

Milchkühlung für Melkvorgänge mit Vorkühlung und Wärmenutzung

Green Milk

Autor:

Günther M. FOIDL*

Letzte Aktualisierung: 8. März 2023

Beschreibung einer Milchkühlung für Melkvorgänge mit Vorkühlung und Wärmenutzung, sowie einer thermodynamischen Betrachtung der Kühlvorgänge und Energiebilanzen am Pilot-Projekt Obermünzer in Waidring. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe kann die Anergie nutzbar gemacht werden, so dass im Vergleich zu konventionellen Heizungen eine CO₂-Einsparung von mehreren Tonnen per annum erreicht werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Stand der Technik	3
3	Beschreibung Schema	3
4	Thermodynamische Betrachtung	7
4.1	Grunddaten, Annahmen	7
4.2	Mischung der gekühlten Milch im Tank mit neu gemolkener Milch	8
4.3	Milchtankkühlung ohne Vorkühlung	8
4.4	Melkvorgänge mit Vorkühlung	9
4.5	Energiebilanz der Kühlvorgänge	10
4.6	Kontrollrechnung	13
5	Betriebskosten / Stromkosten	13
6	CO₂-Bilanz	14

*☎ gfoidl@korporal.at ☎ +43 664 8918365

7 Potentialabschätzung für Österreich**15****Abbildungsverzeichnis**

1	Schema der Milchkühlung ohne Kühlpuffer	5
2	Schema der Milchkühlung mit Kühlpuffer	6
3	Zeitlicher Verlauf der Milchtemperaturen über Dauer Melkvorgang	11
4	Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und Leistung des Wärmetauschers	11
5	Zeitlicher Verlauf der Thermodynamik im Kühlpuffer	12

Tabellenverzeichnis

1	Grunddaten zur thermodynamischen Betrachtung	7
2	Daten der iterativ ermittelten Komponenten	7
3	Temperatur im Milchtank ohne Vorkühlung durch Mischung	8
4	Energiebilanz Kühlvorgänge Wärmepumpe	12
5	Energiebilanz Kühlvorgänge Milchtank	13
6	Energiebilanz Kühlvorgänge Kühlpuffer	13
7	Kontrollrechnung	14
8	Stromkosten	14
9	CO ₂ -Äquivalente inkl. Vorkette gem. Umweltbundesamt	15
10	Vergleich verschiedener Energieträger	15
11	Vergleich verschiedener Energieträger / österreichweit	16

1 Einleitung

Beim Melken ist die Milch körperwarm und hat rund 38 °C und muss gemäß Milchhygieneverordnung [1, Kapitel III, Abs. 2] für die Lagerung gekühlt werden. In der Regel erfolgt die Kühlung im Milchtank auf 4 °C und geschieht per Direktkühlung über einen Kältemittelkreislauf oder durch Eiswasserkühlung, bei der ein Eisvorrat gebildet wird und die Milch über einen Eiswasserstrahl gekühlt wird. Bei diesen Arten der Kühlung bleibt die Kühlenergie ungenutzt und wird einfach an die Umgebung abgegeben. Weiters erwärmt sich die bereits im Milchtank befindliche gekühlte Milch bei nachfolgenden Melkvorgängen durch die Mischung mit der neu gemolkenen körperwarmen Milch (cf. Abschnitt 4.2), so dass streng genommen die Milchhygieneverordnung verletzt wird.

Die Kühlenergie kann zur Erzeugung von Warmwasser, beispielsweise für Heizung, für Reinigung, Kuhtränken, etc. sinnvoll genutzt werden und so je nach Milchmenge als Ersatz oder als Ergänzung zu konventionellen Heizanlagen (z.B. Ölheizung) dienen, was wiederum positiven Einfluss auf Betriebskosten und CO₂-Bilanz hat.

2 Stand der Technik

Gemäß dem Stand der Technik gibt es Verfahren, welche per Kompressionskältemaschinen / Wärmepumpen die Kühlung im Milchtank durchführen um so nutzbare Wärme zu erzeugen. Z.B. zeigt Patentschrift „Vorrichtung zur Abwärmenutzung bei der Milchkühlung“ [2] ein solches Verfahren, ebenso wirbt der deutsche Hersteller Arwego e.K. [3] mit einem ähnlichen Verfahren, bei welchem mittels Wärmepumpe die Kühlung im Milchtank durchgeführt wird. Der Nachteil dieser Verfahren ist, dass sich bereits im Milchtank befindliche Milch bei einem folgenden Melkvorgang wieder sehr erwärmt (ca. 20 °C), wodurch die Milchqualität leidet und – siehe oben – dies nicht der Milchhygieneverordnung entspricht.

Es sind auch Milchvorkühlungen bekannt, welche mittels eines Rohr- oder Plattenkühlers die Milch vor Eintritt in den Milchtank bereits kühlen, so dass sich bereits im Tank befindliche Milch weniger erwärmt und der Kühlaufwand im Tank gesenkt wird. Dazu wird als Kühlmedium für diesen Vorkühler fließendes Wasser verwendet. Nachteilig dabei ist, dass durch das fließende Wasser hier nur eine Kühlung auf etwa 15-18 °C erfolgt und so einerseits dieses (lauwarme) Wasser kaum sinnvoll nutzbar ist und andererseits sich die Milch im Tank durch Mischung wieder ziemlich erwärmt. Abgesehen davon ist ausreichend fließendes Wasser nicht überall anwendbar bzw. bedarf es bei Entnahme aus Fließgewässern / Grundwasser eigener Betrachtungen / Genehmigungen hinsichtlich zulässiger Erwärmung und Entnahmemenge.

