

Diplomarbeit zum Kältetechniker TS an der HKKS in Bern

Eiswasseranlage Salatwaschstraße

Gerald Heinzmann, Visperterminen (CH)



Der Autor hat in Bern die Technikerschule TS HKKS besucht und nach 4 Jahren erfolgreich abgeschlossen. Die Technikerschule TS HKKS in Bern ist eine berufs begleitende Ausbildung. Für Fachpersonen der Kältetechnik ist die Technikerschule HKKS in Bern eine der besten Weiterbildungsmöglichkeiten in der Schweiz. Die Technikerschule dauert 4 Jahre und jeweils am Freitag ganztags und am Samstagvormittag findet der Schulunterricht statt. Die Ausbildung wird in 4 Blöcke unterteilt. Die Fachorientierte Ausbildung dauert 4 Semester, und es wird in den Fächern Anlagen und Systeme, Projektieren, Hydromechanik und Regeltechnik unterrichtet. Während des 7. und 8. Semesters muss jeweils eine Semesterarbeit über ein frei wählbares Thema erarbeitet werden.

Schließlich: Mitte des letzten Semesters muss die Diplomprüfung abgelegt werden. Bei Bestehen der Diplomprüfung kann die Diplomarbeit erarbeitet werden. Diese dauert 10 Wochen. Das Thema muss anhand von Themenvorschlägen unter den Schülern ausgelesen werden. 2 Wochen nach Abgabe der Diplomarbeit wird diese den Experten vorgestellt und der Diplomand wird mit Fragen über Unklarheiten befragt.

Einführende Zusammenfassung

Bei meiner Diplomarbeit handelt es sich um einen Gemüse verarbeitenden Betrieb, der für vier Salatwaschstraßen Eiswasser benötigt. Dieses Eiswasser soll mit einer nach dem heutigen Stand der Technik gewählten Kälteanlage produziert und die Waschstraßen mit einer konstanten Temperatur von $+1^{\circ}\text{C}$ versorgt werden. Im gleichen Betrieb wird für Reinigungszwecke auch Warmwasser benötigt.

Die ganze Eiswasseranlage wurde ausführungsfähig nach gültigen Normen und Vorschriften geplant. Die Abklärung des Leistungsbedarfs der Kälteanlage betrachtet den Eiswasser- und Warmwasserbedarf. Es stellte sich heraus, dass dieser je nach Jahreszeit stark schwankt.

Es gibt nicht viele Abkühlssysteme, die eine Wasserabkühlung auf $+1^{\circ}\text{C}$ ermöglichen. Zwei Varianten, ein Eisspeicher und ein Rieselfilmkühler wurden näher untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass ein Eisspeicher durch Ausnutzen der günstigen Niedertarifzeit energetisch besser betrieben werden kann.



Die genaue Untersuchung der Laufzeit der Kälteanlage ergab, dass sich das optimale Gleichgewicht zwischen Investitionskosten und Betriebssicherheit für die

zum Autor

Gerald Heinzmann,
Kältetechniker TS,
Projektleiter
bei der Goetz AG,
Interlaken,
TB Schönbühl



Aufladung des Eisspeichers bei 150kW Kälteleistung einstellt.

Als Kältemittel wurde R134a gewählt, welches die besten Werte für einen trockenen und die zweitbesten für einen überfluteten Betrieb aufweist.

Bei der Wahl des Kältekonzeptes wurde schließlich ein überflutetes System aus Gründen der niedrigeren Betriebskosten gewählt.

Um die Abwärme der Kältemaschinen für das Warmwasser optimal zu nutzen, fiel die Wahl auf zwei Warmwasserspeicher und je einen AWN Tauscher Enthitzung und einen AWN Tauscher Kondensation.

Die projektierte Verbundanlage besitzt 150kW Kälteleistung und besteht aus einem Dreierverbund Hubkolbenverdichter.

Damit die Kältemittelfüllmenge der Anlage möglichst niedrig gehalten werden kann, wurde ein komplettes Sekundärsystem (Kälte- und Wärmeträger) gewählt.

Zum Objekt

Ein Gemüse verarbeitender Betrieb braucht für mehrere Salatwaschstraßen eine Kälteanlage zur Eiswassererzeugung. Die Waschmaschinen sind unterschiedlich

in Betrieb, so dass der Wasserverbrauch stark schwankt.

