

# Grundlagen der Landtechnik

Herausgegeben mit Unterstützung durch die  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut  
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 34 (1984) Nr. 4, S. 153 bis 184

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

## Rentabilitätsrechnung einer Milchwärmerückgewinnungsanlage

Von Mjongsu Pak, Köln\*)

DK 620.97:637.133:644.62.003.1

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur realistischen Abschätzung der Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung durch Milchwärmerückgewinnung leisten und zeigt, wie die Rentabilitätsrechnung einfach und praxisnah durchgeführt werden kann.

### 1. Einleitung

Bekanntlich ist die Warmwasserbereitung durch Rückgewinnung von Milchwärme heutzutage Stand der Technik. Jedoch macht man sich zum Teil unkorrekte Vorstellungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens. Man liest oder hört häufig von der Warmwasserbereitung durch die Milchwärmerückgewinnung zum Nulltarif [1, 2, 3]. Man beachtet hierbei nicht, daß der Verbrauch an Elektroenergie bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung höher ist als bei Betrieb ohne Wärmerückgewinnung. Außerdem übersieht man, daß die rückgewinnbare Milchwärme im Sommer wegen des überschüssigen Wärmeangebots nur zum Teil ausgenutzt wird. Daher ergeben sich – gemessen an der Realität – wesentlich zu günstige Ergebnisse, wenn die Rentabilitätsrechnung nach der bekannten Faustregel durchgeführt wird, daß man ca. 0,8 l Warmwasser aus 1 l Milch erhält.

Um die Einflüsse der oben genannten Faktoren und von anderen weiteren Parametern auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung zu ermitteln, wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit an der Fachhochschule Köln zum einen eine theoretische Analyse der Milchwärmerückgewinnung durchgeführt. Zum anderen wurden Experimente an einer Milchkühlanlage angestellt, um den schon genannten höheren Verbrauch an Elektroenergie, den Kompressorwirkungsgrad und andere praktische Erfahrungswerte – z.B. Wärmeverluste, Druckverluste – zu ermitteln [4, 5].

Das Ergebnis der Arbeiten wurde in einem Arbeitsdiagramm zusammengefaßt, dem man in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern die Energieeinsparung durch die Milchwärmerückgewinnung entnehmen kann, um damit die Rentabilitätsrechnung einer Milchwärmerückgewinnungsanlage durchzuführen.

Dieser Beitrag wurde auf der Internationalen Tagung Landtechnik, 10./11. Nov. 1983 in Braunschweig, vorgetragen. Die Arbeit wurde aus dem Forschungsfonds der Fachhochschule Köln finanziert.

\*) Prof. Dr.-Ing. M. Pak, Fachbereich Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.

### 2. Milchkühlprozeß

Für die Milchkühlung wird bekanntlich der Kalt dampfprozeß mit Frigen 22 angewandt, Bild 1. Eine Milchkühlanlage nach dieser Prozeßführung enthält einen Verdampfer, einen Verdichter (Kompressor), einen Verflüssiger (Kondensator) und ein Drosselorgan (Expansionsventil).

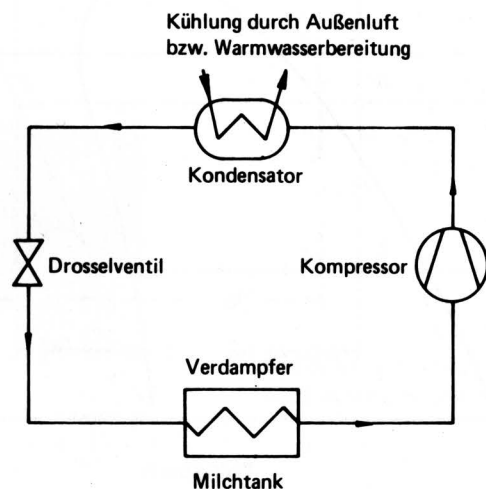


Bild 1. Einfacher Kalt dampfprozeß für die Milchkühlung.

Der Verdampfer, eine Rohrschlange, ist in der Milchkühlwanne angeordnet. Die handelsüblichen Milchkühlanlagen mit Wärmerückgewinnung haben zwei Kondensatoren; ein Kondensator ist im Warmwasserbehälter installiert, der andere ist als luftgekühlter Kondensator ausgeführt.

Bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung wird der Kältemitteldampf nach der Kompression dem Kondensator im Warmwasserbehälter zugeführt. Dort wird das Kältemittel unter Abgabe der Wärme kondensiert. Das flüssige Kältemittel wird nach der Expansion durch das Expansionsventil in den Verdampfer geleitet. Dort erfolgt das Verdampfen des Kältemittels durch Aufnahme der Milchwärme, wodurch die Milch gekühlt wird.

Im Falle der Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung wird das Kältemittel nach der Kompression in den luftgekühlten Kondensator geleitet, von wo es wieder über das Expansionsventil zum Verdampfer gelangt. Der einzige, aber entscheidende Unterschied zwischen den beiden Prozeßführungen besteht also in dem Kondensationsvorgang, der bei verschiedenen Temperaturen stattfindet. Die Kondensationstemperatur bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung ist in der Regel viel höher als diejenige bei der Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung. Dieses ist durch die Temperatur des Warmwassers einerseits und der Umgebung andererseits bedingt.

Die Kondensationsdrücke sind von der Kondensationstemperatur abhängig. Je höher die Kondensationstemperatur ist, um so größer ist auch der Kondensationsdruck. Daher muß der Kompressor im Falle der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung den Kältemitteldampf auf einen höheren Druck komprimieren, wozu er auch mehr Energie benötigt.

In einem log p,h-Diagramm lassen sich der Milchkühlprozeß und die Prozeßgrößen sehr anschaulich darstellen, Bild 2. Die Strecke 1-2 entspricht dem Kompressionsvorgang, die Strecke 2-3 der Abkühlung mit anschließender Kondensation, die Strecke 3-4 dem Expansionsvorgang und die Strecke 4-1 dem Verdampfungsvorgang. In das Diagramm eingezeichnet sind zwei Prozesse, und zwar mit und ohne Wärmerückgewinnung. Der Prozeß mit dem höheren Kondensationsdruck (1-2-3-4) gilt für die Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung, der Prozeß mit dem niedrigeren Kondensationsdruck (1-2\*-3\*-4\*) für die Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung.

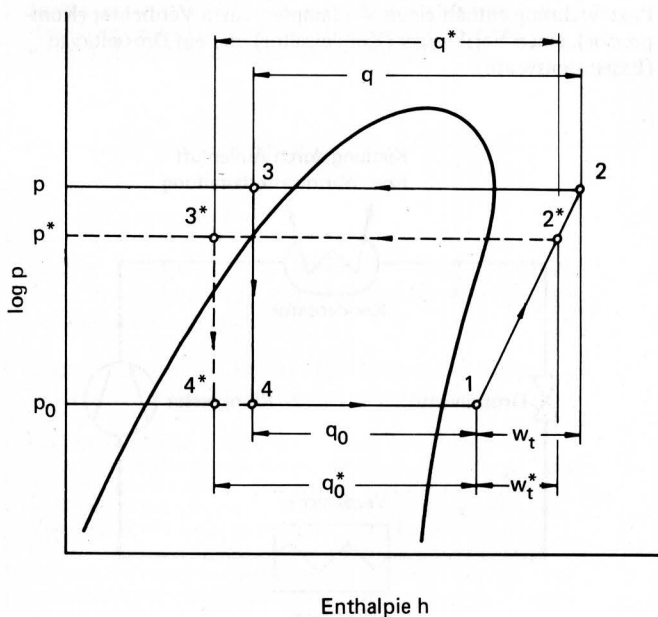


Bild 2. Milchkühlprozeß im log p,h-Diagramm.

o—o mit Wärmerückgewinnung  
o—o ohne Wärmerückgewinnung

Ein besonderer Vorteil dieses Diagrammes ist, daß die Energien der einzelnen Prozeßschritte als waagerechte Strecken dargestellt werden können. So entspricht die waagerechte Projektion der Strecke 1-2 der massenstrombezogenen Leistung des Verdichters im theoretischen Vergleichsprozesse  $w_t$ . Das Diagramm zeigt anschaulich, daß diese Größe bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung wesentlich größer ist als bei der Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung. Zum anderen erkennt man, daß die massenstrombezogene Kälteleistung  $q_0$ , die Strecke 4-1, um so kleiner ist, je größer

der Kondensationsdruck ist. Die Erhöhung der Kondensationstemperatur bzw. des Kondensationsdruckes hat also in zweierlei Hinsicht Nachteile zur Folge.