3 Beschreibung Schema

Das hier beschriebene Schema unterliegt dem Schutzrecht „Milchkühlung für Melkvorgänge mit Vorkühlung und Wärmenutzung“ [4] lautend auf den Autor dieses Schreibens, dessen Erfindung die Aufgabe zugrunde liegt die Milchkühlung bei Melkvorgängen so zu verbessern, dass die Nachteile der dem Stand der Technik entsprechenden Verfahren nicht zum Tragen kommen.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, dass das Kühlmedium für den Wärmetauscher der Vorkühlung aus dem Wärmequellenkreis einer Wärmepumpe stammt. Durch diesen Kühlkreislauf existiert der Vorteil der Vorkühlung, ohne den Nachteil dass Fließwasser verbraucht wird und weiters wird durch die Wärmepumpe Nutzwärme erzeugt. Je nach Milchmenge und Dimensionierung der Wärmepumpe kann die Milch so bereits auf ca. 7 °C gekühlt werden. Die restliche Abkühlung der Milch auf die Soll-Tanktemperatur von 4 °C erfolgt durch die Kühlvorrichtung im Milchtank. Idealerweise besitzt der Milchtank einen Wärmetauscher, so dass derselbe Kühlkreislauf der Wärmepumpe auch für die Kühlung im Tank verwendet werden kann um weitere Nutzwärme während der Tank-Kühlung zu erzeugen. Dazu kann per Mischventil der Kühlkreislauf zwischen Vorkühler und Wärmetauscher im Tank umgeschaltet werden.

Da durch diese Art der Vorkühlung die Milch bereits sehr kühl ist, ergibt sich bei einem folgenden Melkvorgang eine wesentlich geringere Aufwärmung der bereits im Milchtank vorhandenen Milch auf nur ca. 5-6 °C (statt ca. 20 °C ohne Vorkühlung), wodurch die

Milchqualität besser ist und der Milchhygieneverordnung besser Genüge getan wird.

Bei größeren Milchmengen mag die beschriebene Lösung aufgrund einer sehr großen Wärmepumpe und Volumenströmen, sowie einem sehr großen Wärmetauscher für den Vorkühler nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar sein. Daher kann der Vorkühlkreislauf mit einem Kühlpuffer von der Wärmepumpe entkoppelt werden, so dass sich eine kleinere / günstigere Dimensionierung von Wärmepumpe und Vorkühler ergibt. Weiters vereinfacht sich die Regelung der Wärmepumpe, da im Grunde nur der Kühlpuffer auf die Ausgangstemperatur gekühlt werden braucht, ohne dass der Wärmequellenkreis der Wärmepumpe auf nahezu konstanter Vorlauftemperatur gehalten werden muss. Dazu wird der Kühlkreislauf des Vorkühlers nicht direkt über die Wärmepumpe geführt, sondern der Kühlkreis über den Kühlpuffer gelegt. Vor dem Melkvorgang wird der Kühlpuffer per Wärmepumpe z.B. auf 0 °C gekühlt, während des Melkvorgangs wird das Kühlmedium aus dem Kühlpuffer entnommen und über den Vorkühler geführt. Durch den Rücklauf vom Vorkühler erwärmt sich der Kühlpuffer während des Melkvorgangs z.B. auf 10 °C, abhängig von der Kühlleistung der Wärmepumpe die während des Melkvorgangs dem Kühlpuffer weiter Wärme entziehen kann. Da sich somit auch die Kühlleistung des Vorkühlers während des Melkvorgangs verringert, ergibt sich im Milchtank eine leicht höhere Temperatur der Milch am Ende des ersten Melkvorgangs von ca. 12 °C im Vergleich zur vorhin beschriebenen Lösung, die im Anschluss und durch Umschalten vom Mischventil durch den Wärmetauscher im Milchtank auf die gewünschten 4 °C gekühlt wird. Im weiteren Verlauf und als Vorbereitung für den nächsten Melkvorgang wird der Kühlpuffer wieder auf seine Ausgangstemperatur von z.B. 0 °C gekühlt. Bei weiteren Melkvorgängen erwärmt sich der Kühlpuffer wiederum auf die ca. 10 °C, aber die Milch im Tank erwärmt sich weit weniger durch Mischung mit der bereits gekühlten Milch auf nur rund 7 °C, welche dann wie vorhin beschrieben durch den Wärmetauscher im Tank leicht auf die 4 °C kühlen lässt.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich gelangt die Milch (1) mittels einer Pumpe (2) in den Milchtank (3). Dieser Milchtank ist mit einem Wärmetauscher (4) versehen um mittels einer üblichen Wärmepumpe (5) – bestehend aus einer Kühlmedium-/Wärmequellen-Pumpe (6), Verdampfer (7), Verdichter (9), Kondensator (10) und einer Drossel (8) – die Kühlung durchzuführen. Nutzwärme (11) in Form von Warmwasser steht letztlich zur Verfügung und kann beispielsweise in einem Pufferspeicher zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt werden. Bevor die Milch in den Milchtank (3) gelangt, ist ein Wärmetauscher (12) zur Vorkühlung angebracht, dessen Kühlkreislauf ebenfalls dem Wärmequellenkreis der Wärmepumpe entspricht. Per Mischventil (13) kann der Fluss des Kühlmediums zwischen den Wärmetauschern (4) und (12) umgeschaltet werden.

Abbildung 2 zeigt die Verwendung mit Kühlpuffer (15), der über den Wärmetauscher (16) mit dem Wärmequellenkreis der Wärmepumpe (5) – bestehend aus einer Kühlmedium-/Wärmequellen-Pumpe (6), Verdampfer (7), Verdichter (9), Kondensator (10) und einer Drossel (8) – verbunden ist. Der Kühlkreis des Vorkühlers (12) wird durch die Umwälzpumpe (14) erstellt, welche das Kühlmedium aus dem Kühlpuffer (15) entnimmt. Die Milch (1) wird mittels Pumpe (2) durch den Vorkühler (12) in den Milchtank (3) geleitet. Per Mischventil (13) kann der Wärmequellenkreis der Wärmepumpe (5) auf den Wärmetauscher (4) im Milchtank (3) geleitet werden. Nutzwärme (11) wird von der