Im gleichen Betrieb wird für Reinigungszwecke auch Warmwasser benötigt.

Die Rückkühlung der Kälteanlage muss mit Umgebungsluft geschehen.

Die ganze Kälteanlage mit allen Sekundärinstallationen muss in einem optimal dimensionierten Raum untergebracht werden.

Der Betreiber hat zwei Stromtarife.

Tagstrom:	06:00 bis 22:00 Uhr	0.18 Fr./kWh
Nachtstrom:	22:00 bis 06:00 Uhr	0.09 Fr./kWh

Bedingungen

Eiswasserbedarf

Täglicher Eiswasserkonsum:	ca. 120 m ³
Eiswassertemperatur:	ca. +1 °C
Frischwassertemperatur Sommer:	ca. +21 °C
Frischwassertemperatur Winter:	ca. +8 °C
Maximaler Wasserbedarf:	ca. 22 m ³ /h

Warmwasserbedarf

Täglicher Warmwasserkonsum:	ca. 30 m ³
Warmwassertemperatur:	ca. +55 °C
Frischwassertemperatur Sommer:	ca. +21 °C
Frischwassertemperatur Winter:	ca. +8 °C
Maximaler Wasserbedarf:	ca. 12 m ³ /h

Aufgabenstellung

Theoretischer Teil

- Gegenüberstellung von verschiedenen Systemvarianten für die Kälteanlage.
- Gegenüberstellung von verschiedenen Systemvarianten für die Abwärmenutzung.
- Evaluation eines geeigneten Systems.

Praktischer Teil

- Freie Wahl für Verdampfungssystem (Trockenverdampfung oder Überflutung).
- Komplettkältezentrale mit allen notwendigen Installationen (Kälteanlage, Eiswassernetz, Warmwassernetz).
- Steuerungsbeschreibung der Kälteerzeugung (keine Standartgerätebeschreibung).

- Ein komplettes RI-Schema für Kältemittelkreislauf, Eiswassernetz, Warmwasserkreislauf ist zu erstellen.
- Ein Maschinenraumdistributionsplan. Die Raumabmessungen können frei gewählt werden, wobei auf eine kompakte Anordnung zu achten ist (nur so viel Platz wie nötig).

Bemerkungen

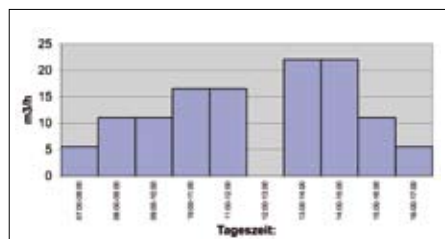
Die Wahl der Systeme und Komponenten muss dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Auf eine vernünftige Energieoptimierung und Kältemittelwahl wird Wert gelegt.

Bedarfsberechnung

Ich habe die Diplomarbeit so erarbeitet, dass jeweils aus verschiedenen Systemvarianten das ökologisch und ökonomisch beste System evaluiert wurde.

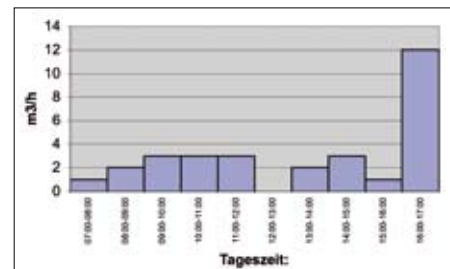
Bedarfsberechnung Eiswasser

Als Erstes musste ich den Eiswasserbedarf definieren. Dieser wurde in der Aufgabenstellung nicht spezifisch definiert. Es wurde ein Maximalbedarf von 22 m³/h und ein Tagesbedarf von 120 m³ Eiswasser definiert. Gewählt habe ich die verschiedenen Eiswassermengen gemäß ersichtlicher Liste. Der Maximalbedarf von 22 m³/h Eiswasser wird nach der Mittagspause benötigt.



Bedarfsberechnung Warmwasser

Auch der Warmwasserbedarf wurde nicht genau definiert. Ein Maximalbedarf von 12 m³/h und ein Tagesbedarf von 30 m³ Warmwasser wurden vorgegeben. Ich habe den Warmwasserbedarf gemäß Tabelle gewählt, wobei der Maximalbedarf am Abend zur Reinigung der Salatwaschstraßen benötigt wird.

