

Diplomarbeit

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die
Anlagentechnik der Firma Veltum

Vorgelegt am: 19.08.2016

Von: Ralf Heinemann
Holzweg 4
34497 Korbach

Studiengang: Versorgungs- und Umwelttechnik

Studienrichtung: Technische Gebäudesysteme

Seminargruppe: VU-13/1

Matrikelnummer: 4001314

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Holger Hahn (BA Glauchau)

Dipl.-Ing. Stefan Veltum (Fa. Veltum)

Themenblatt Diplomarbeit

SG Versorgungs- und Umwelttechnik

Student: **Ralf Heinemann**
Matrikelnummer: **4001314**
Seminargruppe: **4VU13-1**

Thema der Diplomarbeit

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik
der Fa. Veltum

Gutachter/ Betreuer: **Dipl.-Ing. Stefan Veltum**
Gutachter (Studienakademie): **Prof. Dr. Holger Hahn**

Ausgabe des Themas: **30.05.2016**
Abgabe der Arbeit an den SG am: **22.08.2016, 14:00:00**



Prof. Dagmar Menzel
Vorsitzende des Prüfungsausschusses
Technik

Berufsakademie Sachsen
Staatl. Studienakademie Glauchau
Kopernikusstraße 51
08371 Glauchau
Tel. (0 37 63) 173 - 142
Fax (0 37 63) 173 - 163



Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Glauchau **Dienststz** Kopernikusstraße 51, 08371 Glauchau
Telefon +49 (0)3763/173-0, **Telefax** +49 (0)3763/173-180, **URL** www.ba-glauchau.de, **Mail** info@ba-glauchau.de
Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte Dokumente.

www.ba-glauchau.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Gleichungsverzeichnis	VIII
Formelzeichen	X
Vorwort.....	1
1 Einleitung	2
2 Kühllastberechnung nach VDI 2078.....	4
3 Erstellung der Jahresdauerlinie.....	6
4 Die Anlagentechnik der Firma Veltum.....	12
4.1 Aktuelle Anlagentechnik.....	12
4.1.1 Heizungstechnik.....	12
4.1.2 Kältetechnik	17
4.2 Geplante Änderung der Anlagentechnik	18
5 Absorptionskälteaggregate	39
5.1 Kälteaggregat WEGRACAL SE 15 der Firma EAW	39
5.2 Kälteaggregat Typ Yazaki WFC-SC 05 der Firma Yazaki.....	45
5.3 Kälteaggregat der Firma Invensor.....	49
6 Wirtschaftlicher Vergleich nach VDI 2067	54
6.1 Berechnungsweg der Annuitätenmethode	54
6.1.1 Kapitalgebundene Kosten	54
6.1.2 Bedarfsgebundene Kosten.....	57
6.1.3 Betriebsgebundene Kosten.....	60
6.1.4 Sontige Kosten.....	61
6.1.5 Erlöse	61
6.1.6 Annuität der Jahresgesamtzahlungen.....	62
6.2 Annuitätenmethode WEGRACAL SE 15.....	63
6.3 Annuitätenmethode Yazaki WFC-SC 05.....	72
6.4 Annuitätenmethode Invensor	75