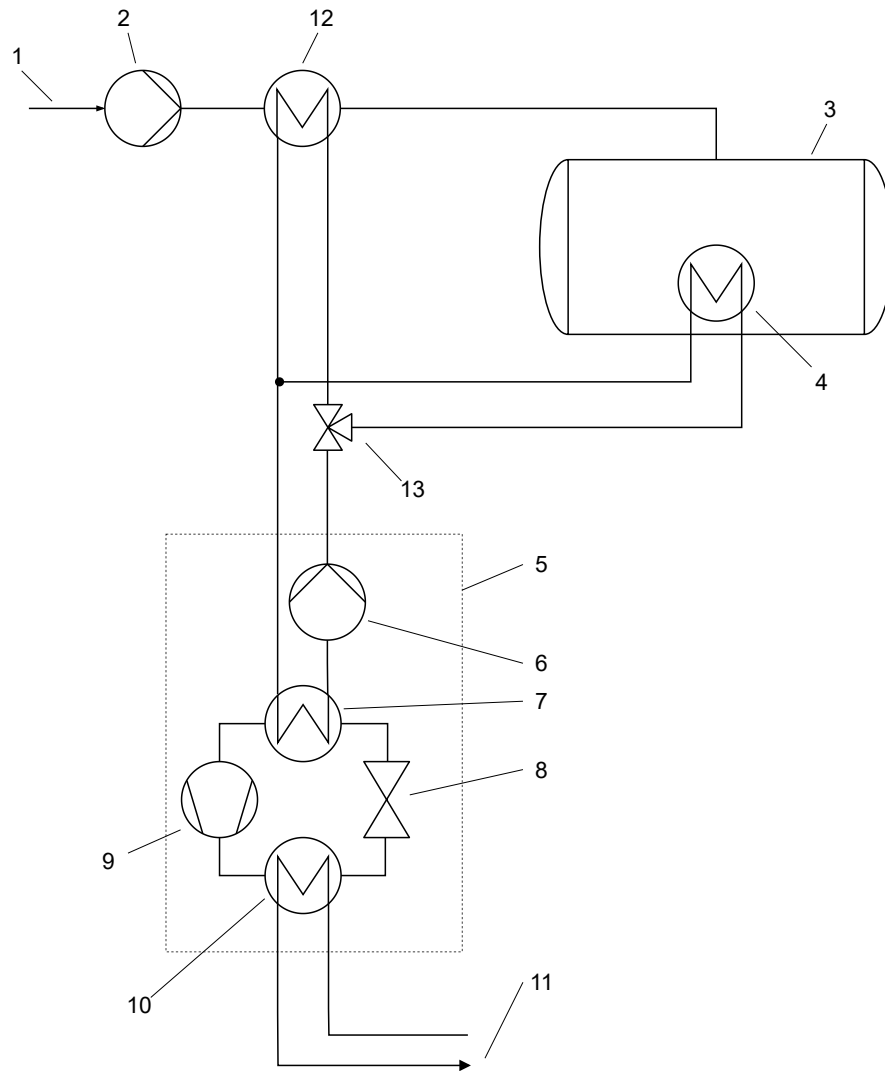


Abbildung 1: Schema der Milchkühlung ohne Kühlpuffer

Wärmepumpe durch die Kühlvorgänge abgegeben.

Aufgrund der Anforderungen (cf. Abschnitt 4.1) beim Pilot-Projekt Obermünzer in Waidring wird in weiterer Folge das Schema der Milchkühlung mit Kühlpuffer weiter verfolgt, da es ohne Kühlpuffer sowohl technisch als auch wirtschaftlich kaum sinnvoll umsetzbar sein würde.