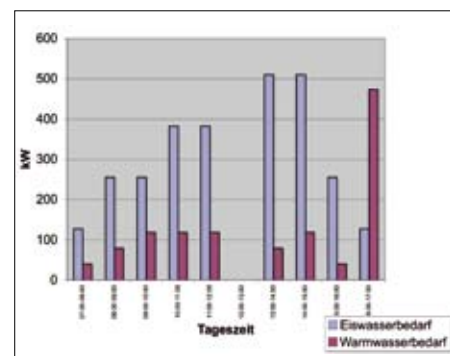


Leistungsberechnung

Nun konnte ich aufgrund der verschiedenen Frischwassertemperaturen, (Winter 8 °C und Sommer 21 °C) die benötigte Kälte- und Wärmeleistung berechnen.

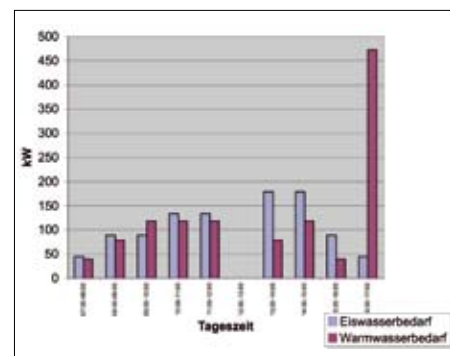
Leistungsvergleich Sommer

Im Sommer beträgt die maximale Kälteleistung 510 kW. Vor dem Feierabend werden 460 kW Wärmeleistung benötigt, um das Wasser direkt zu erwärmen.



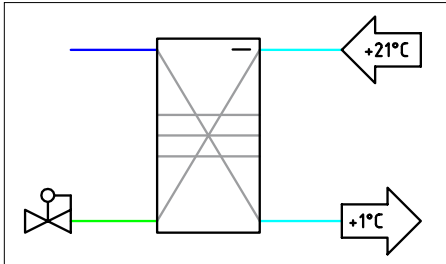
Leistungsvergleich Winter

Im Winter beträgt die maximale Kälteleistung lediglich 180 kW, da das Frischwasser eine Temperatur von 8 °C besitzt. Die erforderliche Heizleistung einer Direkterwärmung beträgt jedoch im Winter fast 500 kW.



Grobkonzeptwahl

Als Erstes musste ich mir überlegen, wie kann das Wasser von 21°C auf die geforderte 1°C abgekühlt werden. Dabei habe ich 3 Systemvarianten untersucht.



Grobkonzeptwahl; um Wasser von 21°C auf 1°C abzukühlen, wurden 3 Systemvarianten untersucht

Direktverdampfung mit Wärmetauscher (z. B. Bündelrohrverdampfer)

Diese Variante ist sicher die preisgünstigste, aber auch die problematischste, da die Gefahr besteht, dass der Verdampfer (Kühler) gefriert. Ein Abkühlen des Wassers von 21°C auf 1°C bei einer Verdampfungstemperatur die nur knapp unter 0°C liegen darf, ist anhand der Temperaturniveaus eher ungeeignet. Wäre eine erforderliche Eiswassertemperatur von ca. 5°C ausreichend gewesen, so wäre diese Variante eher geeignet. Aus diesen Gründen habe ich diese Variante nicht weiterverfolgt.

Wasserabkühlung mit Rieselfilmkühler

Bei einem Rieselfilmkühler wird das Wasser mittels Abfließen auf den Verdampferoberflächen abgekühlt. Auf der Oberfläche wird eine kleine Eisschicht aufgebaut, welche den Abkühlprozess erhöht. Mit einem Rieselfilmkühler kann das Wasser auf die geforderte Temperatur von +1°C abgekühlt werden. Die Kältemaschine muss bei dieser Variante auf die Maximalleistung von 510kW dimensioniert werden. Zusätzlich muss eine geeignete Leistungsregulierung eingebaut werden, dass die Kälteleistung bis auf 40kW gedrosselt werden kann. Dieses System wählte ich für den nächsten Vergleich.

Wasserabkühlung mit Eisspeicher

Der Eisspeicher ist ein Energiespeicher, bei dem man bei Bedarf Spitzenleistungen abfangen kann. Als Energieträger dient Eis. Je nach Eisspeicherkapazität kann die La-

dezeit der Verdichter und somit die erforderliche Kälteleistung definiert werden.

