

\_\_\_\_\_  
Name der Forschungsstelle(n)

\_\_\_\_\_  
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

\_\_\_\_\_  
Bewilligungszeitraum

## **Schlussbericht für den Zeitraum :** \_\_\_\_\_

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Institut für Energie- und  
Umwelttechnik e.V. (IUTA)  
Name der Forschungsstelle

---

11452 N

---

AiF-Vorhaben-Nr.

01.01.1998 bis 31.12.1999

---

Bewilligungszeitraum

**Abschlußbericht für den Zeitraum: 01.01.1998 bis 31.12.1999.**

(Forschungsstelle 1 von 2)

Forschungsthema :

Grundlegende Untersuchungen zur Kreislaufwirtschaft in Sennereien und Molkereien durch Aufbereitung von Molke mit Hilfe der Vakuumdestillation

---

Ort, Datum

---

Unterschrift des Projektleiters

Deutsches Institut für Lebens-  
mitteltechnik e.V. (DIL)

---

Name der Forschungsstelle

11452 N

---

AiF-Vorhaben-Nr.

---

01.01.1998 bis 31.12.1999

---

Bewilligungszeitraum

**Abschlußbericht für den Zeitraum: 01.01.1998 bis 31.12.1999**

(Forschungsstelle 2 von 2)

Forschungsthema :

Grundlegende Untersuchungen zur Kreislaufwirtschaft in Sennereien und Molkereien durch Aufbereitung von Molke mit Hilfe der Vakuumdestillation

---

Ort, Datum

---

Unterschrift des Projektleiters

## **Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

### **1. Thema**

Grundlegende Untersuchungen zur Kreislaufwirtschaft in Sennereien und Molkereien durch Aufbereitung von Molke mit Hilfe der Vakuumdestillation.

### **2. Ausgangssituation**

Im Bereich der milchverarbeitenden Industrie fallen im großen Umfang Molke und Magermilch an, die nur zu einem geringen Teil direkt für Nahrungs- oder Futterzwecke verwendet werden können. Der überwiegende Rest wird heute großtechnisch getrocknet. Kleinere Chargen werden Prozessen zugeführt, durch die die verbleibenden wertvollen Inhaltsstoffe gewonnen werden. In all diesen Fällen bleibt ein belastetes Abwasser übrig. Für kleine und mittelgroße Betriebe gibt es keine technisch angepaßten und kostengünstigen Lösungen zur Reduzierung der Molke. Ihnen ist der Weg der Direkteinleitung seit geraumer Zeit versperrt, so daß in zunehmendem Maße Kosten für Transport und Entsorgung von Molke zu entrichten sind.

### **3. Forschungsziel**

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer Technologie, mit der das Entsorgungsproblem von Molke für kleine und mittelständige Unternehmen gelöst werden kann. Mit Hilfe der Vakuumdestillation, die auf kleine und mittelständische Unternehmen angepaßt werden muß, soll die Kreislaufwirtschaft der Molke realisiert werden, wobei die Molke in Destillat (Wasser) und Molkenkonzentrat getrennt wird. Anschließend können beide Produkte innerhalb der Molkerei einem anderen Verwendungszweck zugeführt werden. Das anfallende Destillat soll eine Qualität haben, die die Verwendung als Brauchwasser möglich macht. Das gewonnene Molkenkonzentrat kann, in Abhängigkeit von den erzielbaren wertgesteigerten Eigenschaften, als Nahrungs- oder Futtermittel eingesetzt werden.

### **4a. Wirtschaftliche Bedeutung für kleine und mittelständige Unternehmen**

Für die Entsorgung von Molke im Bereich kleiner und mittelgroßer Molkereien ist bisher kein geeignetes und kostengünstiges Verfahren verfügbar. Die bekannten Verfahren und Konzepte zur Aufbereitung der Molke sind nicht übertragbar, da das anfallende Abwasser nicht ohne zusätzliche Behandlung entsorgt werden kann und der technische und personelle Aufwand unverhältnismäßig hoch ist. Durch den Einsatz eines prozeßoptimierten Verfahrens auf Grundlage der Vakuumdestillation soll

die Abwasserproblematik gelöst und zugleich die Möglichkeit geschaffen werden, die aufkonzentrierte Molke weiterzuverwerten.

#### **4b. Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse**

Ein direkter Transfer der erzielten Ergebnisse wird durch enge Zusammenarbeit mit Maschinen- und Anlagenbauern, die im Bereich der Milchverarbeitung tätig sind, sowie durch Kooperation mit Molkereien und Sennereien sichergestellt.

#### **5. Mittel, Wege und Verfahren, um das Forschungsziel zu erreichen**

Das beantragte Projekt wird in Kooperation zwischen dem Institut für Umwelttechnologie und Umweltanalytik e.V. (IUTA) und dem Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL) durchgeführt. Im ersten Projektabschnitt steht die Konstruktion, der Bau und die Inbetriebnahme einer Anlage zur Vakuumdestillation von Molke - unter Berücksichtigung der entsprechenden Hygienestandards der Lebensmittelwirtschaft - im Vordergrund. In den darauf folgenden Technikumsversuchen müssen die relevanten Prozeßdaten erfaßt werden, um die Betriebsbedingungen dahingehend zu optimieren, daß sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine optimale Technologie entwickelt werden kann. Parallel dazu werden die Eigenschaften des Molkenkonzentrates und des Destillates charakterisiert und die Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung untersucht.

#### **6. Schlagwörter**

Vakuumdestillation, Abwasserbehandlung, Verfahrensentwicklung, Molkeaufbereitung

#### **7. Bibliographische Daten**

##### ***7.1 Mitgliedsvereinigung***

Verein zur Förderung der Umwelttechnologie und Umweltanalytik e.V.  
c/o IUTA

Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg, Tel.: (02065) 418-0, Fax: (02065) 418-211

##### ***7.2 Forschungsstelle I***

Institut für Umwelttechnologie und Umweltanalytik e.V. (IUTA)

Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg, Tel.: (02065) 418-0, Fax: (02065) 418-211

##### **7.2.1 Leiter der Forschungsstelle**

Prof. Dr.-Ing. K.G. Schmidt

##### **7.2.2 Projektleiter**

Dipl.-Ing. J. Franzen

##### ***7.3 Forschungsstelle II***

Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL)

Professor-von-Klitzing-Straße 7, 49610 Quakenbrück, Tel.: (05431) 183-0,

Fax: (05431) 183-114

### **7.3.1 Leiter der Forschungsstelle**

Dr. J. Westerhausen

### **7.3.2 Projektleiter**

Dipl.-Ing. A. Knoch

47229 Duisburg, den 06.05.2009

Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

Abschlußbericht des AiF-Projektes

**Grundlegende Untersuchungen zur Kreislaufwirtschaft  
in Sennereien und Molkereien durch Aufbereitung  
von Molke mit Hilfe der Vakuumdestillation**

Dipl.-Ing. Jörg Franzen, IUTA

Dipl.-Ing. Achim Knoch, DIL

## **1. Einführung**

In der Nahrungsmittelindustrie tragen Molkereien und Käsereien erheblich zur Abwasserbelastung bei, da die Molke, die bei der Käse- und Caseinherstellung anfällt, nur im begrenzten Rahmen als Nahrungsmittel bzw. zu Futterzwecken verwendet werden kann. Insbesondere für kleine und mittelgroße Molkereien treten Probleme bei der Entsorgung der Molke auf. Eine Entsorgung mit dem Abwasser ist nicht möglich, da die Anforderungen, die an Abwässer gestellt werden, diese Entsorgungsmethode nicht zulassen. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) der Molke von 50-80 g O<sub>2</sub>/l und der biologische Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) von 35-50 g O<sub>2</sub>/l verbieten diese Vorgehensweise.

Aufgrund der hohen Kosten und zu erwartender weiterer Kostensteigerungen für die Entsorgung der Molke besteht für kleine und mittelgroße Molkereien der Bedarf an einem einfachen und kostengünstigen Aufbereitungsverfahren. Bei dem zu entwickelnden Verfahren soll auf der einen Seite Wasser, das unbedenklich abgeführt oder innerhalb der Molkerei eingesetzt werden kann, und auf der anderen Seite ein verwertbares Molkenkonzentrat anfallen.

Die existierenden Verfahren und Konzepte zur Behandlung von Molke können nicht auf klein- und mittelständische Betriebe angepaßt werden, da bei diesen zum einen nicht die Abwasserproblematik im Vordergrund steht, sondern die großtechnische Gewinnung von Stoffen, die in der Molke gelöst sind. Zum anderen ist der benötigte finanzielle und technische Aufwand für kleine Unternehmen mit entsprechend geringen Produktionsmengen unverhältnismäßig hoch. Darüber hinaus bieten diese Verfahren in den meisten Fällen auch keine Lösung für das Abwasserproblem. Das anfallende Prozeßwasser muß in betriebseigenen Abwasserreinigungsanlagen zusätzlich aufbereitet werden. Die Zielsetzung bei all diesen Verfahren ist die Gewinnung wertvoller Inhaltsstoffe. Demgegenüber steht im Rahmen dieses Projektes die Abwasserreinigung, unter der Nebenbedingung der Verwertbarkeit der Restfraktion im Vordergrund (Kreislaufwirtschaft).

Die Realisierung dieses Ziels soll durch eine auf die Behandlung von Molke angepaßte Vakuumdestillation erreicht werden, einer Technologie, die im Bereich der großtechnischen Milch- und Molkeverarbeitung sowie in der Behandlung stark verschmutzter Abwässer etabliert ist.