6.6 Vergleich der Kältegestehungskosten.....	78
7 Auswertung und Empfehlung	79
8 Quellenverzeichnis.....	82
9 Anhang.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 1 Kühllastberechnung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 2 Berechnung der Jahresdauerlinie und Bestimmung der im Grundlastbetrieb erzeugten Kälteenergie	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 3 Grundrisszeichnungen der Firma Veltum	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 4 Anlagenschema der Firma Veltum im Bestand	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 5 Anlagenschema der Firma Veltum Neu	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 6 Angebot EAW	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 7 Technische Daten Wegracal SE 15.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 8 Angebot Firma Gasklima (Yakazi)	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 9 Technische Daten Yakazi.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 10 Angebot Invensor	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 11 Technische Daten Invensor LTC 15 e plus	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 12 Angebot Huckle (Rückkühler).....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 13 Technische Daten Lüftungsgerät.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 14 Berechnung MAG Reflex.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 15 Angebot Firma Veltum (Installation) ...	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 16 Funktion des Leistungsdiagramms Wegracal	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 17 Funktion des Leistungsdiagramms Yazaki	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang 18 Funktion des Leistungsdiagramms Invensor	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10 Ehrenwörtliche Erklärung.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Firmensitz der Firma Veltum vor der Erweiterung 2015 [1].....	2
Abbildung 1.2 Firmensitz der Firma Veltum nach der Erweiterung [1].....	2
Abbildung 3.1 Jahresdauerlinie [5]	6
Abbildung 3.2 Jahresdauerlinie der maximalen Kühllast	7
Abbildung 3.3 Jahresdauerlinie mit stündlicher Darstellung der Kühllast	8
Abbildung 3.4 Jahresdauerlinie mit Darstellung der Grundlast und Spitzenlast.....	10
Abbildung 4.1 Hydraulikschema der Heizungsanlage [1]	12
Abbildung 4.2 3D- Ansicht der externen Heizzentrale [1]	13
Abbildung 4.3 Installation der externen Heizzentrale [1].....	13
Abbildung 4.4 Schnitt der externen Heizzentrale [1].....	13
Abbildung 4.5 Hackschnitzelbefüllereinrichtung [1].....	13
Abbildung 4.6 Installation in der internen Heizzentrale [1].....	14
Abbildung 4.7 Deckenstrahlplatten im Ausstellungsbereich [1]	16
Abbildung 4.8 Klimadecke im neuen Anbau [1]	17
Abbildung 4.9 Schema des Kältenetzes [1]	18
Abbildung 4.10 Schema der Anbindung des Absorptionskälteaggregats auf der Heizungsseite [1].....	19
Abbildung 4.11 Zustände der Pufferspeicher Be- und Entladung [1].....	20
Abbildung 4.12 Energieinhalt der Pufferspeicher in Abhängigkeit der Abnahme und Beladung	21
Abbildung 4.13 Ausschnitt der Grundrisszeichnung der ersten Aufstellmöglichkeit der Absorptionskältemaschine [1].....	23
Abbildung 4.14 Zweite Aufstellmöglichkeit der Absorptionskältemaschine [1].....	24
Abbildung 4.15 Alternative Heizungsanbindung bei der ersten Aufstellmöglichkeit .	25
Abbildung 4.16 Tischkühler für trocken Rückkühlung[12].....	26
Abbildung 4.17 Trockenkühler [16]	27
Abbildung 4.18 Darstellung der Befeuchtung in einem h-x Diagramm [13]	28
Abbildung 4.19 Auszug aus dem VDMA Einheitsblatt 24649 [15]	29
Abbildung 4.20 Hybridkühler für eine feuchte Rückkühlung [16]	30
Abbildung 4.21 Offener Verdunstungskühlturm der Firma EWK [16].....	31
Abbildung 4.22 Geschlossener Verdunstungskühlturm der Firma EWK [16].....	32
Abbildung 4.23 Kälteseitige Anbindung der Absorptionsmaschine [1]	36
Abbildung 5.1 Absorptionskältemaschine Wegracal SE 15 [6]	39
Abbildung 5.2 Ansichten der Absorptionskältemaschine Wegracal SE 15 [6]	40
Abbildung 5.3 Leistungsdiagramm Wegracal SE15 [6].....	41
Abbildung 5.4 Anforderungen an das Nachspeisewasser nach VDI 3803 [14].....	42
Abbildung 5.5 Schemenvorschlag von EAW [6,26]	44
Abbildung 5.6 Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC 05 [27]	45

Abbildung 5.7 Ansichtszeichnung Yazaki WFC-SC 05 [27,28]	46
Abbildung 5.8 Leistungsdiagramm in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur [27]	47
Abbildung 5.9 Wärmebilanz der Absorptionskältemaschine [27,28]	48
Abbildung 5.10 Kühlturm der Firma Huckle mit einer Rückkühlleistung von 43 kW..	49
Abbildung 5.11 Invensor LTC 10 e plus [30]	50
Abbildung 5.12 Ansichten der Adsorptionskältemaschine [30]	51
Abbildung 5.13 Leistungsdiagramm Invensor LTC 10 e plus [30]	52
Abbildung 5.14 Anlagenschema Invensor [30]	53
Abbildung 6.1 tendenzieller Verlauf der Barwerte der Ersatzbeschaffungen [31]	56
Abbildung 6.2 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Wegracal SE 15	66
Abbildung 6.3 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Yazaki WFC-SC05	72
Abbildung 6.4 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Invensor LTV 10 e plus	75
Abbildung 6.5 Vergleich der Kältegestehungspreise	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Kühllasten der einzelnen Räume	4
Tabelle 6.1 Ausgangswerte für die Annuitätenberechnung	64
Tabelle 6.2 Kälteenergie und Betriebsstunden Wegracal	65
Tabelle 6.3 Berechnung Wegracal	71
Tabelle 6.4 Kälteenergie und Betriebsstunden Yazaki	73
Tabelle 6.5 Berechnung Yazaki	74
Tabelle 6.6 Kälteenergie und Betriebsstunden Invensorl	76
Tabelle 6.7 Berechnung Invensor	77
Tabelle 6.8 Berechnungsendwerte der Aggregate	78