Die Auswirkung dieser Effekte läßt sich am besten durch die Leistungszahl  $\epsilon$  ausdrücken, die das Verhältnis zwischen der massenstrombezogenen Kälteleistung  $q_0$  und der massenstrombezogenen Verdichterleistung  $w_t$  ist. Bei einem konstanten Verdampfungsdruck ist die Leistungszahl um so kleiner, je höher die Kondensationstemperatur ist; d.h. man benötigt im Falle der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung mehr elektrische Energie für den Kompressor. Diese Tatsache muß bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Rechnung gestellt werden.

Im folgenden Beispiel, Tafel 1, wird die Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung derjenigen ohne Wärmerückgewinnung mit zwei verschiedenen Lufttemperaturen gegenübergestellt. Bei einer Milchkühltemperatur von 4 °C beträgt die Verdampfungsdruck des Kältemittels ca. 0 °C und der Verdampfungsdruck 5 bar.

Prozeßgrößen		mit	
		Wärmerückgewinnung	
Milchkühltemperatur	°C	4	4
Verdampfungsdruck	bar	5	5
Lufttemperatur	°C		23   5
mittlere Warmwassertemperatur	°C	37	
Kondensationstemperatur	°C	47	33   15
Kondensationsdruck	bar	18	13   8
massenstrombezogene Verdichterleistung $w_t$ ( $\eta_{SV} = 0,6$ )	kJ/kg	54,3	39,5   18,5
massenstrombezogene Kälteleistung $q_0$	kJ/kg	147	165   187
Leistungszahl $\epsilon = q_0/w_t$		2,7	4,2   10,1
Verbesserung von $\epsilon$	%	—	55   274

Tafel 1. Prozeßgrößen bei der Milchkühlung mit und ohne Wärmerückgewinnung.

Im Falle der Wärmerückgewinnung erhält man für eine mittlere Warmwassertemperatur von 37 °C eine Kondensationstemperatur von ca. 47 °C. Der zugehörige Kondensationsdruck beträgt 18 bar. Mit der massenstrombezogenen Verdichterleistung von 54,3 kJ/kg und der massenstrombezogenen Kälteleistung von 147 kJ/kg erhält man eine Leistungszahl von etwa 2,7.

Bei der Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung bei einer Lufttemperatur von 23 °C erhält man eine Kondensationstemperatur von ca. 33 °C und einen Kondensationsdruck von 13 bar.

Mit der massenstrombezogenen Verdichterleistung von 39,5 kJ/kg und der massenstrombezogenen Kälteleistung von 165 kJ/kg erhält man eine Leistungszahl von etwa 4,2. Damit ergibt sich eine Verbesserung der Leistungszahl gegenüber der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung um etwa 55 %. Eine ähnliche Überlegung ergibt bei einer Lufttemperatur von 5 °C eine Steigerung der Leistungszahl auf das etwa 3,7fache. Das heißt, daß im Winter, wenn die gesamte Milchwärme zurückgewonnen wird, der Unterschied in der Leistungszahl für die Milchkühlung mit und ohne Wärmerückgewinnung besonders groß ist und der Prozeß mit Wärmerückgewinnung mehr als das Dreifache an Energie gegenüber der Milchkühlung ohne Wärmerückgewinnung benötigt. Dieses ist sicherlich ein Kostenfaktor, der nicht vernachlässigt werden darf.

### 3. Experimentelle Untersuchung

Zur Bestätigung dieser Überlegung wurden an einer Versuchsanlage Experimente durchgeführt. Diese Versuchsanlage, Bild 3, ist eine handelsübliche Milchkühlanlage mit einem Warmwasserbehälter. Lediglich die Milchwanne wurde durch einen Wasserbehälter ersetzt.

