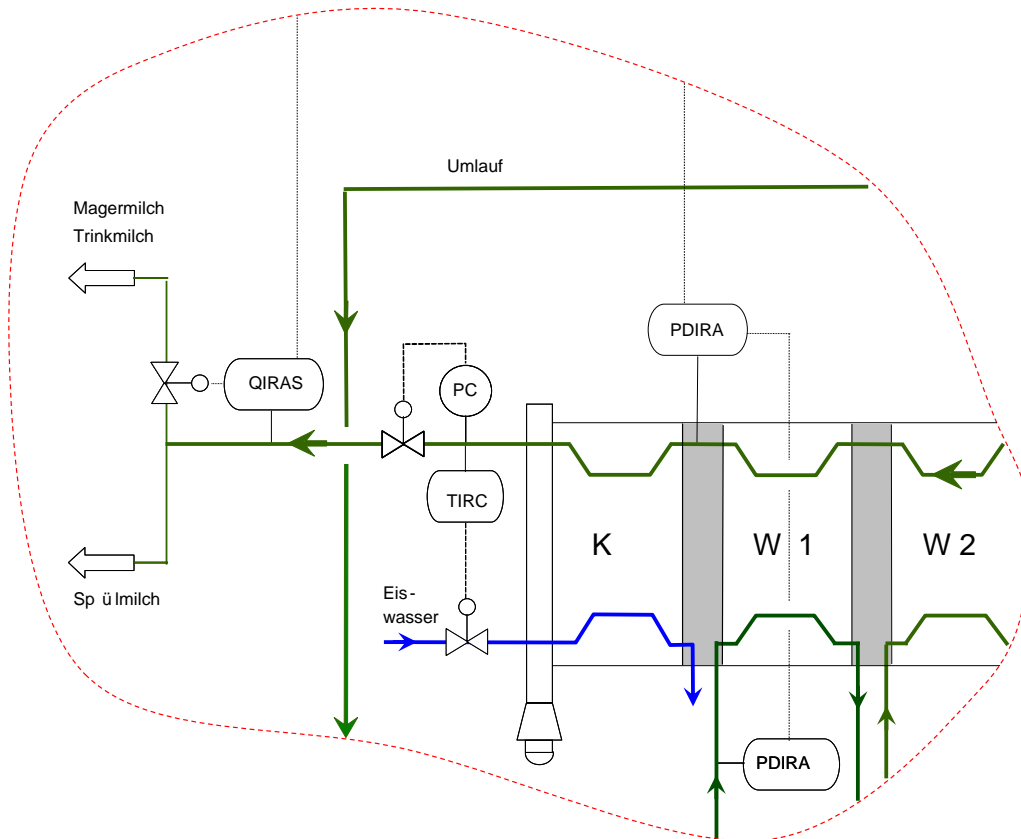


Abb.: 7 Regelung und Registrierung der Milchaustrittstemperatur.
 Detailausschnitt aus Abb. 1

Um eine im vorstehenden Sinne sichere Arbeitsweise zu gewährleisten, hat eine Temperaturmess- und Registriereinrichtung folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Der Fühler für die Erhitzungstemperatur ist nahe dem Heißhalteraustritt einzubauen. Er muss regelmäßig mit der gesamten Registriereinrichtung einer Messgenauigkeitskontrolle unterzogen werden.
- Am Einbauort des Temperaturfühlers sollte möglichst turbulente Strömung ($Re > 2300$) herrschen.
- Die Messgenauigkeit des Temperaturfühlers mit der Registriereinrichtung muss während des Betriebes kontrollierbar sein, z.B. mit geeichtem oder geprüfem Kontrollthermometer in einer Messhülse in Nähe der Fühlereinbaustelle (s. [Abb. 8](#)) oder einem prozessprüfbaren Thermometersystem [9], [Abb. 9](#).

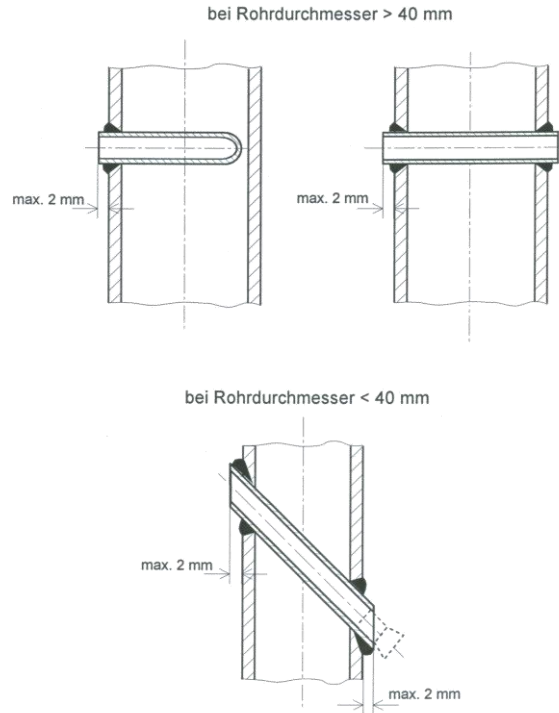


Abb.: 8 Einbaumöglichkeiten von Messhülsen für einen Kontroll-Messfühler.

- Der Gesamtmessfehler der Einrichtung in Bezug auf die angezeigten und aufgezeichneten Temperaturen darf den Grenzwert von **1°C** nicht überschreiten.
- Auf dem Diagramm muss der Registrier-Temperaturbereich sowie der Abstand zwischen den Temperaturlinien, die im Bereich der Erhitzungstemperatur um **1 K** auseinanderliegen sollen.
- Die Temperaturbelastbarkeit der Einrichtung muss bei 90°C liegen.
- Die Grenzwertschaltung darf 1 K Schalthysterese nach oben, 0 K nach unten und maximal 1 s Schaltverzögerung haben.
- Es wird empfohlen, eine Drahtbruchüberwachung vorzusehen.
- Bei einem Störfall jedweder Art (z. B. Drahtbruch, Energieausfall) muss die Sicherheitsfunktion der Einrichtung aufrechterhalten werden (selbsttätiges Abschalten bzw. auf Umlauf schalten).
- Die Einrichtung muss durch geeignete Maßnahmen gegen Manipulation(en) gesichert sein, z.B. durch Verplomben der Einrichtung oder von Anschlussklemmen.
- Bei elektronischer Datenspeicherung, durch Softwareverriegelung der entsprechenden Programmbausteine und Messwertaufbereitung (Passwort).

Angesichts der heute praktizierten Vernetzung von Steuerungssystemen in Betrieben, ist die elektronische Datensicherung von erheizungsrelevanten Größen, verglichen mit dem früher direkt an der Anlage verwendeten Messwertschreiber, nicht wirklich sicher. Der Zugriff zu diesen Daten ist grundsätzlich durch die Vernetzung nicht auszuschließen und durch die Komplexität der Systeme nicht einfach nachvollziehbar und beweisbar. Im Falle einer juristischen Auseinandersetzung wird das Erbringen des Nachweises einer ausreichenden Erhitzung mit Hilfe von elektronisch gespeicherten Daten bei vernetzten Systemen schwierig und kann ggf. angezweifelt werden. Um eine zweideutige Situation zu vermeiden, sollte ein internes Mess- und Registriergerät an der Anlage installiert werden in dem die Messwertspeicherung unabhängig von der Speicherung in der Schaltwarte durch das Prozessleitsystem erfolgt, s. **Abb. 10**. Über eigene Messfühler und getrennt vom Netz sollte die Erhitzungstemperatur und der Volumenstrom im Heißhalter erfasst und gespeichert werden. Darüber hinaus sollte im Messspeicher das Volumen des installierten Heißhalters vom Anlagenbauer unveränderbar hinterlegt werden. Die Stellung des Umschaltventils und die Rücklauf/Vorlauf Druckdifferenz sollten aus der Schaltwarte ebenfalls im internen Mess- und Registriergerät abgespeichert werden.

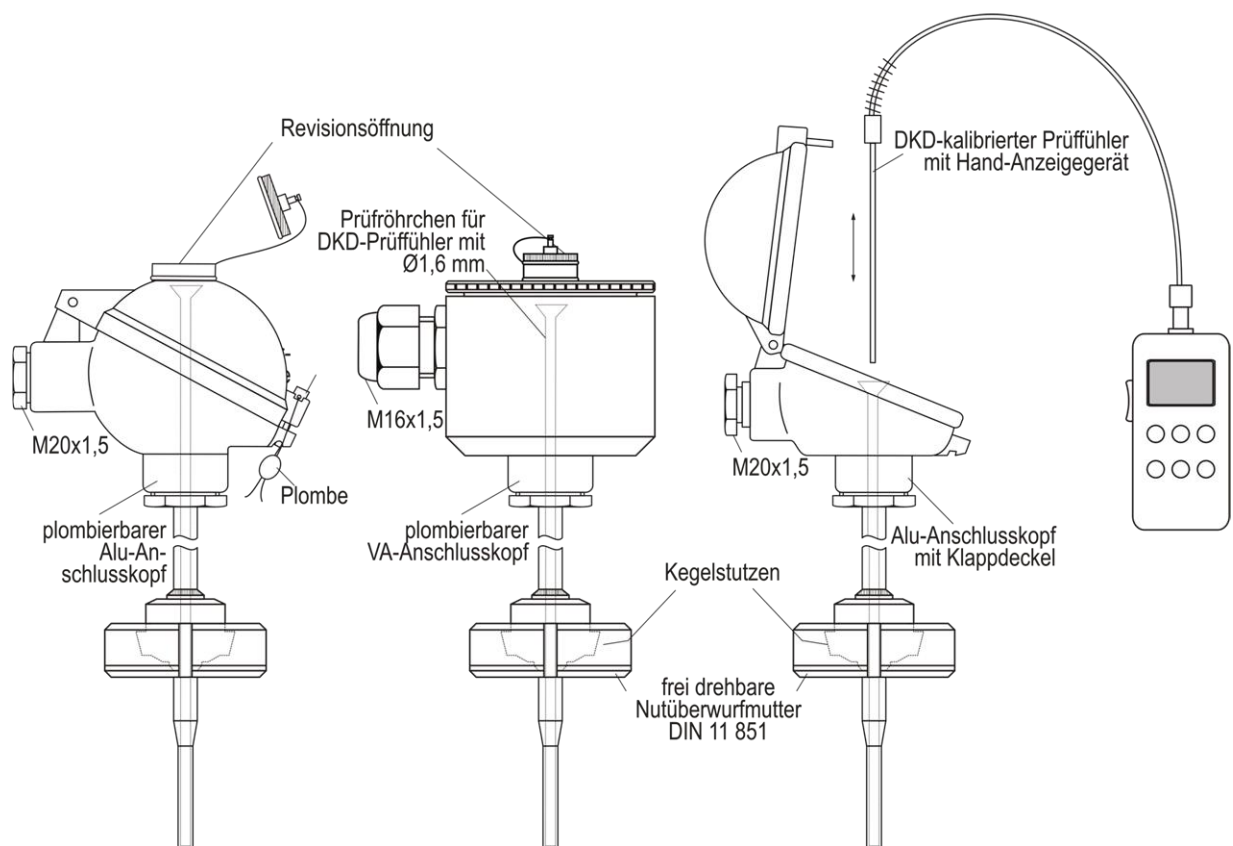


Abb.: 9 Prozeßprüfbares Thermometersystem nach [9]

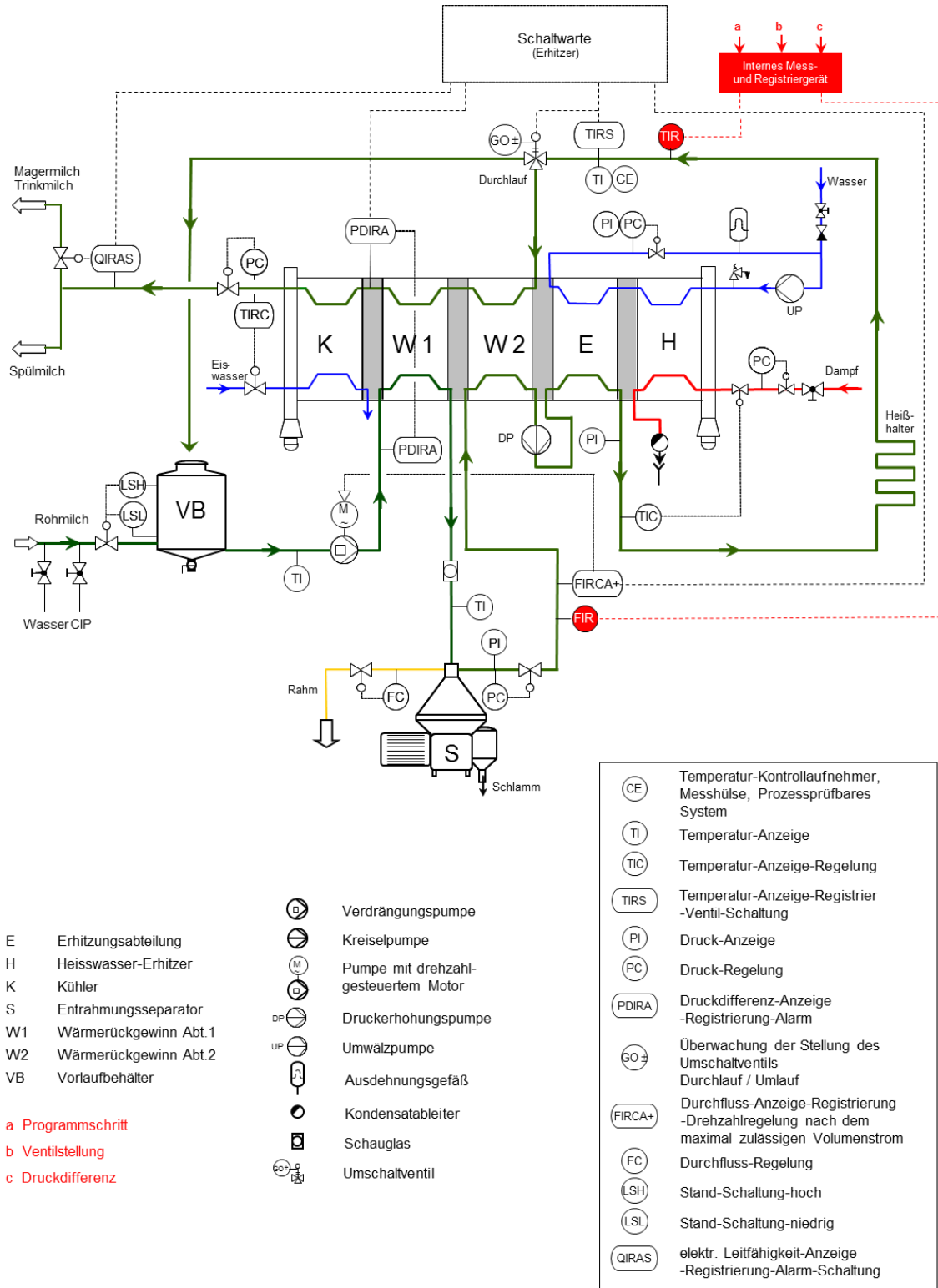


Abb.: 10 Vom Prozessleitsystem und Netz unabhängiges Erfassen der Erhitzungs-temperatur und des Volumenstroms im Heißhalter (rot unterlegt).
Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

3.3 Sicherheitseinrichtung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur, Umlaufzeitbegrenzung

Die Umschalteinrichtung besteht in der Regel aus einem Dreiwegeventil oder aus einer Ventilkombination, die im Zusammenwirken mit der Temperaturmess- und Registriereinrichtung die Funktion einer Sicherheitseinrichtung hat. Sie soll sicherstellen, dass ausschließlich ordnungsgemäß erhitzte Milch zum Fertigmilchlager bzw. zur Abfüllstation gelangt (Schaltstellung - Durchlauf). Unzureichend erhitzte Milch muss dagegen zum Vorlaufbehälter bzw. zu einem Sondermilchtank zurückgeführt werden (Schaltstellung - Umlauf). Demzufolge ist die Umschalteinrichtung während des Umlaufs unzureichend erhitzter Milch die entscheidende Trennstelle zwischen der "unreinen" und der "reinen Seite" des Milchfließweges.

Die Umschalteinrichtung ist in der Regel am Ende des Heißhalters eingebaut. Im Falle ihres Einbaus in die Milchaustrittsleitung nach der Kühlabteilung, s. **Abb.11**, ist durch geeignete, von der Sicherheitseinrichtung initiierte, überwachte und registrierte Zwangsschaltungen sicherzustellen, dass alle dem Heißhalter nachgeschalteten Rückkühlabteilungen zumindest ausreichend erhitzt und desinfiziert werden, bevor die Erhitzungsanlage vom Milchum- zum Milchdurchlauf zurückkehrt.