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1	Wärmemengengleichung
Gleichung 2	Rückkühlerleistung für Kompressionskälte
Gleichung 3	Rückkühlerleistung für Absorptionskälte
Gleichung 4	Leistungsverhältnis der Rückkühler
Gleichung 5	Endenergiebedarf der Rückkühlung
Gleichung 6	Expansionskoeffizient
Gleichung 7	Ausdehnungsvolumen
Gleichung 8	Mindestwasservorlage
Gleichung 9	Enddruck
Gleichung 10	Mindestnennvolumen MAG
Gleichung 11	Auswahl Nutzinhalt MAG
Gleichung 12	Anfangsdruck
Gleichung 13	Speichermasse Pufferspeicher
Gleichung 14	kv Berechnung
Gleichung 15	Ventilautorität
Gleichung 16	Zinsfaktor
Gleichung 17	Annuitätsfaktor
Gleichung 18	Preisänderungsfaktor
Gleichung 19	Barwert der Ersatzinvestition
Gleichung 20	Barwert des Restwertes
Gleichung 21	Annuität der kapitalgebundenen Kosten
Gleichung 22	Preisdynamischer Barwertfaktor
Gleichung 23	Preisdynamischer Barwertfaktor (alternativ)
Gleichung 24	Bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr
Gleichung 25	Laufzeit der Absorptionskältemaschine
Gleichung 26	Energieaufwand [Wärme, Strom, Wasser]
Gleichung 27	Erforderlicher Wasserbedarf
Gleichung 28	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten
Gleichung 29	Instandhaltungskosten im ersten Jahr
Gleichung 30	Annuität der betriebsgebundenen Kosten
Gleichung 31	Annuität der sonstigen Kosten
Gleichung 32	Annuität der Erlöse

Gleichung 33	Annuität der Erlöse bei Einmalzahlung
Gleichung 34	Gesamtannuität
Gleichung 35	Bildung der spezifischen Kälteerzeugungskosten
Gleichung 36	Zusammensetzung der kapitalgebundenen Kosten
Gleichung 37	Annuität aller betriebsgebundenen Kosten
Gleichung 38	Wärmebedarf durch das BHKW
Gleichung 39	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten

Formelzeichen

$\dot{Q}_O$	-	Kälteleistung	[kW]
P_{el}	-	elektrische Leistungsaufnahme	[kW]
$\dot{Q}_H$	-	Heizleistung	[kW]
Q_{Puffer}	-	Energieinhalt Pufferspeicher	[kW]
V_{Puffer}	-	Pufferspeichervolumen	[kW]
ρ	-	Dichte	[kW]
c	-	spezifische Wärmekapazität	[kW]
$\Delta\vartheta_{VL/RL}$	-	Temperaturspreizung	[kW]
h	-	spezifische Enthalpie	[kW]
x	-	spezifischer Wassergehalt	[kW]
$Q_{R,el}$	-	Endenergiebedarf der Rückkühlung	[kWh/a]
$\dot{Q}_{R,KKM}$	-	Rückkühlleistung der Kompressionskältemaschine	[kW]
$\dot{Q}_{R,AKM}$	-	Rückkühlleistung der Absorptionskälte	[kW]
$\dot{Q}_C$	-	Kondensator-/ Verflüssigerleistung	[kW]
$\dot{Q}_A$	-	Absorberabwärmeleistung	[kW]
$q_{R,el}$	-	spezifische elektrischer Leistungsbedarf	[kW/kW]
$f_{R,el}$	-	mittlerer Nutzungsfaktor für die Rückkühlung	[]
t_R	-	mittlere jährliche Betriebszeit	[h/a]
e	-	Heizleistung	[kW]
V_{ex}	-	Heizleistung	[kW]
$V_{wr,min}$	-	Heizleistung	[kW]

