

Erzielte Energieeinsparungen durch Wärmerückgewinnung bei der Milchkühlung auf Schweizer Milchviehbetrieben

Markus Sax, Annett Latsch, Thomas Anken

Auf konventionellen Milchviehbetrieben wird rund 50 % des elektrischen Energiebedarfs für das Kühlen der Milch und Bereitstellen des Reinigungswassers (RWA) eingesetzt. Bei den in der Praxis häufig eingesetzten Zirkulationsreinigungsanlagen muss das RWA auf ca. 80 °C erwärmt werden, wozu gut 20 % des elektrischen Energiebedarfs des Betriebs benötigt werden. Im Gegensatz dazu wird die Wärme der Kälteaggregate zur Milchkühlung ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Diese Studie bezieht sich auf Zirkulationsreinigungsanlagen, da Kochendwasser-Reinigungsanlagen in der Schweiz selten eingebaut sind. Mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) bei den Kälteaggregaten lassen sich das RWA auf ca. 50–55 °C vorerwärmen und die Kühlzeit der Milch verkürzen. Dies ist besonders bei hohen Umgebungstemperaturen im Sommer sehr nützlich, um die vorgeschriebenen Kühlzeiten für den Qualitätserhalt der Milch einzuhalten. Die vorliegenden Untersuchungen auf 9 Praxisbetrieben haben gezeigt, dass mit einer WRG bei der Milchkühlung ca. 47 % der elektrischen Energie im Vergleich zur Bereitstellung des RWA mit einem konventionellen Elektroboiler eingespart werden können. Dank der WRG kann auch die Kühlzeit der Milch verkürzt und der elektrische Energiebedarf beim Kälteaggregat um rund 14 % reduziert werden. Wichtig dabei ist jedoch, dass die Anlagen sachgerecht installiert und regelmäßig gewartet sind.

Schlüsselwörter

Energieeffizienz, Wärmerückgewinnung, Milchkühlung, Kälteaggregat, Wassererwärmer

Das Kühlen der Milch sowie das Reinigen der Melk- und Milchtankinstallation haben einen hohen Einfluss auf die Milchqualität und müssen daher gesetzliche Vorgaben erfüllen. Die frisch gemolkene Milch gelangt mit einer durchschnittlichen Temperatur von ca. 34 °C in den Milchtank und ist nach der Gewinnung auf ca. 4 °C abzukühlen, damit sich die Bakterien und Keime in der Milch nur eingeschränkt vermehren können (SAPALI et al. 2014, MURPHY et al. 2013). In der Schweiz muss die Milch gemäß eidgenössischer Verordnung über die Hygiene der Milchgewinnung bei täglicher Hofabfuhr innerhalb von 2 Stunden auf mindestens 8 °C und bei zweitägiger Milchablieferung weiter auf mindestens 6 °C abgekühlt und gelagert werden (SCHWEIZERISCHER LANDMASCHINEN-VERBAND 2019, VERORDNUNG (EG) NR. 853/2004, VHYMP 2005). Die Milchkühlung erfolgt in der Regel mit einem Kälteaggregat, welches mittels geschlossenem Kältemittelkreislauf die Wärme aus dem Milchtank an die Umgebungsluft abgibt. Dazu fließt ein Kältemittel durch Leitungen im Bodenbereich des Milchtanks, verdampft und entzieht dadurch der Milch Wärme. Nach dem Milchtank strömt das Kältemittel im gasförmigen Aggregatzustand zum Verdichter. Dort wird es komprimiert und auf eine höhere Temperatur angehoben, um danach die Wärme im Kondensator an die Umgebungsluft abgeben zu können.

Speziell an heißen Sommertagen mit hohen Außentemperaturen ist ein hoher Energiebedarf notwendig, um die Wärme über den Kondensator an die Umgebung abzuführen. Dadurch steigt die Gefahr, dass die vorgegebenen Richtzeiten für die Milchkühlung nicht immer eingehalten werden, was zu Qualitätseinbußen bei der Milch und Qualitätsabzügen durch den Milchabnehmer führen kann.

Für den Kühlprozess der Milch sowie auch für die Bereitstellung des Reinigungswassers (RWA) wird meist elektrische Energie eingesetzt. Aus hygienischen Gründen sind alle Oberflächen von Materialien, die mit Milch in Berührung kommen, wie Melkaggregate, Milchleitungen, Milchtank usw., nach jeder Benutzung gründlich mit Heißwasser zu reinigen. Denn das Wachstum unerwünschter Mikroorganismen kann durch Milchrückstände begünstigt werden (SAPALI et al. 2014, MURPHY und BOOR 2019, PALUDETTI et al. 2018). Die Waschvorgänge bei Melkeinrichtungen von Melkständen sind meist in 3 Phasen, Vor-, Haupt- und Nachspülen unterteilt. Um den gewünschten Reinigungseffekt zu erzielen, muss das RWA während des Hauptspülens im Rücklauf einmalig eine Temperatur von 60 °C überschreiten und am Ende dieses Spülvorgangs noch eine minimale Temperatur von 50 °C aufweisen (SCHWEIZERISCHER LANDMASCHINEN-VERBAND 2019). Die meisten Käsereien fordern eine Temperatur von 55 °C beim Rücklauf. Ist die Milch für die Herstellung von Rohmilchkäse bestimmt, muss das RWA im Rücklauf während mindestens 3 Minuten eine Minimaltemperatur von 60 °C aufweisen (SCHWEIZERISCHER LANDMASCHINEN-VERBAND 2019). Damit diese Endtemperatur nach dem Hauptspülgang erreicht werden kann, ist das RWA bei den meisten Installationen auf über 80 °C zu erwärmen. Üblicherweise wird das RWA mit einem Elektroboiler bereitgestellt. Dies war bei allen untersuchten Betrieben der Fall und vereinfachte die Vergleichbarkeit des Energiebedarfs für die RWA-Bereitstellung zwischen den einzelnen Betrieben. Aufgrund des Temperaturunterschieds zwischen Boiler sowie Wasserleitungen und der Umgebungsluft findet stets auch eine Abkühlung des RWA statt. Da die Installationen vor und nach dem Einbau der WRG identisch blieben und nur der Einbau eines zusätzlichen Warmwasserspeichers vor den Boiler erfolgte, wurden diese Wärmeverluste in der Studie nicht berücksichtigt. Abbildung 1 zeigt ein Schema des Milchkühl- und Warmwasserbereitungsequipments.

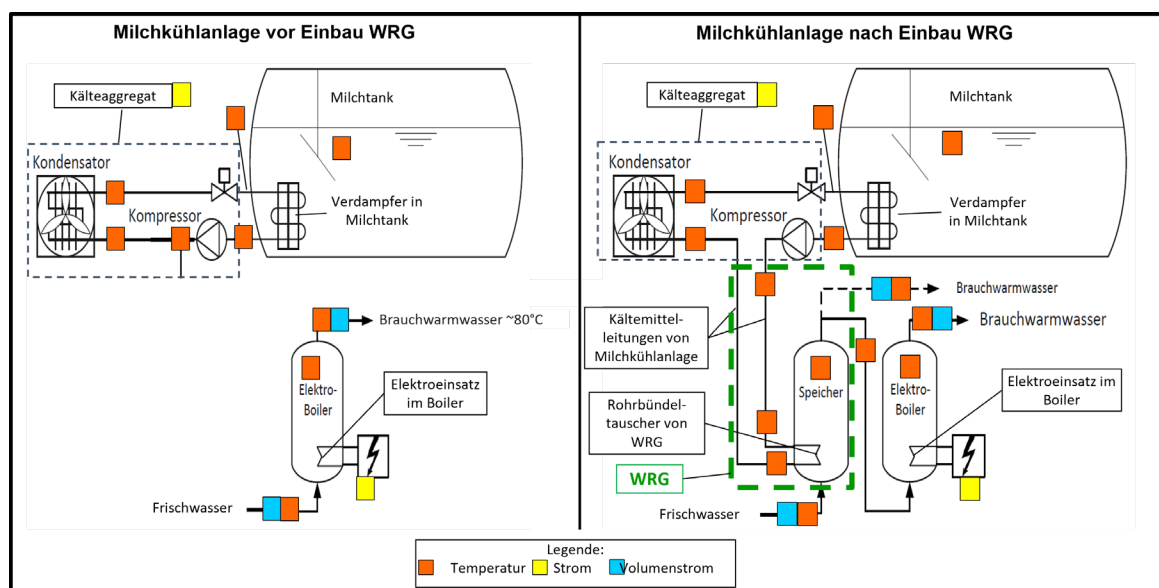


Abbildung 1: Milchkühlanlage vor (L) und nach (R) dem Einbau einer WRG (WRG besteht aus Speicher vor dem Boiler inkl. dem Rohrbündeltauscher von den Kältemittelleitungen der Milchkühlanlage); die Messpunkte für Temperatur, elektrischen Strom und Wasser-Volumenstrom sind farblich markiert