## ***2. Zielsetzungen im Forschungsvorhaben***

Für den Bereich von Kleinanlagen, die unter anderem den Hygieneanforderungen im Lebensmittelbereich entsprechen müssen, gibt es bislang keine entsprechenden Vakuumdestillationsanlagen zur Verarbeitung von Molke. Es soll eine Anlage konstruiert werden, die eine Behandlung der Molke gemäß den Richtlinien zur Herstellung und Behandlung von Lebensmitteln gewährleistet, damit das Restprodukt als Nahrungs-



oder Futtermittel weiterverwertet werden kann. Für die angestrebte Zielgruppe kleiner und mittelgroßer Molkereien und Käsereien darf kein zusätzlicher Personal- und Qualifizierungsbedarf entstehen, d.h. ein wichtiges Kriterium ist die Konstruktion einer Anlage, die leicht handhabbar und bequem zu reinigen ist. Außerdem muß von technischer Seite gewährleistet sein, daß die benötigte Energie auf ein Minimum reduziert wird.

Mit dem Projekt wird eine Kreislaufwirtschaft der Molke angestrebt, wobei die Molke in Wasser und Molkenkonzentrat getrennt wird, um diese Produkte unabhängig voneinander in der Molkerei weiterverwerten zu können. Durch den Einsatz der Vakuumdestillation wird die Molke zu einem fließfähigen Konzentrat mit einem Restwassergehalt von ca. 50 % eingedickt werden, d.h. aus der Molke werden ca. 90 % des Wassers als Destillat mit Brauchwasserqualität gewonnen.

Die Aufbereitung der Molke durch Vakuumdestillation bietet neben der Lösung des Abwasserproblems bei der Käseproduktion zugleich die Möglichkeit, den verbleibenden Rest, d.h. das Molkenkonzentrat ebenfalls zu verwerten.

Die auf dem Markt existierenden Anlagen erfüllen diese Voraussetzung nicht. Es handelt sich um Anlagen, die von einigen kleineren Unternehmen angeboten und zur Aufbereitung von öl- und lösemittelhaltiger Abwässer eingesetzt werden. Sie entsprechen in keiner Weise den Standards der im Bereich der Lebensmittelherstellung eingesetzten Maschinen.

Geplant war die Errichtung einer Anlage mit einem Durchsatz von 50 l Molke/h, um eine Grundlage für ein scale-up auf eine technisch ausgereifte Anlage zur Vakuumdestillation von Molke zu erhalten. Diese Anlage soll in großem Umfang eine Variation der Prozeßparameter (Druck, Temperatur) erlauben, um z.B. Kristallbildung, Fließfähigkeit des Konzentrates, Karamelisierung der Laktose sowie den Einfluß verschiedener Rührtechniken untersuchen zu können.

Die Konstruktion unterliegt den folgenden Kriterien:

- Einhaltung der Hygienestandards der Lebensmitteltechnik
- Verminderung der Schaumbildung
- Vermeidung der Ansatzbildung
- Optimierung des Molkenkonzentrates (Vermeidung von Grießbildung bzw. Kristallbildung und der Karamelisierung der Laktose)
- Minimierung des Energieeinsatzes
- Möglichkeit zur Variation des Vakuums
- Minimierung des Reinigungsaufwandes

Ziel dieses Forschungsprojektes war die Schaffung von theoretischen und praktischen Grundlagen für die Beurteilung eines wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der Vakuumdestillation im Bereich von kleinen und mittelständischen milchverarbeitenden Unternehmen.

Darüber hinaus wird im Rahmen des Projektes auf die produktspezifischen Fragestellungen bei der optimierten Verarbeitung von Molke eingegangen. Neben den produktspezifischen technologischen Problemen im Bereich der Schaumbildung und möglicher Produktablagerungen in der Anlage wurde die Eigenschaften des Konzentrates charakterisiert und Möglichkeiten der Weiterverarbeitung untersucht (einschließlich Fragen der Haltbarkeit und Lagerfähigkeit).

Die wesentlichen Fragestellungen sind in diesem Zusammenhang, welche grundlegenden Veränderungen das Produkt durch die Beanspruchung im Prozeß erfährt. In der Anlage wird das Produkt durch das Vakuum, die Temperaturführung und die mechanische Belastung (beispielsweise bei Einsatz eines Rühraggregates im Sumpf des Verdampfers sowie im Leitungssystem) auf unterschiedliche Weise beansprucht. Die wesentlichen Schwerpunkte der hier erforderlichen Arbeiten liegen in der Bestimmung der Denaturierungskinetik der unterschiedlichen Molkenproteine während der Vakuumdestillation, wobei insbesondere der Einfluß des reduzierten Siedepunktes zu untersuchen ist. Desweiteren war das Wasserbindungsvermögen, der Einfluß des Salzgehaltes auf den weiteren Verwendungszweck und die Trocknungseigenschaften zu charakterisieren. Das Kristallisationsverhalten der Molke im Prozeß ist von großem Interesse, wobei die induzierten Wirkmechanismen, Vakuum, Scherung und Temperaturgradienten (nach dem Prozeß) zu bewerten sind.

Neben den grundlegenden Arbeiten zur Abhängigkeit der Produkteigenschaften von den oben aufgeführten Parametern hat das DIL die Entwicklung der Anlage hinsichtlich der hygienischen und mikrobiologischen Auflagen betreuen und das Konzept im Rahmen des Projektes weiter optimiert.

### **3. Prinzip der neu konzipierten Vakuumdestillationsanlage**

Das Eindampfen von Molke ist ein in der Milchverarbeitung bekanntes Verfahren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine komplette Apparatur zur Konzentration von Molke entwickelt, die den Anforderungen der kleinen und mittelständigen Unternehmen genügt. Neben den bereits genannten Kriterien sind hier besonders geringe Apparate- und Betriebskosten zu realisieren. Für die praktische Umsetzung wurde eine Vakuumdestillationsanlage ausgewählt, in der die Energiezufuhr über die Brüdenverdichtung erreicht wird. Der prinzipielle Aufbau der Anlage ist in Bild 1 dargestellt.

Kern der Anlage ist der Verdampfbehälter mit einem Volumen von ca. 160 l. Er ist im unteren Bereich mit einem Doppelmantel zur indirekten Beheizung des Innenraumes versehen. Im Verdampfbehälter wird die Molke unter Vakuum erhitzt. Das Rührwerk dient zur Vermischung der Molke im Behälter. Das verdampfte Wasser wird über den Kopf des Behälters durch einen Tropfenabscheider abgezogen und über den mechanische Brüdenkompressor verdichtet. Der komprimierte Brüden wird zur kontinuierlichen Beheizung der Molke durch den im Verdampfbehälter angeordneten Wärmetauscher geführt.

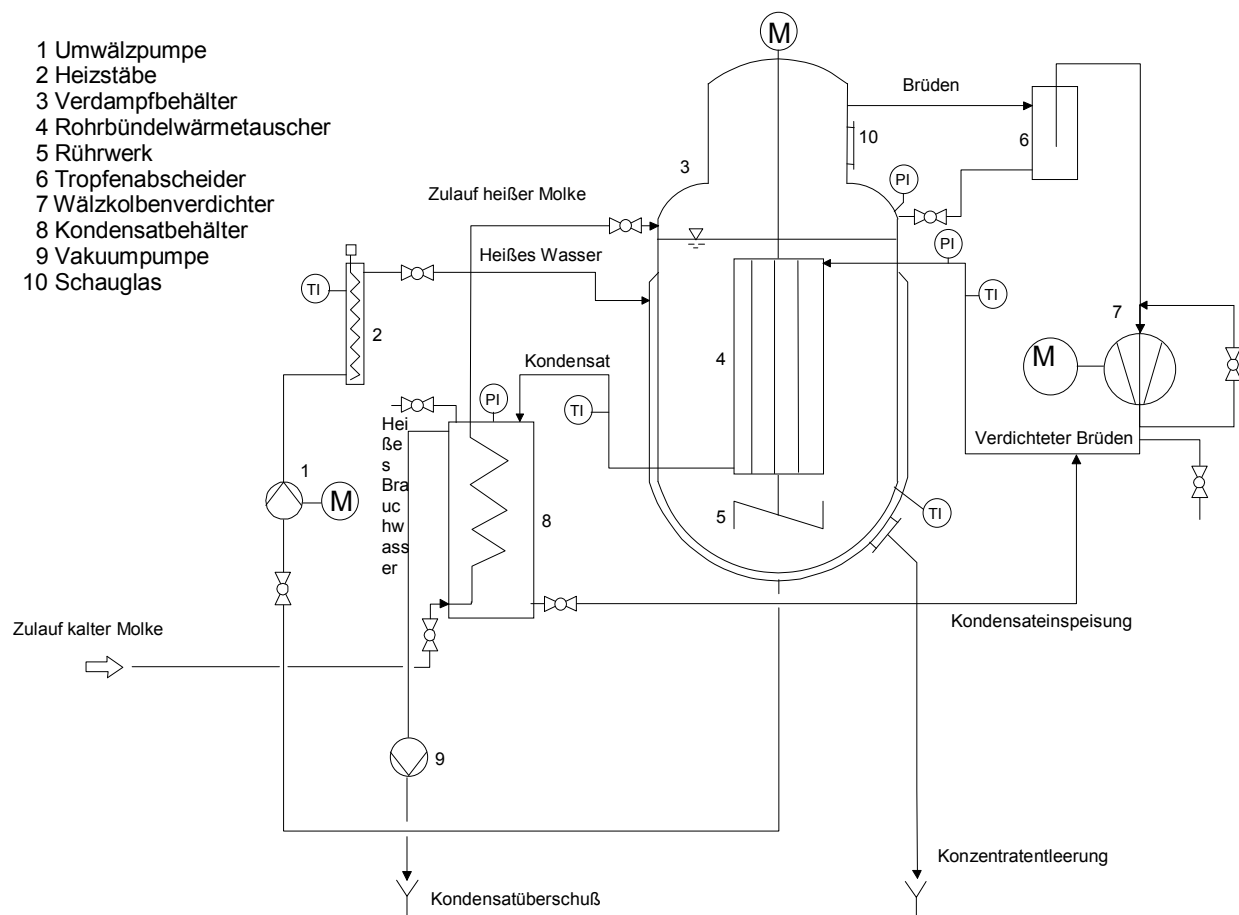


Bild 1: Prinzipielle Darstellung der Vakuumdestillationsanlage zur Konzentrierung von Molke