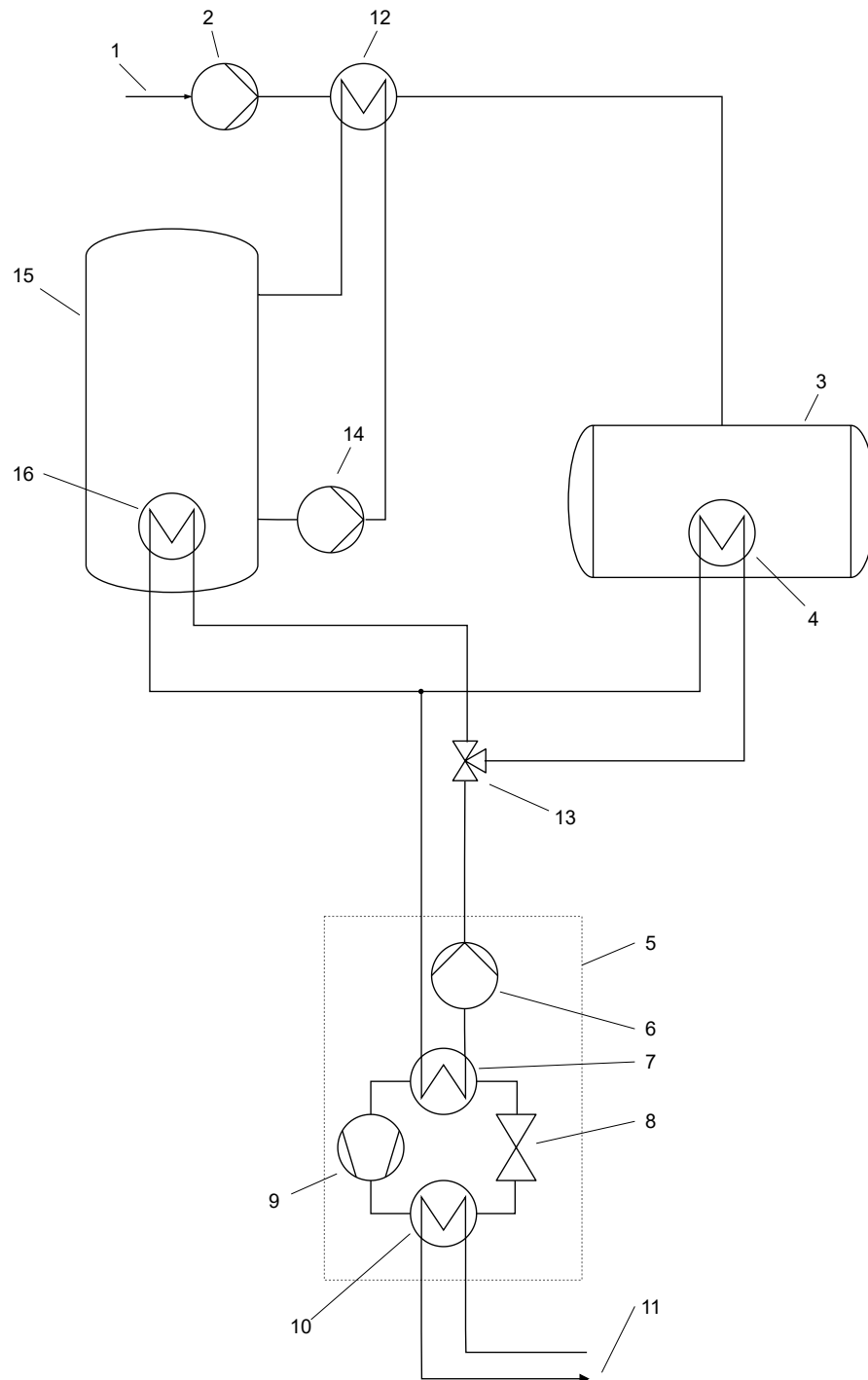


Abbildung 2: Schema der Milchkühlung mit Kühlpuffer

4 Thermodynamische Betrachtung

4.1 Grunddaten, Annahmen

Die Abholung der Milch erfolgt beim Obermünzer in Waidring alle zwei Tage, d.h. nach insgesamt vier Melkvorgängen¹. Zur Lagerung steht ein 13 m³ Milchtank zur Verfügung. Weitere angenommen Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Grunddaten zur thermodynamischen Betrachtung

Item	Wert	Einheit
Milch, Dichte ρ bei 20 °C	1.028	kg/m ³
Milch, Wärmekapazität ^a c_p	3,91	kJ/kg · K
Rohmilch, Temperatur T	38	°C
Soll-Temp Milchtank T	4	°C
Melkvorgang, Dauer ^b Δt	1,5	h
Strompreis ^c	0,404	€/kWh
Kältemittel, Dichte ρ	1.000	kg/m ³
Kühlpuffer, Temp-Ausgang T	0	°C
Kühlmittel, Wärmekapazität c_p	4,197	kJ/kg · K

^aWert temperaturabhängig, daher so angenommen und mit $\frac{\partial c_{p, \text{Milch}}}{\partial T} = 0$

^bAngabe lt. Josef Millinger

^cSchätzung lt. Anfrage TIWAG

Zur Auslegung / Dimensionierung der Wärmepumpe und des Wärmetauschers wurde anhand der nachfolgend vorgestellten Berechnungsschritte ein Simulationsprogramm erstellt, mit dem iterativ die passenden und bei Herstellern verfügbaren Komponenten ermittelt werden. Tabelle 2 fasst diese Daten zusammen.

Tabelle 2: Daten der iterativ ermittelten Komponenten

Item	Wert	Einheit
Wärmepumpe ^a , Kühlleistung $\dot{Q}$	30	kW
Wärmepumpe, Leistungszahl ϵ	4	-
Wärmepumpe, Volumenstrom Wärmequelle $\dot{V}$	10	m ³ /h
Kühlpuffer, Volumen V	4	m ³
Kühlkreis, Volumenstrom $\dot{V}$	4	m ³ /h
Wärmetauscher ^b , Fläche A	1,55	m ²
Wärmetauscher, Wärmedurchgangskoeffizient k	3.750	W/m ² · K

^az.B. IDM Terra SW 42 Twin

^bz.B. Swep B10Tx52

¹zwei Melkvorgänge pro Tag

4.2 Mischung der gekühlten Milch im Tank mit neu gemolkener Milch

Ist bei einem Melkvorgang bereits gekühlte Milch m_T mit Temperatur T_T aus einem vorhergehenden Melkvorgang im Milchtank, so mischt sich die gekühlte Milch im Tank mit der neu hinzugekommen körperwarmen Milch m_M mit T_M und es stellt sich eine Mischungstemperatur T_m ein.

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= Q_{zu} \\ m_M \cdot c_p \cdot (T_M - T_m) &= m_T \cdot c_p \cdot (T_m - T_T) \\ T_m &= \frac{m_M \cdot c_p \cdot T_M + m_T \cdot c_p \cdot T_T}{m_M \cdot c_p + m_T \cdot c_p} \end{aligned}$$

Hier kann angenommen werden, dass die spezifische Wärmekapazität c_p konstant ist (cf. Tabelle 1), daher kann für die Mischungstemperatur T_m verallgemeinert werden

$$T_m = \frac{\sum_i m_i \cdot T_i}{\sum_i m_i} \quad (1)$$

4.3 Milchtankkühlung ohne Vorkühlung

Betrachten wir eine konventionelle Milchkühlung, also ein Verfahren ohne Vorkühlung, so ergeben sich bei vier Melkvorgängen gem. Glg. 1 Temperaturen lt. Tabelle 3 nach Abschluss des Melkvorgangs im Milchtank. Ein Kühlaggregat, etc. muss im Anschluss

Tabelle 3: Temperatur im Milchtank ohne Vorkühlung durch Mischung

Melkvorgang	Milchmenge l	Milchmasse kg	Temperatur °C
1	3.250	3.341	38
2	6.500	6.682	21
3	9.750	10.023	15
4	13.000	13.364	13

den Milchtank nach jedem Melkvorgang auf die Soll-Temperatur von 4 °C kühlen. Falls angenommen werden kann, dass zu Beginn des Melkvorgangs der Milchtank auf Soll-Temperatur gekühlt wurde, so braucht nur die neu gemolkene Milch gekühlt werden – zumindest rein rechnerisch, da die Mischung in diesem Fall auch rechnerisch einfach eliminiert werden kann².

$$Q_{\text{Kühl}} = m_{\text{Melkvorgang}} \cdot c_{p,\text{Milch}} \cdot (T_{\text{Milch}} - T_{\text{Soll}}) \quad (2)$$

Hier würde das bedeuten, dass pro Melkvorgang 123 kWh Wärme entzogen werden müssten, die ungenützt blieben und einfach an die Umwelt abgegeben würden. In der Regel

²in der Realität ergibt sich eine Mischungstemperatur (siehe vorigen Abschnitt) und dabei muss eine größere Milchmenge um ein geringeres ΔT gekühlt werden – es ergibt sich jedoch dieselbe Energie

werden die Kühlaggregate mit Strom betrieben, so dass in Bezug auf CO₂-Bilanz ebenfalls keine positiven Aspekte getätigt werden können.