Die beiden Prozesse, Milchkühlung und Wassererwärmung, benötigen zwischen 44 und 54 % des elektrischen Energiebedarfs eines Milchwirtschaftsbetriebes, wobei auf die Milchkühlung oft der größere Anteil von ca. 25 bis 30 % entfällt (CORSCADDEN et al. 2014, RAJANIEMI et al. 2017, UPTON et al. 2013).

Laut Literatur liegt der Bedarf für das Kühlen der Milch und das Bereitstellen des RWA bei ca. 25 bis ca. 50 Wh pro Kilogramm Milch (RAJANIEMI et al. 2017, TODDE et al. 2018, GIE ÉLEVAGE BRETAGNE 2018). Die großen Unterschiede beim Energiebedarf resultieren – neben den Einstellungen der Anlagen und den RWA-Mengen – auch aus den heterogenen baulichen Voraussetzungen wie z. B. verschiedene Wärmedämmungen, Rohrlängen, Dimensionierungen. Ein weiterer Grund kann beim Intervall der Milchabholung vom Hof liegen, da bei zweitägiger Hofabfuhr ein Waschgang gegenüber einer täglichen Milchablieferung eingespart wird (EDENS et al. 2003). Für den RWA-Bedarf kalkulierten SHINE et al. (2018) ca. $0,15 \text{ l/kg}_{\text{Milch}}$; KRAUSS et al. (2016) sowie EIDE (2002) gaben dazu 0,34 bzw. $0,30 \text{ l/kg}_{\text{Milch}}$ an. Die teils großen Unterschiede beim RWA-Bedarf liegen oft bei den Einstellungen der Melk- und Milchtankanlagen, was bei den meist jährlichen Wartungsarbeiten durch den jeweiligen Fachmann fix eingestellt wird. Der geringere Wasserbedarf in SHINE et al. (2018) lässt sich zudem auf ein unregelmäßiges sowie größeres Reinigungsintervall mit Heißwasser bei den Melkanlagen zurückführen.

Der Wirkungsgrad des Elektroboilers, den UPTON (2010) mit 0,79, SANFORD (2003) für Standardboiler mit 0,7–0,85 und CORSCADDEN (2014) mit 0,7–0,98 angegeben haben, hat ebenfalls einen Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf. Die Wirkungsgrade drücken das Verhältnis der investierten elektrischen Energie zur erzeugten Wärmeenergie aus, wobei auch die Abstrahlungsverluste berücksichtigt werden. Weiter können Kalkablagerungen auf den Elektroheizstäben bei einer Kalkschicht von 1 mm den elektrischen Energiebedarf des Boilers um ca. 10 % erhöhen (EIDE 2002, SHINE et al. 2017). Zudem wirkt sich auch die große Variabilität der Temperaturen des RWA auf den Strombedarf aus (MURGIA et al. 2013, DAIRY FARMERS OF CANADA 2010, CUTHBERTSON 2006), die in dieser Studie zwischen 55 und 85 °C lagen.

Der elektrische Energiebedarf für die Warmwasserbereitung kann mit einer WRG, die das kalte Wasser mit der Wärme aus der zu kühlenden Milch vorerwärmt, zwischen 20 und 60 % reduziert werden (PARMAR et al. 2020). Bei Anlagen mit WRG sind meist zwei Warmwasserspeicher hintereinander in Serie eingebaut. Im ersten Speicher befindet sich ein Rohrbündel-Wärmetauscher, durch welchen das Kältemittel vom Kälteaggregat strömt und das kalte Wasser auf rund 50–55 °C erwärmt (CORSCADDEN et al. 2014, RAJANIEMI et al. 2017). Im zweiten Wasserspeicher (Elektroboiler) wird das vorerwärmte Wasser mit einem Elektroheizstab final auf ca. 80 °C erwärmt. Da das heiße Wasser meist nur für die Reinigung der Melk- und Milchtankanlage benötigt wird, kann dieser Speicher kleiner ausgelegt werden, was Abstrahlungsverluste und Verkalkung reduziert. Trotz der großen Stromeinsparung bei der RWA-Bereitstellung haben Anfragen bei verschiedenen Installationsunternehmen ergeben, dass heutzutage wegen der erhöhten Kosten in der Schweiz nur ungefähr bei einem Viertel bis zu einem Drittel der Neuanlagen eine Wärmerückgewinnung eingebaut werde. Die Befragten schätzen den Anteil der WRG-Anlagen auf insgesamt weniger als ein Drittel an den Milchkühlanlagen der gut 17.000 Milchproduktionsbetriebe.

Bei einer Wärmerückgewinnung erfolgt die Wärmeabgabe des Kälteaggregates zu einem Großteil ans Wasser im ersten Speicher. Der Wirkungsgrad des Kälteaggregats wird mit der dimensionslosen Kennzahl (kWh/kWh) oder auch als COP (Coefficient of Performance) ausgedrückt. Die Kennzahl beschreibt das Verhältnis zwischen der gewonnenen Wärme (kWh) aus der zu kühlenden Milch und der dafür benötigten elektrischen Energie (kWh) für das Kälteaggregat. Der COP der Milchkühlung

ist stark abhängig von der Temperatur des kalten Wassers und der Umgebungsluft sowie der Auslegung der Anlage und liegt im Bereich von 1,60 bis 2,91 (MURPHY et al. 2013, RAJANIEMI et al. 2017, VAN DER BRUGGEN et al. 2019, GODSKESEN et al. 2012). In der Praxis sind sehr große Unterschiede beim COP feststellbar. Landwirtschaftsbetriebe erreichen bei ihren Kälteanlagen wegen suboptimaler Auslegung und teils mangelhafter Wartung oft einen sehr tiefen COP.

Ziel dieser Studie war es, bei Praxisbetrieben das Einsparpotenzial der elektrischen Energie bei der Bereitstellung des RWA und der Milchkühlung zu bestimmen, um deren Effizienz unter Praxisbedingungen besser zu analysieren. Dazu wurde der elektrische Energiebedarf von 9 bestehenden Milchkühlanlagen inkl. Bereitstellung des RWA vor und nach dem Einbau einer WRG gemessen. Diese Grundlagen sollen für Förderprogramme und als Entscheidungsgrundlage bei Installationen zur Steigerung der Energieeffizienz dienen.

Material und Methoden

Situation der untersuchten Betriebe vor dem Einbau

Für die Untersuchung wurden 9 Milchviehbetriebe mit konventionellem Melkstand und isoliertem Milchlager tank im Osten der Schweiz (Kantone Thurgau und St. Gallen) ausgewählt. Der Milchabtransport von den jeweiligen Höfen erfolgte im Ein- oder Zwei-Tages-Rhythmus. Nach der Tankleerung findet eine automatische Reinigung des Milchlager tanks mit Kalt- und Reinigungswasser aus dem Boiler sowie entsprechenden Reinigungszusätzen statt.