In der Anfahrphase wird die Molke, die sich im Destillationssumpf befindet, indirekt mit Wasser erwärmt (durch einen 3 kW Heizstab, Leistung konnte während der Versuchsdurchführung von 9 kW auf 3 kW reduziert werden). Ist die Molke im Destillationssumpf auf die gewünschte Temperatur gebracht, wird der Heizwasserkreislauf abgeschaltet und der Kreislauf für den kontinuierlichen Zulauf der Frischmolke geöffnet. Die Erwärmung der Frischmolke wird mit den im Destillationsapparat angebrachten Wärmetauscher (Innenkocher) durch kondensierenden Brüden realisiert. Die in den Destillationsapparat eingebrachte Frischmolke verdampft unter Vakuum ( $p \approx 260$  mbar,  $T \approx 66$  °C), wobei der entstehende Brüden durch einen Wälzkolbenverdichter komprimiert wird ( $p \approx 400$  mbar). Der gewünschte Unterdruck in der Anlage läßt sich durch eine Wasserringvakuumpumpe beliebig einstellen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Variation des Unterdrucks in der Anlage, und damit auch des Betriebspunktes des Wälzkolbengebläses, so daß eine vorgegebene Siedetemperatur der Molke eingestellt werden kann. Vor dem Brüdenverdichter ist ein Tropfenabscheider installiert, der das Konzentrat bzw. mitgerissene Konzentrattropfen vom Dampfstrom trennt. Im Destillationsapparat ist als Wärmetauscher der sogenannte Innenkocher eingebaut, in dem der heiße Brüden kondensiert. Die freiwerdende Verdampfungs-

enthalpie dient zur Aufheizung der im Sumpf des Destillationsapparates befindlichen Molke bis zum Siedepunkt, entsprechend des angelegten Vakuums.

Das noch warme Destillat wird in einem Vorratsbehälter, der als Wärmetauscher konzipiert ist, aufgefangen und dient zur Vorwärmung der Frischmolke. Das Destillat hat mindestens Brauchwasserqualität, so daß es zu Reinigungszwecken innerhalb einer Sennerei eingesetzt werden kann. Für die Reinigung des Destillationsapparates sind kugelförmige Düsen (CIP-Düsen) installiert, die Wasser mit Druck gegen die Molke berührten Bauteile spritzen.

#### 4. Durchgeführte Untersuchungen

In der ersten Projektphase wurden Vorversuche an einer Laborapparatur aus Glas durchgeführt, die als Grundlage zur Konstruktion der Technikumsanlage zur Eindampfung von Molke dienten. Nach Abschluß dieser Untersuchungen wurde eine entsprechende Anlage konstruiert, gebaut und in Betrieb genommen. Die durchgeführten Versuche mit der Technikumsanlage zeigen, daß die gesetzten Ziele erfolgreich umgesetzt werden konnten, wobei gewisse Details an der Anlage, im Laufe der Versuchsdurchführungen, überarbeitet und optimiert werden mußten. Der angestrebte Durchsatz von 50 Litern Molke/Stunde konnte durch Umbaumaßnahmen am Wälzkolbengebläse erreicht werden. Der Hersteller des Wälzkolbengebläses gibt die folgenden Leistungsdaten an:

|                        |                   |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ansaugdruck $p_1$      | bar abs           | 0,26  | 0,26  | 0,26  | 0,26  | 0,26  |
| Ansaugtemperatur $T_1$ | °C                | 65,82 | 65,82 | 65,82 | 65,82 | 65,82 |
| Enddruck $p_2$         | bar abs           | 0,4   | 0,4   | 0,4   | 0,4   | 0,4   |
| Druckdifferenz         | mbar              | 140   | 140   | 140   | 140   | 140   |
| Gebläsedrehzahl $n$    | 1/min             | 2000  | 3000  | 4000  | 4660  | 5800  |
| Ansaugleistung $m_1$   | kg/h              | 20,7  | 38,7  | 56,6  | 68,4  | 88,8  |
| Ansaugleistung $V_1$   | m <sup>3</sup> /h | 124,8 | 232,8 | 340,7 | 412,0 | 535,0 |
| Leistungsbedarf $P$    | kW                | 1,3   | 1,9   | 2,5   | 2,9   | 3,6   |
| Motorleistung          | kW                | 7,5   | 7,5   | 7,5   | 7,5   | 7,5   |
| Motordrehzahl          | 1/min             | 1000  | 1500  | 2000  | 2330  | 2900  |
| Motorfrequenz          | Hz                | 17,2  | 25,9  | 34,5  | 40,2  | 50,0  |

**Tabelle 1: Leistungsdaten des Wälzkolbengebläses der Firma WKE.**

Für die Auslegung des Wälzkolbengebläses wurde dem Hersteller eine Ansaugtemperatur des Brüden von ca. 65 °C vorgegeben. Diese Ansaugtemperatur entspricht der Siedetemperatur der Molke bei einem absoluten Druck von 260 mbar im Verdampfer. Diese Rahmenbedingungen wurden als Mittelwerte für die Auslegung der Wälzkolbengebläses ausgewählt, weil sie den Arbeitsbereich von 60-70 °C widerspiegeln, bei

dem die Molke eingedampft werden soll. Ist eine Siedetemperatur der Molke von 60 °C gewünscht, ist ein Absolutdruck von 200 mbar im Verdampfer notwendig. Dieser gewünschte Druck kann durch die Wasserringvakuumpumpe eingestellt werden. Diese Vorgehensweise beeinflusst das Wälzkolbengebläse nur in soweit, daß der Kondensatdurchsatz kleiner wird (es wird weniger Molke verarbeitet). Dieser Zusammenhang ist in Tabelle 2 dargestellt.

|   |              |              |              |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Siedetemperatur der Molke [°C]                | 60           | 65           | 70           |
| Ansaugdruck [mbar]                            | 200          | 260          | 320          |
| Enddruck [mbar]                               | 340          | 400          | 460          |
| Druckdifferenz [mbar]                         | 140          | 140          | 140          |
| Leistung des Innenkochers [kW]                | 37,08        | 36,85        | 36,67        |
| spezifische Dampfvolumen [m <sup>3</sup> /kg] | 7,650        | 5,982        | 4,924        |
| <b>Kondensatdurchsatz [kg/h]</b>              | <b>44,54</b> | <b>56,95</b> | <b>69,19</b> |

**Tabelle 2: Dampfmenge in Abhängigkeit der Betriebsbedingung unter der Voraussetzung einer konstanten Ansaugleistung von 340,7 m<sup>3</sup>/h und einer Gebläsedrehzahl von 4000 1/min.**

Während des kontinuierlichen Betriebs wurden die Leistungsdaten der Anlage ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt. Die Messungen wurden bei unterschiedlichen Temperaturen im Bereich zwischen 60 und 72 C durchgeführt. Aufgetragen ist die maximal verdampfte Kondensatmenge über der Temperatur im Verdampfbehälter.

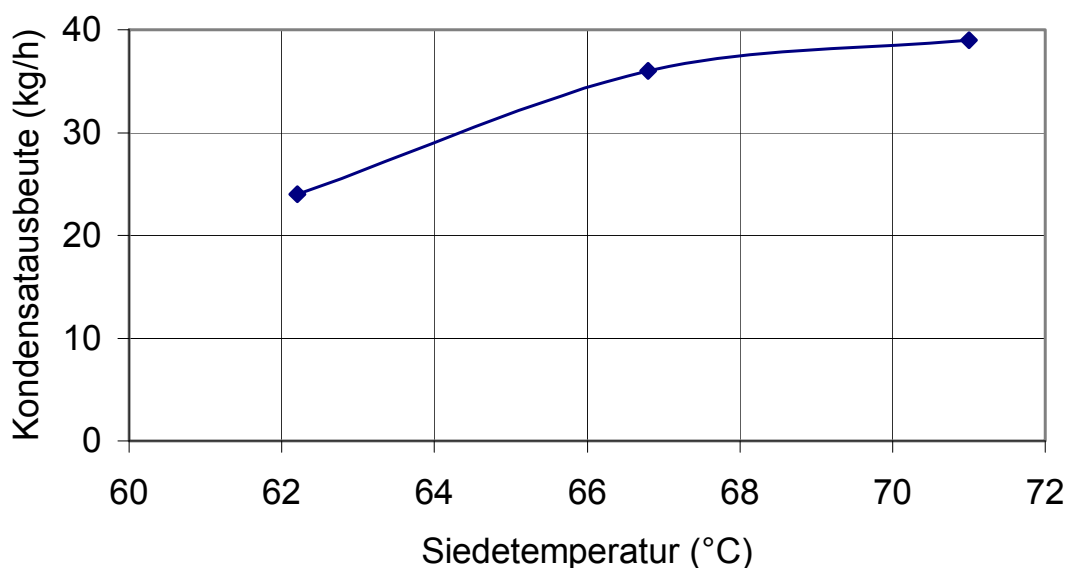


Bild 2: Leistungskurve der entwickelten Anlage

In Anlage 1 ist exemplarisch ein Protokoll eines Versuches dargestellt, bei dem Molke mit Hilfe der entwickelten Anlage eingedickt worden ist.