An ihre konstruktive Ausführung hinsichtlich zuverlässiger Funktion und hygienischer Ausführung sind daher besonders hohe Anforderungen zu stellen, wie bereits in [1] dargestellt.

Eine Umschalteinrichtung muss:

- Insbesondere den Durchlauf-Fließweg sicher abdichten bei
 1. Druckbelastung jeder Art, die über den zulässigen Betriebsdruck bzw. über ihren Schließfederdruck hinausgeht,
 2. Ausfall der Hilfsenergie für den Antrieb,
 3. einer defekten Dichtung, indem z.B. die Einrichtung mit einer Leckagesicherung ausgeführt wird.
- Bei Ausfall der Hilfsenergie für ihren Antrieb selbsttätig auf Umlauf schalten.
- Den Defekt einer Dichtung sichtbar anzeigen, z.B. durch sichtbaren Austritt von Leckageflüssigkeit.
- Aus Werkstoffen hergestellt sein - dies gilt auch für ihre Dichtungen – die
 1. Milch nicht beeinträchtigen; insbesondere dürfen von ihnen keine Stoffe auf Milch übergehen, ausgenommen gesundheitlich, geruchlich und geschmacklich unbedenkliche Anteile, die technisch unvermeidbar sind,
 2. den mechanischen, thermischen und molkereispezifisch chemischen Beanspruchungen hinreichend widerstehen. Der Hersteller hat für alle wesentlichen Verschleißteile, insbesondere für Dichtungen, Wartungsempfehlungen zu geben.
- Aus hygienischen Gründen so konstruiert, ausgeführt und eingebaut sein, dass
 1. alle mit Milch in Kontakt gekommenen Flächen im CIP-Verfahren rückstandsfrei zu reinigen und einwandfrei zu desinfizieren sind,
 2. sie, insbesondere auch im Dichtungsbereich, keine Toträume wie z.B. Spalten und Nuten aufweist, die der vorgenannten Anforderung entgegenstehen.

Eine Umschalteinrichtung muss im Zusammenwirken mit der Temperaturmess- und Registriereinrichtung:

- Beim Unterschreiten der Mindest-Erhitzungstemperatur (s. Pkt. 2) während der Produktion selbsttätig von Durchlauf auf Umlauf umschalten. Die Dauer des Umschaltvorgangs darf 3 s nicht überschreiten.
- Die jeweilige Schaltstellung anzeigen. Darüber hinaus muss sie der Registriereinrichtung jede Schaltstellungsänderung unverzüglich signalisieren, damit letztere fortlaufend auf dem Diagramm (Bildschirm) registriert wird.
- Zum Reinigen und Sterilisieren mit einem Schaltvorgang oder Programmschritt, z. B. Schlüsselschalter, auf Durchlauf zu schalten sein. Diese besondere Durchlauf-Schaltstellung außerhalb der Produktion muss auf dem Diagramm als solche erkennbar sein. Der Betriebsverantwortliche hat ggf. durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, dass keine missbräuchliche Umschaltung erfolgt bzw. erfolgen kann.

Wird eine Milchpasteurisieranlage störungsbedingt im Umlauf gefahren, ist bei der Wärmebehandlung von Konsummilch alternativ wie folgt zu verfahren:

- Die Milchfahrt ist spätestens nach 3 min durch eine Zwangsschaltung zu beenden. Umlaufzeit und Zwangsschaltung sind unverwechselbar zu registrieren. Die Registriereinrichtung kann mit der für die Erhitzungstemperatur identisch sein.
- Die Milchfahrt kann fortgesetzt werden, wenn durch kontrollierbare Maßnahmen sichergestellt ist, dass die mehrfach erhitzte Milch nicht zur Konsummilch-Abfüllstation gelangt.

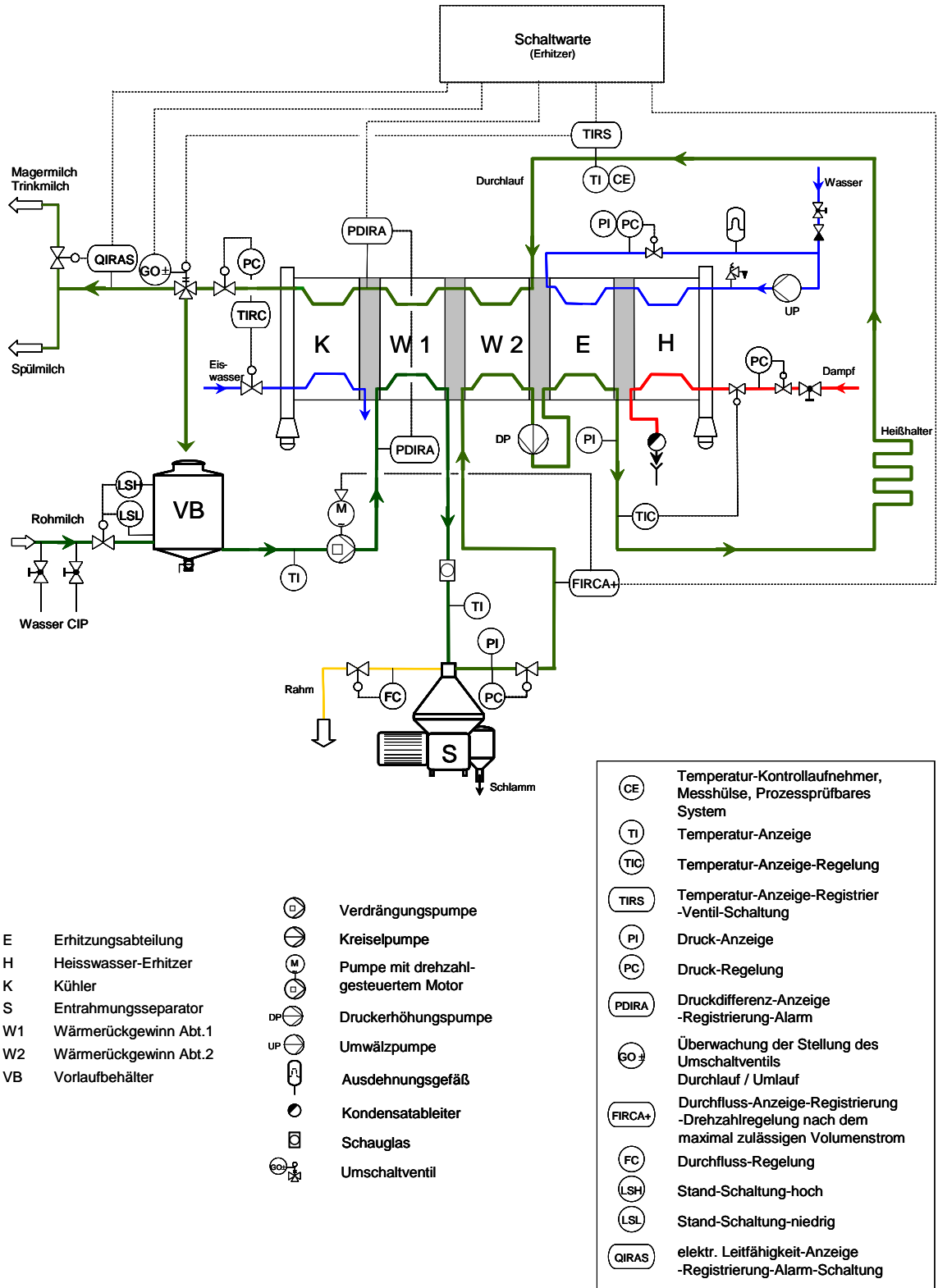


Abb.: 11 Einbau des Umschaltventils am Auslauf aus der Kühlabteilung, s. auch Abb. 4. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

3.4 Schutzeinrichtungen gegen Vermischen von wärmebehandelter Milch mit unzureichend erhitzter Milch

Infolge eines technischen Defektes, wie z.B. eines durch Spannungsrisskorrosion oder Lochfraß entstandenen Durchbruchs in den Wärmeübertragungsflächen, kann in den Wärmerückgewinnabteilungen aufgrund des höheren Druckes auf der Vorwärmseite (= Vorlauf) im Verhältnis zu der Rückkühlseite (= Rücklauf) unzureichend erhitzte in bereits ordnungsgemäß erhitze Milch übertreten. Dies kann gesundheitlich bedenklich sein, wenn die unzureichend erhitze Milch Krankheitserreger enthält, die bei entsprechend hoher Erregerzahl und Übertrittsmilchmenge in die wärmebehandelte Milch unmittelbar vor der Abfüllung gelangen.

Ein im vorstehenden Sinne ausreichender Schutz gegen Vermischen gilt als gewährleistet, wenn:

- Der Wärmerückgewinn indirekt über einen gesonderten Wasserkreislauf mit gesondertem Wärmeübertrager erfolgt, so dass sich wärmebehandelte und unzureichend erhitze Milch nicht in unmittelbar benachbarten Fließwegen gegenüberstehen.
- In den Wärmerückgewinnabteilungen (wärmebehandelte Milch gegen unzureichenderhitzter Milch) auf der Rücklaufseite ein höherer Druck herrscht als auf der Vorlaufseite und dies durch geeignete Kontrollmaßnahmen z.B. mittels Registriereinrichtung nachgewiesen wird, s. **Abb. 1**. Zum Erzeugen des höheren Druckes auf der Rücklaufseite und zur Absicherung der Wirksamkeit des Systems ist eine Druckerhöhungspumpe (DP) in Verbindung mit einem Regel- bzw. Druckhalteventil so in die Erhitzungsanlage einzubauen, dass die Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf in der/den Wärmerückgewinnabteilung(en) unter allen Produktionsbedingungen (z.B. Wiedervermischung, Entrahmung) mindestens 0,5 bar (Mindestdruckdifferenz) beträgt. Es ist eine Druckmess- und Aufzeichnungseinrichtung vorzusehen, deren Druckaufnehmer im Vorlauf und im Rücklauf der Wärmerückgewinnabteilung(en) dort einzubauen sind, wo unter Berücksichtigung der Produktionsbedingungen (z.B. Entrahmung, Wiedervermischen) die geringst mögliche Druckdifferenz zu erwarten ist, s. **Abb. 1**. Die Druckdifferenz soll mit einer zulässigen Toleranz von 0,2 bar ermittelt, angezeigt und fortlaufend registriert werden. Die Mindestdruckdifferenz sollte nicht unterschritten werden. Bei Unterschreitung soll Alarm ausgelöst werden. Für den Fall einer kurzfristigen Unterschreitung der Mindestdruckdifferenz, z.B. infolge des diskontinuierlichen Zentrifugatauswurfs aus dem Entrahmungsseparator, wird eine Verzögerung der Reaktionszeit der Alarmschaltung von bis zu 30 s toleriert. Nach erfolgter Alarmschaltung ist deren Ursache unverzüglich nachzugehen. Die Produktion darf nur fortgesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass kein Defekt der Wärmeübertragungsfläche vorliegt. Andere Ursachen sind möglichst schnell zu beheben. Die durchgeführten Kontrollmaßnahmen und deren Ergebnisse sind zu protokollieren. Bei längerem Ausfall der Druckerhöhungspumpe wegen notwendiger Reparatur oder Ersatzbeschaffung ist vor jedem Produktionsbeginn die Wärmerückgewinnabteilung einer Durchbruchkontrolle zu unterziehen.

Empfehlung

Solange die Mindestdruckdifferenz zugunsten der Rücklaufseite eingehalten wird, ist im Falle eines vergleichsweise kleinen Durchbruchs in der Wärmeübertragungsfläche ein Übertritt unzureichend erhitzter in die wärmebehandelte Milch unwahrscheinlich. Da Durchbrüche jedoch generell ein Risikofaktor sind, sollten die Wärmeübertragungsflächen in regelmäßigen Abständen (ca. einmal jährlich) im Rahmen der betrieblichen Eigenkontrollen danach untersucht werden.

- Irgendein anderes Sicherheitssystem mit vergleichbarer Risikominimierung angewendet wird, dessen Eignung durch ein gesondertes Gutachten nachgewiesen worden ist, wie z.B. Doppel - Wärmeübertragerplatten [10], das Druckprüfsystem nach Fels [11] oder Anwendung von Markierungsstoffen;

1. Das Funktionsprinzip des „ Druckprüfsystems Fels“ beruht darauf, dass während der täglichen Stillstandzeit eines Milcherhitzers dessen gesamte Wärmeübertragungsfläche, die die vorzuwärmende Rohmilch auf der Vorlaufseite von der rückzukühlenden erhitzten Milch auf der Rücklaufseite trennt, einer selbsttätig ablaufenden statischen Druckprüfung unterzogen wird, mit der jeder Trennwanddurchbruch sicher festgestellt werden kann. Im Falle eines signifikanten Druckabfalls wird durch eine selbsttätige Zwangsschaltung die Inbetriebnahme des Erhitzers blockiert. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass der tägliche Milcherhitzungsbetrieb nur mit intakter Wärmeübertragungsfläche aufgenommen werden kann [11]. Das beschriebene Druckprüfsystem nach Fels sollte nicht anstelle einer Druckerhöhungspumpe eingesetzt werden, sondern nur als deren Ergänzung. Bei geringen Trennwanddurchbrüchen wird eine leistungsfähige Druckerhöhungspumpe, trotz einer Leckage, die erforderliche Druckdifferenz von 0,5 bar aufbauen können. Die Leckage bleibt somit längere Zeit unerkannt. Mit einem installierten Druckprüfsystem nach Fels kann die Leckage vor dem Beginn jeder Produktion entdeckt werden. Wird das Druckprüfsystem ohne Druckerhöhungspumpe eingesetzt, so können Leckagen, die während der Produktion auftreten sofort eine Rekontamination verursachen. Ein solches Sicherheitssystem gegen Vermischen würde nicht als ausreichend angesehen werden müssen. Das Druckprüfsystem setzt sich aus zwei fernbetätigten Absperrventilen (Ventil 1 und Ventil 2 s. [Abb. 12](#)) zusammen, die in die Milcheintrittsleitung der ersten sowie in die Milchaustrittsleitung der letzten rücklaufseitigen Wärmerückgewinnabteilungen W1 und W2 einzubauen sind [11]. Mit einer Einrichtung (Alternative A, B und C) zum Erzeugen eines statischen Prüfdruckes unter kontrollierten Bedingungen wird in der abgesperrten Rücklaufseite der Wärmerückgewinnabteilungen ein vorgegebener Prüfdruck aufgebaut. Dieser wird dadurch erzeugt, dass bei:

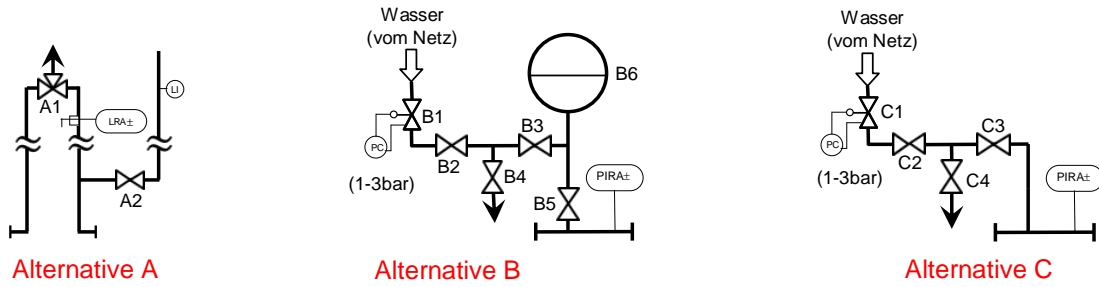
Alternative A ([Abb. 12](#)) die aus der letzten Kühlabteilung *K* ca. 5 m senkrecht nach oben geführte Milchaustrittsleitung über das in ihrem Scheitelpunkt befindliche Absperr-Dreiwegeventil *A1* belüftet wird. Hierdurch wird ein definierbarer Druck – hier 5 m Wassersäule- auf die gesamte

Wärmeübertragungsfläche des abgesperrten Rücklauf-Fließwegabschnittes wirksam. Die Höhe der Wassersäule wird nach dem Öffnen des Ventils A2 am Standglas angezeigt. Außerdem wird mit Hilfe des Niveauwächters überwacht, ob und wann der durch sein Einbauniveau vorgegebener Minimum-Füllstand unterschritten wird. Der Füllstand wird kontinuierlich registriert. Bei Unterschreitung des Niveaus wird ein Alarm sowie eine Zwangsschaltung ausgelöst, durch die ein unmittelbares Anfahren des Erhitzers unterbunden wird [11].