Für die Milchkühlung verfügten alle Betriebe über ein marktübliches Kälteaggregat mit Wärmeabgabe über einen Kondensator an die Umgebungsluft. Die Bereitstellung des RWA erfolgte jeweils in einem unabhängigen Elektroboiler während der Nacht. Die Wassertemperaturen in den Boilern lagen zwischen 61 und 83 °C. Der Energiebedarf des Elektroboilers und der Kälteanlage wurde bei allen Betrieben vor und nach dem Einbau der WRG gemessen (Abbildung 1). Die Untersuchungen fanden zwischen April und September 2018 statt. Damit ein allfälliger Einfluss der Herdengröße auf die Effizienz beim Strom- und Wasserbedarf untersucht werden konnte, wurden Betriebe mit unterschiedlichen Jahresmilchmengen zwischen 126.000 kg und 475.000 kg mit Bestandsgrößen von 22 bis 65 laktierenden Kühen ausgewählt. Die Milchleistung der Betriebe lag zwischen 7.000 bis 8.900 kg pro Kuh und Jahr. Tabelle 1 zeigt die Kennzahlen von Herdengröße, Milchmengen sowie dem COP der Milchkühlung während der Messungen nach dem Einbau der WRG aller untersuchten Betriebe aufgeführt.

Tabelle 1: Kennzahlen der 9 untersuchten Betriebe

Betrieb Nr.	Anzahl laktierende Kühe nach Einbau WRG	Milchmenge pro Tag in kg/d	COP-Milchkühlung nach Einbau WRG
1	22	531	1,84
2	25	595	1,40
3	31	650	1,70
4	30	715	2,02
5	33	736	3,12
6	50	1.125	2,39
7	52	1.245	1,98
8	55	1.414	2,42
9	65	1.661	2,59

Einbau der WRG auf allen Betrieben

Auf allen Betrieben wurde ein zusätzlicher Warmwasserbehälter in Serie vor den Elektroboiler installiert (Abbildung 1), in welchem die Wärme aus der Milch mittels Kältemittel über einen Rohrbündeltauscher ins RWA übertragen wurde. Nach diesem Speicher gelangt das Kältemittel zum Kälteaggregat, wo je nach Situation noch Wärme über den Kondensator an die Umgebungsluft abgegeben wird. So wurde das RWA im ersten Warmwasserspeicher mit der installierten WRG auf ca. 50–55 °C vorerwärmt. Die weitere Temperaturerhöhung auf die gewünschten rund 80 °C fand danach rein elektrisch im Elektroboiler statt. Den Betrieben steht somit RWA mit 80 °C aus dem Boiler und Warmwasser von ca. 50 °C für andere Zwecke aus dem vorgeschalteten Warmwasserspeicher zur Verfügung. Da bei einigen der untersuchten Betriebe die bestehenden Boiler veraltet und teilweise defekt waren, wurden diese durch neue ersetzt.

Messkonzept

Die Datenerhebung erfolgte bei allen Messbetrieben während mind. 14 Tagen vor und nach der Installation der WRG. Dazu wurden Energiezähler (Carlo Gavazzi, EM24 DIN, Lainate, Italien) bei den maßgebenden elektrischen Energiebezügen, Elektroboiler und Kälteaggregat, montiert (Abbildung 1). Zur Erfassung der Wassermenge und der Wassertemperatur dienten Kombi-Messsensoren (Alborn, FVA 645 GV40QT, Holzkirchen, Deutschland), welche, sofern die Leitungen mit Schraubverbindungen zusammengesetzt waren, in der Zu- sowie Ausflussleitung der Behälter (Boiler und Speicher) eingebaut wurden. Bei Wasserleitungen mit gepressten Verbindungen wurden Oberflächensensoren (Thermasgard, ALTF2 PT100, Nürnberg, Deutschland) auf die entsprechenden Leitungen aufgebaut und mit Wärmedämmung isoliert, damit der Einfluss der Umgebungstemperatur minimiert werden konnte. Die Temperaturmessdaten wurden mit 1 Hz erhoben und die Minutenmittelwerte auf dem Datenlogger (Alborn, Almemo MA8590, Holzkirchen, Deutschland) gespeichert. Die Spezifikationen der verwendeten Sensoren sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Das Messen der Milchmenge erfolgte bei jeder Tankleerung durch das im Lkw integrierte Mengemessgerät, wovon Abholscheine automatisch erstellt und beim Tank deponiert wurden. Die Außenlufttemperatur sowie Raumlufttemperatur im Raum des Milchtanks wurden mit Temperatur- und Feuchtigkeitsmessgeräten (Alborn, FHA646-1, Holzkirchen, Deutschland) in einem Intervall von 1 Minute gemessen und lokal gespeichert.

Tabelle 2: Spezifikationen der für die Messungen verwendeten Sensoren

Messparameter	Sensor	Messeinheit, Messbereich der Sensoren	Toleranz
Elektrische Energie Boiler und Kälteaggregat	EM24 DIN, 3 Phasen, Cavazzi, Lainate (IT)	1 Impuls je Wh	±1 %
Wasserdurchfluss und Wasser- temperatur bei den Zapfstellen	Kombisensor FVA645 GV40QT, Alborn, Holzkirchen (D)	2 bis 40 l/min bzw. 0 bis 100 °C	±1,5 % bzw. ±1 °C
Rohrtemperatur von Wasser- und Kältemittelleitungen	ALTF2 PT100, Thermasgard, S+S Regeltechnik, Nürnberg (D)	–30 bis 110 °C	±0,5 °C
Temperatur im Milchtank	FPA30K20L0020 Almemo D6, Alborn, Holzkirchen (D)	–30 bis 150 °C	±0,3 °C
Umgebungstemperatur	FHA646-1, Almemo, Alborn, Holzkirchen (D)	–20 bis 80 °C	±1 °C
Speichergerät	MA85909, Almemo, Alborn, Holzkirchen (D)	SD-Karte 512 MB	

Korrektur der Temperaturen von aufgesetzten Sensoren

Bei der Auswertung der Temperaturdaten zeigte sich, dass bei einem Warmwasserbezug die Temperaturen an der Oberfläche der Leitungen verzögert bis auf ein Maximum anstiegen. Das Erwärmen der Leitungen sowie eine gewisse Trägheit der Sensoren führten zu dieser Verzögerung der Temperaturmessung. Die Korrektur erfolgte, indem ab Beginn der Messung die Maximaltemperatur des jeweiligen Warmwasserbezuges verwendet wurde. Der Grund dafür ist, dass ab Beginn heißes Wasser aus dem Boiler strömte und dies mit zunehmendem Bezug nur kälter werden konnte. Nach dem Erreichen des Temperaturmaximums, was in der Regel nach rund 2–3 Minuten der Fall war, wurden die gemessenen Werte verwendet, um bei großen Wasserbezügen das allfällige Absinken der Temperatur im Warmwasserspeicher nicht zu vernachlässigen (Abbildung 2).