Zur Ermittlung der Temperaturen und Drücke wurden Temperaturregeber Pt 100 und Druckgeber in den Kältemittelleitungen installiert. Außerdem wurde die Leistung des Antriebsmotors und die Durchflußmenge des Kältemittels gemessen.

Bild 4 zeigt den Verlauf der Temperaturen für einen Milchkühlvorgang mit und ohne Wärmerückgewinnung. Die Milcht temperatur fällt von 32 °C auf 4 °C monoton ab. Die Kondensationstemperatur im Falle ohne Wärmerückgewinnung beträgt zwischen 31 und 35 °C, dagegen ist die Kondensationstemperatur im Falle der Wärmerückgewinnung starken Schwankungen unterworfen und verläuft zwischen 40 und 58 °C. Diese Temperaturschwankungen sind durch die Temperaturänderungen des Wassers im Warmwasserbehälter bedingt. Sobald die gewünschte Warmwassertemperatur von etwa 55 °C erreicht wurde, ist der Wasserbehälter neu mit Frischwasser gefüllt worden.

Die Verdichteraustrittstemperatur ist im Falle ohne Wärmerückgewinnung fast konstant und beträgt 110–115 °C. Bei Wärmerückgewinnung schwankt auch die Verdichteraustrittstemperatur, und zwar synchron mit der Kondensationstemperatur. Sie liegt zwischen 123 und 135 °C.

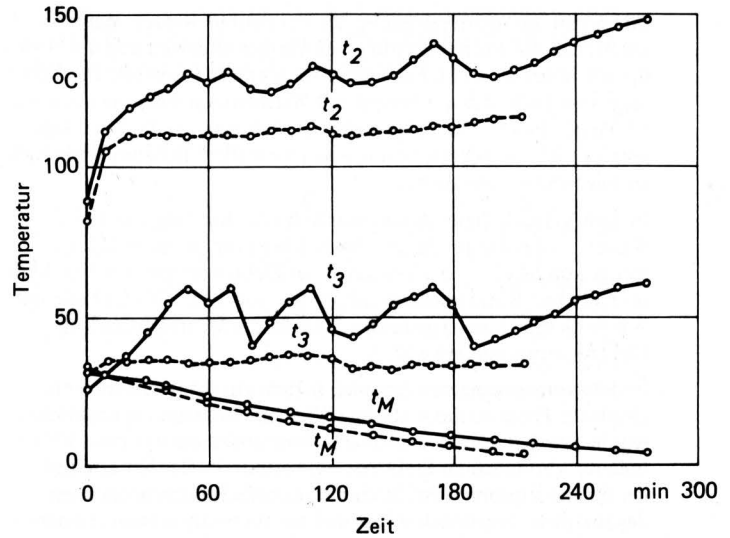


Bild 4. Temperaturverlauf bei der Milchkühlung mit (o—o) und ohne (o—□) Wärmerückgewinnung.

$t_L = 23\text{ °C}$        $t_2$  Verdichteraustrittstemperatur  
 $t_M$  Milcht temperatur       $t_3$  Kondensationstemperatur