Alternative B oder C (Abb. 12) der abgesperrte Rücklauf-Fließwegabschnitt über die Ventile B/C2, B/C3 und B4 zunächst kurzfristig einem definierten Wasserdruck zwischen 1 und 3 bar ausgesetzt wird. Nach dem Schließen dieser Ventile wird über den Druckausgleichbehälter B6 bzw. über den wie ein Druckausgleichbehälter wirkenden Platten-Milcherhitzer der am Druckreduzierventil eingestellte Prüfdruck ausgeübt. Hierzu muss allerdings mit Hilfe des Ventils B/C4 der Leitungsabschnitt zwischen den Ventilen B/C2 und B/C3 drucklos geschaltet sein. Bei Unterschreitung des eingestellten Minimum-Druckes wird ein Alarm und eine Zwangsschaltung wie bei Alternative A ausgelöst [11].

Während der Stillstandszeit (= Druckbeaufschlagungszeit) kühlt das in der Milcherhitzungsanlage enthaltene Wasser ab, wodurch der Füllstand bzw. der Prüfdruck geringfügig abfällt. Dieser Druckabfall ist bei der Festlegung des Minimum-Druckgrenzwertes zu berücksichtigen. Mit Hilfe zusätzlicher Absperrventile 3 zwischen den Abteilungen W2/W1 und W1/K kann durch abteilungsweise Druckbeaufschlagung ein Trennwanddurchbruch eingegrenzt werden [11].

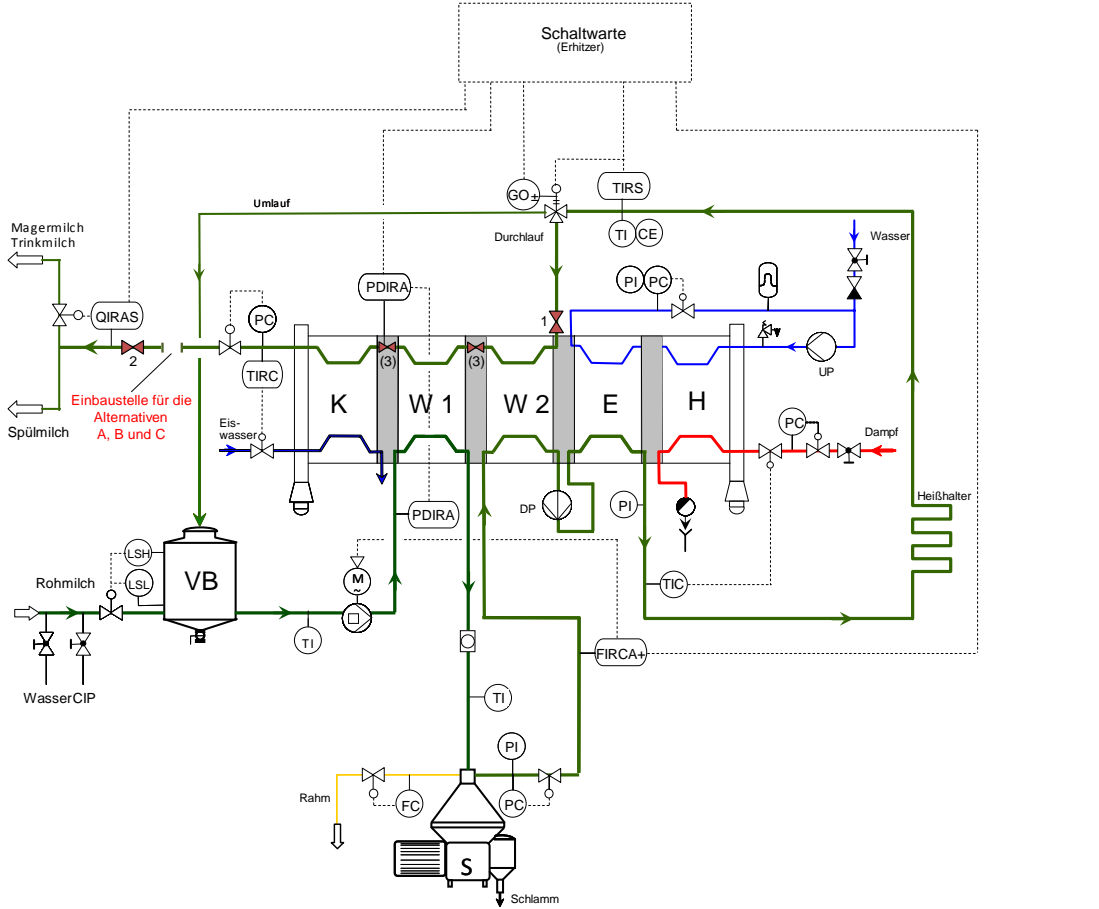
2. Die Doppel-Wärmeübertragerplatte nach APV [10] besteht aus zwei, jeweils gemeinsam geprägten, dünneren Einzelplatten, die ebenso wie jede Einfach-(Standard-)platte, am Plattenrand nahezu gleichmäßig verteilt, zahlreiche leicht ovale Ausnehmungen aufweist, die zum Fixieren der kleberlosen „Paraclip“-Plattendichtung und gleichzeitig zum Zusammenhalten beider Einzelplatten mittels Fixiernippel dienen. Die Abdichtung des zwischen beiden Platten bestehenden Leckagespaltes erfolgt durch die um die Durchtrittsöffnungen herumgeführten, speziell profilierten Dichtringe, die in die Plattendichtung integriert sind. Die Doppelplatten haben den Vorteil, dass im Falle eines Plattendurchbruchs eine Leckage über den jeweiligen, nach allen Seiten offenen, drucklosen Zwischenspalt erfolgt und somit zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen gegen Vermischen von unerhitzter mit erhitzter Milch entbehrlich sind. Andererseits ist wegen leckagespaltbedingter ungünstigerer Wärmeübertragungsbedingungen eine größere Wärmeübertragungsfläche erforderlich, wenn der gleiche Wärmerückgewinn wie mit der jeweiligen Standardschaltung erzielt werden soll.
3. Anwendung von Markierungsstoffen zwecks Feststellung von Plattendurchbrüchen z.B. der Firma Bactoforce GmbH. Dabei wird im Vorlauf der Milchpasteurisanlage mit Markierungsstoffen versetzte Flüssigkeit umgewälzt und die Konzentration dieses Stoffes im Rücklauf gemessen. Bei intakten Wärmeübertragungsflächen ist keine Konzentration des Markierungsstoffes messbar und umgekehrt.



Alternative A

Alternative B

Alternative C



- | | | | | | | | |
|-------|-----------------------------|----------|---|---------|---|---------------------|---------------------|
| E | Erhitzungsabteilung | (LSH) | Stand-Schaltung-hoch | (QIRAS) | elektr. Leitfähigkeit-Anzeige-Registrierung-Alarm-Schaltung | (Kreiselpumpe) | Kreiselpumpe |
| H | Heisswasser-Erhitze | (LSL) | Stand-Schaltung-niedrig | (PDIRA) | Druckdifferenz-Anzeige-Registrierung-Alarm | (DP) | Druckerhöhungspumpe |
| K | Kühler | (LI) | Standanzeige (U-Rohr) | (GO±) | Überwachung der Stellung des Umschaltventils Durchlauf / Umlauf | (UP) | Umwälzpumpe |
| S | Entrahmungsseparator | (LRA±) | Stand Registrierung – Alarm (Niedrigwert) | (M) | Pumpe mit drehzahl-gesteuertem Motor | (Ausdehnungsgefäß) | Ausdehnungsgefäß |
| W1 | Wärmerückgewinn Abt.1 | (TIR) | Temperatur-Anzeige-Registrier-Ventil-Schaltung | (PI) | Druck-Anzeige | (Kondensatableiter) | Kondensatableiter |
| W2 | Wärmerückgewinn Abt.2 | (TIRS) | Durchfluss-Anzeige-Registrierung -Drehzahlregelung nach dem maximal zulässigen Volumenstrom | (PC) | Druck-Regelung | (Schauglas) | Schauglas |
| VB | Vorlaufbehälter | (FIRCA+) | | (PIRA±) | Druck Anzeige – Registrierung – Alarm (Niedrigwert) | (Umschaltventil) | Umschaltventil |
| (TI) | Temperatur-Anzeige | | | (FC) | Durchfluss-Regelung | | |
| (TIC) | Temperatur-Anzeige-Regelung | | | | | | |

Abb.: 12 Druckprüfeinrichtung nach „Fels“ [11]

3.5 Auslegung von Heißhaltern und Heißhaltezeitbegrenzung

Für die Kurzzeiterhitzung ist eine effektive Heißhaltezeit bei Erhitzungstemperatur direkt oder indirekt der (Peroxdasenachweis) vorgegeben [3]. Die effektive Heißhaltezeit berücksichtigt die Verweilzeitstreuung, d.h. die Verweilzeit der schnellsten (kürzeste Heißhaltezeit) und der langsamsten (längste Verweilzeit) Milchteilchen im Heißhalter. Bei einem festen Heißhaltervolumen ist die mittlere Heißhaltezeit ausschließlich vom Volumenstrom abhängig, abgesehen von einem vergleichsweise minimalen Einfluss der Querschnittsverengung durch die Belagbildung.

Bei Volumenstromänderungen, z.B. infolge variabel verstellbarer Pumpenförderleistung oder einer Betriebsartänderung von Wiedervermischungs- auf Entrahmungs- oder Teilenträhmungsbetrieb, muss gewährleistet sein, dass die kürzeste Heißhaltezeit eingehalten wird. Der maximale Volumenstrom (= Nennvolumenstrom) ist deshalb Grundlage für die Auslegung des Heißhalters unter Berücksichtigung der kürzesten bzw. der effektiv kürzesten Heißhaltezeit. Der Nennvolumenstrom darf nicht überschritten, bzw. im Rahmen eventuell vorgegebener längster Heißhaltezeit oder anderer Grenzwerte unterschritten werden.

Als mittlere Verweilzeit wird in der Regel die rechnerische mittlere Verweilzeit zugrunde gelegt, die aus dem Verhältnis Heißhaltervolumen (V) zum Volumenstrom (\dot{V}) einfach zu berechnen ist [12,13]. Die mit ihr verwandte real auftretende mittlere Verweilzeit wird dagegen experimentell als Mittelwert aus einer Verweilzeitverteilung (Verweilzeitspektrum) bestimmt. Da unter stationären Strömungsbedingungen die reale und die rechnerische mittlere Verweilzeit übereinstimmen, kann in der Praxis auf die experimentelle Verweilzeitermittlung verzichtet werden.

Unter Verweilzeitstreuung versteht man das Zeitintervall zwischen den schnellsten und den langsamsten Milchteilchen beim Passieren des Austritts eines Heißhalters [12]. Diese maximale Streubreite der Verweilzeit ist ein absoluter Wert ohne Wichtung. Sie entspricht nicht der Varianz oder der Standardabweichung, die bei statistischen Verteilungen das gewichtete Maß der Streuung um den Mittelwert darstellen. Die maximale Verweilzeitstreuung eines Strömungssystems kann experimentell oder, sofern die funktionellen Zusammenhänge des Verweilzeitverhaltens dieses Strömungssystems bekannt sind, auch rechnerisch bestimmt werden. Aus experimentell mit Hilfe der Markierungstechnik bestimmten Verweilzeitspektren kann die maximale Verweilzeitstreuung nach Festlegung der Randpunkte (entspricht den Nullpunkten) unmittelbar abgelesen werden. Allerdings muss nach jeder Änderung der Betriebsbedingungen im Heißhalter eine erneute Messung durchgeführt werden. Das experimentell erhaltene Verweilzeitspektrum nähert sich der Zeitachse nach beiden Seiten asymptotisch, ohne sie im Endlichen zu schneiden, wobei der Grad der Annäherung von der Messgenauigkeit der die Markierungssubstanz kennzeichnenden physikalischen Größen, wie Konzentration, elektrische Leitfähigkeit usw., abhängig ist

Abb. 13.

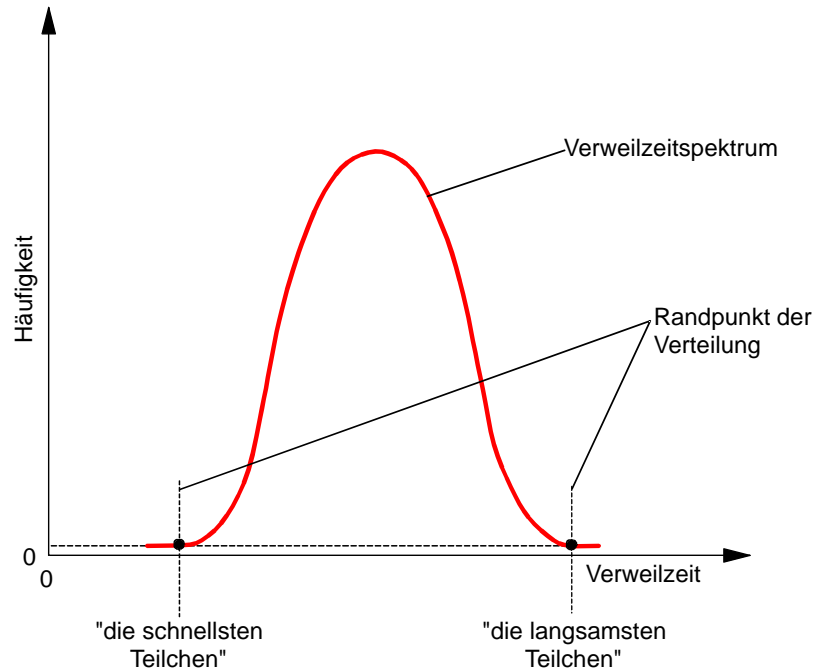


Abb.: 13 Verweilzeitspektrum mit dazugehörigen Randpunkten der Verteilung

Daher sind Beginn und Ende des Verweilzeitspektrums bzw. die Nullpunkte des Spektrums willkürlich festzulegen. Das Herausgreifen „des schnellsten Teilchens und „des langsamsten Teilchens“ durch Zuordnung einer sehr kleinen Häufigkeit ist nicht möglich, weil das Messsignal welches ein einziges Milchteilchen hervorrufen würde, zu gering wäre, um messtechnisch erfasst werden zu können. Deshalb ist stets eine messtechnisch relevante Häufigkeit zu wählen, so dass es sich zwangsläufig immer um mehrere Milchteilchen handeln wird, für die die daraus resultierende kürzeste beziehungsweise längste Heißhaltezeit zutrifft [12].

Die rechnerische Ermittlung der Verweilzeitstreuung setzt die Kenntnis des Verweilzeitverhaltens des jeweils eingesetzten Heißhalters voraus. Aus systematischen Untersuchungen sind die das Verweilzeitverhalten beschreibenden Zusammenhänge für Rohrströmung von Taylor [14], Sjenitzer [15] und Nassauer [16], für Strömung in Plattenfließwegen von Kiesner [17], aufgestellt worden.

Für Rohr- und Plattenheißhalter kann mit sehr guter Genauigkeit das Verweilzeitmodell eines Strömungsrohres mit axialer Diffusion, das sogenannte Dispersionsmodell, zugrunde gelegt werden. Die allgemeine mathematische Funktion des Verweilzeitspektrums für das Dispersionsmodell lautet [16]

$$f(\tau) = \sqrt{\frac{Bo \bar{\tau}}{4\pi\tau^3}} \exp\left[-\frac{Bo(\bar{\tau} - \tau)^2}{4\bar{\tau}\tau}\right] \quad (1).$$

Hierin sind:

Bo-Bodenstein-Zahl,

τ - Zeit (s),

$\bar{\tau}$ - mittlere Verweilzeit (s).

Die Nullpunkte dieser Funktion Gl.(1), ergeben sich für unendlich große Werte der Zeit τ . Sie können infolgedessen nicht als die kürzeste beziehungsweise längste Verweilzeit interpretiert werden. Erst wenn man für die Nullpunkte einen endlichen Funktionswert zum Beispiel eine kleine Häufigkeit von 0,01 festlegt, kann die auf die mittlere Verweilzeit bezogene kürzeste oder längste, effektive Verweilzeit $\frac{\tau_{\min}}{\bar{\tau}}$ oder $\frac{\tau_{\max}}{\bar{\tau}}$ in Abhängigkeit von der Bo-Zahl (Bodenstein-Zahl) bestimmt werden.