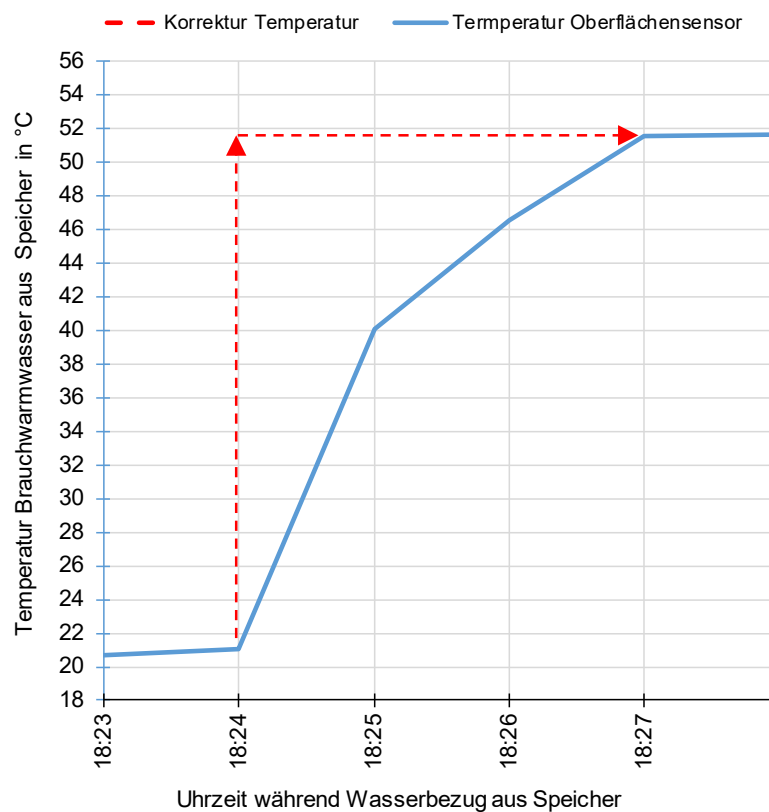


Abbildung 2: Bei oberflächlich auf Rohren montierte Temperatursensoren wurde wegen der Erwärmung der Rohre etc. ab Beginn der Messung die maximale Temperatur (Korrektur Temperatur) eines Bezuges für die Berechnung der Wärmemenge verwendet und nicht die real gemessene Temperatur des Oberflächensensors

Berechnungsformeln

Die Milcht Temperatur betrug nach dem Melken beim Einfließen in den Milchlagertank ca. 31–35 °C und wurde auf eine Temperatur von 4–8 °C gekühlt. Die Wärmeenergie (Q_M) aus der zu kühlenden Milch berechnet sich nach Gleichung 1:

$$Q_M = c_{p \text{ Milch}} \times \rho_{\text{Milch}} \times m_M \times \Delta T \quad (\text{Gl. 1})$$

$c_{p \text{ Milch}}$ = spezifische Wärmekapazität von Milch (3.980 J/kg K), ρ = Dichte von Milch (1,03 kg/l), m_M = Masse von Milch in kg, ΔT = Temperaturdifferenz von Beginn bis Ende der Milchkühlung (Annahme die Milch fließt mit ca. 33 °C in den Milchtank und wird auf ca. 4 °C abgekühlt, woraus sich eine Temperaturdifferenz von 29 Kelvin ergibt).

Die während des Kühlvorgangs aus der Milch gewonnene Wärmeenergie dividiert durch den elektrischen Energiebedarf des Kälteaggregats ergibt den *COP* der Milchkühlanlage und wird berechnet mit:

$$\text{COP} = Q_M / W \quad (\text{Gl. 2})$$

COP des Kälteaggregats (dimensionslos);

Q_M = die Wärmemenge aus der zu kühlenden Milch (kWh);

W = elektrischer Energiebedarf des Kälteaggregats (kWh)

Der *COP* von Boilern wurde mit der aus der Wärmemenge im Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebedarf des Boilers berechnet (Gleichung 3):

$$\text{COP} = Q_W / W \quad (\text{Gl. 3})$$

COP des Boilers (dimensionslos);

Q_W = die theoretische berechnete Wärmemenge im Warmwasser bei Entnahme aus dem Boiler (kWh);

W = elektrischer Energiebedarf des Boilers (kWh)

Die theoretische Berechnung der Energiemenge im RWA (Boiler und Speicher) wurde mit Gleichung 4 berechnet:

$$Q_H = c_p \times m_W \times \Delta T \quad (\text{Gl. 4})$$

c_p = spezifische Wärmekapazität von Wasser (4.182 J/kg K),

m_W = Masse von Wasser (1.000 kg/m³),

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Wasserein- und -austritt beim Boiler und Wärmespeicher (K).

Für die Berechnung der theoretischen Energieeinsparung aufgrund der Reduktion bei der Boilertemperatur wurde Gleichung 5 eingesetzt:

$$ES = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \Delta T_1 \times 100 \quad (\text{Gl. 5})$$

ES = elektrische Einsparung Boiler aufgrund Reduktion Boilertemperatur (%),

ΔT_1 = Differenz Boilertemperatur vor Temperaturreduktion zu Kaltwasser;

ΔT_2 = Differenz Boilertemperatur zu Kaltwasser nach Temperaturreduktion, (K)

Die Bestimmung des Wirkungsgrads des Boilers erfolgt gemäß Gleichung 6:

$$\eta = w / Q_W \quad (\text{Gl. 6})$$

η = Wirkungsgrad des Boilers (dimensionslos);

w = Strombedarf des Boilers (kWh);

Q_W = theoretisch berechneter Energieinhalt im RWA (kWh).

Ergebnisse

Bedarf an Reinigungswasser (RWA)

Der durchschnittliche tägliche Bedarf an RWA über alle Messbetriebe lag zwischen 150 und 440 Litern und die produzierte Tagesmilchmenge zwischen 531 und 1.661 l/Tag. Umgerechnet auf 1 kg Milch ergibt dies einen RWA-Bedarf von rund 0,33 l/kg_{Milch} vor dem Einbau der WRG und knapp 0,31 l/kg_{Milch} nach dem Einbau, was eine Reduktion von gut 8 % ergibt. Bei den meisten Betrieben waren die Unterschiede vor und nach dem Einbau der WRG gering. Auf 3 Betrieben wurde mit der Nachrüstung der WRG auch der Bezug an RWA signifikant reduziert (Abbildung 3).

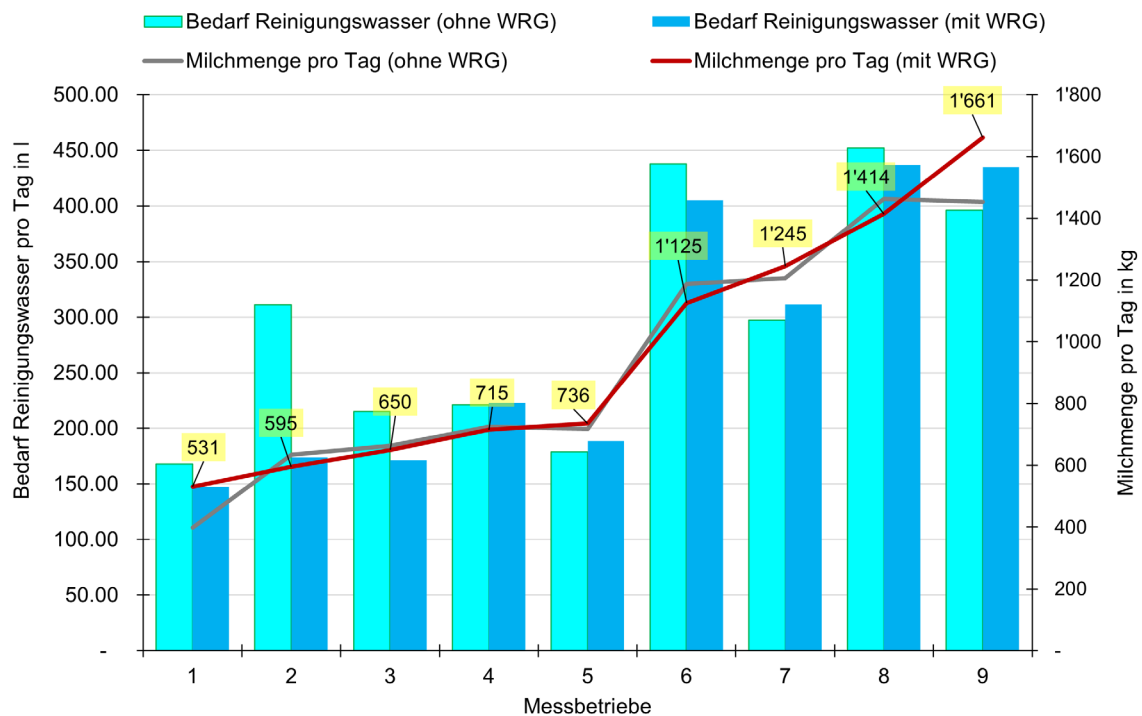


Abbildung 3: Durchschnittlicher täglicher Bedarf an RWA und durchschnittliche Tagesmilchmenge der Betriebe vor und nach der Installation der WRG während der Messphasen

Regressionsanalyse für Bedarf an RWA

Der tägliche Bedarf an RWA korrelierte recht gut mit der Tagesmilchmenge. Die Streuungen der Werte zeigen zwischen den Betrieben mit kleineren und größeren produzierten Milchmengen keine Unterschiede (Abbildung 4).