p_{fin}	-	Heizleistung	[kW]
$V_{N,min}$	-	Heizleistung	[kW]
p_{ini}	-	Heizleistung	[kW]
p_{siv}	-	Ansprechdruck des Sicherheitsventil	[bar]
$\rho_{\vartheta max}$	-	Dichte des Mediums bei maximaler Betriebstemperatur	[kg/dm ³]
$\rho_{\vartheta min}$	-	Dichte des Mediums bei minimaler Betriebstemperatur	[kg/dm ³]
V_{System}	-	Volumen des Mediums im System	[dm ³ ; Liter]
V_N	-	Nennvolumen des ausgewählten MAGs	[dm ³ ; Liter]
m	-	Heizleistung	[kW]
$\dot{m}$	-	Heizleistung	[kW]
t	-	Heizleistung	[kW]
k_V	-	Ventilkennwert	[m ³ /h]
$\dot{V}$	-	Volumenstrom/ nominaler Durchsatz	[m ³ /h]
Δp_V	-	Druckverlust über dem Ventil	[m ³ /h]
$a; P_V$	-	Ventilautorität	[]
Δp_{var}	-	Druckverlust über den volumenstromvariablen Teil der Anlage	[bar]
q	-	Zinsfaktor	[]
i	-	Zinssatz	[%]
a	-	Annuitätsfaktor	[]
T	-	Betrachtungszeitraum	[a]
r	-	Preisänderungsfaktor	[]

j	-	Preisänderungssatz	[]
A_n	-	Barwert der Ersatzinvestition	[€]
A_0	-	Investitionskosten	[€]
n	-	Anzahl der Ersatzinvestitionen im Betrachtungszeitraum	[]
T_N	-	Rechnerische Nutzungsdauer der Anlage	[a]
B_{RW}	-	Barwert des Restwertes	[€]
T	-	Betrachtungszeitraum	[a]
$A_{N,K}$	-	Jährliche Annuität der Kapitalgebundenen Kosten	[€/a]
$A_{0,1,...n}$	-	Barwert der ersten, zweiten, ..., n- ten Ersatzinvestition	[€]
b	-	preisdynamischer Barwertfaktor	[]
A_{V1}	-	bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr	[€/a]
$Q_{Wärme}$	-	Energieaufwand der Wärmeerzeugung	[kWh/a]
$Q_{Kälte}$	-	Energieaufwand der Kälteerzeugung	[kWh/a]
Q_{Strom}	-	Stromaufwand	[kWh/a]
Q_{Wasser}	-	Wasseraufwand	[m³/a]
$Preis$	-	Energie- oder Wasserpreis	[€/kWh; €/m³]
t_{AKM}	-	Laufzeit der Absorptionskältemaschine	[h/a]
$Q_{Kälte,GL}$	-	Erzeugte Kälteenergie der Grundlastanlage	[kWh/a]
$\dot{Q}_{AKM}$	-	Kälteleistung der Absorptionskältemaschine	[kW]
$Q_{Aufwand}$	-	Energieaufwand	[kWh/a]
$\dot{Q}_{Aufwand}$	-	Leistung des jeweiligen Bereiches	[kW]
$V_{Aufwand}$	-	erforderlicher Wasserbedarf	[m³/a]
$\dot{V}_{Aufwand}$	-	erforderlicher Wasservolumenstrom	[m³/h; l/s]

$A_{N,V}$	-	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten	[€/a]
A_{IN}	-	Instandhaltungskosten im ersten Jahr	[€/a]
f_{Inst}	-	Faktor für den Aufwand der Instandsetzung	[]
f_{W+Insp}	-	Faktor für Wartung und Inspektion	[]
$A_{N,B}$	-	Annuität der betriebsgebundenen Kosten	[€/a]
A_{B1}	-	Betriebsgebundene Kosten für Bedienung im ersten Jahr	[€]
b_B	-	Preisdynamischer Barwertfaktor der betriebsgebunden Kosten	[]
b_{IN}	-	Preisdynamischer Barwertfaktor der Instandhaltungskosten	[]
$A_{N,S}$	-	Annuität der sonstigen Kosten	[€/a]
A_{S1}	-	Sonstige Kosten in dem ersten Jahr	[€/a]
b_S	-	Preisdynamischer Barwertfaktor für sonstige Kosten	[]
A_{NE}	-	Annuität der Erlöse	[€/a]
E_1	-	Erlöse im ersten Jahr	[€]
b_E	-	Preisdynamischer Barwertfaktor für Erlöse	[]