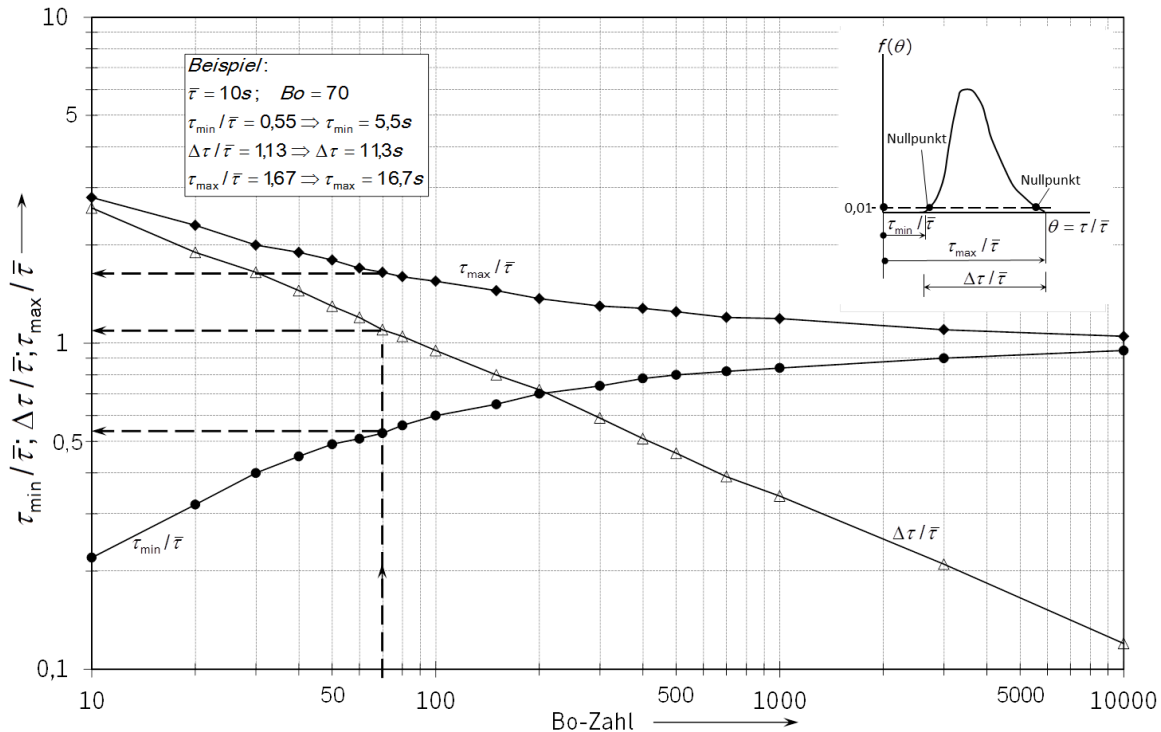


Abb.: 14 Diagramm zur Ermittlung der relativen kürzesten, längsten und der Streuung der Verweilzeit in Abhängigkeit von der Bo-Zahl [17]

In **Abb. 14** sind die für $\frac{\tau_{\min}}{\bar{\tau}}$, für $\frac{\tau_{\max}}{\bar{\tau}}$ sowie für die relative Streuung $\frac{\Delta\tau}{\bar{\tau}}$ in Abhängigkeit von der Bo-Zahl graphisch dargestellt. Mit Hilfe dieses allgemeingültigen Diagramms, können die kürzeste und die längste Verweilzeit sowie die Verweilzeitstreuung ermittelt werden. Dazu muss die mittlere Verweilzeit $\bar{\tau}$ und die Bo-Zahl bekannt sein [12, 17]. Die dimensionslose Bo-Zahl ist von folgenden Größen abhängig

$$Bo = \frac{\bar{w} L}{D_{eff}} \quad (2).$$

Hierin sind:

D_{eff} - effektiver Dispersionskoeffizient ($m^2 s^{-1}$),

\bar{w} - mittlere Geschwindigkeit (ms^{-1}),

L - Länge des Heißhalters (m).

Der effektive Dispersionskoeffizient D_{eff} ist für das jeweilige Strömungssystem experimentell zu bestimmen. Er hängt außer von den Stoffeigenschaften des Fluids vor allem von den hydrodynamischen Bedingungen, von den Phasenverhältnissen und von der Geometrie des Strömungssystems ab. In funktioneller Form kann man schreiben

$$D_{eff} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Geometrie}) \quad (3).$$

Unter statistischem Gesichtspunkt ist der Dispersionskoeffizient ein Maß für eine mögliche Abweichungen diskreter Fluidteilchen von der geordneten Transportbewegung eines Pfropfens mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{w} [12].

Die Heißhalterstrecken bei Milcherhitzern werden in der Regel in Form einer Rohrstrecke ausgeführt. Taylor [14] hat dafür den axialen Dispersionskoeffizient D_{eff} eine Gleichung in der Form

$$D_{eff} = 1,785 \bar{w} D \sqrt{\lambda} \quad (4)$$

aufgestellt. Darin sind λ die Rohrreibungszahl, \bar{w} die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und D der Rohrdurchmesser.

Für turbulente Rohrströmung ($\text{Re} \geq 10000$) ergibt sich aus Gl.(4) folgende Abhängigkeit

$$\frac{D_{eff}}{\nu} = 0,766 \text{Re}^{0,9} \quad (5).$$

Für den Übergangsbereich $2300 \leq \text{Re} \leq 10000$ gilt nach Sjenitzer [15]

$$\frac{D_{eff}}{\nu} = 1296 \text{Re}^{0,1} \left(\frac{D}{L} \right)^{-0,141} \quad (6).$$

Die Reynoldszahl (Re) ist nach Gleichung

$$\text{Re} = \frac{\bar{w} D}{\nu} \quad (7),$$

mit D als Rohrdurchmesser zu bestimmen.

Gleichung (7) und (5) eingesetzt in Gleichung (2) ergibt für turbulente Strömung im Heißhalter

$$Bo = 1,3 \bar{w}^{0,1} L D^{-0,9} \nu^{-0,1} \quad (8).$$

Wird für die Auslegung eines Röhrenheißhalters für einen Volumenstrom von \dot{V} ein Rohr von der Länge L und einem Durchmesser D gewählt, so kann die mittlere Verweilzeit

nach Gleichung $\bar{\tau} = \frac{\pi D^2 L}{4\dot{V}}$ und die mittlere Geschwindigkeit nach Gleichung $\bar{w} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2}$

berechnet werden. Aus diesen Größen wird die Bo-Zahl nach Gl.8 berechnet und aus Gl.1 unter Annahme einer kleinen Häufigkeit von beispielsweise 0,001, die bezogene

kürzeste Verweilzeit $\frac{\tau_{\min}}{\bar{\tau}}$ und die bezogene längste Verweilzeit $\frac{\tau_{\max}}{\bar{\tau}}$ ermittelt, s. dazu auch Diagramm **Abb. 14**. Die Differenz der Verweilzeiten $\tau_{\max} - \tau_{\min}$ stellt die Verweilzeitstreuung dar. Entsprechende Rechenprogramme für die schnelle Auslegung von Röhrenheizhaltern sind an der Prüfstelle MRI Kiel erstellt worden.

Liegen dagegen die ermittelten Re-Zahlen unterhalb von 10000, so kann die Verweilzeitstreuung nach der von Nassauer [18] für Rohrströmung entwickelten Methode bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass die axiale Mischung nicht an der Trennfläche die sich durch die Rohrleitung mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{w} bewegt stattfindet, sondern an einer Geschwindigkeitsverteilung die sich mit Hilfe eines resultierenden Exponenten n_{res} beschreiben lässt. Die Abhängigkeit des Exponenten n_{res} von der Re-Zahl wurde von Nassauer [18] experimentell für Rohrströmung ermittelt. Danach gilt beispielsweise für einen Röhrenheizhalter der aus zwei verschiedenen Abschnitten besteht s. **Abb. 15**, für den mittleren Exponenten \bar{n}_{res}

$$\bar{n}_{res} = -1,5 + \sqrt{\frac{2\bar{w}_{\max}}{\bar{w}} + 0,25} \quad (9),$$

wobei \bar{w}_{\max} die mittlere maximale Strömungsgeschwindigkeit und \bar{w} die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in allen Abschnitten des Heizhalters sind, s. **Abb. 15**.

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} beider Abschnitte des Heizhalters (I und II) wird mit

$$\bar{w} = \frac{L_I + L_{II}}{\frac{L_I}{w_I} + \frac{L_{II}}{w_{II}}} \quad (10)$$

und die mittlere maximale Strömungsgeschwindigkeit mit

$$\bar{w}_{\max} = \frac{L_I + L_{II}}{\frac{2}{(1+n_{resI})(2+n_{resII})} \frac{L_I}{w_I} + \frac{2}{(1+n_{resI})(2+n_{resII})} \frac{L_{II}}{w_{II}}} \quad (11)$$

berechnet.

Die Exponenten n_{resI} und n_{resII} in Abhängigkeit von der jeweiligen Re-Zahl lassen sich aus dem von Nassauer [18] experimentell bestimmten Diagramm ablesen.

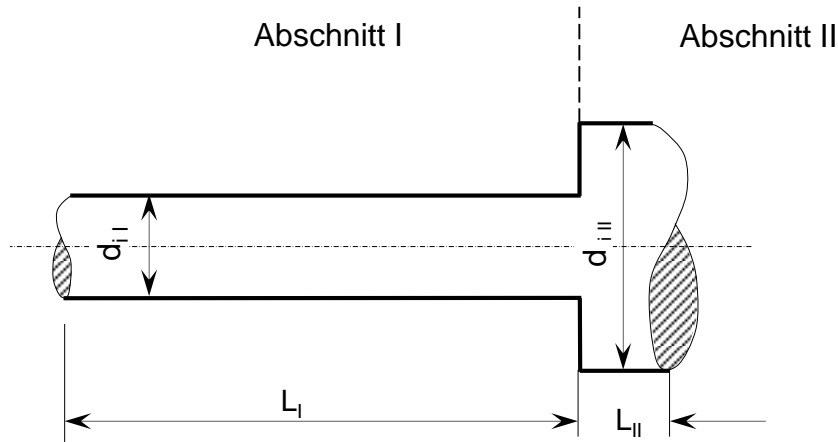


Abb.: 15 Eine aus zwei Abschnitten mit unterschiedlichen Durchmessern bestehende Heißhaltestrecke

Unter Vernachlässigung der lokalen Druckverluste im Heißhalter gibt Nassauer [18] für die Bestimmung der relativen kürzesten Verweilzeit eine Gleichung in der Form

$$\left(1 - \frac{\tau_{\min}}{\bar{\tau}}\right) = \left(1 - \frac{2}{(2 + \bar{n}_{res})(1 + \bar{n}_{res})}\right) + 3,5 \sqrt{\frac{\bar{D}_{eff}}{LW}} \quad (12)$$

an, wobei ist L die Gesamtlänge des Heißhalters und \bar{D}_{eff} der mittlere Dispersionskoeffizient der Heißhalterabschnitte.

Für den hier betrachteten Fall eines Heißhalters aus zwei Abschnitten, ergibt sich für den mittleren Dispersionskoeffizienten folgender Zusammenhang

$$\bar{D}_{eff} = \frac{L_I + L_{II}}{\frac{L_I}{D_{eff I}} + \frac{L_{II}}{D_{eff II}}} \quad (13).$$

Die Dispersionskoeffizienten der Heißhalterabschnitte $D_{eff I}$ und $D_{eff II}$ werden nach Gleichung 4 berechnet. Ein Rechenbeispiel der Auslegung eines aus zwei Abschnitten bestehenden Heißhalters ist unter [19] zu finden.

Grundsätzlich ist bei der Auslegung von Heißhaltern zu beachten, dass die mittlere Verweilzeit so gewählt werden muss, dass auch bei Re-Zahlen die kleiner als 10000 sind, unter Berücksichtigung der resultierenden Verweilzeitstreuung die kürzeste Verweilzeit den Wert von 15 s nicht unterschreitet. Das Prinzip der Auslegung von Heißhaltern wird mit der von Biewendt [13] dargestellten Abbildung verdeutlicht, **Abb. 16**

3.6 Wärmerückgewinn

Der erzielbare Wärmerückgewinn ist eine charakteristische Kenngröße einer Milchpasteurieranlage. Er ist von der thermischen Auslegung der Wärmerückgewinnabteilungen abhängig. Je größer ein Wärmerückgewinn ausfällt, desto geringer ist die Wärmemenge die zum Erreichen der erforderlichen Erhitzungstemperatur der Milch in der Erhitzungsabteilung zugeführt werden muss, s. **Abb. 1**. Im Erhitzungsprozess wird die kalt gestapelte Rohmilch (6°C) zuerst auf 75°C erhitzt und nach einer erforderlichen Heißhaltephase wieder auf eine Abfülltemperatur von ca. 6°C heruntergekühlt. Für das Herunterkühlen wird die kalte Vorlaufmilch verwendet die sich dabei aufwärmt. Die bei der Herunterkühlung bzw. der Vorwärmung ausgetauschte Wärmemenge stellt das Maß der Wärmerückgewinnung dar. Setzt man die zurückgewonnene Wärmemenge zu der für die Erhitzung erforderlichen Wärmemenge $\dot{\Theta}$ ins Verhältnis, so erhält man den Wärmerückgewinnungsgrad einer Milchpasteurieranlage.

Für die Betriebsvariante wo nach dem Entrahmungsseparator nur Magermilch pasteurisiert wird, ergibt sich für die zugeführte Wärmemenge in den Wärmerückgewinnabteilungen *W1 und W2* und in der Erhitzungsabteilung, s. **Abb. 17**, folgende Gleichung

$$\dot{m}_{RM} c(\vartheta_S - \vartheta_{VE}) + \dot{m}_{MM} c(\vartheta_{VA} - \vartheta_S) + \dot{m}_{MM} c(\vartheta_E - \vartheta_{VA}) = \dot{\Theta} \quad (1).$$

Ersetzt man den Rohmilchmassenstrom \dot{m}_{RM} mit den Massenströmen der Magermilch und des Rahms in der Form

$$\dot{m}_{RM} = \dot{m}_R + \dot{m}_{MM} \quad (2),$$

so erhält man aus Gl. (1)

$$\dot{m}_{MM} c(\vartheta_E - \vartheta_{VE}) + \dot{m}_R c(\vartheta_S - \vartheta_{VE}) = \dot{\Theta} \quad (3).$$

Der Wärmerückgewinnungsgrad WR, beträgt dann

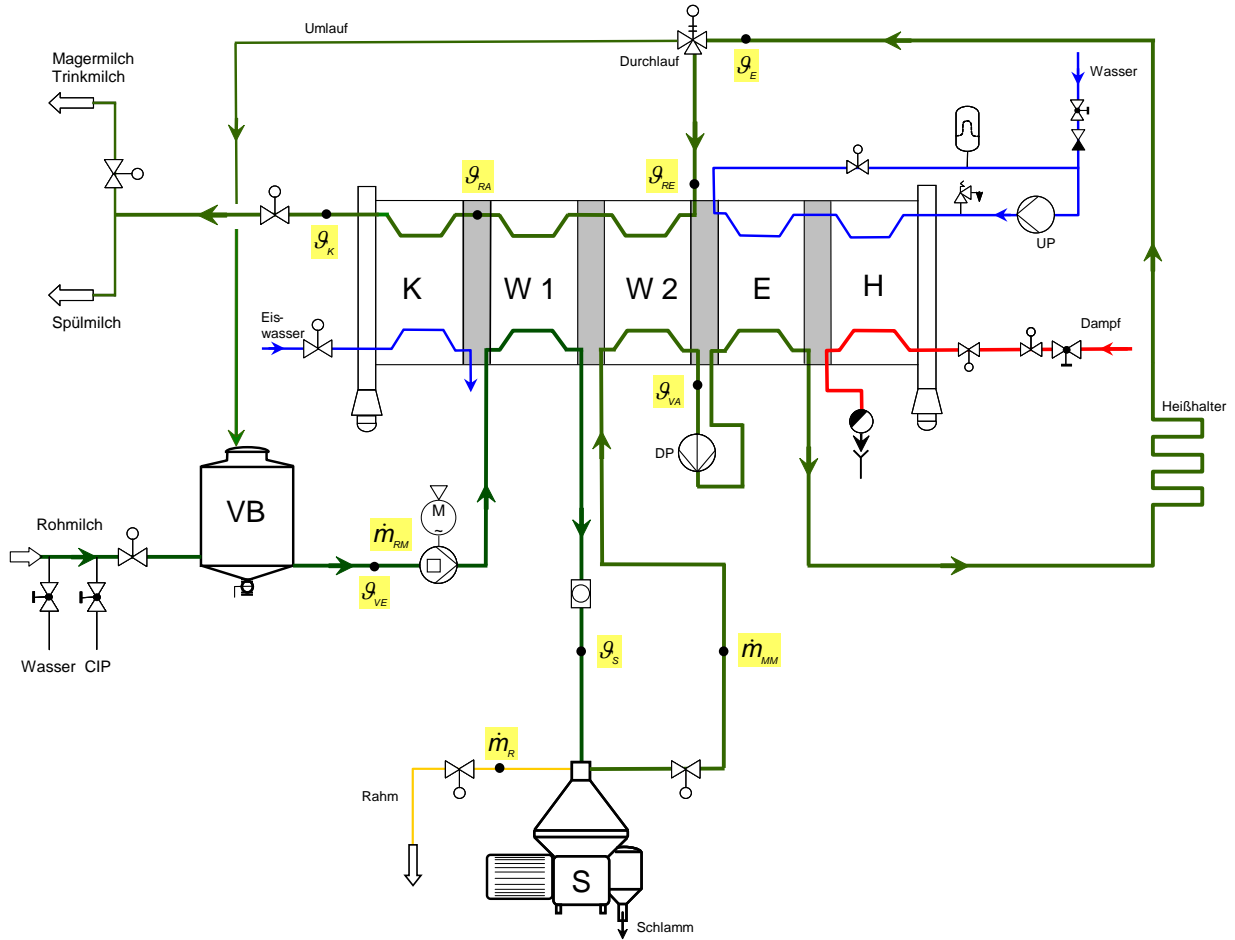
$$WR = \frac{\dot{m}_{MM} (\vartheta_E - \vartheta_{RA})}{\dot{m}_{MM} (\vartheta_E - \vartheta_{VE}) + \dot{m}_R (\vartheta_S - \vartheta_{VE})} \quad (4).$$

Der Rahmanfall \dot{m}_R hängt von den Fettgehalten der Rohmilch (f_{RM}), des Rahms (f_R) und der Magermilch (f_{MM}) ab. Der letzte sollte nicht größer als 0,05 % sein.