Eine rechnerische Aufarbeitung von genauer Energie- und CO₂-Bilanz der Kühlaggregate wurde hier nicht durchgeführt, da es sehr viele verschiedene Hersteller und Modelle gibt, so dass sich keinerlei objektiv neutrale Aussagen tätigen lassen.

4.4 Melkvorgänge mit Vorkühlung

Zur rechnerischen Analyse eines Melkvorgangs mit Vorkühlung entsprechend Abbildung 2 muss der Melkvorgang in Zeit-Intervallen dt betrachtet werden, da es ein instationärer Vorgang ist. Zu jedem Zeit-Intervall gelangt frisch gemolkene Milch $dm_0 \mid \dot{m}_0 = 0$ mit der Temperatur $T_0 \mid \dot{T}_0 = 0$ zum Wärmetauscher, welcher diese Milch auf $T_1(t)$ durch die Kühlleistung $P_{WT}(t)$ abkühlt. Diese Abkühlung lässt sich durch Glg. 3 beschreiben.

$$T_1(t) = T_0 - \frac{P_{WT}(t) dt}{dm_0 \cdot c_{p,Milch}} \quad (3)$$

Danach wird diese vorgekühlte Milch dem Milchtank zugeführt, in dem sich bereits Milch $m_T(t)$ von vorherigen Melkvorgängen mit einer Temperatur von $T_T(t)$ befindet, so dass sich eine Mischtemperatur gem. Glg. 1 zu

$$T_{MT}(t + dt) = \frac{\int_t m_{MT}(t) \cdot T_{MT}(t) dt + dm_0 \cdot T_1(t)}{\int_t m_{MT}(t) dt + dm_0} \quad (4)$$

einstellt.

Die durch den Wärmetauscher entzogene Wärme $dQ_{WT} = P_{WT}(t) dt$ zur Kühlung der Milch wird dem Kühlpuffer zugeführt, so dass sich dieser erwärmt. Um dessen Erwärmung und somit negative Beeinflussung der Kühlung via Wärmetauscher zu minimieren ist es vorteilhaft, dass die Wärmepumpe während des Melkvorgangs den Kühlpuffer konstant Wärme entzieht, so dass der Kühlpuffer letztlich nur mit

$$dQ_{KP, zu} = dQ_{WT} - P_{WP, kühl} dt \quad (5)$$

erwärmt wird. Die Temperatur im Kühlpuffer ergibt sich somit zu

$$T_{KP}(t + dt) = T_{KP}(t) + \frac{dQ_{KP, zu}}{m_{KP} \cdot c_{p, KP}} \quad (6)$$

Die Temperatur des Kühlpuffers ist ident der Vorlauftemperatur des Wärmetauschers ($T_{KP}(t) \equiv T_{WT, V}(t)$), so dass sich die Rücklauftemperatur zu

$$T_{WT, R}(t) = T_{WT, V}(t) + \frac{P_{WT}(t) dt}{\dot{m}_{KK} dt \cdot c_{p, KK}} \quad (7)$$

errechnet.

Ausgehend von der Grundgleichung für Wärmetauscher [5] mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten k , der Wärmetauscherfläche A und der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta t_{m,\log}$

$$P_{WT} = k \cdot A \cdot \Delta t_{m,\log} \quad | \quad \Delta t_{m,\log} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$$

ergibt sich für unseren Anwendungsfall:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\max}(t) &= T_0 - T_{WT,R}(t) \\ \Delta t_{\min}(t) &= T_1(t) - T_{WT,V}(t) \\ \Delta t_{m,\log}(t) &= \frac{\Delta t_{\max}(t) - \Delta t_{\min}(t)}{\ln \frac{\Delta t_{\max}(t)}{\Delta t_{\min}(t)}} \\ P_{WT}(t) &= k \cdot A \cdot \Delta t_{m,\log}(t) \end{aligned} \tag{8}$$

Diese gekoppelten Differentialgleichungen wurden numerisch gelöst³, dabei die Werte aus Abschnitt 4.1 verwendet. Die nachfolgend beschriebenen Abbildungen geben die Rechenergebnisse wieder.

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Milchttemperaturen während der Melkvorgänge. Die Austrittstemperatur aus dem Wärmetauscher (Rücklauf) ist bei allen Melkvorgängen gleich, da invariant von der bereits im Tank befindlichen Milchmenge. Zu sehen ist auch dass sich die Milch im Tank bei späteren Melkvorgängen nur mehr gering erwärmt, beim vierten Melkvorgang bleibt die Temperatur sogar unter der seitens Milchhygieneverordnung [1, Kapitel III, Abs. 2] vorgeschriebenen Temperatur.

Abbildung 4 betrachtet den Wärmetauscher mit Vor- und Rücklauftemperatur, sowie der Leistung während der Dauer des Melkvorgangs. Ausgehend von einer Temperatur des Kühlpuffers und somit auch Vorlauftemperatur von 0 °C erwärmt sich der Kühlpuffer während des Melkvorgangs auf rund 11 °C, so dass die Kühlleistung des Wärmetauschers abnimmt. Dennoch stellt die gewählte Kombination aus Wärmepumpe, Puffergröße, etc. einen sinnvollen und v.a. wirtschaftlich umsetzbaren Kompromiss dar. Abbildung 5 stellt die Erwärmung des Kühlpuffers dar.