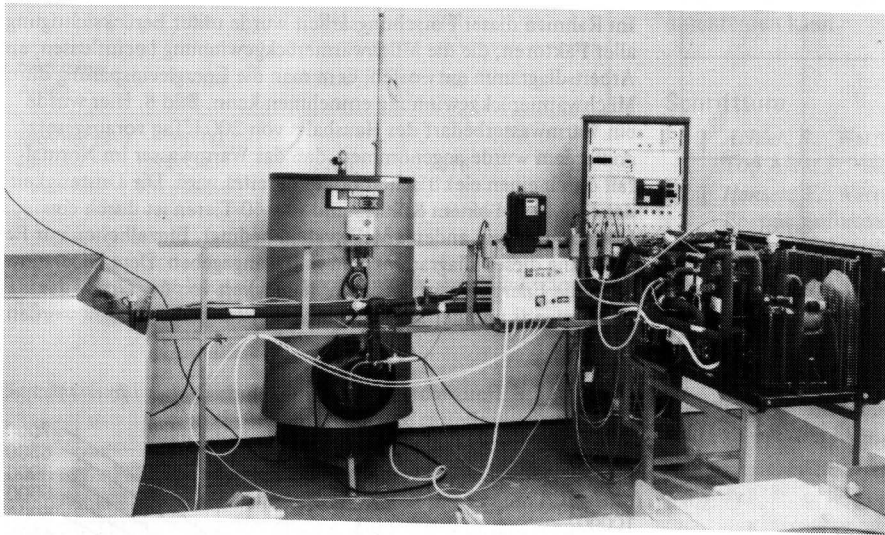
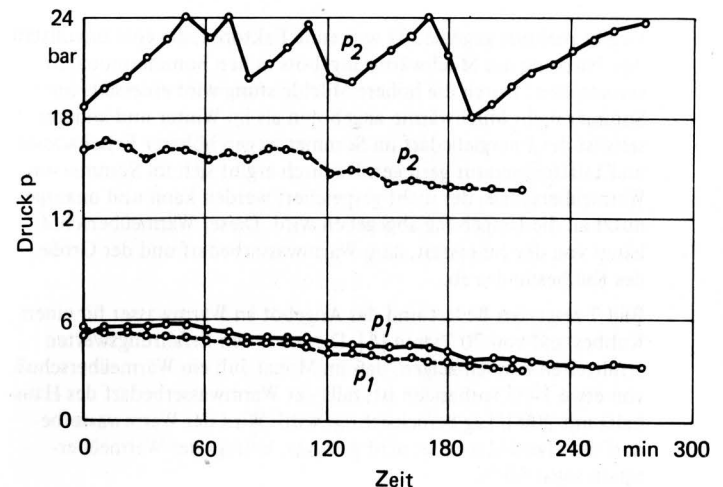


Bild 3. Versuchsanlage für die Milchwärmerückgewinnung.

In Bild 5 ist der Verlauf der Drücke dargestellt. Der Druck am Verdichtereintritt  $p_1$  fällt in beiden Fällen entsprechend der Abnahme der Milcht temperatur ab. Der Verdampfungsdruck ist ein wenig höher als der Druck  $p_1$ . Der Verdichteraustrittsdruck  $p_2$  nimmt im Falle ohne Wärmerückgewinnung von etwa 16,2 bar auf 13,5 bar allmählich ab. Im Falle mit Wärmerückgewinnung zeigen sich wieder die typischen Schwankungen synchron mit der Entleerung und Füllung des Warmwasserbehälters. Hier ist der Druck jedoch wesentlich höher als im Falle ohne Wärmerückgewinnung und beträgt 18 bis 24 bar.

Bild 5. Druckverlauf im Kältemittel bei der Milchkühlung mit (o—o) und ohne (o—□) Wärmerückgewinnung.

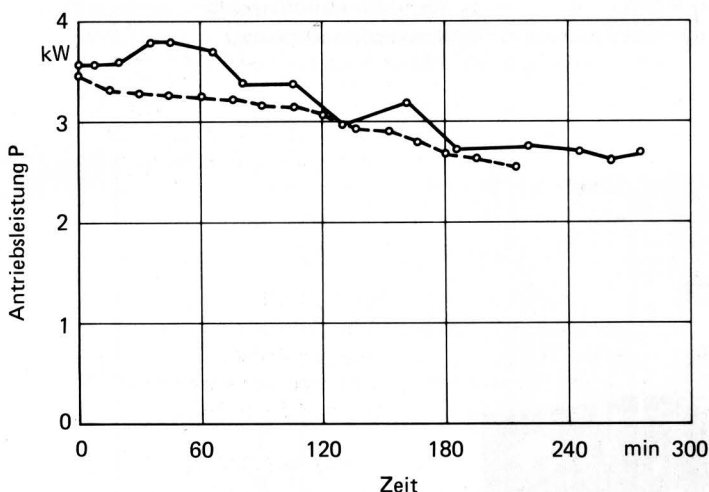
$t_L = 23\text{ °C}$   
 $p_1$  Verdichtereintrittsdruck  
 $p_2$  Verdichteraustrittsdruck



**Bild 6** gibt die Antriebsleistung des Verdichters wieder. Man erkennt, daß die Antriebsleistung bei Wärmerückgewinnung um etwa 0,3 kW höher ist als im Falle ohne Wärmerückgewinnung. Das Bild zeigt aber auch, daß der Prozeß mit Wärmerückgewinnung um etwa 1 h länger dauert. Die Folge davon ist, daß man bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung einen wesentlich höheren Verbrauch an elektrischer Energie hat.