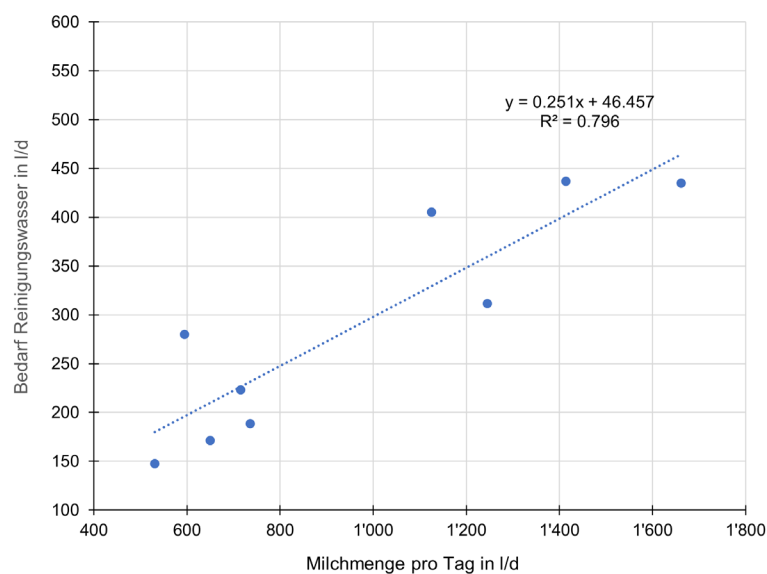


Abbildung 4: Regressionsanalyse für den täglichen Bedarf an RWA aufgrund der Tagesmilchmenge nach der Installation der WRG

Elektrischer Energiebedarf Boiler

Der elektrische Energiebedarf für das Bereitstellen des RWA konnte bei allen Betrieben nach dem Einbau der WRG gesenkt werden. Im Durchschnitt wurden vor dem Einbau der WRG 27,44 Wh und nach dem Einbau 14,46 Wh pro Kilogramm Milch eingesetzt, was eine mittlere Einsparung von ca. 47 % ergibt (Abbildung 5).

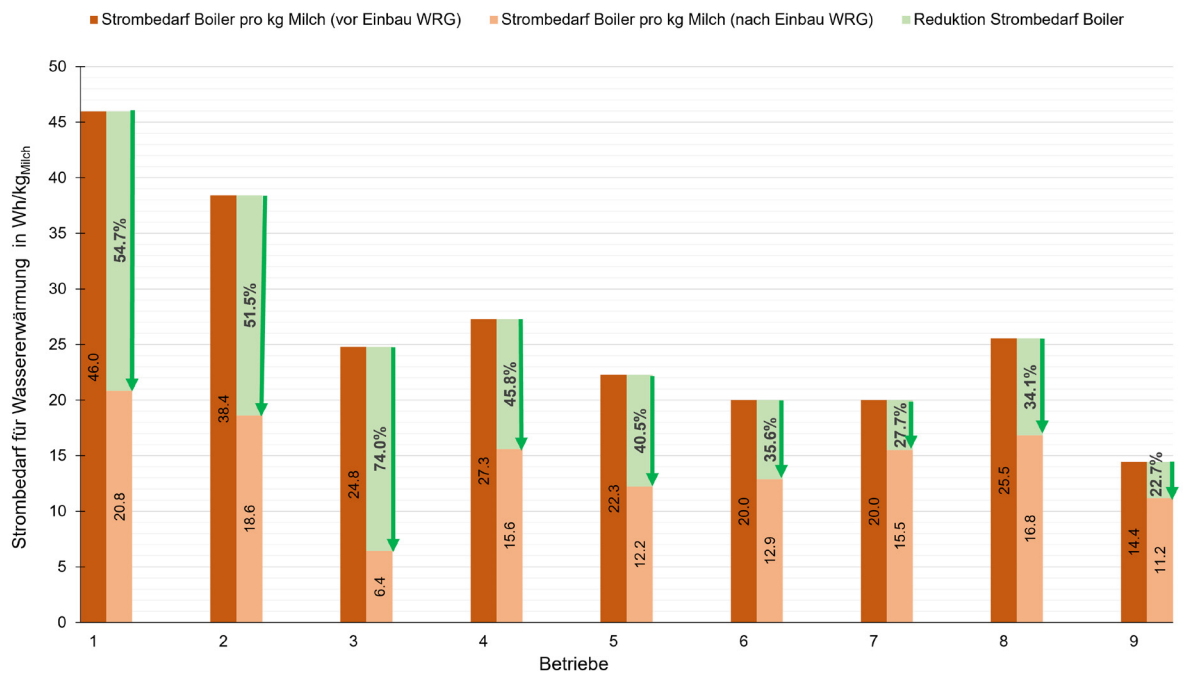


Abbildung 5: Elektrischer Energiebedarf der Elektroboiler für die Bereitstellung des RWA vor und nach dem Einbau der WRG über alle 9 Betriebe

Elektrischer Energiebedarf der Kälteaggregate

Das Nachrüsten der WRG reduzierte den elektrischen Energiebedarf der Kälteaggregate von durchschnittlich 18,2 auf 15,6 Wh/kg gekühlte Milch (Abbildung 6). Diese Einsparung entsprach im Mittel rund 14 %. Nur bei einer Anlage wurde nach der Installation ein höherer Strombedarf gemessen.

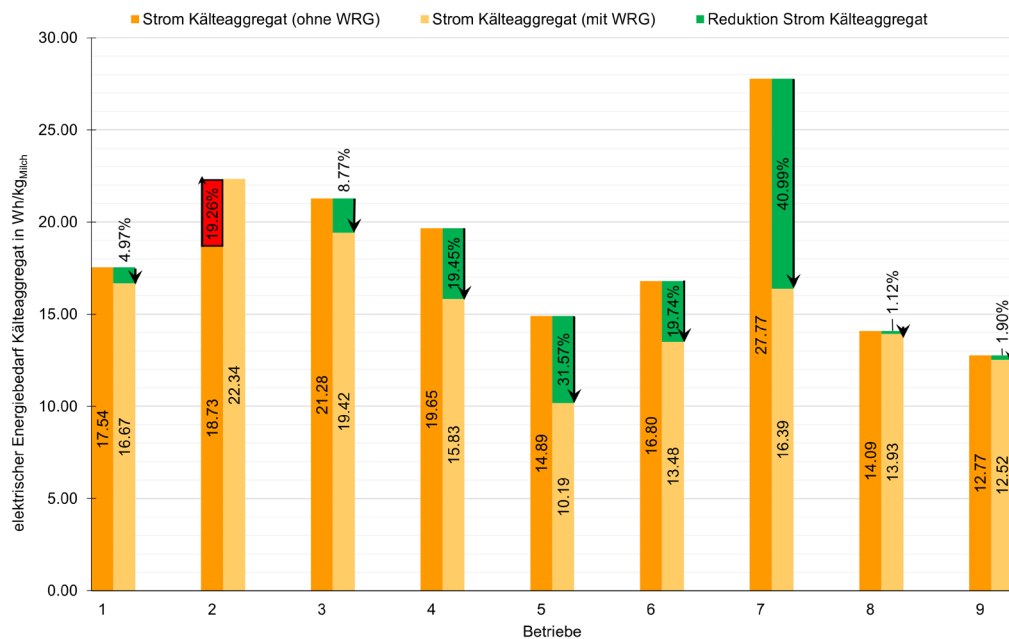


Abbildung 6: Elektrischer Energiebedarf der Kälteaggregate vor und nach dem Einbau der WRG

Regressionsanalyse des COP der Milchkühlverfahren

Der COP-Wert der Kälteaggregate nach dem Einbau der WRG und deren elektrischer Energiebedarf pro kg zu kühlender Milch sind eng miteinander korreliert (Abbildung 7). Die COP der Milchkühlsysteme liegt nach Einbau der WRG zwischen 1,4 und 3,1 und zeigt eine enge Beziehung zum Energiebedarf für die Milchkühlung.