Ein Eisspeicher ist geeignet, um Wasser auf 1°C abzukühlen. Auch dieses System wählte ich für den nächsten Vergleich.

Systemvergleich Eisspeicher / Rieselfilmkühler

Um mich für ein System zwischen dem Eisspeicher und dem Rieselfilmkühler zu entscheiden, habe ich eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt.

	Eisspeicher 12h Betrieb	Rieselfilmkühler
Investitionskosten	339'692.00	320'687.00
jährl. Unterhaltskosten	7'000.00	7'000.00
jährl. Stromkosten	32'685.00	56'262.00
Total Betriebskosten	39'685.00	63'262.00
Differenz Betriebskosten	23'577.00	-
Amortisationsdauer	0.86	-

Wirtschaftlichkeitsvergleich, sämtliche Beträge in CHF

Fazit aus Vergleich

- Beide Systeme erfüllen die Bedingungen;
- Investitionskosten vom Rieselfilmkühler sind geringer;
- Kein Teillastbetrieb (Leistungsschwankungen) bei der Eisspeichervariante;
- Energiekosteneinsparung von CHF 24'000 – mit der Eisspeichervariante pro Jahr (Nachtauladung);
- Amortisationszeit der Mehrinvestition der Eisspeichervariante von 9 Monaten.

Ich habe mich für die Eisspeichervariante entschieden, da die Mehrinvestition in weniger als einem Jahr amortisiert ist und eine vergleichsweise kleinere Kälteleistung am Verdichterverbund gewählt werden kann. Auch die Teillastproblematik beim Rieselfilmkühlersystem ist bei der Eisspeichervariante nicht vorhanden, da im Betrieb immer die gleiche Kälteleistung abgeführt werden muss.

Vergleich Eisspeichergröße / Definition der Kälteleistung

Als nächster Schritt habe ich untersucht, was für eine Eisspeicherkapazität bzw. Kälteleistung der Verdichter am wirtschaftlichsten ist und habe dazu auch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt.

Wirtschaftlichkeitsberechnung

Drei verschiedene Eisspeicherladezeiten wurden miteinander verglichen. Eine 24h Ladezeit mit einer Kälteleistung von 120kW, eine 12h Ladezeit mit einer Kälteleistung von 240kW und eine komplette Nachtauladung während der Niedertarifzeit mit einer Ladezeit von 8 Stunden und einer Kälteleistung von 360kW.

	24 h Betrieb	12 h Betrieb	8 h Betrieb
Investitionskosten	301'054.00	339'682.00	377'927.00
jährl. Unterhaltskosten	7'000.00	7'000.00	7'000.00
jährl. Stromkosten	38'389.00	32'537.00	27'794.00
Total Betriebskosten	45'389.00	39'337.00	34'794.00
Differenz Betriebskosten		6'052.00	10'595.00
Amortisationsdauer	-	8.75	10.48

Wirtschaftlichkeitsberechnung in einem Vergleich von 3 verschiedenen Eisspeicherladezeiten

Fazit aus Vergleich

24h Betrieb (120kW Kälteleistung)

- Positiv:**
- niedrigste Investitionskosten
 - kleinster Platzbedarf, da der Eisspeicher am kleinsten dimensioniert werden kann.
- Negativ:**
- höchste Betriebskosten (lange Laufzeit in der Hochtarifzeit).
 - niedrigste Betriebssicherheit. Bei einem kurzen Ausfall eines Verdichters reicht die Kälteleistung nicht aus, um den Leistungsbedarf zu decken.

12h Betrieb (240kW Kälteleistung)

- Positiv:**
- niedrigere Betriebskosten gegenüber dem 24h Betrieb;
 - höhere Betriebssicherheit (12h Betrieb).

- Negativ:**
- höhere Investitionskosten gegenüber dem 24h Betrieb
 - lange Amortisationszeit der Mehrinvestition von fast 9 Jahren gegenüber dem 24h Betrieb.

8h Betrieb (360kW Kälteleistung / komplette Nachtauladung)

- Positiv:**
- niedrigste Betriebskosten aufgrund der kompletten Nachtauladung;
 - hohe Betriebssicherheit.