In dem Versuch dieser Arbeit wurde für die Kühlung von 800 l Wasser – das entspricht von der Kühlleistung her einer Milchmenge von 844 l – ein Verbrauch an Elektroenergie von 10,6 kWh im Fall ohne Wärmerückgewinnung und von 14,6 kWh im Falle mit Wärmerückgewinnung gemessen. Dies ist ein Mehrverbrauch an Elektroenergie von etwa 38 %.

In dem vorangegangenen Beispiel, in dem ein theoretischer Vergleich der Prozesse mit und ohne Wärmerückgewinnung angestellt wurde, wurde unter vergleichbaren Umständen ein um etwa 55 % höherer Verbrauch an Elektroenergie ermittelt. Der Unterschied der beiden Ergebnisse ist durch die vereinfachenden Annahmen des Beispiels, den Druckverlust und die ein wenig größere Temperaturspanne am luftgekühlten Kondensator in tatsächlichen Prozessen bedingt. Das Versuchsergebnis bestätigt aber die theoretische Überlegung eindrucksvoll.

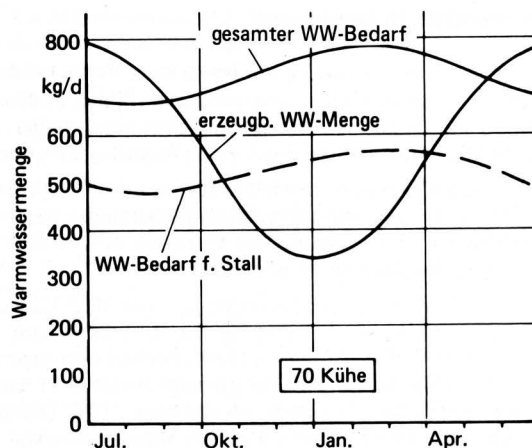


**Bild 6.** Verdichterantriebsleistung bei der Milchkühlung mit (o—o) und ohne (o—o) Wärmerückgewinnung;  $t_L = 23\text{ °C}$ , 844 kg Milch.

#### 4. Unvollständige Ausnutzung des Milchwärmeangebots – ein Arbeitsdiagramm

Es gibt mehrere gegenläufig wirkende Faktoren, die eine unvollständige Nutzung des Milchwärmeangebots in den Sommermonaten verursachen: Durch die höhere Milchleistung wird einerseits im Sommer mehr Milchwärme angeboten als im Winter und andererseits ist der Energiebedarf im Sommer wegen höherer Frischwasser- und Lufttemperatur geringer. Dadurch ergibt sich im Sommer ein Wärmeüberschuß, der nicht gespeichert werden kann und unausgenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Wärmeüberschuß hängt von der Jahreszeit, dem Warmwasserbedarf und der Größe des Kuhbestandes ab.

**Bild 7** zeigt den Bedarf und das Angebot an Warmwasser für einen Kuhbestand von 70 Tieren [6]. Diese aus den Erfahrungswerten ermittelten Kurven zeigen, daß im Monat Juli ein Wärmeüberschuß von etwa 14 % vorhanden ist, falls der Warmwasserbedarf des Haushalts mit 200 l/Tag berücksichtigt wird. Wird der Warmwasserbedarf des Haushalts außer acht gelassen, beträgt der Wärmeüberschuß sogar 60 %.