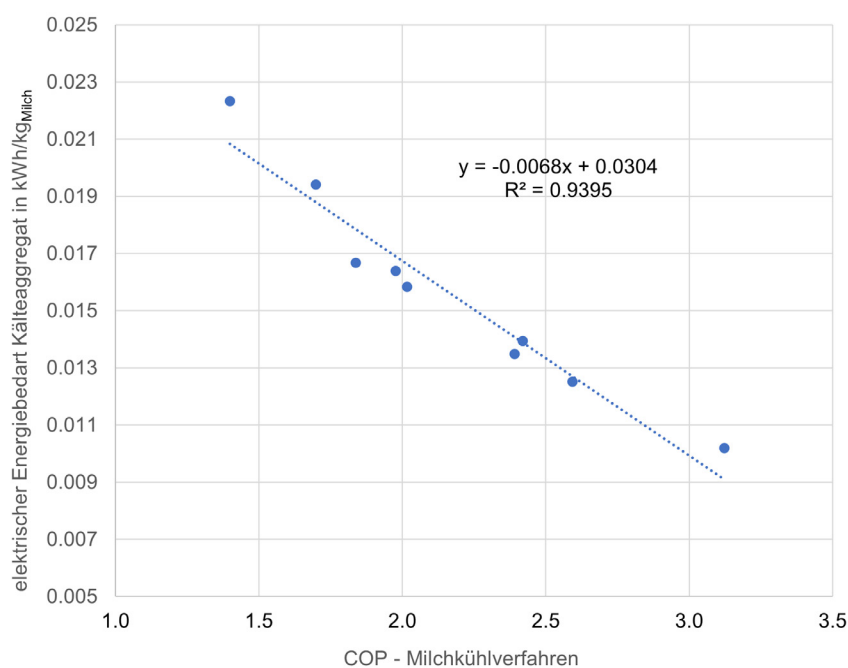


Abbildung 7: COP-Milchkühlverfahren und elektrischer Energiebedarf von Kälteaggregat in kWh pro kg zu kühlender Milch

Diskussion

Der berechnete Mittelwert des Bedarfs an RWA über die 9 Betriebe ist mit $0,33 \text{ l/kg}_{\text{Milch}}$ vor dem Einbau und mit knapp $0,31 \text{ l/kg}_{\text{Milch}}$ nach dem Einbau der WRG vergleichbar mit den Angaben von EIDE (2002) ($0,3 \text{ l}$) und KRAUSS et al. (2016) ($0,34 \text{ l}$). Die Spülmengen werden bei den Melkanlagen beim Einbau durch die Fachpersonen und danach in einem vorgegebenen Intervall durch Wartungsbefragte eingestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anlagen sind die Spülmengen stark abhängig vom jeweiligen Produkt und der Art der Installation. Diese Einstellungen können durch den jeweiligen Landwirt nicht verändert werden. Damit soll eine optimale Reinigungsqualität der Melk- und Milchtankeinrichtung sichergestellt werden (DAIRY FARMERS OF CANADA 2010).

Ein Vergleich der Betriebe zeigt, dass der RWA-Bedarf mit der Tagesmilchmenge recht gut korrelierte ($R^2 = 0,8$). Dies ist plausibel, da höhere Tagesmilchmengen größere Melkeinrichtungen erfordern, damit die Melkzeiten pro Melkdurchgang nicht zu lange dauern. Zur Kühlung und Lagerung der frisch gewonnenen Milch müssen entsprechend größere Milchtankanlagen vorhanden sein. Der Gesamtbedarf an RWA pro Tag nimmt daher mit zunehmender Tagesmilchmenge linear zu.

Auf drei Betrieben ergab sich nach dem Einbau der WRG eine große Einsparung beim Bedarf an RWA. Einer der Hauptgründe war die zu niedrige Temperatur des RWA vor dem Einbau der WRG. Besonders auf Betrieb 3 war der Boiler sehr stark verkalkt, wodurch die Temperatur im Boiler nur maximal $55\text{--}60^\circ\text{C}$ erreichte und daher für die geforderte Reinigungsqualität mehr RWA pro Spüldurchgang eingesetzt werden musste. Auf den Betrieben 5, 7 und 9 stieg der Bedarf an RWA nach dem Einbau der WRG an. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Mengen bei den automatischen Spüldurchgängen dem Bedarf angepasst wurden. Speziell bei Betrieb 9 gab der Landwirt an, dass vor dem Nachrüsten der WRG wegen des zu geringen Boilervolumens die Wassermenge bei den Spüldurchgängen zu knapp bemessen war.

Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse des elektrischen Energiebedarfs des Boilers für die Bereitstellung des RWAs zeigen, dass der Energiebedarf durch den Einbau einer WRG eine große Einsparung von ca. 47 % bewirkt. Der Mittelwert des elektrischen Energiebedarfs für die Bereitstellung des RWA lag mit $14,5 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ nahe des von EDENS et al. (2003) publizierten Wertes ($14,4 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$), und etwas unter dem Mittelwert von $16,25 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ (Messbereich von $9,7\text{--}22,8 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$), wie es die Untersuchungen von RAJANIEMI et al. (2017) zeigten. UPTON et al. (2013) beschrieben den Mittelwert dieses Energiebedarfs mit $9,83 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ und in der Literaturrecherche von SHINE et al. (2017) ist dazu $9,45 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ ausgewiesen, wobei in beiden Studien nicht beschrieben ist, wie oft pro Tag und Woche das Melkequipment mit Heißwasser gereinigt wurde.

Bei Betrieb 1 und 2 wurden nach dem Einbau der WRG die Temperatur des RWAs von 89 auf 83°C respektive von 68 auf 61°C reduziert, ohne Einbußen bei der Reinigungsqualität hinnehmen zu müssen. Die Reduktion der RWA-Temperatur ergab nach Gleichung 5 eine Stromeinsparung von ca. 9 % beim Betrieb 1 und ca. 20 % beim Betrieb 2. Die eingesetzte elektrische Energie für die Bereitstellung des RWA konnte so beim Betrieb 1 um weitere ca. $1,9 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ (9 % von $20,8 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$) und beim Betrieb 2 um ca. $3,8 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$ (20 % von $18,6 \text{ Wh/kg}_{\text{Milch}}$) reduziert werden.

Die größte Einsparung beim elektrischen Energiebedarf des Boilers war auf Betrieb 3 festzustellen, was auf die massiven Kalkablagerungen auf den Elektroheizstäben vor dem Einbau der WRG zurückzuführen war. Die durch Kalk verursachte Isolation der Elektroheizstäbe führte dazu, dass nur noch eine Heißwassertemperatur von $56,8^\circ\text{C}$ erreicht und die Qualitätsanforderungen der Reinigung nicht erfüllt werden konnte. Laut van der BRUGGEN et al. (2009) und GODSKESEN et al. (2012) ist

bereits bei einer Kalkschicht von 1 mm eine Zunahme des elektrischen Energiebedarfs von ca. 10 % anzunehmen. Zudem wies der bereits etwas ältere und wartungsarm betriebene Elektroboiler einen schlechten Wirkungsgrad von ca. 0,74 auf (berechnet nach Gleichung 3), was im unteren Bereich der in der Literatur bezeichneten Spannweite liegt.