Der Rahmanfall kann entsprechend nach der Gleichung

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_{RM} (f_{RM} - f_{MM})}{f_R - f_{MM}} \quad (5)$$

berechnet werden.



- E Erhitzungsabteilung
- H Heisswasser-Erhitzer
- K Kühler
- S Entrahmungsseparator
- W1 Wärmerückgewinn Abt.1
- W2 Wärmerückgewinn Abt.2
- VB Vorlaufbehälter

- Verdrängungspumpe
- Kreiselpumpe
- Pumpe mit drehzahlgesteuertem Motor
- Druckerhöhungspumpe
- Umwälzpumpe
- Ausdehnungsgefäß
- Kondensatableiter
- Schauglas
- Umschaltventil

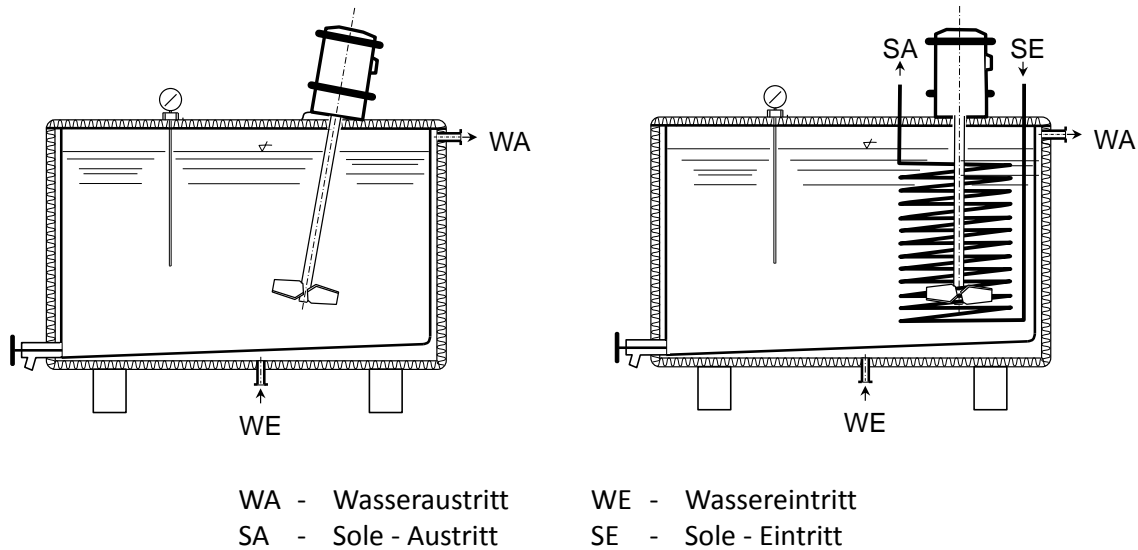
- g_E Eintrittstemperatur - Vorlauf W1 – W2 Abt.
- g_S Separator - Temperatur
- g_{VA} Austrittstemperatur – Vorlauf
- g_{VE} Erhitzungstemperatur
- g_{RE} - Eintrittstemperatur – Rücklauf
- g_{RA} - Austrittstemperatur – Rücklauf
- $g_{RE} = g_E$
- \dot{m}_{RM} - Massenstrom Rohmilch
- \dot{m}_{MM} - Massenstrom Magermilch
- \dot{m}_R - Massenstrom Rahm

Abb.: 17 Verfahrenstechnisches Fließschema einer Pasteuranlage mit eingetragenen Betriebsgrößen

4. Diskontinuierliche Milchpasteurisieranlagen

Die Dauererhitzung von Milch auf 63°C und einer Heißhaltezeit von 30 Minuten, s. Pkt.2, wird diskontinuierlich in doppelwandigen Behältern (Dauererhitzungswannen) durchgeführt. Sie wird heute für kleine Milchmengen in der Regel bei den Selbstvermarktern eingesetzt. Alle drei Wärmebehandlungsschritte, Aufheizen, Heißhalten und Kühlen finden in derselben Dauererhitzungswanne statt. Das Verfahren und die Dauererhitzungswannen werden nach der Prüfrichtlinie [20] typgeprüft.

Die Dauererhitzung von Milch zählt, ähnlich wie die Kurzzeiterhitzung, zu den schonenden Erhitzungsverfahren. In verfahrenstechnischer Hinsicht gestattet die Durchführung der Dauererhitzung einen einfachen Aufbau der Anlage. Forderungen nach einer Druckkonstanz der Wärmezufuhr und nach einer konstanten oder von der Milchttemperatur gesteuerten Energiezufuhr, wie sie bei Durchflusserhitzern als notwendig angesehen werden, brauchen bei dem Dauerwannenbetrieb nicht angestellt zu werden [21]. Auf der Milchseite fällt das bei Durchflusserhitzern zur Rückleitung der ungenügend erhitzten Milch benötigte Umschaltventil fort. Nach beendeter thermischer Behandlung kann die Dauererhitzungswanne auch zur Milchlagerung verwendet werden [21]. **Abb. 18** zeigt die gebräuchlichen Typen von Dauererhitzungswannen. Beim Aufheizen wird der Zwischenraum der doppelwandigen Wanne mit Heizwasser/Dampf durchströmt. Bei der Kühlung wird er mittels Eiswasser durchströmt. Wird als Kühlmittel Sole gebraucht, so strömt diese durch einen separaten in der Doppelwand eingebauten Wärmeübertrager oder durch eine eingetauchte Rohrspirale. Infolge der durch Heißhaltung zeitlich voneinander getrennten Erhitzung und Kühlung ist ein Wärmerückgewinn nicht möglich. Der Energiebedarf von Dauererhitzungswannen, sowohl beim Aufheizen als auch Kühlen, ist etwa doppelt so hoch, wie bei kontinuierlicher Erhitzung beispielsweise auf 65°C und bei 65% Wärmerückgewinn [21]. Die Berechnung der erforderlichen Behandlungszeiten und zu übertragenden Energien ist mit den aus der Literatur bekannten mathematischen Beziehungen möglich, wobei die Übereinstimmung mit der Praxis selten gegeben ist. Grund dafür ist neben der nicht immer genau bekannten Wärmedurchgangszahl k vor allem die bei undefinierter Flüssigkeitsströmung im Doppelmantel nur schwer abzuschätzende „mittlere Heißwassertemperatur“. Dem wird in der Fachliteratur dadurch Rechnung getragen, dass sich die Zahlenbeispiele hierzu immer auf die Fälle mit Sattdampfbeheizung beziehen. Nur dann kann die Heizmitteltemperatur an jeder Stelle der Heizfläche als konstant gegeben und angesetzt werden, so dass Rechnung und Experiment in Einklang stehen [22, 23]. Eine konstruktive Verbesserung des Doppelmantels ist gegeben, wenn Strömungsführung des Heizmediums definiert geschieht, z. B. in aufgeschweißten Halbrohren, so dass eine eindeutige Zuordnung von Temperaturveränderung und Heizfläche möglich ist.



a) Stehende Wanne für Eiswasserkühlung b) Stehende Wanne mit Sole - Rohrspirale

Abb.: 18 Unterschiedliche von der Kühlungsart abhängige Bauarten von Dauererhitzungswannen

Die Zeit der Aufheizphase τ von einer Temperatur des Produktes $\vartheta_p(0)$ bis auf $\vartheta_p(\tau)$ kann bei Mischbetrieb, d.h. bei der Annahme eines jederzeit temperaturlausgeglichenen Körpers in der Dauererhitzungswanne, wie folgt berechnet werden (s. Abb. 19)

$$\tau = \frac{1}{K} \ln \frac{\vartheta_{D/W} - \vartheta_p(0)}{\vartheta_{D/W} - \vartheta_p(\tau)} \quad (1),$$

dabei ist $\vartheta_{D/W}$ die Heizdampf- oder die mittlere Heizwassertemperatur. Weiterhin wird K nach der Gleichung

$$K = \frac{A}{V} \frac{k}{\rho c} \quad (2),$$

mit k als Wärmedurchgangszahl und V als Volumen der Dauererhitzungswanne berechnet. Wenn Boden nicht beheizt, wird $A/V = 4/D$ und $K = \frac{4}{D} \frac{k}{\rho c}$.

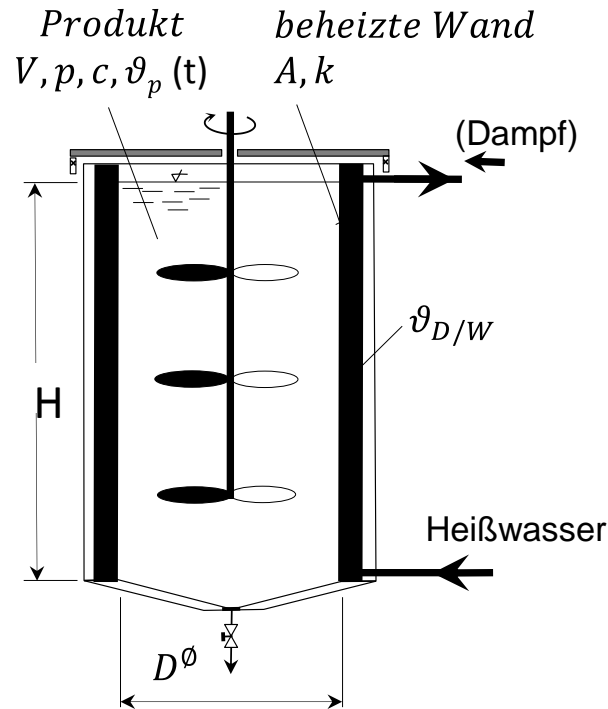


Abb.: 19 Betriebsdaten einer Dauererhitzungswanne

Der Wärmestrom der für die Aufheizung des Produkts erforderlich ist beträgt

$$\dot{\theta}(\tau) = Ak(\vartheta_{D/W} - \vartheta_p(\tau)) \quad (3).$$

Kann ein nicht jederzeit temperaturousgeglichener Milchinhalt in der Dauererhitzungswanne angenommen werden, so ist die Produkttemperatur neben der Zeit auch noch vom Ort in der Dauererhitzungswanne abhängig. Hinsichtlich der Abtötung von eventuell in der Milch vorhandenen pathogenen Keimen, spielt die Kenntnis der Temperaturverteilung im gesamten Milchvolumen eine sehr wichtige Rolle. Da Keime relativ homogen im gesamten Volumen der Milch verteilt sind, muss prozessverfahrenstechnisch sichergestellt werden, dass die Mindesttemperatur von 63°C an jeder Stelle im Milchvolumen für 30 min erreicht war. Es reicht jedoch aus die Produkttemperatur nach einer bestimmten Zeit an zwei Orten in der Dauererhitzungswanne nämlich im Wandbereich und in der Mitte des Milchvolumens zu berechnen. Ist die Mindesttemperatur von 63°C in der Mitte des Milchvolumens erreicht und wird sie für 30 min. nicht unterschritten, so sind bei einem Wärmetransport von der Wand zur Mitte alle Temperaturen außerhalb der Mitte höher als 63°C.

Die Berechnung der Produkttemperatur in der Mitte des Milchvolumens kann bei nicht jederzeit temperaturousgeglichene Milchinhalt für einen zylindrischen Körper nach der Methode der dimensionslosen Kennzahlen ermittelt werden [24]. Danach ist die

Temperatur in der Mitte nach einer Zeit τ eine Funktion der dimensionslosen Kennzahlen Bi (Biot-Zahl) und Fo (Fourier-Zahl)

$$\frac{\vartheta_{D/W} - \vartheta_{Mitte}(\tau)}{\vartheta_{D/W} - \vartheta(\tau=0)} = f(Fo, Bi) \quad (4),$$

wobei $Bi = \frac{\alpha D}{2 \lambda_{fest}}$ die dimensionslose Biot-Zahl und $Fo = \frac{4 a \tau}{D^2}$ die dimensionslose Fourier-Zahl ist.

In den Gleichungen für die Berechnung der dimensionslosen Zahlen Bi und Fo sind:

$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ die Temperaturleitzahl für Milch,

α die Wärmeübergangszahl Wand/Produkt,

D der Durchmesser der Dauererhitzungswanne,

λ Wärmeleitfähigkeit der Milch und

λ_{fest} die Wärmeleitfähigkeit des Wandmaterials der Dauererhitzungswanne.

Aus entsprechenden Arbeitsdiagrammen der Funktion $\frac{\vartheta_{D/W} - \vartheta_{Mitte}(\tau)}{\vartheta_{D/W} - \vartheta(\tau=0)} = f(Fo, Bi)$ für

einen zylindrischen Körper [24], können für die berechneten Bi und Fo-Zahlen die Temperatur der Milch am Rand und in der Mitte einer Dauererhitzungswanne nach einer bestimmten Zeit τ ermittelt werden. Für die Beurteilung des erzielbaren Temperatursausgleichs im Milchvolumen reicht der Vergleich der erzielbaren Temperaturen am Rand und in der Mitte des Milchvolumens. Weichen die Temperaturen voneinander nicht stark ab, wobei eine Temperaturdifferenz von $\pm 1^\circ\text{C}$ durchaus annehmbar ist [20], und die Temperaturen in der Mitte die Mindesttemperatur von 63°C erreichen und 30 min lang gehalten werden, so kann ein solcher Temperatursausgleich als ausreichend bezüglich der Abtötung aller eventuell vorhandenen pathogenen Keimen angesehen werden. Festzuhalten ist ebenso, dass für sehr kleine Fo-Zahlen ($Fo < 0,2$) unabhängig von der Größe der Bi-Zahl keine Unterschiede zwischen den Temperaturen in der Mitte und am Rand des Zylinders auftreten, d.h. die Temperaturen im gesamten Volumen ausgeglichen sind. Die Fo-Zahl nimmt generell für kurze Aufheiz- oder Abkühlzeiten kleine Werte an. Die im Rahmen einer Typprüfung erfasste Temperaturverteilung zeigte einen gleichmäßigen Temperaturanstieg an allen gemessenen Messpunkten und eine Fo-Zahl von 0,0014 [25].

4.1 Verteilung der Temperatur im Milchbehandlungsraum

Nach der gültigen Prüfrichtlinie des Erhitzerausschusses für die Typprüfung von Dauererhitzern für Milch [20] wird im Wasserversuch ein wirkungsvoller Temperatureausgleich von $\pm 1^\circ\text{C}$ gefordert und im Rahmen der Typprüfung messtechnisch erfasst. Als empfohlene Platzierung von drei Messstellen wird in der Höhe $\frac{1}{4}h$ und in der Seite $\frac{d}{6}$ vorgeschlagen, s. **Abb. 20**.