Im folgenden sind die gewonnenen Erkenntnisse, die in den Vorversuchen und beim Betrieb der Technikumsanlage gemacht wurden, zusammengefaßt.

### *1. Bestimmung von Auslegungskriterien für die Konstruktion der Technikumsanlage*

Die Projektierung und Konstruktion der Technikumsanlage erfolgte auf der Grundlage von Ergebnissen, die aus Vorversuchen an einer Glasapparatur gewonnen wurden. Hiermit wurde die Größenordnung der einzustellenden Betriebsparameter gefunden, die auch zur Auslegung der Technikumsanlage dienen. Dabei waren insbesondere die Mechanismen und Bedingungen zur Schaumbildung der Molke und die Entwicklung von Methoden zur Vermeidung dieses Effektes von Interesse.

So wurde festgestellt, daß die Schaumbildung nur dann verstärkt auftritt, wenn die Frischmolke zu sieden beginnt oder der aufkonzentrierten Molke im Destillationsbehälter zuviel frische Molke zugegeben wird. Die Schaumbildung ist demzufolge nur in der Anfahrphase bzw. im kontinuierlichen Betrieb bei hohem Frischmolkeeintrag ein Problem. Ist die Molke temperiert, bilden sich im Gegensatz zur Anfahrphase nur noch relativ große Blasen, die instabil sind und leicht zerstört werden können.

Aufbauend auf den Ergebnissen der durchgeführten Versuche wurden mehrere Methoden zur Schaumzerstörung bzw. -vermeidung eingesetzt und auf ihre Tauglichkeit im Routinebetrieb mit der Technikumsanlage überprüft.

Bei der Untersuchung der Fließfähigkeit der aufkonzentrierten Molke aus den Glasversuchen konnte festgestellt werden, daß eine Eindampfung bis auf ca. 50 % Trockenmassegehalt bzw. auf 10 % Eingangsmasse unproblematisch möglich ist. Bis zu diesem Grad der Eindampfung ist gewährleistet, daß das Konzentrat aus dem Sumpf des Verdampfers problemlos abfließen kann. Wird zusätzlich Wasser entzogen, kann es zu Anbackungen durch Kristallisationseffekte in Ventilen und Leitungen kommen, die herausgespült werden müssen. Kristalle, die sich speziell an heißen Flächen bilden, können nur unter erheblichen Aufwand abgelöst werden, so daß die Vermeidung dieses Effektes zwingend notwendig ist.

Einen Einfluß des kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Betriebs auf die Qualität des Molkenkonzentrates konnte bisher aufgrund der relativ geringen Menge Molke, die in der Glasapparatur destilliert wurde, nicht festgestellt werden. Der Zusammenhang zwischen der Betriebsweise und der Qualität des Molkenkonzentrates wurden durch Versuche mit der Technikumsanlage geklärt.

Die Ergebnisse der Versuche in der Glasapparatur waren bei der Auslegungen der Technikumsanlage hilfreich, obwohl nicht grundsätzlich jedes auftretende Problem in den Laborversuchen mit der Glasapparatur simuliert werden konnte.

### *2. Einsatz verschiedener Schaumzerstörungsmethoden*

Bei der Konstruktion der Technikumsanlage wurde die Option offen gehalten, verschiedene Verfahren zur Schaumminderung erproben zu können, so z.B. zusätzliche Einbauten oder ein rotierendes Metallgittergeflecht.

Die zuerst installierte Schaumzerstörungsmethode, bei der eine Teilmenge des anfallenden Destillates oberhalb einer Füllkörperpackung, die das Konzentrat bzw. mitgerissene Konzentrattropfen vom Dampfstrom trennt sollte, eingedüst wird, ist nicht praktikabel. Die sehr kleinen, stabilen Schaumblasen, die sich speziell im Anfangsstadium der Verdampfung von Molke bilden, werden durch die Füllkörperpackung nicht zurückgehalten, so daß mitgerissene Destillattropfen in den Brüdenverdichter gelangen und zu Schädigungen führen. Außerdem ist der Aufwand für die Reinigung der Füllkörperpackung unverhältnismäßig hoch. Darüber hinaus sinkt die Destillationsleistung erheblich, weil das Destillat bei dieser Methode zurück in den Destillationsapparat geführt wird, wo es erneut verdampft werden muß.

Eine weitere Methode, die in der Technikumsanlage zur Schaumminimierung eingesetzt wurde ist in Abb. 2 dargestellt. Der Verdampfer (Innenkocher) ist prinzipiell als geschlossener Zylinder ausgeführt, in den 9 Rohre, oben und unten offen, eingebaut sind, wobei der untere Teil dieser Rohre in die Molke eingetaucht und der obere Teil in den Verdampfungsraum hineinragt. In den Zylindern wird der Brüden geführt, der dort kondensiert, so daß die freiwerdende Verdampfungsenthalpie die in den neun einzelnen Rohren befindliche Molke entsprechend des angelegten Vakuums bis zur Siedetemperatur aufheizt. Die sich bildenden Dampfblasen steigen in den Rohren auf und reißen dabei Molke mit. Die mit hoher kinetischer Energie nach oben bewegte Molke prallt gegen ein Blech, wird dort umgelenkt und reduziert so den aufsteigenden Schaum auf ein Minimum. Zusätzlich wurde das Volumen des Verdampfungsraumes über dem Prallblech durch einen nachträglichen Umbau vergrößert, so daß eventuell noch aufsteigender Schaum bis zur Dampfentnahme zusammengebrochen sein sollte.

Die ersten Versuche mit dieser Konstruktion wurden mit einem zufriedenstellendem Ergebnis durchgeführt. Letztendlich bildete diese Methode aber nicht die ideale Lösung zur Beseitigung der Schaumproblematik. Unter bestimmten Betriebsbedingungen gelangt Schaum am Prallblech vorbei in den Brüdenverdichter.

Das Schaumbildungsverhalten von verschiedenen Frischmolken wird z.B. durch die Fütterungsmethode maßgeblich beeinflusst und ist aus diesem Grund sehr unterschiedlich. Darüber hinaus ist der Reinigungsaufwand für das Prallblech unverhältnismäßig hoch, so daß eine andere Methode zur Schaumminimierung gewählt wurde.

Bei der neuen Methode wurde dem Schaum der siedenden Molke mehr Raum zur Ausbreitung zur Verfügung gestellt und darüber hinaus eine Anfahroutine gewählt, bei der zu Beginn nur eine geringe Menge Molke (ca.  $\frac{1}{2}$  Füllvolumen) in den Verdampfer eingefüllt wurde. Nachdem die Molke eine gewisse Zeit (ca. 15 Minuten) temperiert wurde, konnte neue Frischmolke zugeführt werden. Auf diese Weise ist die Schaumbildung des Gemisches aus frischer Molke und temperierter Molke so verringert werden, daß die Bildung von Schaumblasen, auch während des Anfahrbetriebes, kein Problem mehr darstellt.

### 3. Auswirkungen des kontinuierlichen und des diskontinuierlichen Betriebes auf das Molkenkonzentrat

Die Qualität des Molkenkonzentrates ist maßgeblich davon abhängig wie lange die Molke unter Temperatureinfluß gestanden hat. Die Denaturierung der Molkenproteine wird von der Temperatur und der Zeit beeinflusst. Mit zunehmender Zeit vergrößert sich der Grad der Denaturierung der Molkenproteine und das Molkenkonzentrat büßt damit wichtige ernährungsphysiologische Eigenschaften ein. Demzufolge ist ein Einsatz des Molkenkonzentrates als Zusatzstoff für Nahrungsmittel nur dann sinnvoll, wenn das Molkenkonzentrat nicht übermäßig lange unter dem Einfluß der Temperatur gestanden hat. Demzufolge kommt für Sennereien nur die Batchbetriebsweise in Frage, bei der eine gleichbleibend hohe Qualität des Molkenkonzentrates realisierbar ist.

Ist die Qualität des Molkenkonzentrates in Bezug auf ihre ernährungsphysiologischen Eigenschaften von sekundärer Bedeutung, weil das Konzentrat z.B. als Futtermittel eingesetzt werden soll, kann die Art und Weise des Betriebes der Anlage in weiter Grenzen an die Bedürfnisse des Betreibers angepaßt werden. In diesem Fall wäre ein kontinuierlicher Betrieb der Anlage sinnvoller, weil dieser mit weniger Aufwand verbunden ist und eine Automatisierung des Eindampfungsprozesses möglich ist.