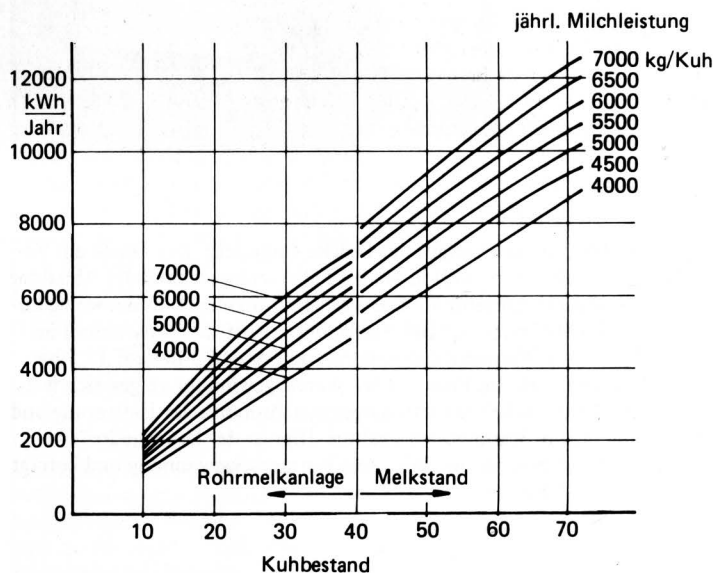


**Bild 7.** Bedarf an Warmwasser und Angebot an Warmwasser über Milchwärmerückgewinnung im Jahresablauf.

Jährl. Milchleistung	4 500 kg/Kuh	Mittl. Milcht. Temperatur	28 °C
Warmw.-Bedarf d. Haush.	200 kg/Tag	Kühltemperatur	4 °C
Warmw.-Temperatur	55 °C		

Bei der Erstellung dieses Diagramms wurden ein Warmwasserbehälter mit hinreichendem Fassungsvermögen und ein optimales "Timing" zwischen Warmwassererzeugung und -entnahme vorausgesetzt. Im anderen Fall wird die Milchwärme nicht optimal ausgenutzt, und es muß selbst in der Jahreszeit mit Wärmeüberschuß das Warmwasser teilweise elektrisch bereitgestellt werden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde unter Berücksichtigung aller Faktoren, die die Milchwärmerückgewinnung beeinflussen, ein Arbeitsdiagramm entworfen, dem man die Energieeinsparung durch Milchwärmerückgewinnung entnehmen kann, **Bild 8**. Hier wurde ein Warmwasserbedarf des Haushalts von 200 l/Tag vorausgesetzt. Außerdem wurde angenommen, daß das Warmwasser im Normalfall durch einen elektrischen Boiler bereitgestellt wird. Die Unstetigkeit der Kurven bei einem Kuhbestand von 40 Tieren ist durch den Übergang auf ein anderes Melksystem bedingt. Einzelheiten zur Berechnung dieses Diagramms sind in [6] angegeben. Dem Diagramm kann die Energieeinsparung in Abhängigkeit von der Größe des Kuhbestandes und der jährlichen Milchleistung entnommen werden.



**Bild 8.** Energieeinsparung in Abhängigkeit vom Kuhbestand; jährliche Milchleistung als Parameter.

Warmw.-Bedarf d. Haush.	200 kg/Tag	Mittl. Milcht. Temperatur	28 °C
Warmw.-Temperatur	55 °C	Kühltemperatur	4 °C



Bei Vorgabe der Kosten für die Elektroenergie und der Mehrkosten für die Milchwärmerückgewinnungsanlage kann die Rentabilitätsrechnung nun mühelos durchgeführt werden.

Tafel 2 zeigt ein Beispiel für die Rentabilitätsrechnung einer Milchwärmerückgewinnungsanlage. Für einen Kuhbestand von 70 Tieren mit einer durchschnittlichen jährlichen Milchleistung von 5000 kg/Kuh entnimmt man eine Energieeinsparung von 10000 kWh. Nach der bekannten Faustregel, daß 1 l Milch 0,8 l Warmwasser ergibt, würde man jährlich 272000 l Warmwasser zum Nulltarif erhalten. Bei einer mittleren Kaltwassertemperatur von 12 °C und mit einem Wirkungsgrad des elektrischen Boilers von 0,9 würde man dann eine Energieeinsparung von ca. 15 100 kWh erreichen. Wie man sieht, ist die tatsächliche Energieeinsparung nach Bild 8 nur 2/3 von derjenigen nach der alten Faustregel. Bei Stromkosten von 0,15 DM/kWh wäre der Gewinn durch die Energieeinsparung nur 1 500 DM/Jahr anstelle von 2265 DM/Jahr.