4.5 Energiebilanz der Kühlvorgänge

Die gesamte Kühlwärme $Q_{\text{Kühl}}$ für einen Melkvorgang $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ mit der jeweiligen Dauer t_M ergibt sich aus der Summe der Kühlwärme der Wärmepumpe während des Melkvorgangs $Q_{WP}(i)$, der anschließenden Kühlung des Milchtanks auf $T_{\text{Soll,Milch}}$ von 4 °C $Q_{MT}(i)$, sowie der abschließenden Kühlung des Kühlpuffers auf dessen Ausgangstemperatur $T_{KP}(0)$ von 0 °C $Q_{KP}(i)$.

$$\begin{aligned} Q_{WP}(i) &= P_{WP,\text{kühl}} \cdot t_M \\ Q_{MT}(i) &= m_{MT}(i) \cdot c_{p,\text{Milch}} \cdot (T_{MT}(i) - T_{\text{Soll,Milch}}) \\ Q_{KP}(i) &= m_{KP} \cdot c_{p,KP} \cdot (T_{KP}(t_M) - T_{KP}(0)) \end{aligned} \tag{9}$$

³eigens dafür entwickeltes Programm basierend auf Integration durch Newton-Cotes-Formeln

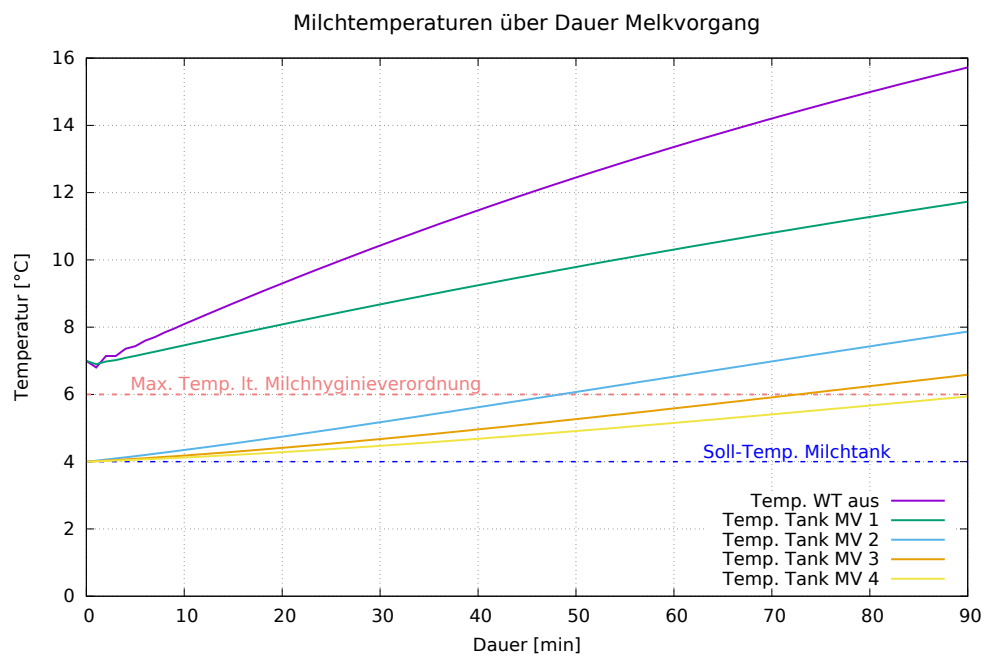


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Milchtemperaturen über Dauer Melkvorgang

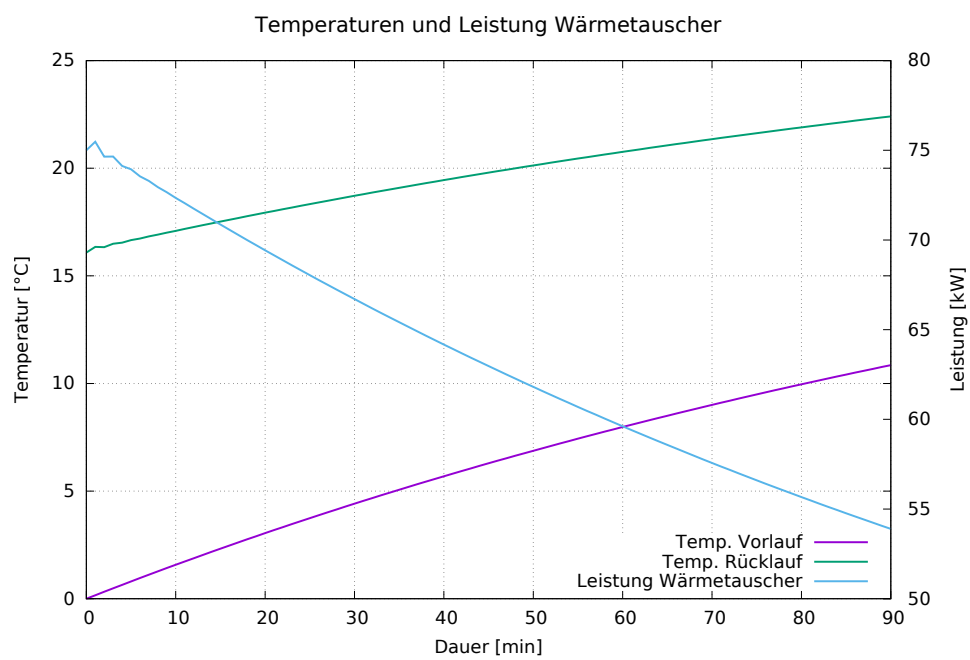


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und Leistung des Wärmetauschers