Der elektrische Energiebedarf der Kälteaggregate der Milchkühlung konnte nach dem Einbau der WRG auf 8 Betrieben reduziert werden. Der Mittelwert liegt dabei mit 15,6 Wh/kg_{Milch}, nahe den Angaben von SHINE et al. (2020) mit 15,3 Wh/kg_{Milch}. Die Wärmeabgabe eines luftgekühlten Kondensators an die Umgebung hängt sehr stark von der Kondensationstemperatur und von der Temperatur der Umgebungsluft ab. Ist die Differenz dieser beiden Größen zu gering, kann pro Zeiteinheit weniger Wärme vom Kondensator an die durchströmende Luft abgegeben werden. Auf Betrieb 7 wurde die Wärmeabgabe des Kondensators vor dem Einbau der WRG durch den ungeeigneten Standort des Kälteaggregats erschwert. Dieser befand sich direkt unter der Dacheindeckung (Faserzement) des in Richtung Süden ausgerichteten Scheunendachs. Der Mittelwert der Umgebungstemperaturen um das Kälteaggregat betrug während der Kühlzeit des Abendmelkens ca. 31 °C, was zu überdurchschnittlich langen Kühlzeiten und entsprechend höherem elektrischen Energiebedarf führte. HARRINGTON et al. (2018) beschrieben, dass Kälteaggregate für dieselbe Kühlleistung bei einer Umgebungstemperatur von 16 °C über 40 % weniger Energie benötigen als bei 32 °C und RAJANIEMI et al. (2017) kam zur identischen Einsparung bei einer Reduktion der Umgebungstemperatur von 35 auf 17 °C. Damit lässt sich der höhere elektrische Energiebedarf des Kälteaggregats vor dem Einbau der WRG auf Betrieb 7 erklären. Auf den Betrieben 4 und 6 waren die Kühlrippen der Kondensatoren sehr stark verstaubt, was die Wärmeabgabe an die Umgebungsluft entsprechend einschränkte. Während des Einbaus der WRG fanden Wartungsarbeiten bei den Kälteaggregaten inkl. Reinigung der Kondensatoren statt. Bei Betrieb 5 wurde die Fortluft nach dem Kondensator durch einen schmalen Kanal mit teils dicken Ablagerungen an den Kanalwänden nach außen geführt und am Ende des Kanals waren nur teilgeöffneten Jalousien vorhanden. Bei diesen 3 Anlagen führte der hohe Strömungswiderstand bei der Fortluft nach dem Kondensator zu einer längeren Kühlzeit. Beim Kälteaggregat auf Betrieb 2 wurde nach dem Einbau der WRG zu wenig Kältemittel eingefüllt, was ebenfalls zu einer längeren Kühlzeit und einem höheren elektrischen Energiebedarf führte.

Die Effizienz der Milchkühlsysteme wird mit dem COP (Coefficient of Performance) ausgedrückt, der das Verhältnis der gewonnenen Wärmeenergie aus der Milch zur aufgewendeten elektrischen Energie für das Kälteaggregat bezeichnet. Berechnet ist der COP der Milchkühlung mit der Gleichung 2. Bei den 9 untersuchten Betrieben lag der COP nach dem Einbau der WRG zwischen 1,4 und 3,12, was einen Mittelwert von 2,16 ergibt. Diese Werte liegen im Bereich der Angaben von LUDINGTON et al. (2004) (1,6–2,91), MHUNDWA et al. (2017) und RAJANIEMI et al. (2017) (2,0). Wie oben aufgeführt, führen mangelhafte Installationen oder aufgeschobene Wartungsarbeiten zu längeren Kühlzeiten und damit auch schlechteren COP-Werten.

Die Beziehung zwischen dem elektrischen Energiebedarf des Kälteaggregates und den COP-Werten des Milchkühlverfahrens ergab eine sehr gute Korrelation. Somit ließe sich also der COP einfach durch die Milchmenge und den Stromverbrauch des Kälteaggregates bestimmen, was für die Überwachung der Aggregate eingesetzt werden könnte. Der COP von Kühlverfahren hängt stark vom Temperaturunterschied zwischen dem wärmeabgebenden und wärmeaufnehmenden Medium ab. Aufgrund des meist kalten Wassers im Speicher bei Beginn der Milchkühlung kann das Kälteaggregat die Wärme über den Rohrbündelwärmetauscher im Speicher besser abführen als über die Umgebungsluft.

Entscheidend dazu ist die richtige Dimensionierung des Speichers und des Boilers, damit bei Kühlbeginn immer ausreichend kaltes Wasser im Speicher enthalten ist.

In der Schweiz bestanden im Jahr 2023 gut 17.000 Milchviehbetriebe und produzierten ca. 3,3 Mio. Tonnen Milch. Ausgehend von einer durchschnittlichen Stromeinsparung von knapp 13 Wh/kg_{Milch} (27,45–14,46 Wh/kg_{Milch}) beim Bereitstellen des RWA aufgrund einer WRG, könnten in der Schweiz jährlich ca. 43 GWh Strom eingespart werden. Als grobe Annahme kann davon ausgegangen werden, dass ca. 1/3 der Milchviehbetriebe bereits eine WRG installiert haben. Somit liegen immer noch ca. 28 GWh brach.

Die Wirtschaftlichkeit einer WRG bei der Milchkühlung wird mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung aufgezeigt. In der Schweiz wurde durch AgroCleanTech (Lindau, Schweiz, www.agrocleantech.ch) ein Förderprogramm für die Nachrüstung einer WRG bei bestehenden Milchkühlanlagen durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Förderprogramms zeigten, dass die Installationskosten pro Anlage im Bereich von 5.000 und 9.000 EUR für Jahresmilchmengen von 150.000 bis 500.000 kg lagen. Bei angenommenen Stromkosten von 0,23 EUR/kWh resultierten Amortisationszeiten zwischen 5 bis max. 7 Jahren, was mit unseren Erhebungen gut übereinstimmt.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen auf 9 Betrieben zeigen klar auf, dass durch den Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) der elektrische Energiebedarf für das Bereitstellen des Reinigungswassers (RWA) um 47 % reduziert werden kann. Zusätzlich reduzierte sich der Energiebedarf des Kälteaggregates für die Milchkühlung um 14 %. Die schnellere Wärmeabgabe des Kälteaggregates an das RWA führte zu einer kürzeren Kühlzeit, womit auch die Qualitätsanforderungen für das Kühlen der Milch besser eingehalten werden können. Trotz sehr unterschiedlichen Installationen führten alle nachgerüsteten WRG-Anlagen zu einer deutlichen Einsparung von elektrischer Energie. Die detaillierte Betrachtung der neun Praxisanlagen zeigte, dass eine fachgerechte Installation und zeitgerechte Wartung der Milchkühl- und Wassererwärmungsanlagen einen großen Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf haben. Oft wird das notwendige Zeitintervall für die Reinigung des Kondensators und die Kontrolle des Kältemittelfüllstandes etwas vernachlässigt, was verschiedene Servicetechniker so bestätigten. In einem nächsten Schritt wäre es interessant, die Ursachen dieser großen Unterschiede bei den Installationen zu ergründen. Die deutlichen Unterschiede belegen, dass die Installation, der Betrieb und die Wartung bei diesen Anlagen sehr unterschiedlich ist und folglich ungenutzte Energieeinsparpotenziale vorhanden sind. Es zahlt sich also deutlich aus, Anlagen sorgfältig zu planen, zu installieren, zu betreiben und zu warten. Diese Studie zeigte auf, dass eine WRG die Stromeffizienz der Betriebe deutlich verbessert und deren Nachrüstung empfehlenswert ist!