Kuhbestand	70		
Mittl. jährl. Milchleistung	5000 kg/Kuh		
Fassungsvermögen des Warmwasserbehälters	500 l		
zusätzliche Investitionskosten	5000 DM		
Festkosten (Abschreibung, Zinsen, Reparatur: 15 %)	750 DM		
Warmwasserbedarf des Haushaltes	200 kg/Tag		
Kosten der Elektroenergie	0,15 DM/kWh		
	Energie- Einsparung kWh	Eingesparte Energiekosten DM	Gewinn DM
nach dieser Arbeit	10000	1500	750
nach der be- kannten Faustregel	15 100 (272000 l Warmwasser)	2265	1515

Tafel 2. Daten der Rentabilitätsrechnung für eine Milchwärmerückgewinnungsanlage.

Für die Rentabilitätsrechnung müssen noch die zusätzlichen Investitions- und Reparaturkosten in Rechnung gestellt werden. Für das vorliegende Beispiel wird ein Warmwasserbehälter mit 500 l Fassungsvermögen gewählt. Die Investitionskosten hierfür betragen ca. 5000 DM. Bei einem Ansatz von 15 % dieser Kosten für die jährliche Abschreibung, Verzinsung und Reparatur ergeben sich jährliche Festkosten von 750 DM. Der tatsächliche Gewinn beträgt damit nur 750 DM anstelle von 1515 DM.

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß die Rentabilitätsrechnung nach der einfachen Faustregel ein nicht vertretbares, von dem tatsächlichen zu stark abweichendes Ergebnis erbringt.

## 5. Zusammenfassung

Für die realistische Abschätzung der Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung durch Milchwärmerückgewinnung und für die Rentabilitätsberechnung müssen der höhere Verbrauch an Elektroenergie bei der Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung und die unvollständige Ausnutzung des Milchwärmeangebots berücksichtigt werden. Aufgrund einer thermodynamischen Betrachtung wird gezeigt, daß die Milchkühlung mit Wärmerückgewinnung einen höheren Verbrauch an Elektroenergie aufweist als diejenige ohne Wärmerückgewinnung. Die Ursachen hierfür sind die durch die Warmwassertemperatur bedingte höhere Kondensationstemperatur und der dadurch vorgegebene höhere Kondensationsdruck. Die im Versuch ermittelten Temperatur- und Druckverläufe sowie die Meßwerte der Verdichter-Antriebsleistung bestätigen die Ergebnisse der theoretischen Überlegung.

Bekanntlich steht in den Sommermonaten ein höheres Wärmeangebot einem im Vergleich zu den Wintermonaten niedrigeren Wärmebedarf gegenüber. Die dadurch bedingte unvollständige Ausnutzung des Milchwärmeangebots wird mit Hilfe des statistischen Jahres der täglichen Milchleistung und des Warmwasserbedarfs ermittelt. Unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren wurde ein Arbeitsdiagramm zur Ermittlung der Energieeinsparung durch die Milchwärmerückgewinnung erstellt. In einem Beispiel wird gezeigt, daß man die Rentabilitätsrechnung einer Milchwärmerückgewinnungsanlage mit Hilfe dieses Diagramms einfach und praxisnah durchführen kann.

## Schrifttum

- [ 1 ] Achler, B.: Warmes Wasser zum Nulltarif. Top Agrar (1980) Nr. 2, S. 21/24.
- [ 2 ] Hansen, E.: Wärmerückgewinnung aus der Milch. Energie, Informationsheft des Referats Landtechnik der Landwirtschaftskammer Hannover, 1983, S. 16/19.
- [ 3 ] Kostenloses Warmwasser. Der Landmaschinen-Fachbetrieb Jg. 36 (1984) Nr. 1, S. 22.
- [ 4 ] El Khetrani, M. u. A. Lamzouri: Experimentelle Untersuchung der Milchwärmerückgewinnung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, 1982.
- [ 5 ] Kottsieper, W. u. J. Regenhart: Experimentelle Untersuchung der Milchwärmerückgewinnung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, 1983.
- [ 6 ] Pak, M. u. W. Petry: Die erreichbare Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung durch Milchwärmerückgewinnung. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 137/42.