### 4. *Fremdbeheizung des Sumpfes des Verdampfers*

Um die Aufheizzeit der Frischmolke bei Erstbefüllung zu verkürzen, ist bei der Konstruktion der Technikumsanlage eine Fremdheizung berücksichtigt worden. Bei dieser zusätzlichen Heizung handelt es sich um einen separaten Kreislauf, in dem Wasser mit Hilfe eines Heizstabes (Leistung 3 kW) auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt und anschließend in die Doppelwandung des Verdampfers geleitet wird, wo das Wasser die Wärmeenergie an die Molke abgibt.

Für den Versuchsbetrieb ist die Fremdheizung sinnvoll, weil auf diese Weise die Versuchsdauer verkürzt wird und flexibler die Temperatur der Molke im Sumpf des Destillationsapparates beeinflusst werden kann.

Ob diese Vorgehensweise für den realen technischen Einsatz auf diese Art sinnvoll realisierbar ist, oder ob vorhandener Dampf als Wärmeträgermedium zur Fremdheizung eingesetzt werden kann, in vom Einsatzort anhängig.

### 5. *Vermeidung der Kristallbildung*

Zur Unterdrückung der Kristallbildung ist in der Destillationsblase ein Rührwerk integriert. Bei den ersten Versuchen mit der Technikumsanlage wurde zur Verkürzung der Aufheizphase die Molke, nicht wie unter Punkt 3 beschrieben, durch einen Wasserkreislauf aufgeheizt, sondern direkt mit einem Heizstab. Das Rührwerk sollte für diese Betriebssituation für eine ausreichende Bewegung der Molke sorgen, so daß Kristallbildung bzw. Anbackungen am Heizstab verhindert werden. Während der ersten Versuchen war festzustellen, daß sich trotz Einsatz des Rührwerkes eine Kristallschicht auf der Oberfläche des Heizstabes gebildet hat. Als bei einem Destillationsversuch das Rührwerk ausfiel bildete sich in kürzester Zeit eine Kristallkruste auf dem Heiz-



tab, die einbrannte und zu einer starken Geruchsbildung führte. Der Heizstab mußte erneuert werden, da dieser beim Versuch irreparabel beschädigt wurde. Beim Betrieb einer Vakuumdestillationsanlage für die Eindampfung von Molke muß sichergestellt werden, daß alle Molke berührten heißen Bauteile ausreichend umspült werden, da es sonst zur Kristallbildung kommt.

Zur Vermeidung dieses Problems wird die Molke nicht mehr direkt mit dem Heizstab aufgeheizt. Es wurde ein separater Wasserkreislauf insatliert, bei dem ein Heizstab das Wasser erhitzt, das in den Doppelmantel des Verdampfers geleitet wird und so die Molke vorheizt (vgl. Abb. 1).

Mit dem Verdampfer (Innenkocher), der mit heißem Brüden betrieben wird, stellt sich dieses Problem der Kristallbildung nicht, da bedingt durch die Konstruktion, immer eine erzwungene Konvektion vorhanden ist, die der Bildung von Kristallen auf der Oberfläche des Verdampfers vorbeugt.

## 6. Reduzierung des Energieaufwandes

Die benötigte Energie für das Eindampfen der Molke ist ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung und mitentscheidend für den effektiven Betrieb der Destillationsanlage. Im kontinuierlichen Betrieb erfolgt das Erhitzen der Molke im Verdampfbehälter über den verdichteten Brüden. Die in den Prozeß eingespeiste Energie ist die elektrische Energie zum Betreiben des Brüdenverdichters, der Vakuumpumpe und des Rührwerkes beträgt ca. 4 kW/h. Entsprechend den in Kap. 4 dargestellten Ergebnisse werden für die mittlere Verdampfungstemperatur von ca. 66 °C ca. 34l/h Kondensat verdampft. Aus den Versuchsergebnisse ergibt sich ein Energieaufwand von 12 % bezogen auf den Energiegehalt des verdampften Wassers. Somit kann die entwickelte Anlage von Seiten des Energieverbrauchs durchaus mit mehrstufigen Anlagen verglichen werden.

Durch sinnvolle Isolierungsmaßnahmen konnte eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden, die sich sofort durch einen größeren Durchsatz bemerkbar machte. Das Rührwerk, das zur Verminderung von Kristallisation notwendig ist, verbessert zusätzlich den Wärmetransport innerhalb der Molke. In der Entwicklungsphase wurde sehr großen Wert auf eine möglichst effizienten Umgang mit der Energie gelegt. Dies spiegelt sich in der Energiebilanz wieder.

Die im Antrag zu diesem Forschungsprojekt berechneten Energiekosten wurden anhand der Eckdaten 90 kWh/m<sup>3</sup> und 0,2 DM/kWh (Durchsatz ca. 45 Liter Molke in der Stunde) berechneten. Es ergaben sich Energiekosten von 18,- DM/m<sup>3</sup> annehmen, d.h. bei einem Durchsatz von 1.000 m<sup>3</sup> Molke pro Jahr mußte mit etwa 18.000,- DM Energiekosten gerechnet werden.

Bei existierenden Anlage werden ca. 60 kWh/m<sup>3</sup> benötigt, wodurch sich bei einem Strompreis von 0,2 DM/kWh Energiekosten von ca. 12 DM/m<sup>3</sup> errechnen lassen bzw. 12.000 DM bei einem Durchsatz von 1.000m<sup>3</sup> Molke.

Daraus folgt, das die erwarteten Energiekosten um 1/3 kleiner sind als die erwarteten Kosten.

## 7. Maßnahmen zur Reduzierung des Reinigungsaufwandes

Die Vakuumdestillationsanlage ist so ausgeführt worden, daß eine leichte und einfache Reinigung der Molke berührten Bauteile möglich ist. Da eine einfache, effektive Methode zur Schaumzerstörung gewählt wurde, bei der der Einbau einer Füllkörperpackung entfällt, konnte ein zusätzlicher Reinigungsaufwand vermieden werden. Prinzipiell kann die Anlage mit CIP-Düsen ausgerüstet werden, die eine vollautomatische Reinigung der Anlage ermöglichen. Bei Kleinanlagen, die in Sennereien üblich sind, kann die Anlage durch einen Spülvorgang und einer Reinigung von Hand gesäubert werden.

## 8. Erzielbare Qualität des Destillates

In Tabelle 1 sind exemplarisch zwei Analysenwerte des Destillates, das bei der Eindampfung von Molke anfällt, zusammengefaßt.

| Versuchsdatum | Total organic carbon<br>TOC [mg/l] | Chemische Sauerstoffbedarf<br>CSB [mg/l] |
|---------------|------------------------------------|--|
| 13.07.1998    | 4300                               | 11100                                    |
| 17.09.1998    | 33,4                               | 178                                      |
| 25.03.1999    | 17,1                               | 89                                       |

**Tabelle 3: Typische Analysenwerte des Destillates.**

Die Destillatqualität konnte zwischen den exemplarisch ausgesuchten Versuchen deutlich gesteigert werden. Durch die Optimierung des Tropfenabscheiders gelangen keine Aerosoltropfen mehr in das Destillat. Das anfallende Destillat hat eine Qualität unterhalb des gesetzlich vorgeschriebenen CSB-Wert von 110 mg/l.

## 5. Eigenschaften des Molkenkonzentrates

### 5.1 Durchgeführte Untersuchungen

Ziel der Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Anlage zur Eindampfung von Molke. Die Eignung der Anlage wird wesentlich durch die Qualität der erzeugten Molkekonzentrate bestimmt. Im praktischen Betrieb der Anlage sollen die Betreiber, also die kleinen Molkereien, die Möglichkeit erhalten, die Konzentrate zumindest zum Teil in ihre Produkte mit einzubinden. Daher wurden die verarbeiteten Molken und die erstellten Konzentrate in Laborversuchen auf ihre physikalischen Eigenschaften untersucht.

Ausgangsmaterial für die experimentellen Untersuchungen ist handelsübliche Molke. Die Zusammensetzung von Süß- und Sauermolke ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Zusammensetzung der Molken

| Anteil (%)    | Sauermolken | Süßmolken |
|---------------|-------------|-----------|
| Trockenmasse  | 5 - 6       | 6 – 7     |
| Protein       | 0,7 – 0,8   | 0,7 – 0,8 |
| Laktose       | 4,0 – 4,4   | 4,3 – 4,9 |
| Mineralstoffe | 0,7 – 0,8   | 0,5 – 0,7 |
| pH-Wert       | 4,45 – 4,6  | 6,3 – 6,6 |

Für die Qualität der Molke bzw. der Molkekonzentrate ist die Temperaturbeanspruchung während des Eindampfens von großer Bedeutung. In den Arbeiten wurden daher die Temperatur im Verdampfbehälter und die Verweilzeit bei erhöhter Temperatur variiert. Die Temperaturen wurden zwischen 50 °C und 90 °C verändert und die Dauer der Temperaturbeanspruchung lag zwischen einer und sechs Stunden.