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde im 6. Praxissemester (30.05.2016-22.08.2016) des dualen Studiums der BA Glauchau in der Firma Veltum GmbH in Waldeck-Sachsenhausen erstellt. Mit dieser Diplomarbeit soll der Titel Diplom-Ingenieur für Versorgungs- und Umwelttechnik erlangt werden.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern der Firma Veltum und den Mitarbeitern der Firmen Gasklima, EAW, Abrotec und Invensor, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei Hermann Wagener und Stefan Veltum für das entgegengebrachte Vertrauen und die konsequente Unterstützung während der gesamten dreijährigen Studienzeit bedanken.

Des Weiteren bin ich meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Dipl.-Ing Holger Hahn, zu großem Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Diplomarbeit verpflichtet. Durch konstruktive Gespräche konnte ich neue Blickweisen zu dem Thema gewinnen und dadurch neue Ansätze für die Diplomarbeit entwickeln.

Nicht zu allerletzt bedanke ich mich bei meiner Schwester, Martina Heinemann, und meiner Cousine, Sabrina Wolff, für die Korrektur der zahlreichen schriftlichen Arbeiten, diese Diplomarbeit mit inbegriffen, die im Rahmen des Studiums erstellt wurden.

1 Einleitung

Die Firma Veltum ist ein mittelständiger Betrieb in der Heizungs-, Sanitär-, Lüftungs-, Klima- und Ökologiebranche. Das Unternehmen plant versorgungstechnische Anlagen und installiert diese. Die Firma ist im nordhessischen Sachsenhausen im Landkreis Waldeck-Frankenberg ansässig (Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1 Firmensitz der Firma Veltum vor der Erweiterung 2015 [1]

Im Jahr 2015 wurde die Ausstellung um einen Anbau, den „V-Cube“, erweitert (Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2 Firmensitz der Firma Veltum nach der Erweiterung [1]

Durch den Anbau und struktureller Änderungen des bestehenden Gebäudes hat sich der Kühlbedarf des Gebäudes erhöht. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die aktuelle Kühllast nach dem dynamischen Verfahren der VDI 2078, die Jahresdauerlinie und somit eine Kältegrundlast ermittelt. Über die erforderliche Kältegrundlast soll ein Absorptionskälteaggregat ausgelegt und in die Anlagentechnik der Firma Veltum integriert werden. Als Wärmequelle für die Absorptionskälte dienen das Erdgasblockheizkraftwerk, das Brennstoffzellenblockheizkraftwerk und eine thermische Solaranlage, welche bei Bedarf aufgerüstet wird. Die Einbindung der Absorptionskälte in die bestehende Anlagentechnik und die Empfehlung der Betriebsweise sind ebenfalls Bestandteil dieser Diplomarbeit. Des Weiteren werden die in Frage kommenden Kälteaggregate auf Basis der Wirtschaftlichkeit nach dem Annuitätenverfahren der VDI 2067 verglichen.

Die theoretischen Grundlagen der Kälteprozesse und Kennwerte sind in der Studienarbeit „Kompressions-, Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen“[2] von Ralf Heinemann beschrieben und werden daher nicht in dieser Diplomarbeit behandelt. Die Studienarbeit wurde als Vorarbeit für diese Diplomarbeit im Rahmen des 5. und 6. Semesters des Studiums an der BA Glauchau erstellt und am 04.05.2016 in Glauchau abgegeben.

2 Kühllastberechnung nach VDI 2078

In der VDI 2078 „Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)“ sind die Verfahren zur Ermittlung der Kühllast beschrieben. Für diese Diplomarbeit wird das dynamische (EDV) Verfahren verwendet. Die verwendete Berechnungssoftware C.A.T.S. (Computer and Technology Service) ist ein auf AutoCAD basierendes Programm. Alle Ergebnisse der Kühllastberechnung sind im Anhang 1 aufgeführt. In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 2.1) sind nur die maximalen Kühllasten der einzelnen Räume aufgelistet.