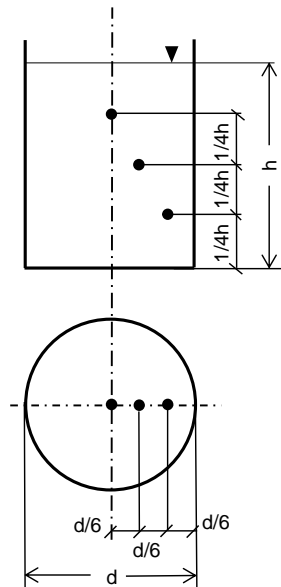
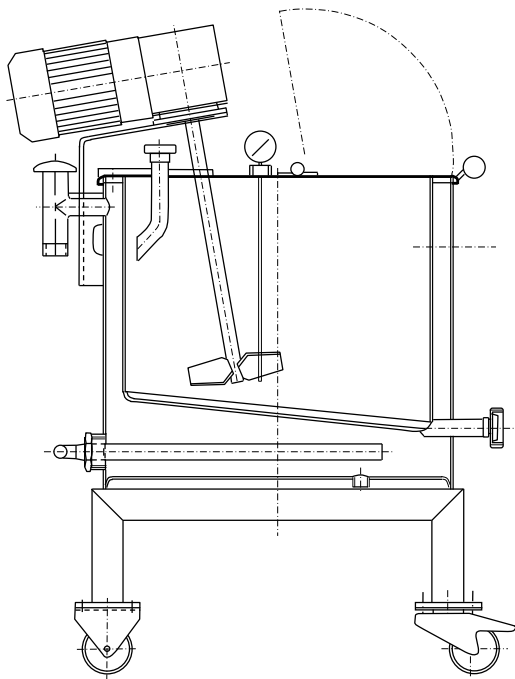


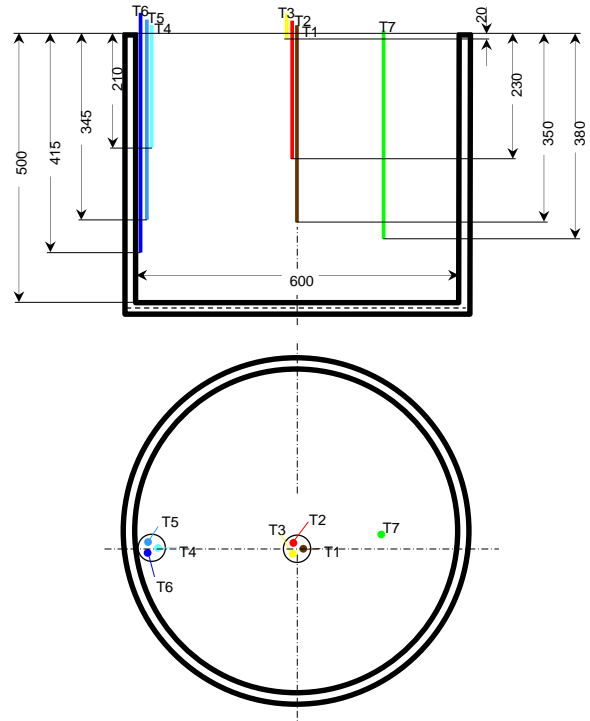
Abb.: 20 Anordnung der Temperaturmessstellen im Milchraum [20]

Zur Ermittlung des Temperatureausgleichs bei unterschiedlichen Füllgraden und unter Einwirkung eines Rührwerkes wurden Temperaturmessungen im Milchraum am Rand und in der Mitte einer Dauererhitzungswanne durchgeführt, s. **Abb. 21**.

Die Dauererhitzungswanne wurde mit Dampf beheizt. In der **Abb. 21** ist auch die Anordnung der Fühler veranschaulicht (rechtes Bild). Es wurden insgesamt sieben Fühler in der Dauererhitzungswanne verbaut, wobei der T7 Fühler ein fest installierter war. Es wird grundsätzlich ein Temperaturfühler fest an dem Behälterdeckel installiert. Er hat dann stets die gleiche Position im Milchraum und dient zu Überwachung und Registrierung der erforderlichen Erhitzungstemperatur. s. dazu auch Pkt. 4.2. Die Versuche wurden bei zwei Füllhöhen von 435 mm und 220 mm durchgeführt. Entsprechend lag die Füllmenge bei 121 l und 61 l. Der Messwert des Temperaturfühlers T7 wurde als Referenzwert herangezogen. Wenn T7 63°C erreicht hatte wurde die Dampfzufuhr abgeschaltet. Es folgte eine 30 minütige Heißhaltezeit und anschließend eine Kühlung mit kaltem Wasser. Bei der Dampf Temperatur wurde versucht einen konstanten Wert von 107°C einzuhalten. Die Temperaturmessungen wurden sowohl bei eingeschaltetem oder ausgeschaltetem Rührwerk durchgeführt.



Verwendeter Rührkessel
(Max Rubner-Institut Kiel, Kiesner 2013)



Anordnung der Temperaturfühler
und Maßangaben

Abb.: 21 Für eine experimentelle Erfassung der Temperaturen im Milchraum verwendete Dauererhitzungswanne und die Anordnung der Messstellen.
Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

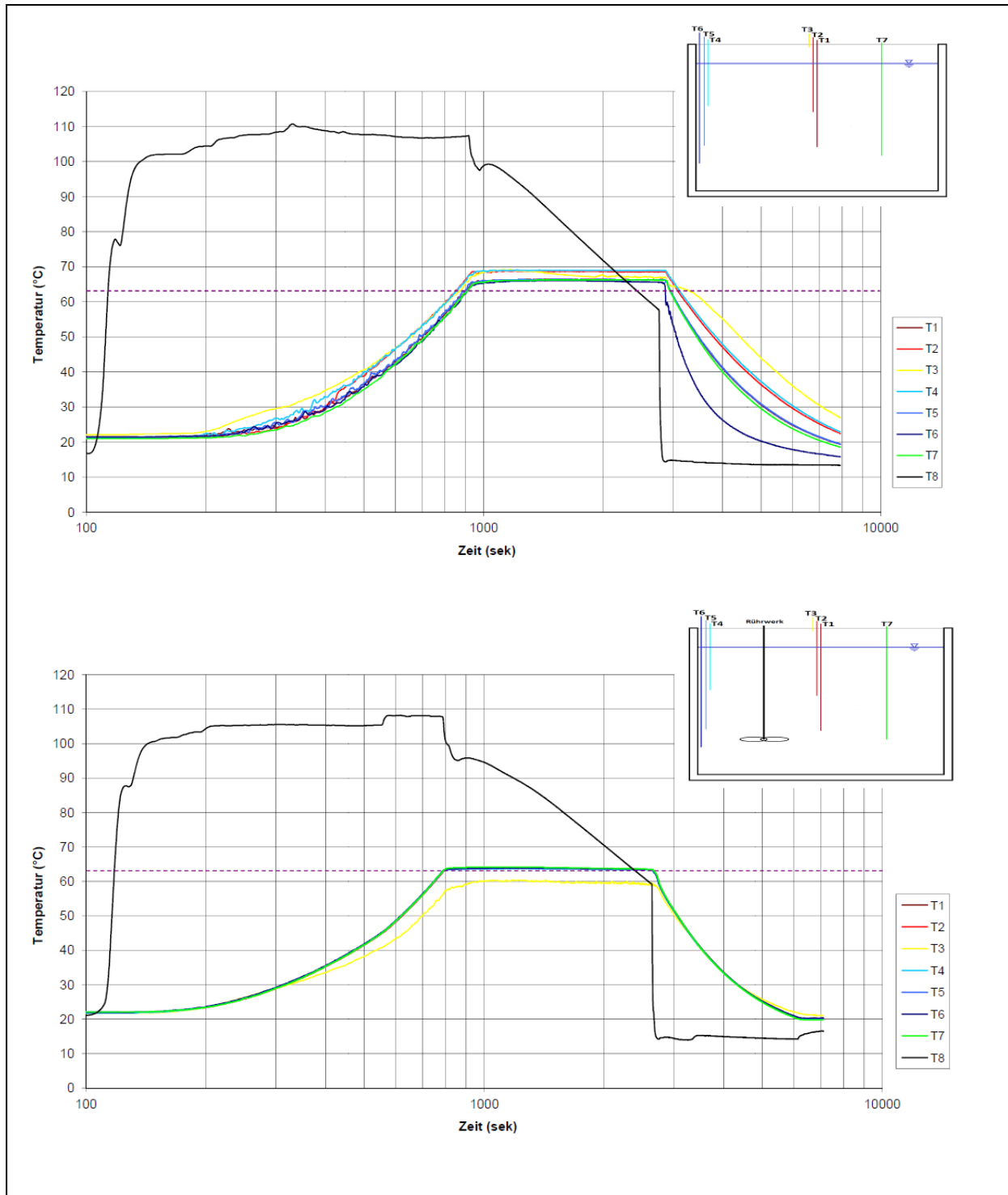


Abb.: 22 a-b Gemessene Temperaturen im Milchraum a) ohne Mischung, b) mit Mischung bei max. Füllhöhe. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

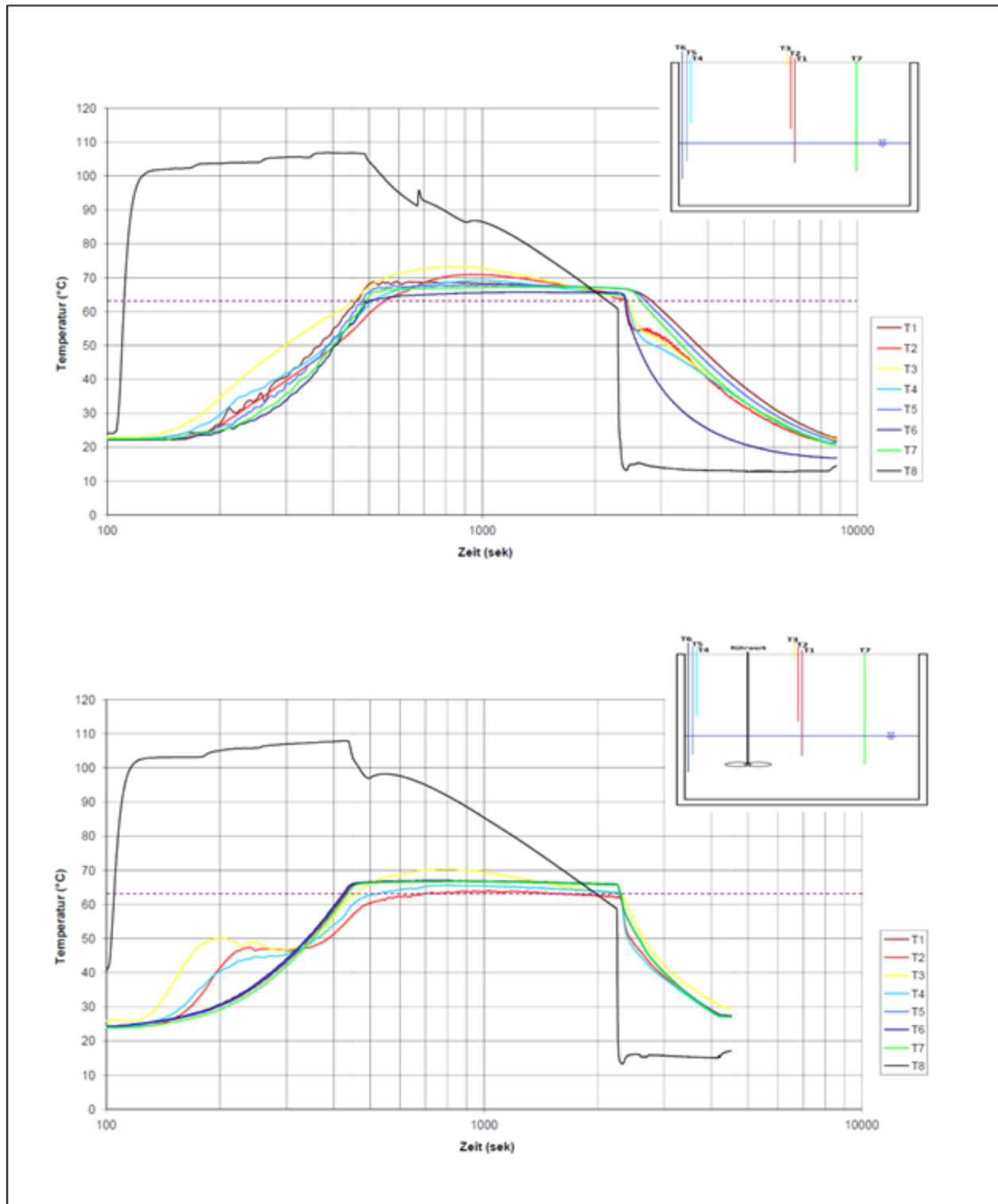


Abb.: 23 a-b Gemessene Temperaturen im Milchraum a) ohne Mischung, b) mit Mischung bei min. Füllhöhe. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

Abb. 22-23 zeigen die erzielten Ergebnisse unter den beschriebenen Versuchsbedingungen [26]. Auffallend ist, dass bei nicht laufendem Rührwerk die gemessenen Temperaturen in der Aufheizphase max. um 5°C schwanken. Die Schwankungen setzen sich in der Heißhaltephase fort, aber alle gemessenen Temperaturen erreichen bei der eingestellten Dampftemperatur den Mindestwert von 63°C. Unter diesen Bedingungen kann man zwar von einer sicheren Abtötung von Keimen im gesamten Produktvolumen ausgehen, die Temperaturschwankung ist aber höher als $\pm 1^\circ\text{C}$. Die im Wasserversuch erzielten Temperaturverteilungen sind auf den Milchbetrieb übertragbar. In der Abkühlphase schwanken die Temperaturen bis zu 20°C sehr stark. Das liegt daran, dass bei der Kühlung mit kaltem Wasser die Temperatur über die gesamte Wärmeübertragungsfläche nicht konstant ist. Bei der Beheizung mit Dampf ist die Temperatur über die gesamte Wärmeübertragungsfläche gleich, Abb. 22a. Bei zugeschaltetem Rührwerk ist ein nahezu schwankungsfreier Temperaturverlauf sowohl während der Aufheizphase als auch während der Kühlphase im Milchraum erzielbar, s. Abb. 22b. Ähnliche Zusammenhänge konnten bei Versuchen mit kleinerem Füllstand (61 l) erzielt werden, Abb. 23 a-b.

Anforderungen an die Temperaturverteilung im Milchraum:

- Die Temperaturverteilung im Milchraum muss vor der Inbetriebnahme messtechnisch erfasst werden. Es ist ausreichend wenn die Temperaturen in der Mitte und am Rand des Milchraums gemessen werden. Erreichen jedoch alle gemessenen Temperaturen den Mindestwert unter Berücksichtigung der Temperaturschwankung von 63°C und bleiben auf diesem Niveau während der Heißhaltephase für 30 Minuten erhalten, so kann für die jeweils eingestellte Dampf oder -Heißwassertemperatur von einer Reduktion von 5-log Phasen von *Coxiella burnetti* (s. Pkt. 2) im gesamten Milchraum ausgegangen werden.
- Wird eine ganze Typreihe von Dauererhitzungswannen zugelassen, so sind die Messungen der Temperaturverteilung für Wanne mit dem kleinsten Verhältnis $\frac{A}{V}$ durchzuführen.

4.2 Sicherheitseinrichtung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur und gegen unkontrollierten Zulauf bzw. Ablauf von Milch während der Wärmebehandlung

Der Prozess muss automatisch überwacht werden. Für das Auslassventil und den Behälterdeckel ist eine Verriegelung vorzusehen. Sie wird aktiviert mit dem Beginn der Wärmebehandlung und deaktiviert mit dem Ende der Behandlung. Bei Unterschreitung der Mindest-Erhitzungstemperatur muss die Heißhaltezeitählung unterbrochen werden. Nach einem erneuten Erreichen der Mindest-Erhitzungstemperatur beginnt die Zeitählung bei Null. Die Unterschreitung der Mindest-Erhitzungstemperatur und damit die Unterbrechung der Zeitählung ist zu signalisieren [20].

5. Verfahrenstechnische und technologische Weiterentwicklungen der Pasteurisierung von Konsummilch.

Wie unter Pkt.2 beschrieben, wird die Pasteurisierung primär wegen der Abtötung von eventuell in der Milch vorhandenen pathogenen Keimen eingesetzt. Die Temperatur/Zeit- Bedingungen dieser Wärmebehandlung wurden auf der Grundlage der Reduzierung von 5-log Phasen von *Coxiella burnetti* (Q-Fieber-Erreger) in Milch festgelegt. Die Mindesterhitzungsbedingungen sind bei der Dauererhitzung 63°C für 30 min sowie bei der Kurzzeiterhitzung 72°C für 15s.

Unter Praxisbedingungen wird bei der Kurzzeiterhitzung die Erhitzungstemperatur zwischen 72°C und 75°C gefahren. Die Heißhalter werden so ausgelegt, dass die kürzeste Verweilzeit bei mindestens 15s liegt und die längste Verweilzeit die 30s nicht überschreitet, s. Pkt. 3.5.