Bei den untersuchten Betrieben waren die Melk- und Milchkühlanlagen von international bekannten Unternehmen wie Boumatic, DeLaval, Lemmer Fullwood und GEA eingebaut. Da die Montageanleitungen meist international sehr ähnlich sind, dürften die Ergebnisse dieser Untersuchung gut auf andere Länder übertragbar sein, was die Vergleiche mit der Literatur bestätigten. Es ist davon auszugehen, dass die aufgetretenen hohen Streuungen der verschiedenen Anlagen sich auch im Ausland wiederholen, was durch die Literatur klar aufgezeigt wird.

Literatur

- Corscadden, K.; Biggs, J.; Pradhanang, M. (2014): Energy Efficient Technology Selection for Dairy Farms: Milking Cooling and Electric Water Heating. *Applied Engineering in Agriculture*, pp. 375–382, <https://doi.org/10.13031/aea.30.10403>
- Cuthbertson, H. (2006): Hot water, energy and the milking centre. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario, Canada
- Dairy Farmers of Canada (2010): Canadian Quality Milk on-Farm Food Safety Program. Reference Manual, Dairy Farmers of Canada, Ottawa, Canada
- Edens, W.C.; Pordesimo, L.O.; Wilhelm, L.R.; Burns, R.T. (2003): Energy Use Analysis of Major Milking Center Components at a Dairy Experiment Station. *Applied Engineering in Agriculture* 19(6), pp. 711–716, <https://doi.org/10.13031/2013.15659>
- Eide, M.H. (2002): Life cycle assessment (LCA) of industrial milk production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7(2), <https://doi.org/10.1007/BF02978855>
- GIE Élevage Bretagne (2018): Réduire les consommations d'électricité des élevages laitiers Bretons. https://www.gie-elevages-bretagne.fr/admin/upload/8_PAGES_ECO_ENREGIE_LAIT_VF.pdf, Zugriff am 12.05.2025
- Godskesen, B.; Hauschild, M.; Rygaard, M.; Zambrano, K.; Albrechtsen, H.-J. (2012): Life cycle assessment of central softening of very hard drinking water. *Journal of environmental management* 105, pp. 83–89, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.030>
- Harrington, L.; Aye, L.; Fuller, B. (2018): Impact of room temperature on energy consumption of household refrigerators: Lessons from analysis of field and laboratory data. *Applied Energy* 211, pp. 346–357, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.060>
- Krauß, M.; Drastig, K.; Prochnow, A.; Rose-Meierhöfer, S.; Kraatz, S. (2016): Drinking and Cleaning Water Use in a Dairy Cow Barn. *Water* 8(7), pp. 302, <https://doi.org/10.3390/w8070302>
- Ludington, D.; Johnson, A.; Kowalski, J.; Mage, A.; Peterson, R. (2004): Dairy farm energy management guide: California. Rosemead, CA, USA, Southern California Edison
- Mhundwa, R.; Simon, M.; Tangwe, S. (2017): Comparative analysis of the coefficient of performance of an on-farm direct expansion bulk milk cooler. In: 2017 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 15–16 Aug 2017, Cape Town, South Africa, IEEE, pp. 1–7
- Murgia, L.; Todde, G.; Caria, M.; Pazzona, A. (2013): A partial life cycle assessment approach to evaluate the energy intensity and related greenhouse gas emission in dairy farms. *Journal of Agricultural Engineering* 44(2s), <https://doi.org/10.4081/jae.2013.279>
- Murphy, S.; Boor, K. (2019): Sources and Causes of High Bacteria Counts in Raw Milk: An Abbreviated Review. <https://dairy-cattle.extension.org/sources-and-causes-of-high-bacteria-counts-in-raw-milk-an-abbreviated-review/>, Zugriff am 12.05.2025
- Murphy, M.D.; Upton, J.; O'Mahony, M.J. (2013): Rapid milk cooling control with varying water and energy consumption. *Biosystems Engineering* 116(1), pp. 15–22, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.05.007>
- Paludetti, L.F.; Kelly, A.L.; O'Brien, B.; Jordan, K.; Gleeson, D. (2018): The effect of different precooling rates and cold storage on milk microbiological quality and composition. *Journal of dairy science* 101(3), pp. 1921–1929, <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13668>
- Parmar, P.; Lopez-Villalobos, N.; Tobin, J.T.; Murphy, E.; McDonagh, A.; Crowley, S.V.; Kelly, A.L.; Shalloo, L. (2020): The Effect of Compositional Changes Due to Seasonal Variation on Milk Density and the Determination of Season-Based Density Conversion Factors for Use in the Dairy Industry. *Foods* (Basel, Switzerland) 9(8), <https://doi.org/10.3390/foods9081004>
- Rajaniemi, M.; Jokiniemi, T.; Alakukku, L.; Ahokas, J. (2017): Electric energy consumption of milking process on some Finnish dairy farms. *Agricultural and Food Science* 26(3), <https://doi.org/10.23986/afsci.63275>
- Sanford, S. (2003): Heating Water on Dairy Farms. <https://learningstore.extension.wisc.edu/products/heating-water-on-dairy-farms-p143>, Zugriff am 12.05.2025

- Sapali, S.N.; Pise, S.M.; Pise, A.T.; Ghewade, D.V. (2014): Investigations of waste heat recovery from bulk milk cooler. *Case Studies in Thermal Engineering* 4, pp. 136–143, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.09.003>
- Schweizerischer Landmaschinen-Verband (2019): Fachgruppe Hofeinrichtungen / Melktechnik. <https://slv-asma.ch/service-finder/fachgruppen>, Zugriff am 19.05.2025
- Shine, P.; Scully, T.; Upton, J.; Shalloo, L.; Murphy, M.D. (2018): Electricity & direct water consumption on Irish pasture based dairy farms: A statistical analysis. *Applied Energy* 210, pp. 529–537, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.029>
- Shine, P.; Upton, J.; Sefeedpari, P.; Murphy, M.D. (2020): Energy Consumption on Dairy Farms: A Review of Monitoring, Prediction Modelling, and Analyses. *Energies* 13(5), p. 1288, <https://doi.org/10.3390/en13051288>
- Todde, G.; Murgia, L.; Caria, M.; Pazzona, A. (2018): A Comprehensive Energy Analysis and Related Carbon Footprint of Dairy Farms, Part 1: Direct Energy Requirements. *Energies* 11(2), p. 451, <https://doi.org/10.3390/en11020451>
- Upton, J.; Humphreys, J.; Groot Koerkamp, P.W.G.; French, P.; Dillon, P.; Boer, I.J.M. de (2013): Energy demand on dairy farms in Ireland. *Journal of dairy science* 96(10), pp. 6489–6498, <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6874>
- Upton, J.; Murphy, M.; French, P.; Dillon, P. (2010): Dairy Farm Energy Consumption. <https://www.teagasc.ie/media/website/rural-economy/farm-management/DairyFarmEnergyConsumptionDairyConference2010.pdf>, Zugriff am 12.05.2025
- van der Bruggen, B.; Goossens, H.; Everard, P.A.; Stemgée, K.; Rogge, W. (2009): Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. *Journal of environmental management* 91(2), pp. 541–549, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.024>
- Verordnung (EG) Nr. 853/2004 (2004): Verordnung (EG) Nr. 853/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 mit spezifischen Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs, <http://data.europa.eu/eli/reg/2004/853/oj>, Zugriff am 12.05.2025
- VHyMP (2005): Verordnung des EDI über die Hygiene bei der Milchproduktion (VHyMP). Eidgenössisches Departement des Innern, Bern, Schweiz

Autoren

Dipl.-Ing. Markus Sax, Dipl.-Biol. Annett Latsch sind wissenschaftliche Mitarbeiter und **Dr. Thomas Anken** ist stellvertretender Bereichsleiter der Forschungsgruppe Nachhaltigkeitsbewertung und Agrarmanagement, Digitale Produktion bei Agroscope, Tänikon 1, CH-8356 Ettenhausen. E-Mail: markus.sax@agroscope.admin.ch