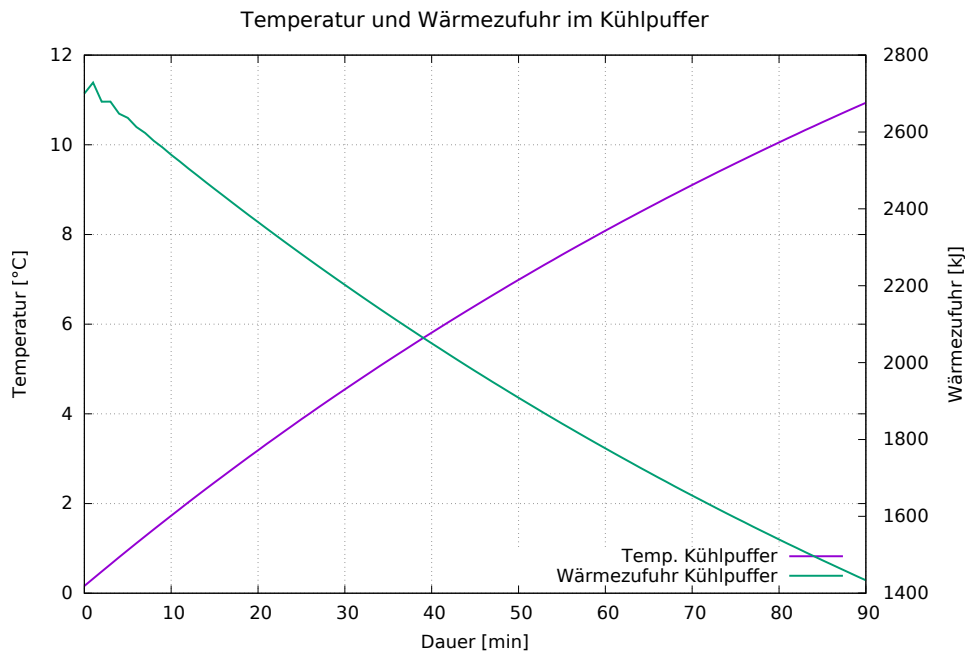


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Thermodynamik im Kühlpuffer

. Für vier Melkvorgänge ist die gesamte Kühlenergie somit

$$Q_{\text{Kühl}} = \sum_{i=1}^4 Q_{\text{WP}}(i) + Q_{\text{MT}}(i) + Q_{\text{KP}}(i) \quad (10)$$

. Bei jedem Kühlvorgang wird durch die Wärmepumpe nutzbare Wärme erzeugt. Mit den Grunddaten aus Abschnitt 4.1 ergeben sich für Q_{WP} die in Tabelle 4, für Q_{MT} die in Tabelle 5 und für Q_{KP} die in Tabelle 6 errechneten Werte.

Tabelle 4: Energiebilanz Kühlvorgänge Wärmepumpe

Melkvorgang	$Q_{\text{kühl}}$ kWh	el. Energie kWh	Q_{ab} kWh
1	45	15	60
2	45	15	60
3	45	15	60
4	45	15	60
Gesamt	180	60	240

Für vier Melkvorgänge werden somit insgesamt 495,97 kWh Energie der Milch zur Kühlung entzogen, dabei werden 165,32 kWh elektrische Energie aufgewandt und 661,30 kWh Nutzwärme erzeugt.

Tabelle 5: Energiebilanz Kühlvorgänge Milchtank

Melkvorgang	$T_{MT}(t_M)$ °C	ΔT K	$Q_{\text{kühl}}$ kWh	Dauer Kühlung min	el. Energie kWh	Q_{ab} kWh
1	11,73	7,73	28,05	56,10	9,35	37,40
2	7,87	3,87	28,08	56,17	9,36	37,45
3	6,58	2,58	28,14	56,27	9,38	37,51
4	5,94	1,94	28,16	56,32	9,39	37,55
Gesamt			112,43		37,48	149,91

Tabelle 6: Energiebilanz Kühlvorgänge Kühlpuffer

Melkvorgang	$T_{KP}(t_M)$ °C	ΔT K	$Q_{\text{kühl}}$ kWh	Dauer Kühlung min	el. Energie kWh	Q_{ab} kWh
1	10,94	10,94	50,89	102	16,96	67,85
2	10,94	10,94	50,89	102	16,96	67,85
3	10,94	10,94	50,89	102	16,96	67,85
4	10,94	10,94	50,89	102	16,96	67,85
Gesamt			203,54		67,85	271,39

4.6 Kontrollrechnung

Die gesamte Kühlenergie kann in Anlehnung an Glg. 2 mit

$$Q_{\text{Kühl}} = m_{\text{ges}} \cdot c_{p,\text{Milch}} \cdot (T_0 - T_{\text{Soll,Milch}})$$

berechnet werden. Aus der Definition der Leistungszahl ϵ der Wärmepumpe

$$\epsilon = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{E_{\text{WP}}} = \frac{Q_{\text{Kühl}} + E_{\text{WP}}}{E_{\text{WP}}} = 1 + \frac{Q_{\text{Kühl}}}{E_{\text{WP}}} \quad (11)$$

lässt sich die benötigte elektrische Energie und die erzeugte Nutzwärme berechnen:

$$E_{\text{WP}} = \frac{Q_{\text{Kühl}}}{\epsilon - 1} \quad (12)$$

$$Q_{\text{Nutz}} = E_{\text{WP}} \cdot \epsilon = E_{\text{WP}} + Q_{\text{Kühl}}$$

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Kontrollrechnung und stellt diese der Simulation gegenüber. Der Fehler von 0.5 % ist vernachlässigbar und zeigt dass die Annahmen sowie Güte der numerischen Integration ausreichend ist.

5 Betriebskosten / Stromkosten

Tabelle 8 zeigt die Stromkosten für die einzelnen Kühlsschritte bzw. pro Melkvorgang unter der Annahme dass der Strom mit den in Tabelle 1 angenommenen Strompreis

Tabelle 7: Kontrollrechnung

Item	Simulation kWh	Kontrolle kWh	Fehler kWh	Fehler %
$Q_{\text{Kühl}}$	495,97	493,50	-2,47	-0,50
E_{WP}	165,32	164,50	-0,82	-0,50
Q_{Nutz}	661,30	658,00	-3,29	-0,50

zugekauft werden muss. Je vier Melkvorgänge werden 165,32 kWh elektrischer Energie benötigt, so dass sich die jährlichen Betriebskosten auf 12.202,14 € belaufen.

Tabelle 8: Stromkosten

Vorgang	el. Energie kWh	Kosten €
Wärmepumpe während Melkvorgang 1	15,00	6,07
Kühlung Milchtank nach Melkvorgang 1	9,35	3,78
Kühlung Kühlpuffer Vorbereitung Melkvorgang 1	16,96	6,86
Wärmepumpe während Melkvorgang 2	15,00	6,07
Kühlung Milchtank nach Melkvorgang 2	9,36	3,79
Kühlung Kühlpuffer Vorbereitung Melkvorgang 2	16,96	6,86
Wärmepumpe während Melkvorgang 3	15,00	6,07
Kühlung Milchtank nach Melkvorgang 3	9,38	3,79
Kühlung Kühlpuffer Vorbereitung Melkvorgang 3	16,96	6,86
Wärmepumpe während Melkvorgang 4	15,00	6,07
Kühlung Milchtank nach Melkvorgang 4	9,39	3,80
Kühlung Kühlpuffer Vorbereitung Melkvorgang 4	16,96	6,86
Gesamt ^a	165,32	66,86
pro Jahr	30.171,72	12.202,14

^afür einen Zyklus, i.e. vier Melkvorgänge bis der Milchtank wieder geleert wird

In dieser Betrachtung hier ist nicht berücksichtigt, dass die benötigte elektrische Energie z.B. durch PV-Module zumindest teilweise selbst produziert werden kann und somit die Stromkosten dadurch gesenkt werden können.