In einem Temperatur-Heißhaltezeit-Diagramm, **Abb.24**, sind die bekannten Wärmebehandlungsverfahren der Pasteurisierung (DE und KE) und der Sterilisierung (UHT, Sterilisation) eingetragen. Eingetragen sind ebenso Linien konstanter hitzeinduzierter chemischer Veränderungen bezogen auf Inaktivierung von Proteasen, Beta Lactoglobulin (β -LG)- Denaturierung, Inaktivierung von Phosphatase und Peroxidase, Kochgeschmack oder Inaktivierung von Plasmin. Eingetragen sind auch Linien konstanter Abtötung von *G. stearothermophilus*, *Clostridium botulinum*, TB oder *Brucellose*.

In der Kopfzeile des Diagramms sind Linien konstanter z-Werte im Bereich zwischen 10°C bis 35°C eingetragen. Der z-Wert dient der Charakterisierung der thermischen Widerstandsfähigkeit eines Merkmals. Der Zahlenwert gibt die Temperaturdifferenz an, die notwendig ist, um die Reaktionszeit zum Erreichen einer bestimmten Umsatzrate/Abtötung auf das 10-fache zu steigern bzw. auf 1/10 zu verringern. Die Linie eines konstanten z-Wertes entsteht, in dem man eine bestimmte Temperaturdifferenz der Zeitspanne von 10 zuordnet, s. kleines Diagramm in der Kopfzeile **Abb. 24**. Für die thermische Abtötung von Mikroorganismen in Milch liegen die z-Werte zwischen 6°C und 12°C. Bei den hitzeinduzierten chemischen Reaktionen (z. B Vit. B1-Abbau oder Lactulosebildung) zwischen 20°C und 35°C. Bei Enzyminaktivierung zwischen 24°C und 87°C [29].

Schneidet eine bestimmte Linie konstanten z-Wertes zwei unterschiedliche Erhitzungsbereiche, so kann davon abgeleitet werden, dass in beiden Bereichen der gleiche hitzeinduzierte Umsatz eines Merkmals generiert wird. Diese Annahme ist nur dann gültig, wenn sich die hitzeinduzierte Reaktion eines Merkmals im betrachteten Temperaturabschnitt in dem die beiden Erhitzungsbereiche liegen mit einem konstanten z-Wert abläuft.

Wird beispielsweise der Bereich der Kurzzeiterhitzung (KE) mit dem Bereich der länger haltbaren Milch (ESL), s. **Abb. 24**, mit einer z-Wert-Linie von 35°C verbunden, so kann man daraus ableiten, dass beide Verfahren den gleichen Umsatz eines bestimmten Merkmals mit $z=35^{\circ}\text{C}$ generieren. Hitzeinduzierte Veränderungen die sich mit einem $z=35^{\circ}\text{C}$ beschreiben lassen zählen bekanntlich zu den chemischen Veränderungen.

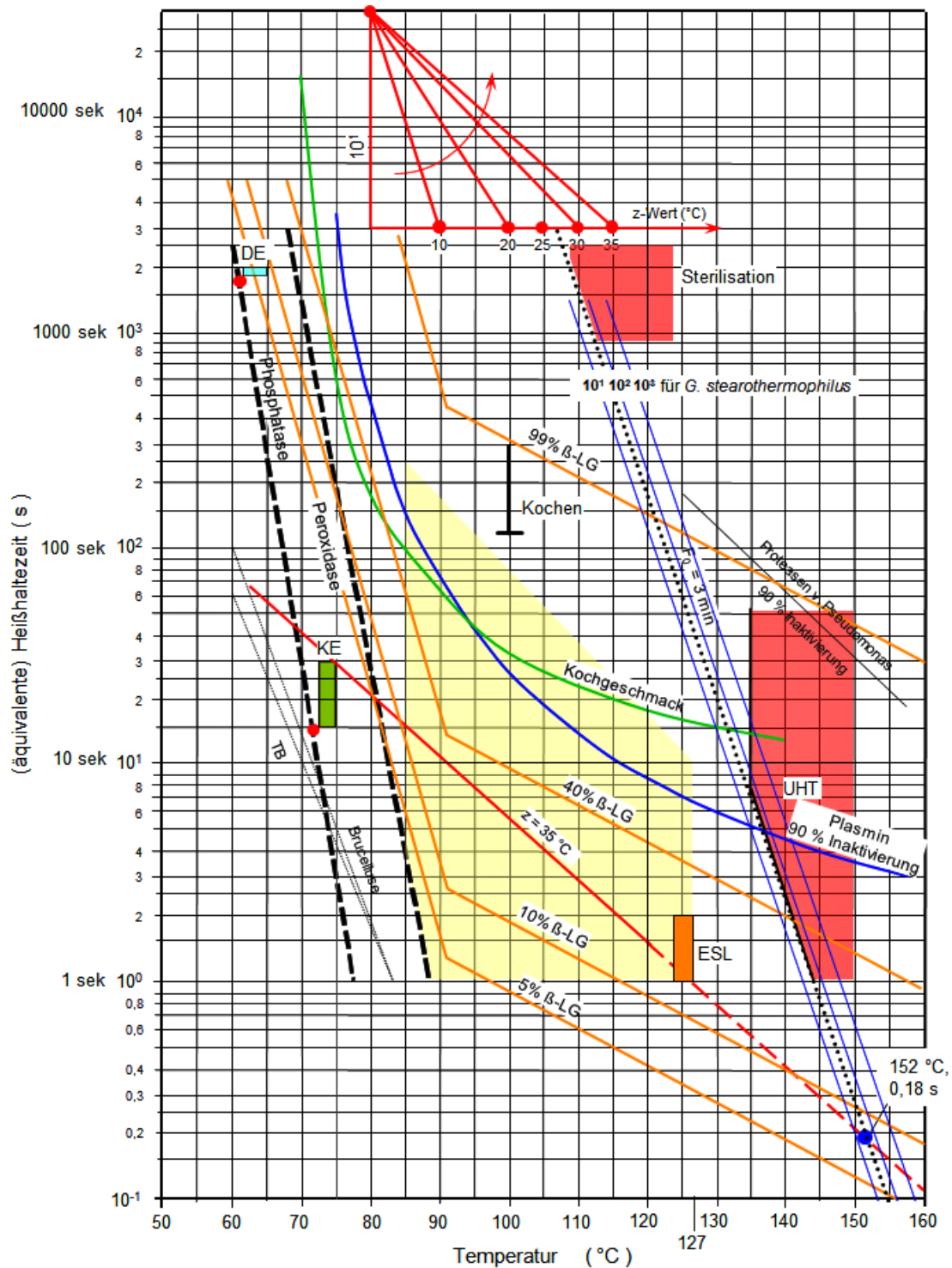


Abb.: 24 Erhitzungsbereiche im Temperatur-Zeit-Diagramm mit eingetragenen Linien konstanter Abtötung von TB, Brucellose, Clostridium Botulinum, *G. sterothermophilus* sowie Linien konstanter Denaturierung von Beta Lactoglobulin (β -LG), 90% Inaktivierung von Plasmin, des Kochgeschmacks und des konstanten z-Wertes. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

Die z-Wert-Linie von $z=10^{\circ}\text{C}$ (Abtötung von Mikroorganismen) ist für den ESL-Erhitzungsbereich sehr weit parallel nach rechts gegenüber dem Bereich der Kurzzeiterhitzung verschoben. Es findet daher bei dem ESL-Verfahren eine viel höhere Reduktion von Mikroorganismen als bei der Kurzzeiterhitzung statt. **Die ESL-Milch weist folglich bezogen auf Inhaltsstoffe und sensorische ähnliche Eigenschaften wie die kurzeiterhitzte Milch auf. Aufgrund der höheren Abtötungsrate von Mikroorganismen ist die ESL-Milch jedoch länger haltbar** [31, 32]. Die Haltbarkeit liegt unter Kühlbedingungen von 8°C bei ca. drei Wochen. Die ESL-Milch erfreut sich heute bei den Konsumenten einer großen Beliebtheit und nimmt einen festen Platz unter den anderen Konsummilchsorten ein. Das liegt eindeutig daran, dass die längere Haltbarkeit dieser Milch mit einer guten Qualität einhergeht [33, 34]. Die ESL-Milch weist keinen Kochgeschmack auf, solange die Heißhaltezeit bei Erhitzungstemperatur unter 2 s bleibt.

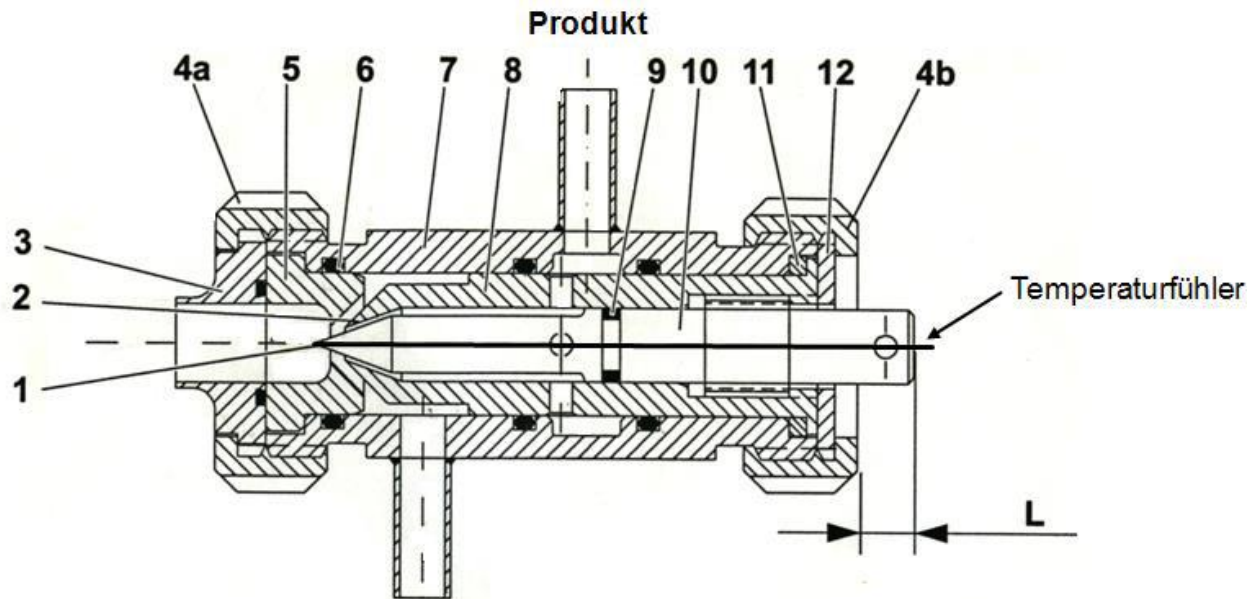
Die Abtötungsrate von Sporen, z.B. Sporen von *Geobacillus stearothermophilus*, im ESL-Bereich erreicht keinen Wert von 1-log Phase. Deswegen ist die ESL-Milch auch keine sterile Milch. Um sterile Milch herzustellen, ist eine Reduktion von 3-log Phasen bezogen auf *Geobacillus stearothermophilus* oder ein F_0 -Wert von 3 min erforderlich. Unter Beibehaltung des z-Wertes von 35°C ist eine Reduktion von 3-log Phasen von *Geobacillus stearothermophilus* bei einer Temperatur-Zeit-Kombination von 152°C und einer Heißhaltezeit von 0,18 s möglich, s. **Abb. 24** blauer Punkt. Eine so erhitze Milch würde steril sein und die hitzeinduzierten chemischen Veränderungen wären vom Umsatz her identisch wie bei kurzeiterhitzter Milch.

Die Erhitzung von Milch auf 152°C ohne Aufheizphase ist nur durch eine direkte Erhitzung mit Wasserdampf möglich. Sie entspricht einer Punkterhitzung. Der Mischraum von Wasserdampf und Milch muss vom Volumen her so bemessen sein, dass sich bei vorgegebenem Volumenstrom eine Heißhaltezeit von 0,18s einstellt. Das entspricht einem Volumen von 0,05 l auf 1000 l/h. Bezogen auf die jeweilige Erhitzungstemperatur wird dort ein entsprechender Druck mit Hilfe eines nachgeschalteten Druckhalteventils gehalten. Ebenso muss eine Möglichkeit gegeben sein, die Erhitzungstemperatur zu messen. Hinter dem Kegel des Druckhalteventils herrscht über die Zuleitung zu Vakuumgefäß ein Vakuum, auf das die Milch entspannt und schlagartig abgekühlt wird, s. **Abb. 27**.



Abb.: 25 Dampfinjektor (Bauart Tetra Pak) mit Druckhalteventil für die Punkt-Erhitzung von Milch. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

Abb. 25 zeigt den Aufbau eines solchen Dampfinjektorsystems mit Gegendruckventil, das für eine Pilotanlage am MRI Kiel gebaut wurde [32]. Der Temperaturfühler wird durch die zentrale Spindel des Injektors in den Mischraum eingeführt. Die Spitze des Fühlers 1 schließt mit der Spitze der Spindel 10 ab, wodurch die Temperaturmessung direkt an der Stelle der Vermischung mit Dampf und Milch erfolgt, s. Abb. 26.



1 - Spindelspitze
2 - Hülsenrand
3 - Rohr
4 - Mutter

Dampf

5 - Spindelspitze
6 - O-Ring
7 - Gehäuse
8 - Hülse

9 - O-Ring
10 - Spindel
11 - Distanzring
12 - Unterlegscheibe

Abb.: 26 Dampfinjektor (Bauart Tetra Pak) mit in der Spindel eingebautem Temperaturfühler. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

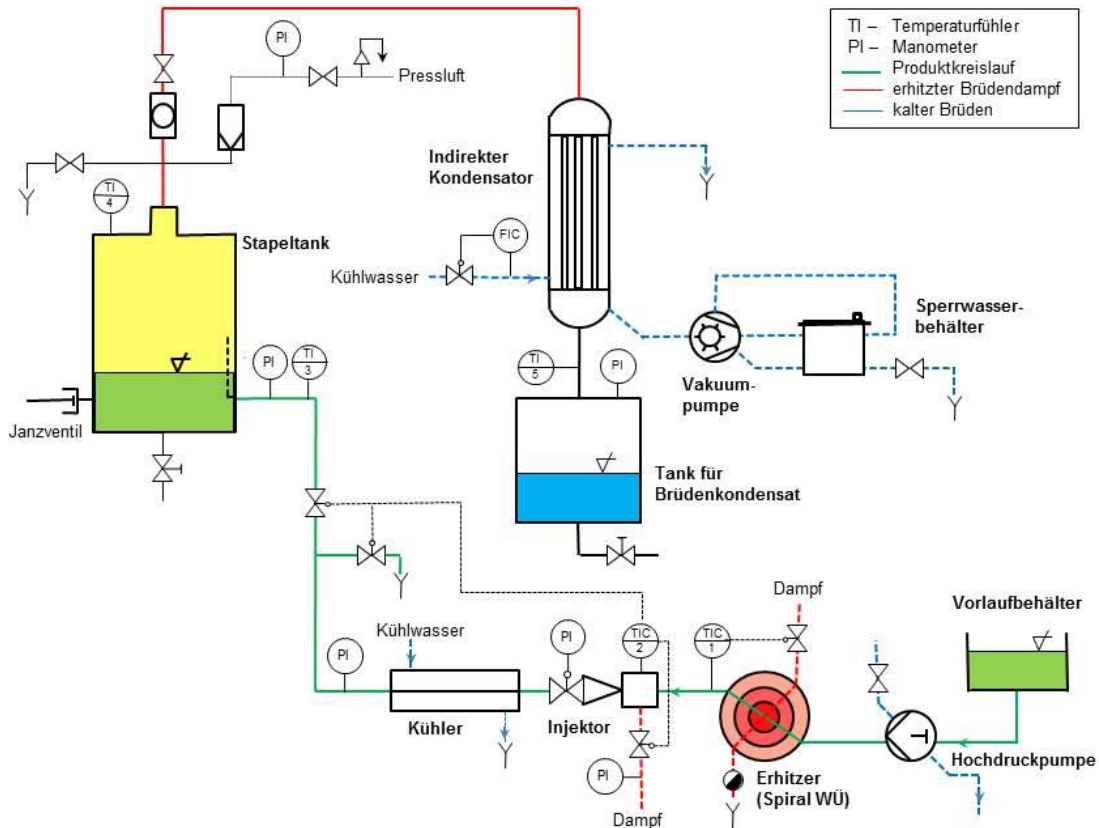


Abb.: 27 Pilotanlage zur Erhitzung von Milch nach dem Verfahren der Punkterhitzung. Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

Abb. 27 zeigt das Fließschema einer Pilotanlage, die am MRI Kiel zur Erhitzung von Milch nach dem Verfahren der Punkterhitzung mit nachgeschalteter Stapelung im sterilen Stapelbehälter gebaut wurde. Nach einer extrem kurzen Erhitzung bei mindestens 152°C schließt sich eine längere Heißhaltezeit (ca. 30 min) bei niedrigen Temperaturen (60°C bis 70°C) an. Durch die längere Heißhaltezeit soll eine höhere Inaktivierung des Enzyms Plasmin erreicht werden. Eine erhöhte Enzymaktivität verkürzt bekanntlich auch bei voller Sterilität die Haltbarkeit der Milch [33]. Die längere Heißhaltezeit wird durch die Befüllung eines sterilen Stapeltanks erzielt. Basierend auf dem Aufbau der Pilotanlage, wurde eine Anlage zur Punkterhitzung mit steriler Stapelung in Industriemaßstab konzipiert, s. **Abb. 28**.