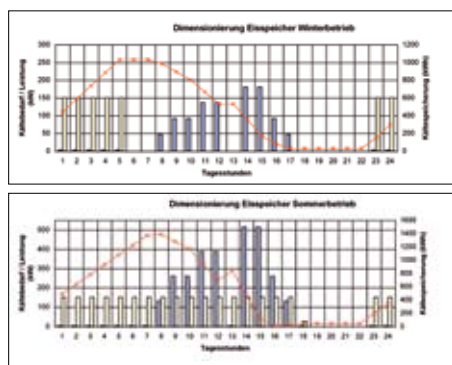
Negativ: - höchste Investitionskosten;
- sehr lange Amortisationszeit der Mehrinvestition von 10,5 Jahren gegenüber der 24h Variante.

Gewählt: 20h Betrieb mit 150kW Kälteleistung.

Gewählt habe ich eine Laufzeit der Verdichter von 20h, was eine Kälteleistung von 150kW ergibt.

Bei dieser Zwischenvariante wurde die Betriebssicherheit der Kälteanlage gegenüber dem 24h Betrieb erhöht.

In 4 Stunden sollten die Kälteanlagen bei einem normalen Störfall repariert werden können.



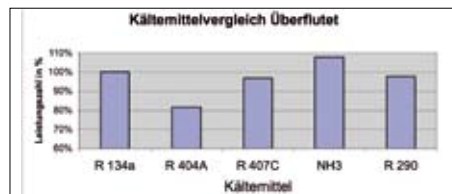
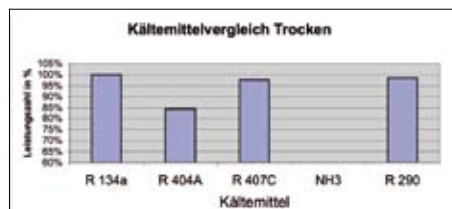
Kältemittelvergleich

Nachdem das Abkühlsystem definiert war, musste das Kältemittel bestimmt werden. Da ich das Kältekonzept noch nicht definiert hatte, verglich ich verschiedene Kältemittel im überfluteten sowie im trockenen System.

Verglichen habe ich die Kältemittel R134a, R404A, R407C, NH₃ Ammoniak und R290 Propan.

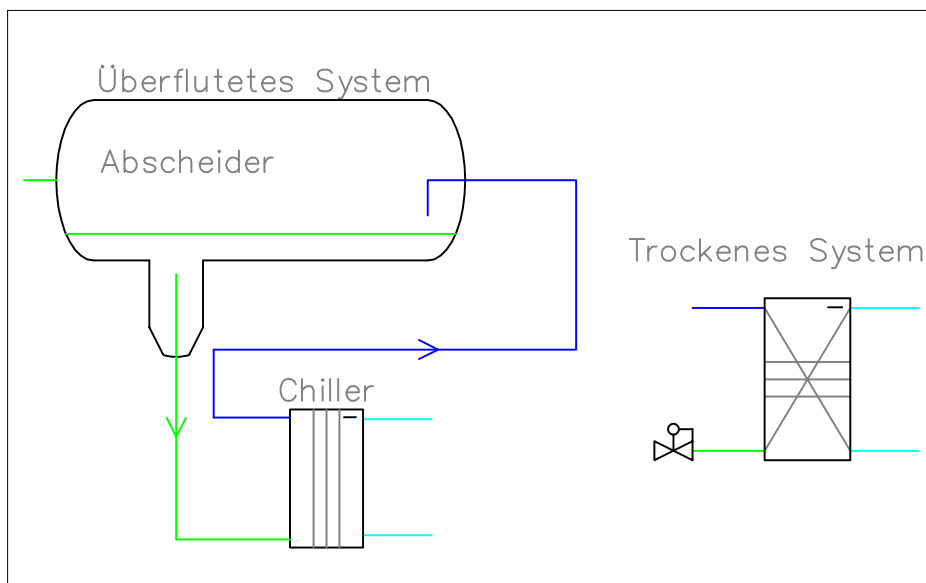
Regime des Kältemittelvergleichs:

Verdampfungstemperatur: -10 °C
Kondensationstemperatur: +45 °C



Das Kältemittel R134a wies die besten Leistungszahlen für beide Systeme auf. Ammoniak wäre im überfluteten System noch besser gewesen, ist jedoch für 150 kW Kälteleistung eher am unteren Einsatzbereich. Ich wählte das Kältemittel R134a für die Kälteanlage aus.