6 CO₂-Bilanz

Gemäß den Tabellen des Umweltbundesamtes [6] gelten für verschiedene Energieträger die in Tabelle 9 zusammengefassten CO₂-Äquivalente (CO₂e) inkl. der Vorkette.

Bei vier Melkvorgängen ist eine Nutzwärme von 661,30 kWh (cf. Abschnitt 4.5) verfügbar, jährlich ergibt sich eine Nutzwärme von 120,69 MWh bzw. täglich von 330,65 kWh.

Tabelle 9: CO₂-Äquivalente inkl. Vorkette gem. Umweltbundesamt

Energieträger	Einheit	CO ₂ -Äquivalent in kg
Strom	kWh	0,26
Heizöl	l	3,37
Erdgas	m ³	2,74
Holzpellets	kg	0,19
Holz	kg	0,09
Hackschnitzel ^a	kg	0,16

^agemittelt aus Holz und -pellets

Tabelle 10: Vergleich verschiedener Energieträger

Energieträger	Heizwert MJ/kg	tägl. Menge kg	Menge p.a. kg	CO ₂ e p.a. kg
Heizöl	41	29,09	10.596	44.626
Erdgas	37	32,17	11.743	37.412
Strom ^a	3,6	330,65	120.687	31.137
Hackschnitzel	14,4	82,66	30.172	4.707

^ahier sind angeführten Einheiten nur bedingt anwendbar

Tabelle 10 zeigt die CO₂-Bilanz anderer Energieträger zur Erzeugung der gleichen Menge an Nutzwärme. Zu beachten ist hier jedoch, dass für die konventionelle Milchkühlung bzw. deren Kühlaggregate ebenfalls Energie benötigt wird und somit der CO₂-Ausstoss größer als angegeben ist – siehe dazu den Hinweis bei Abschnitt 4.3.

Der für die Wärmepumpe benötigte elektrische Strom erzeugt dabei 7.784,30 kg CO₂e pro Jahr, falls dieser nicht durch ökologische Alternativen (z.B. PV-Module) selbst erzeugt wird.

7 Potentialabschätzung für Österreich

Gemäß [7] wurden 2021 in Österreich 3.830.100 Tonnen Milch von rund 528.400 Milchkühen produziert, was einer durchschnittlichen Jahresmilchleistung von ca. 7.250 kg je Tier entspricht.

In Anlehnung an Abschnitt 4.6 ergeben sich für die 3,83 Mio. Tonnen Milch eine Milchwärme von 141,44 GWh, 47,15 GWh benötigte elektrische Energie und somit eine Nutzwärme von 188,58 GWh.

Mit der Annahme eines durchschnittlichen Jahreswärmebedarfs eines Haushalts von 14.150 kWh [8] könnten mit der verfügbaren Nutzwärme (sehr) naiv gerechnet rund 13.000 Haushalte mit Wärme versorgt werden.

Analog zu Abschnitt 6 gibt Tabelle 11 die CO₂-Bilanz anderer Energieträger zur Erzeugung der gleichen Menge Nutzwärme pro Jahr wieder. Würde die benötigte elektrische Energie konventionell produziert werden, also ohne z.B. PV-Module, so würden dafür 12.163,59 t CO₂e p.a. entstehen.

Tabelle 11: Vergleich verschiedener Energieträger / österreichweit

Energieträger	Heizwert MJ/kg	Menge p.a. t	CO ₂ e p.a. t
Heizöl	41	16.558,49	69.731,93
Erdgas	37	18.348,59	58.459,48
Strom ^a	3,6	188.582,78	48.654,36
Hackschnitzel	14,4	47.145,69	7.354,73

^ahier sind angeführten Einheiten nur bedingt anwendbar

Weiters werden in Österreich gem. [7] rund 10.800 Tonnen Schafmilch und 26.500 Tonnen Ziegenmilch produziert. Diese 37.300 Tonnen Milch wurden in der Potentialabschätzung hier außer Acht gelassen.

Literatur

- [1] *Verordnung des Bundesministers für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz über Hygienevorschriften für die Herstellung und Vermarktung von Rohmilch, wärmebehandelter Milch und Erzeugnissen auf Milchbasis (Milchhygieneverordnung)*. online. Aug. 2021. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010738&FassungVom=2000-12-31>.
- [2] Eberhard Eissmann, Wolfgang Schreiber und Andreas Lange. “Vorrichtung zur Abwärmenutzung bei der Milchkühlung”. DD 141 707. 14. Mai 1980.
- [3] Arwego e.K. D-88145 Hergatz. *Milchkühlung mit einer Wärmepumpe*. Aug. 2021. URL: <https://www.arwego.de/produkte/milchkuehlung.php>.
- [4] Günther Foidl. “Milchkühlung für Melkvorgänge mit Vorkühlung und Wärmenutzung”. AT 17611 (U1). 24. Juni 2021.
- [5] Karl-Heinrich Grote und Jörg Feldhusen, Hrsg. *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-38890-3. DOI: [10.1007/978-3-642-38891-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0).
- [6] Umweltbundesamt. *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. Aug. 2021. URL: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>.
- [7] STATISTIK AUSTRIA. *Milcherzeugung und -verwendung Kalenderjahr 2021*. Techn. Ber. Direktion Raumwirtschaft, 2022.
- [8] STATISTIK AUSTRIA. *Dimensionen der Energiearmut in Österreich*. Wien: STATISTIK AUSTRIA, 2022, S. 48. ISBN: 978-3-9033-93-28-8.