Simulationseinstellungen											
Sommerzeit Korrektur : Aus			Direkte Sonnenstrahlung : Ein			Berücksichtigte Monate					
Alle innere Lasten : Ein			Diffuse Sonnenstrahlung : Ein			J	F	M	A	M	J
Feuchte innere Lasten : Ein			Klimazone :			X	X	X	X	X	X
Regelung berücksichtigen : Ja			Wetterperiode : geringe Trübung			J	J	A	S	O	N
						D					
						X	X	X	X	X	X
						Stunde : 17					
						Monat : Juli					

Raumkennzeichnung			Lasten								
Ebene	Raum		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
Nr.	Nr.	Bezeichnung	Konv.	Potenz.	Rauml.	AF	BT	Strahl.	gesamt	feucht	trocken
[-]	[-]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
OG	11	Großraumbüro	-1769	0	380	-62	-697	-1253	-3400	-298	-3102
OG	12	Projektteam RAD	-1119	0	187	-31	-341	-733	-2037	-199	-1838
OG	13	Projektteam JE	-1150	0	191	-31	-351	-715	-2055	-199	-1856
OG	14	Projektteam WA/NI	-1120	0	192	-31	-351	-734	-2046	-199	-1847
OG	15	Projektteam QM	-1119	0	182	-31	-331	-731	-2029	-199	-1830
OG	17	Sekretariat	-555	0	96	-15	-182	-377	-1033	-99	-934
OG	18	Sekretariat 2	-555	0	95	-15	-175	-376	-1027	-99	-928
OG	19	Buchhaltung	-1208	0	198	-36	-380	-864	-2291	-199	-2092
OG	20	Geschäftsführung	-1254	0	232	-77	-507	-1360	-2966	-50	-2916
OG	21	Technische Leitung	-1322	0	141	-44	-395	-1178	-2799	-99	-2700
OG	22	Kaufmännische Leitung	-1321	0	137	-44	-387	-1174	-2789	-99	-2690
OG	23	Besprechung 1	-1502	0	137	-44	-387	-1079	-2874	-248	-2626
OG	24	Besprechung 2	-463	0	73	-0	-166	-133	-690	-199	-491
OG	25	Besprechung 3	-884	0	73	-0	-166	-298	-1275	-298	-977
OG	26	Besprechung 4	-488	0	50	-0	-114	-248	-799	-99	-700
OG	27	Besprechung 5	-558	0	91	-26	-212	-487	-1192	-199	-993
OG	28	Büro	-1310	0	238	-85	-596	-1720	-3473	-50	-3423
OG	29	Küche 2	-1122	0	174	-41	-412	-1367	-2767	-0	-2767
OG	41	Server	-1000	0	36	-0	-80	-939	-1984	-0	-1984
EG	01	Ausstellung	-12374	0	1901	-935	-4444	-5016	-20869	-4074	-16795
EG	02	Besprechung Waldeck	-1278	0	112	-62	-168	-680	-2076	-447	-1629
EG	03	Besprechung Edersee	-903	0	74	-39	-108	-443	-1420	-348	-1072
EG	04	KUNDENDIENSTBÜRO (BEST.) - EG.02	-1916	0	215	-117	-307	-1705	-3830	-248	-3582
EG	09	Lagerbüro	-877	0	211	-62	-422	-941	-2092	-99	-1993
Summen :			-37167	-0	5416	-1828	-11679	-24551	-69813	-8048	-61765

Tabelle 2.1 Kühllasten der einzelnen Räume

Für die Berechnung wurde für alle Personen der Aktivitätsgrad II „sitzende Tätigkeit (Büro, Schule, Labor) 125 W/Person gesamt“ [3] angenommen. Des Weiteren sind Computer mit 100 W und Monitore mit 55 W je Monitor nach dem C.A.T.S. Rechenkern angenommen. Bürozubehör, wie zum Beispiel Ladekabel und Telefone,

wurden mit 50 W pro Arbeitsplatz beaufschlagt [4]. Somit hat ein Arbeitsplatz mit einem Computer und zwei Monitoren eine zusätzliche Wärmeleistung von 260 W aufgrund der Büroausstattung. Dadurch ergibt sich je Arbeitsplatz eine thermische Leistung von 385 W. Weitere interne Wärmequellen sind der Plotter, drei Drucker beziehungsweise Kopierstationen, zwei Starboards und ein Beamer. Die Wärmeleistung für die Beleuchtung wurde aufgrund der LED Beleuchtung mit Tageslichtsteuerung auf einen mittleren Wert von 5 W/m² festgelegt [4]. Aktuell ist die Serveranlage mit einem eigenen Splitgerät ausgestattet, soll aber zur Erhöhung der Grundkühllast über das reguläre Kältenetz versorgt werden. Die thermische Leistung des Servers liegt bei 2 kW.