In einer ersten Versuchsreihe wurde in verschiedenen Versuchen die Haltezeit zur Konzentrierung der Molke bei einer konstanten Produkttemperatur von  $T = 60\text{ °C}$  variiert. Die Einstellungen der Versuche zur Variierung der Haltezeit sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Versuchsparmeter zur Konzentrierung von Molke unter Variierung der Haltezeit bei  $T = 60\text{ °C}$

| Versuch | Haltezeit |
|---------|-----------|
| 1       | 60 min    |
| 2       | 120 min   |
| 2 (W)   | 120 min   |
| 3       | 150 min   |
| 3 (W)   | 150 min   |
| 4       | 180 min   |

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Produkttemperatur während des Konzentrationsvorganges variiert. Bei Einstellung des minimal möglichen Druckes während des Konzentrationsvorganges, resultieren aus der Einstellung unterschiedlicher Produkttemperaturen unterschiedliche Haltezeiten, um eine merkliche Konzentrierung der Molke zu erreichen. Die Einstellungen der Versuchsreihe mit den jeweiligen Produkttemperaturen und den resultierenden Haltezeiten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Versuchsparameter zur Konzentrierung von Molke unter Variierung der Produkttemperatur

| Versuch | Produkttemperatur | Haltezeit |
|---------|-------------------|-----------|
| 5       | 50 °C             | 360 min   |
| 6       | 60 °C             | 310 min   |
| 7       | 70 °C             | 285 min   |
| 8       | 80 °C             | 225 min   |
| 9       | 90 °C             | 95 min    |

## 5.2. Charakterisierung der Molke

Zur Beurteilung des Konzentrierungsprozesses der Molke, wurde der Verdampfungsvorgang für ausgewählte Versuche genauer beschrieben.

Zur Charakterisierung der Molke wurden folgende Parameter herangezogen:

- pH-Wert
- Dichte
- Trockensubstanz
- Proteingehalt
- Löslichkeit
- Anteil undenaturiertes Protein
- Rheologische Eigenschaften

### pH-Wert

Der pH-Wert der Molke wurde bei  $T = 20\text{ °C}$  mit einer pH-Elektrode ermittelt.

### Dichte

Die Dichte der Molke wurde mit Hilfe eines Pyknometers bei  $T = 20\text{ °C}$  bestimmt.

### Trockensubstanz

Die Bestimmung der Trockensubstanz erfolgte durch Trocknung des Musters unter Vakuum bei  $T = 80\text{ °C}$  bis zur Gewichtskonstanz.

### Rohproteingehalt

Die Bestimmung des Rohproteingehaltes der Molke erfolgte nach einer Methode des §35 LMBG (Verfahren: Kjeldahl) (1).

## Löslichkeit

Zur Bestimmung der Löslichkeit der Molke wurde die Molke definiert in verschiedenen Verhältnissen mit H<sub>2</sub>O gemischt. Das Gemisch wurde 15 min bei Raumtemperatur mit einem Magnetrührer ( $n = 500 \text{ min}^{-1}$ ) gerührt. Anschließend wurde das Gemisch durch einen Faltenfilter filtriert. Der Faltenfilter wurde unter Vakuum bei  $T = 80^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der Anteil unlöslicher Trockensubstanz wurde berechnet nach:

$$c_{ul} = (m_{ul} / m_{ges}) * 100\%$$

Dabei sind

$c_{ul}$ : Anteil unlöslicher Trockensubstanz

$m_{ul}$ : Masse unlösliche Trockensubstanz (Rückstand im Faltenfilter)

$m_{ges}$ : Gesamtmasse Trockensubstanz des Gemisches Molke/H<sub>2</sub>O

## Anteil undenaturiertes Protein

Zur Bestimmung des undenaturierten Proteins wurden die denaturierten Molkenproteine nach Fällung mittels NaCl durch Filtration entfernt. Das Filtrat enthielt die undenaturierten Proteine. Der Proteingehalt des Filtrats wurde nach einer Methode des §35 LMBG (Verfahren: Kjeldahl) bestimmt (1-5). Der Anteil undenaturiertes Protein wurde berechnet nach:

$$a_{ud} = (c_{pf} * (m_M + m_{NaCl}) / c_{pm} * m_M) * 100\%$$

Dabei sind

$a_{ud}$ : Anteil undenaturiertes Protein

$c_{pf}$ : Proteinkonzentration Filtrat

$c_{pm}$ : Proteinkonzentration Molke

$m_M$ : Masse vorgelegte Molke

$m_{NaCl}$ : Masse NaCl zugegeben

## Rheologische Eigenschaften

Die rheologischen Eigenschaften von Molke wurden durch die Bestimmung der Fließ- und Viskositätsfunktion in einem deformationsgesteuerten Rotationsrheometer ermittelt. Folgende Messparameter wurden gewählt:

Messsystem: koaxiales Zylindersystem (Z2.DIN)

Messtemperatur:  $T = 20^\circ\text{C}$

Schergeschwindigkeit:  $\dot{\gamma} = 150 - 1000 \text{ s}^{-1}$

### 5.3 Ergebnisse der Charakterisierung der Molke

In die Untersuchungen zur Charakterisierung wurde die handelsübliche Sauermolke sowie die daraus erzeugten Molkenkonzentrate mit den oben beschriebenen Methode analysiert. Die Ergebnisse der Bestimmung von pH-Wert, Dichte, Trockensubstanz, Proteingehalt und Anteil undenaturiertes Protein sind in Tabelle 7 zusammengefaßt.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung von konzentrierter Molke

| Probe            | pH-Wert | Dichte                      | Trocken-<br>substanz | Protein-<br>gehalt | undenaturier-<br>tes Protein |
|------------------|---------|-----------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|
| Ausgangsmaterial | 4.48    | 1.0145<br>g/cm <sup>3</sup> | 6.3 %                | 0.76 %             | 63.09 %                      |
| Versuch 1        | 4.60    | 1.0340<br>g/cm <sup>3</sup> | 8.4 %                | 0.97 %             | 62.54 %                      |
| Versuch 2        | 4.54    | 1.0510<br>g/cm <sup>3</sup> | 12.0 %               | 1.47 %             | 46.23 %                      |
| Versuch 3        | 4.60    | 1.0460<br>g/cm <sup>3</sup> | 11.1 %               | 1.27 %             | 48.15 %                      |
| Versuch 4        | 4.49    | 1.1630<br>g/cm <sup>3</sup> | 35.6 %               | 4.35 %             | 50.29 %                      |
| Versuch 5        | 4.43    | 1.1388<br>g/cm <sup>3</sup> | 30.5 %               | 3.72 %             | 82.83 %                      |
| Versuch 6        | 4.40    | 1.1791<br>g/cm <sup>3</sup> | 37.1 %               | 4.67 %             | 74.29 %                      |
| Versuch 7        | 4.41    | 1.1575<br>g/cm <sup>3</sup> | 34.1 %               | 4.03 %             | 59.19 %                      |
| Versuch 8        | 4.31    | 1.1808<br>g/cm <sup>3</sup> | 38.9 %               | 4.76 %             | 69.02 %                      |
| Versuch 9        | 4.27    | 1.1707<br>g/cm <sup>3</sup> | 37.0 %               | 4.41 %             | 50.12 %                      |

In der tabelle sind mittelwerte der Messungen angegeben. Der Eindampfprozess hat keinen Einfluß auf den pH-Wert der Molkeprodukte. Die Dichte der konzentrierten Molke nimmt mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt zu.

Besondere Bedeutung kommt bei der Herstellung der Konzentrate der Denaturierung der Proteine zu. In Bild 3 ist der Grad der Proteindenaturierung in Abhängigkeit von der Haltezeit (hier ist gleichzeitig der Trockensubstanzgehalt aufgetragen), und in Bild 4 ist das Ausmaß der Proteindenaturierung in Abhängigkeit von der Produkttemperatur während des Eindampfprozesses dargestellt.

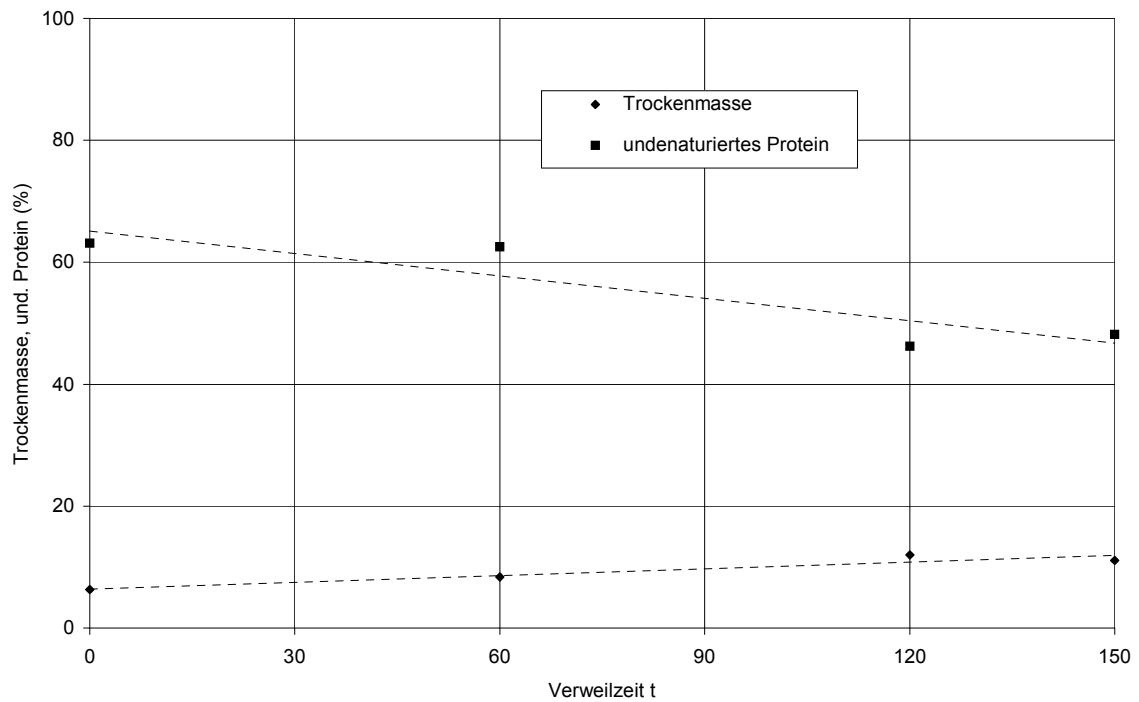


Bild 3: Anteil undenaturiertes Protein und Trockensubstanzgehalt als Funktion der Haltezeit