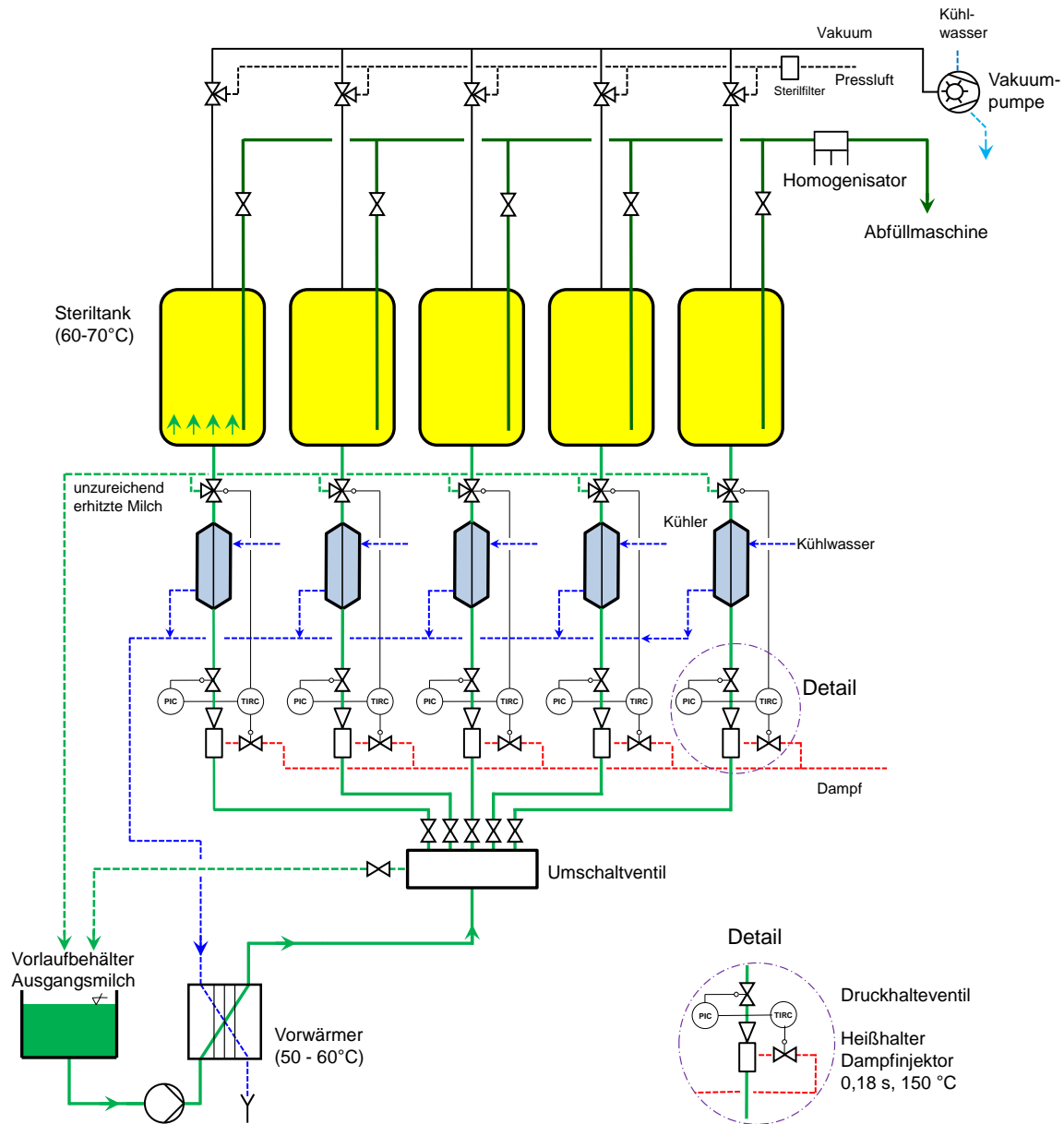


Abb.: 28 Fließschema einer industriellen Anlage zur Punkt-Erhitzung von Milch mit mehreren Sterilbehältern zur Aufnahme der fertigen Milch.
Dr. C. Kiesner, MRI Kiel.

6. Formelzeichen

$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$	Temperaturleitzahl	$[m^2 s^{-1}]$
A	Wärmeübertragungsfläche	$[m^2]$
c	spezifische Wärme	$[J kg^{-1} K^{-1}]$
D	Durchmesser	$[m]$
D_{eff}	axialer effektiver Dispersionskoeffizient	$[m^2 s^{-1}]$
f_{RM}	Fettgehalt Rohmilch	$[\%] V$
f_R	Fettgehalt Rahm	$[\%]$
f_{MM}	Fettgehalt Magermilch	$[\%]$
k	Wärmedurchgangszahl	$[W m^{-2} K^{-1}]$
L	Länge	$[m]$
\dot{m}	Massenstrom	$[kg s^{-1}]$
n_{res}	resultierender Exponent der Geschwindigkeitsverteilung [18]	
τ	Zeit/Verweilzeit	$[s]$
\dot{V}	Volumenstrom	$[m^3 s^{-1}]$
V	Volumen	$[m^3]$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$[W m^{-1} K^{-1}]$
α	Wärmeübergangszahl	$[W m^{-2} K^{-1}]$
ϑ	Temperatur	$[^\circ C]$
ν	kinematische Viskosität	$[m^2 s^{-1}]$
w	Strömungsgeschwindigkeit	$[ms^{-1}]$

Dimensionslose Kennzahlen

Bi-Zahl	$Bi = \frac{\alpha D}{2\lambda_{fest}}$	Biot-Zahl
Bo-Zahl	$Bo = \frac{\bar{w} L}{D_{eff}}$	Bodensteinsche-Zahl
Fo-Zahl	$Fo = \frac{4a\tau}{D^2}$	Fourier-Zahl
Re-Zahl	$Re = \frac{\bar{w} D}{\nu}$	Reynolds-Zahl

Indizes

eff	effektiv
max	maximal
min	minimal
res	resultierend

7. Literatur

- [1] Buchheim, W., Biewendt, H.-G., Kiesner, C., Baldenegger, P.; Mess-, Regel-, Kontroll- und Sicherheitseinrichtungen für Milcherhitzungsanlagen (Richtlinie des Erhitzerausschusses), Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 50, 343-356 (1998)
- [2] DIN 11488 Milchwirtschaftliche Maschinen und Anlagen- Teil 1:Begriffe, Teil 2:Planung und Abnahme, Teil 3: Anlagentechnik, August 2011
- [3] Verordnung zur Durchführung von Vorschriften des gemeinschaftlichen Lebensmittelrechts von 8. August 2007, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil 1 Nr.39
- [4] Allgemeine Verwaltungsvorschrift über die Durchführung der amtlichen Überwachung der Einhaltung von Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs und zum Verfahren zur Prüfung von Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis von September 2007, Bundesanzeiger Nr.180a vom 25.09.2007
- [5] Codex Alimentarius Commission bei WHO, Report of the thirty-sixth session of the codex committee on food hygiene, Washington D. C., USA 29 march-03 april 2004
- [6] Verordnung über Hygiene- und Qualitätsanforderungen an Milch und Erzeugnisse auf Milchbasis (Milchverordnung) vom 20. Juli 2000 zuletzt geändert durch Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 58, S. 2794 vom 12. November 2004. Aufgehoben durch Bgbl. 2007 Teil I Nr. 39, S. 1816, Art. 23 vom 14. August 2007.
- [7] Pasteurisation of Milk Containing the Organism of Q Fever, J. B. Enright, W. W. Sadler, R. C. Thomas, American Journal of Public Health, 695-700 (1957)
- [8] Böhm, H. D., Heeschen, W., Teufel, P.: Das neue Milch-Hygienerecht 2000, Verlag Th. Mann Gelsenkirchen
- [9] Kiesner, C., Matzen; S. :Prozessprüfbares Themometersystem, dmz 10, 27-29, (2012)
- [10] Biewendt, H.-G., Baldenegger, P., Buchheim, W.: Bericht über die Typprüfung von Wärmeübertrager-Doppelplatten (Duo-Safety) der Typen K55 und K71 für den Einsatz in Milcherhitzern, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 49, 229-237 (1997)
- [11] Biewendt, H.-G., Buchheim, W.: Bericht über die Typprüfung des Druckprüfsystems Fels als Schutzeinrichtung gegen Vermischen, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte, 48, 63-70 (1996)
- [12] Kiesner, C. : Auslegung von Heißhaltern unter Berücksichtigung der Verweilzeitstreuung, Deutsche Milchwirtschaft 4, 86-88 (1991)

- [13] Biewendt, H.-G.: Hilfsmittel zur schnellen Auslegung und Kontrolle von Rohrheizhaltern, insbesondere für Kurzzeiterhitzer, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 43, 27-39 (1991)
- [14] Taylor, G.I.: Proc. Roy. Soc. A 223, 446-468 (1954)
- [15] Sjenitzer, F.: The Pipeline Engineer 10, 31-34 (1958)
- [16] Nassauer, J., Kessler, H. G.: Mischphasen beim Verdrängen von Produkt aus einer Rohrleitung, Zeitschrift für Lebensmittel, Technologie und Verfahrenstechnik, 30 (3) 95-99 (1979)
- [17] Kiesner, C.: Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg 1989
- [18] Nassauer, J.: Über die Verweilzeitverteilung in Rohrleitungssystemen und Plattenapparaten, Dissertation TU München 1978
- [19] Hammer, P., Kiesner, C., Walte, H.-G., Knappstein, K., Teufel, P.: Heat resistance of *Mycobacterium avium* ssp. *Paratuberculosis* in raw milk tested in a pilot plant pasteurizer, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 54, 275-303 (2002)
- [20] Meisel, H., Kiesner, C., Matzen, S.: Typprüfung von Dauererhitzern für Milch (Richtlinie des Erhitzerausschusses), Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 55, 73-80 (2003)
- [21] Wälzholz, G. : Konstruktion und Betriebsweise von Dauererhitzungswannen, Molkerei- und Käsezeitung 1384-1389 1953
- [22] Walenta, W. : Berechnungsverfahren zu Ein- und Zweikreis-Systemen von Milchdauererhitzern, Kurzfassung des Vortrags bei der Arbeitstagung der Amts- und Beratungsingenieure in Meersburg April 2002
- [23] VDI-Wärmeatlas, 1984
- [24] Kessler, H.-G.: Lebensmittelverfahrenstechnik, Schwerpunkt Molkereitechnologie, München–Weihenstephan 1976
- [25] Bericht Nr. ED 01/04 über die Typprüfung eines Dauererhitzers für Milch, Typ PB 300 der Firma Erdmann
- [26] Hülsmann, M. :Temperaturverteilung in Behältern zur Pasteurisierung von Milch, MRI/CAU Chr. Kiesner, K. Schwarz : Bachelor-Arbeit (2013)
- [27] Kiesner, C., Hoffmann, W., Clawin-Rädecker, I., Krusch, U., Neve, H., Buchheim W.: Application of direct heating systems for the production of high pasteurized milk, Proceedings of the IDF Symposium held in Vienna (Austria) 6-8 September 1995

- [28] Biewendt, H.-G., Kiesner, C., Klobes, H.: Hochpasteurisierte Konsummilch- Eine neue Milchsorte, dmz Lebensmittelindustrie und Milchwirtschaft, 688-692 (1994)
- [29] Schlimme, E., Ott, F.G., Kiesner, C., Biewendt, H.G.: Heat-dependent generation of modified ribonucleosides in milk in the temperature range 40-150°C, IDF Special Issue 9303 52-66 (1994)
- [30] Hoffmann, W., Klobes, H., Kiesner, C., Suhren, G., Krusch, U., Clawin-Rädecker, I., Larsen, P. H.: Use of microfiltration for production of pasteurized milk with extended shelf life, Bulletin of the IDF 311 45-46 (1996)
- [31] Kiesner, C., Hoffmann, W., Lorenzen, P. Chr., Clawin- Rädecker, I., Martin, D., Meisel, H., Einhoff, K., Hammer, P., Teufel, P., Suhren, G.: Anwendung von Mikrofiltration bei der Herstellung von Konsummilch mit verlängerter Haltbarkeit, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 57 (3) 139-190 (2005)
- [32] Lübbers, H.: Modifiziertes direktes Erhitzungsverfahren für die Herstellung von haltbarer Trinkmilch, MRI/CAU Chr. Kiesner, K. Schwarz Master-Arbeit (2014)
- [33] de Vrese, M., Lorenzen, P., Clawin-Rädecker, I., Hammer, P., Hoffmann, W., Martin, D., Molkentin, J., Walte, H-G.: Was ist ESL-Milch?, Teil 2: Ergebnisse einer ESL-Milch Studie der MRI, Ernährungs Umschau 1, 15-21 (2012)
- [34] Lorenzen, P., Clawin-Rädecker, I., Einhoff, K., Hammer, P., Hartmann, R., Hoffmann, W., Martin, D., Molkentin, J., Walte, H-G., de Vrese, M.: A survey of the quality of extended shelf life (ESL) milk in relation to HTST and UHT milk, International Journal of Dairy Technology, Vol 64, No 2 166-178 (2011)
- [35] Codex Alimentarius Commission/GL 69, Guidelines for the validation of food safety control measures 1-16 2008

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Standards für Mess-, Regel-, Kontroll- und Sicherheitseinrichtungen bei kontinuierlichen und diskontinuierlichen Milchpasteurisieranlagen, wie sie in Deutschland angewendet werden, ausführlich beschrieben. Zahlreiche Fließschemen und Schaltungskombinationen von Pasteuranlagen zeigen den Stand der Technik dieser Erhitzungssysteme. Es werden ausführlich Methoden der Auslegung von Heißhaltern und der Bestimmung des Wärmerückgewinns dargestellt. Bei den diskontinuierlichen Pasteuranlagen wird auf die rechnerische und experimentelle Ermittlung der Temperaturverteilung im Milchraum einer Dauererhitzungswanne eingegangen.

Abschließend werden Weiterentwicklungen der klassischen Pasteurisierung am Beispiel des ESL- Verfahrens und der Punkt-Erhitzung mit nachgeschalteter steriler Stapelung von Milch vorgestellt. Das letzte Verfahren befindet sich noch in Entwicklungsphase.

Danksagung

Das Thema der technischen Standards von Pasteuranlagen hat mich in den 35 Jahren meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der Bundesanstalt für Milchwirtschaft und am heutigen Max Rubner-Institut in Kiel in verschiedener Form und in unterschiedlichen Funktionen beschäftigt. Insbesondere war die Tätigkeit im Bereich des Prüfwesens für mich sehr wichtig. Ich habe dadurch den Einblick in die milchwirtschaftliche Praxis in Deutschland und in anderen Staaten der EU gewonnen, der ohne den diese Aufgabe nicht möglich gewesen wäre.

Ich danke allen Mitarbeitern des Instituts die sich in den vielen Jahren, in welcher Form auch immer, an diesen Arbeiten beteiligt oder unterstützend mitgewirkt haben. Besonders danke ich für die Zusammenarbeit meinen langjährigen Arbeitskollegen Dipl.-Ing. Hans- Gerd Biewendt und Dipl.-Ing. Sönke Matzen, die geschäftsführend die Prüfstelle am Institut geleitet haben. Ebenso danke ich meinem guten Freund Dipl.-Ing. Rolf Meyer, Referat 432-Milch vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft in Bonn für die beidseitig interessante Zusammenarbeit. Der Austausch war für mich stets förderlich gewesen.

Ich danke den Frauen U. Gelbke und W. Jessen für die Erstellung von zahlreichen aufwendigen Zeichnungen während meiner Tätigkeit am Institut. Frau W. Jessen danke ich besonders für die Erstellung der Zeichnungen für diese Arbeit.

MRI Kiel im Januar 2015
Dr.-Ing. Christian Kiesner