Kältekonzeptwahl



Schematische Gegenüberstellung zweier infrage kommenden Kältekonzepte

Im nächsten Schritt wurde das Kältekonzept gewählt. Dabei habe ich ein überflutetes mit einem trockenen System verglichen. Zu diesem Zeitpunkt stand schon fest, dass ein Kälteflüssigkeit eingesetzt werden muss, damit die Kältemittelfüllmenge nicht zu hoch liegt.

Überflutetes System

Vorteile:

- Energetisch vorteilhafter, da bei diesem System die Kälteanlage mit einer etwas höheren Verdampfungstemperatur betrieben werden kann;
- dadurch niedrigere Betriebskosten.

Nachteile:

- Etwas höhere Investitionskosten.
- Höhere Kältemittelfüllmenge.

Trockenes System

Vorteile:

- Niedrigere Investitionskosten.
- Geringere Kältemittelfüllmenge.

Nachteile:

- Höhere Betriebskosten aufgrund der tieferen Verdampfungstemperatur;
- dadurch energetisch etwas schlechter.

Gewählt habe ich ein überflutetes System, da die Mehrinvestition des überfluteten Systems bereits nach 1,5 Jahren amortisiert ist.

Abwärmenutzungskonzept

Ausgangslage

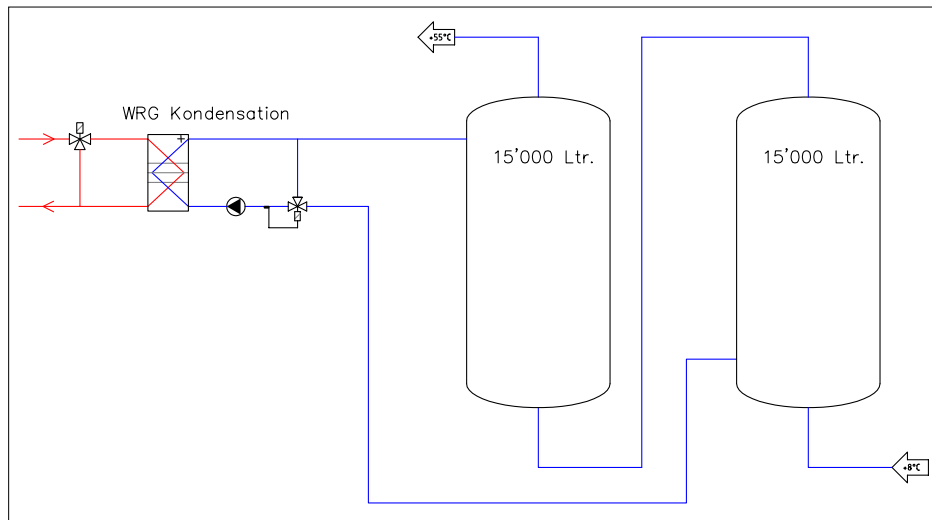
- Die Kondensationsleistung reicht nicht aus, um den ganzen Warmwasserbedarf zu decken.
- Im Winter kann der Warmwasserspeicher nur während der Niedertarifzeit geladen werden. Eine Laufzeit der Verdichter von 7h im Winter reicht aus, um den Eiswasserbedarf zu decken.
- Mit einer Kondensationstemperatur von +45 °C kann nicht das ganze Warmwasser im Speicher auf 55 °C erwärmt werden.
- Ein Nachwärmer des Warmwassers ist nötig.
- Berechnete Speichergröße 2 x 15000 Liter.

2 Speicher von 15000 Liter habe ich gewählt, da der Gesamtbedarf 30000 Liter Warmwasser beträgt und die Platzverhältnisse im Maschinenraum zu klein sind für nur einen Speicher.

Ich habe mir anhand der Ausgangslage überlegt, welche Varianten gibt es, um eine sinnvolle Abwärmenutzung zu planen. Dabei habe ich 2 verschiedene Systeme miteinander verglichen.

Positiv:

- Nicht das gesamte Warmwasser muss nachgewärmt werden.



Variante 1: Nutzung der Erhitzungs- und Kondensationswärme über nur einen WRG-Tauscher

Variante 1:
Mit 1 Plattentaucher Kondensation

Bei dieser Variante wird die Enthitzungswärme und Kondensationswärme gemeinsam an den WRG-Tauscher abgegeben. Bei einer Kondensationstemperatur im Abwärmenutzungs(AWN)-Betrieb von 45°C kann das Wasser auf maximal 40°C vorgewärmt werden. Das gesamte vorgewärmte Warmwasser muss im Nachwärmer nachgewärmt werden.