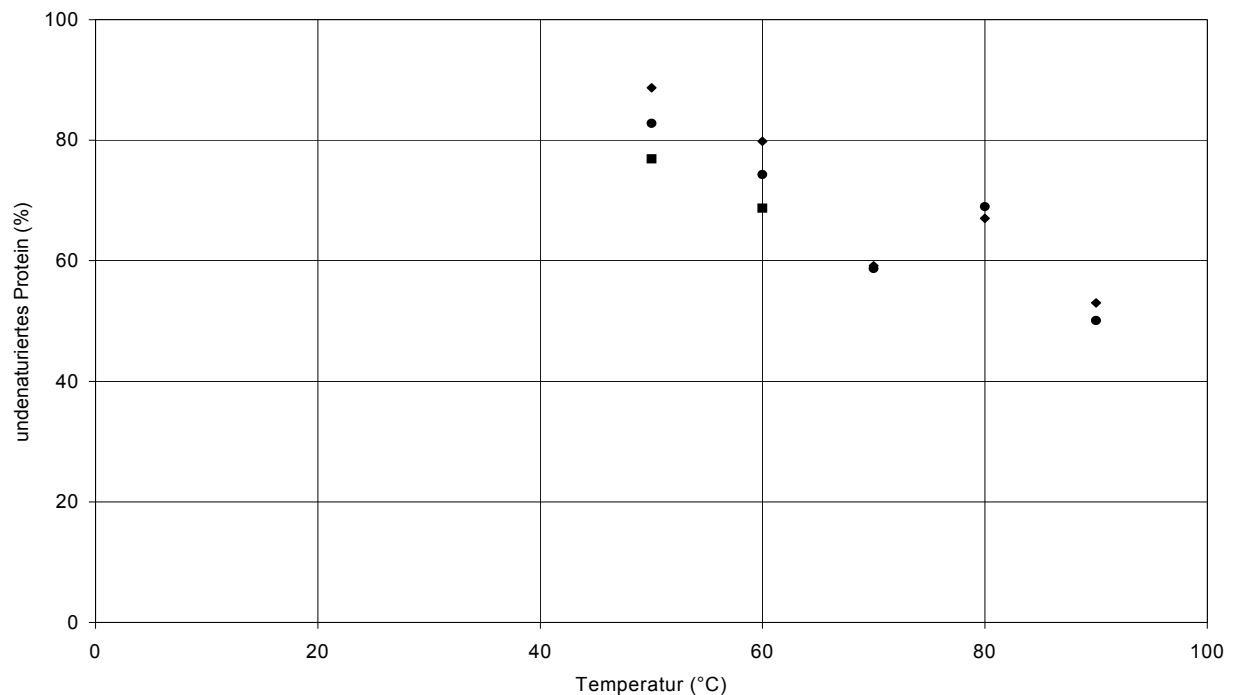


Bild 4: Anteil undenaturiertes Protein als Funktion der Produkttemperatur

In Bild 3 wird der kontinuierliche Verdampfung der Molke durch den Anstieg der trockensubstanz im Konzentrat deutlich. Gleichzeitig ist zu erkennen, daß der Anteil des undenaturierten Proteins mit wachsender Verweilzeit abnimmt.

In Bild 4 wird der Einfluß der Temperatur auf den Grad der Denaturierung der Molkenproteine noch deutlicher. Die auftretenden Schwankungen in den Meßergebnissen resultieren aus Unterschieden im Ausgangsmaterial und der Variation der

Versuchsdurchführung. Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß der Eindampfprozeß der Molke bei möglichst geringen Temperaturen ablaufen muß, um den nativen Charakter der Proteine weitestgehend zu erhalten.

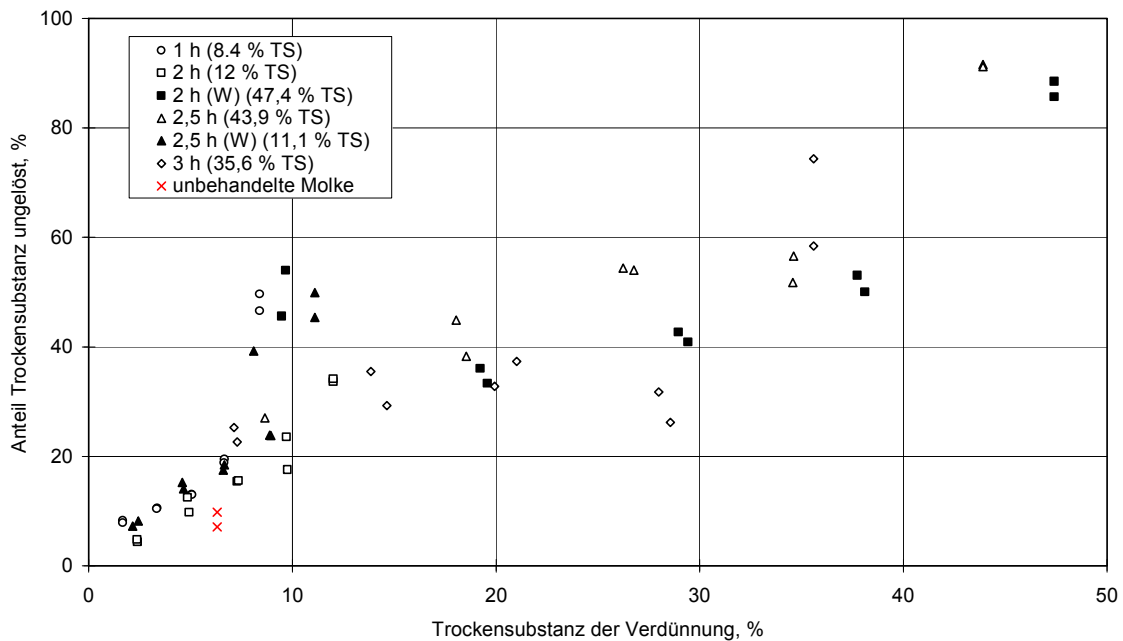


Bild 5: Anteil unlösliche Trockensubstanz in Abhängigkeit von der Verdünnung für konzentrierte Molke (Konzentrationsbedingungen: T = 60 °C, Variierung der Haltezeit)

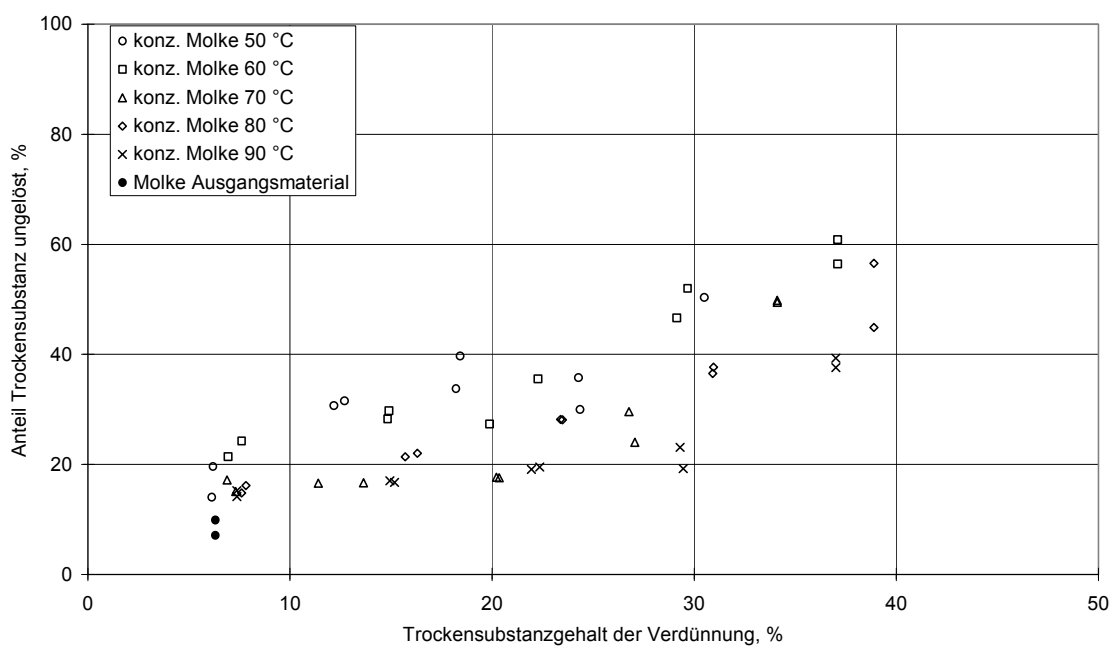


Bild 6: Anteil unlösliche Trockensubstanz in Abhängigkeit von der Verdünnung für bei verschiedenen Temperaturen konzentrierte Molke



Die Ergebnisse der Bestimmung der Löslichkeit von konzentrierter Molke sind in den Bild 5 und 6 dargestellt. Aus den Untersuchungen zur Löslichkeit von konzentrierter Molke geht hervor, daß die unlösliche Trockensubstanz bei Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes zunimmt. Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Produkttemperatur bzw. der Haltezeit und der Löslichkeit von konzentrierter Molke festgestellt werden.

Die dynamische Viskosität von der konzentrierten Molke in unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten (TS) wurde am Rotationsrheometer bei einer Temperatur von ca. 20°C ermittelt. In Bild 7 sind die gemessenen Viskositäten der Molkenkonzentrate in Abhängigkeit von der Schubspannung dargestellt. Die Meßergebnisse sind für unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen deutlich die starke Abhängigkeit der Viskosität von der Trockenmasse in den untersuchten Konzentraten. Die Konzentrate weisen alle ein leicht Strukturviskoses Verhalten auf.

Im Verdampfbehälter hat die konzentrierte Molke aber eine Temperatur von ca. 65°C. Die Viskosität ist stoff- und temperaturabhängig, mit steigender Temperatur sinkt für Molke die Viskosität. Das heißt, daß die Viskosität der konzentrierten Molke bei einer Temperatur von ca. 65°C im Verdampfbehälter noch fließfähiger ist. Man erkennt, daß die Viskosität ansteigt mit höheren Trockensubstanzgehalten.

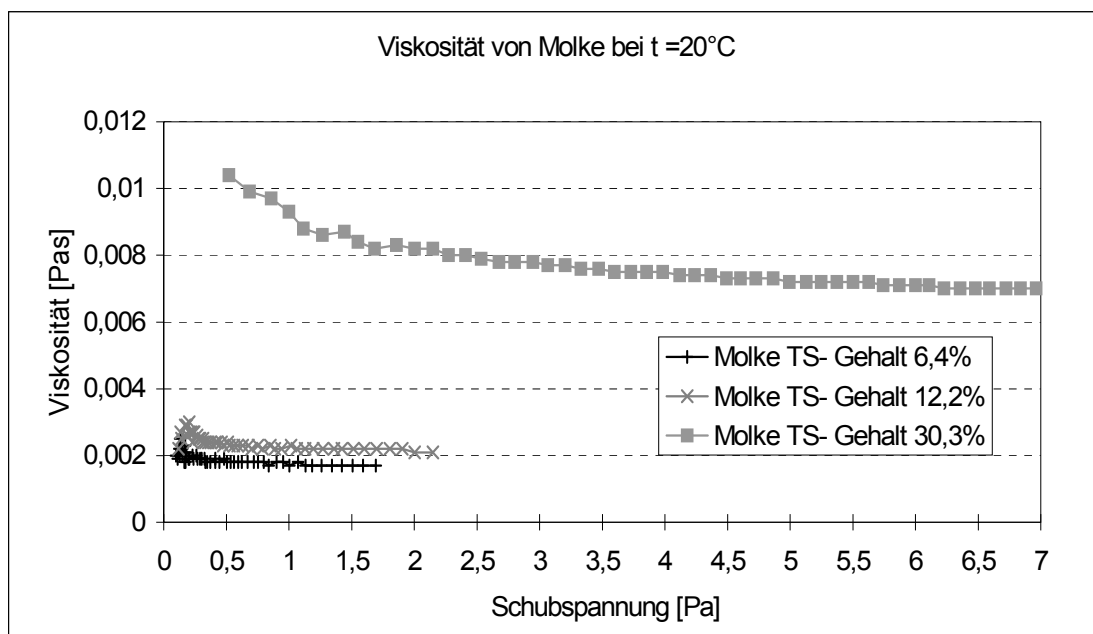


Bild 7: Viskosität von konzentrierter Molke in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit

## 5.4 Literatur

- (1) Amtliche Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 LMBG BGVV, Berlin, 1997
- (2) Belitz, H.-D., Grosch, W., Lehrbuch der Lebensmittelchemie, Springer-Verlag, Berlin, 1982

(3) Marschke, R.J., Houlihan, D.B., Rapid estimation of undenatured whey protein in the manufacture of skim milk powder, Australian Journal of Dairy Technology, 35 (1), 13-15, 1980

(4) McGann, I.C.A., Mathiassen, A., O'Connell, J.A., Applications of the Pro-Milk Mk 2.4. Monitoring the degree of denaturation of whey proteins in heat processing of milk and the heat treatment classification of milk powders, Laboratory Practice, 21 (12), 865-871, 1972

(5) Niro Atomizer, Analysen-Methoden für Trockenmilch-Produkte, 4. Ausgabe, A/S Niro Atomizer, Kopenhagen, 1978

## 6. Wirtschaftliche Bedeutung für kleine und mittelgroße Unternehmen

Einen Vorteil, der sich durch die Aufarbeitung von Molke durch die Vakuumdestillation ergibt, ist die Möglichkeit, die aufkonzentrierte Molke weiterzuverwerten, so daß insgesamt eine Kreislaufwirtschaft realisiert wird. Die ökonomischen Vorteile liegen somit in der Verringerung der Abwassermenge und der Möglichkeit, die konzentrierte Molke wertschöpfend weiterzuverwenden.

Für eine Anlage zur Vakuumdestillation von Molke sind folgende Investitionskosten zu erwarten:

|   |                    |
|---|--------------------|
| Verkaufspreis der Destillationsanlage (1000 m <sup>3</sup> /a Molke) ca.: | 200.000,- DM       |
| bauliche Veränderungen (z.B. Anschlüsse):                                 | 10.000,- DM        |
| Tank für das Molkenkonzentrat:  | 5.000,- DM         |
| Tank für das Destillat (in der bilanzierten Sennerei vorhanden):          | 5.000,- DM         |
| <hr/> Investitionskosten ca.:   | <hr/> 220.000,- DM |

Die Energiekosten belaufen sich auf ca. 12.000,- DM pro Jahr (vgl. vorher). Neben den anfallenden Energiekosten können zur Aufrechterhaltung des Betriebes, für Inspektionen und Reparaturen Betriebskosten in Höhe von 6.600,- DM im Jahr angesetzt werden (3 % vom Anlagen Wert).

Bei der Vakuumdestillation von Molke kann nicht nur das Molkenkonzentrat einer weiteren Nutzung zugeführt werden, sondern auch das Destillat, das als Brauchwasser zu Reinigungszwecken einsetzbar ist. Demzufolge läßt sich der Verbrauch an Wasser, das aus dem Netz des öffentlichen Versorgungsunternehmens entnommen und zur Reinigung der Anlagen eingesetzt wird, reduzieren, so daß zumindest die Kosten für die Entnahme des Wasser und die Entsorgung des Abwassers entfallen.

Am Beispiel der Herstellung von Molkenpulver soll fiktiv dargestellt werden, welche Kosten für die Eindampfung der Molke und die Trocknung des Konzentrates entstehen, und mit welchen finanziellen Vorteilen bei dieser Vorgehensweise zu rechnen ist.

Für die Herstellung von Molkenpulver ist ein Trockner notwendig, der Anschaffungskosten von ca. 65.000,- DM, jährliche Energiekosten von ca. 7.000,- DM sowie Be-

triebskosten von ca. 2.000,- DM verursacht. Geht man davon aus, daß 5% der Molke in Pulver umgesetzt werden können, wären dies ca. 50.000 kg pro Jahr. Bei einem angenommenen Verkaufspreis von 0,8 DM/kg für das Molkenpulver lassen sich 40.000,- DM pro Jahr aus dem Verkauf des Pulvers erzielt.

Die oben angegebenen Kosten und Einsparungen für die Herstellung von Molkenpulver lassen sich wie folgt zusammen fassen:

|   |   |               |
|---|---|---------------|
| angenommenen bisherige Entsorgungskosten<br>(bei 1000 m <sup>3</sup> Molke pro Jahr): |   | 50.000,- DM/a |
| Energiekosten (Destillation):   | - | 18.000,- DM/a |
| Betriebskosten (Destillation):  | - | 6.600,- DM/a  |
| Energiekosten (Trocknung):  | - | 7.000,- DM/a  |
| Betriebskosten (Trocknung):   | - | 2.000,- DM/a  |
| <hr/>   |   |               |
| Einsparung:   |   | 16.400,- DM/a |
| Wert Molkenpulver:  | + | 40.000,- DM/a |
| Einsparung Wasser- und Abwassergebühren:  | + | 1.000,- DM/a  |
| <hr/>   |   |               |
| Überschuß:  |   | 57.400,- DM/a |

Diesem finanziellen Vorteil stehen die folgenden Investitionskosten gegenüber:

|                             |   |              |
|-----------------------------|---|--------------|
| Vakuumdestillationsanlage:  |   | 220.000,- DM |
| Trockner:                   | + | 65.000,- DM  |
| <hr/>                       |   |              |
| gesamte Investitionskosten: |   | 285.000,- DM |

Hieraus folgt eine Amortisationszeit von ca. 5 Jahren. Läßt sich das Molkenkonzentrat für andere Verwendungszwecke mit größerer Wertschöpfung einsetzen, verringert sich die Amortisationszeit entsprechend.