Positiv:

- Niedrigere Investitionskosten gegenüber Variante 2.

Negativ:

- Alles Warmwasser muss nachgewärmt werden.

Variante 2:
Mit 1 Plattentaucher Enthitzung und 1 Plattentaucher Kondensation

Bei dieser Variante wird die Enthitzungswärme mit dem höheren Temperaturniveau dem Enthitzungsplattentaucher abgegeben und die Kondensationswärme dem AWN-Plattentaucher Kondensation.

Dabei wird ein Teil des zweiten Speichers auf die gewünschten 55°C erwärmt – mit der Enthitzungswärme – und der Rest wird auf eine Temperatur von 40°C vorgewärmt.

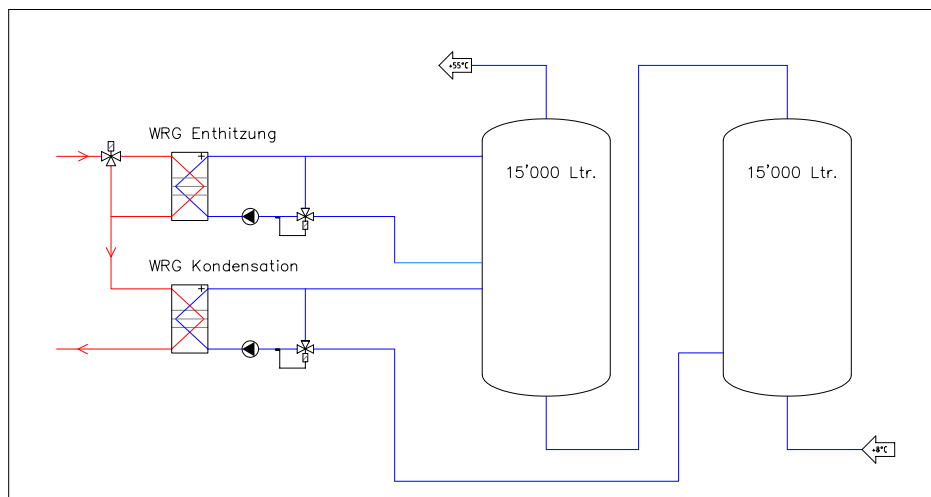
Negativ:

- Höhere Investitionskosten, da 2 separate Wärmetauscher inkl. Anschluss notwendig sind.

Gewählt:

- Abwärmenutzung mit 2 WRG-Tauschern.

Gewählt habe ich die zweite Variante mit beiden Tauschern, da nicht das gesamte Warmwasser nachgewärmt werden muss.



Variante 2: Nutzung der Erhitzungs- und Kondensationswärme über 2 voneinander unabhängige WRG-Tauscher

Anlagenprojektierung

Nachdem nun sämtliche Systeme der Anlage definiert wurden, konnte mit der Projektierung gestartet werden. Dabei habe ich folgende Hauptkomponenten gewählt:

- 3er Verbund DWM 8 Zylinder mit einer Kälteleistung von 156kW;
- Kältemittel R134a;
- Eigendimensionierter Abscheider DN500;
- Rückkühlnetz mit Ethylenglykol 34%;
- Rückkühler mit einer Leistung von 240kW;
- Kälte-trägernetz mit Propylenglykol 38%, da bei einer Leckage der Kälte-träger mit dem Lebensmittel in Berührung kommt;
- Eisspeicher mit einer Kapazität von 1500kWh;
- Abwärmenutzung mit 2 WRG-Tauschern.

Schlusswort

Die Projektierung der Kälteanlage stellte für mich eine große Herausforderung dar.

Die erhoffte Anwendung des in der Schule erlernten Stoffes und die entsprechende Weiterbildung im Rahmen dieser Diplomarbeit konnten meiner Ansicht nach erfüllt werden.

Die Technikerschule TS HKKS in Bern kann ich nur weiterempfehlen. Nicht nur das im Alltag benötigte Fachwissen in der Kältetechnik ist sehr wertvoll, sondern auch das erlernte Wissen im Bereich Hydromechanik und Regeltechnik kann ich seit der Ausbildung im Alltagsgeschäft einbeziehen. Die Technikerschule gibt jedem Absolventen ein breites Fachwissen im ganzen Haustechnikbereich. ■