Die ermittelte Gesamtkühllast von 69,8 kW beinhaltet die feuchte (8 kW) und die trockene (61,8 kW) Kühllast der zu klimatisierenden Räume des Firmengebäudes. Da die Luftauslässe jedoch noch ohne Kondensatanschluss ausgeführt sind, ist die abführbare thermische Leistung durch den Taupunkt der Raumluft begrenzt, sodass an Tagen mit einer hohen Luftfeuchtigkeit eine Erhöhung der Raumlufttemperatur nicht auszuschließen ist, auch wenn die Kälteleistung zur Verfügung steht. Das hat zur Folge, dass die berechnete Kühllast nicht zu hundert Prozent als Auslegungsleistung für die Kälteaggregate herangezogen werden kann, da hierdurch eine Überdimensionierung der Anlage stattfinden würde. Aus diesem Grund ist die Kälteanlage unterdimensioniert. Sollten Auslässe mit Kondensatabläufen installiert werden, kann die Kälteleistung erhöht werden. Zudem hat der Ausstellungsbereich eine eigene, in dem Lüftungsgerät verbaute Kompressionsanlage, welche im Kapitel 4.1 beschrieben ist. Der Ausstellungsbereich hat eine Gesamtkühllast von 20.869 kW. Da das Lüftungsgerät die Zuluft auf einem niedrigen Temperaturniveau bereitstellt, muss die Kälteanlage nur die Leistung für die Klimadecke bereitstellen. Hierdurch kann die, für die Auslegung der Kälteanlage anzurechnende, Kälteleistung um 10 kW reduziert werden.

3 Erstellung der Jahresdauerlinie

Bei einer Jahresdauerlinie ist in der Regel eine Leistungskurve über den gesamten Jahresverlauf von 8760 Stunden dargestellt (Abbildung 3.1). Auf der Ordinate ist die Leistung als absoluter Wert oder prozentual angetragen. Die Abszisse ist in die Jahresstunden aufgegliedert.

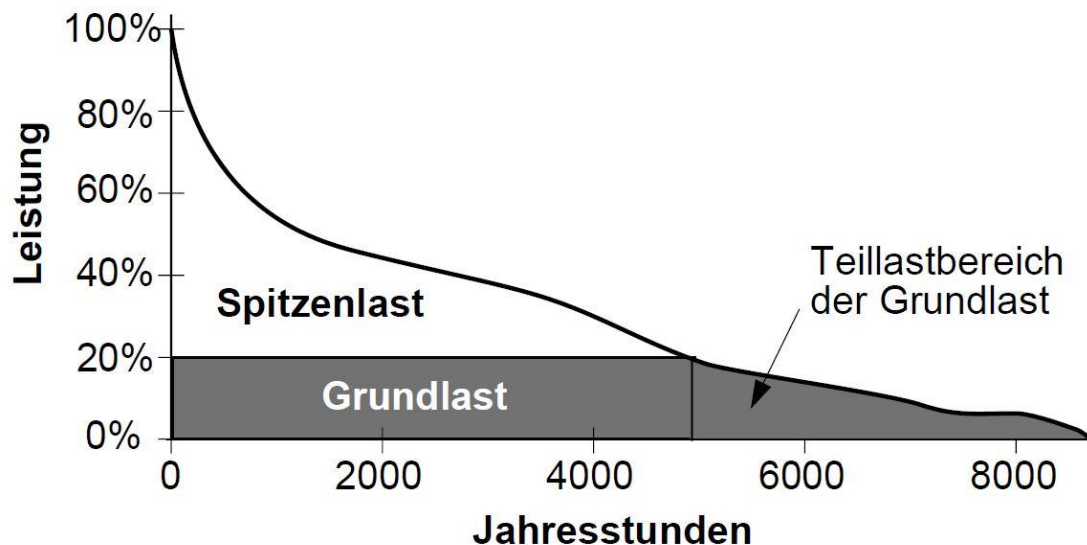


Abbildung 3.1 Jahresdauerlinie [5]

Um einen degressiven Leistungsverlauf zur besseren Unterteilung der Grund- und Spitzenlast darzustellen, sind die Leistungen vom größtem zum kleinsten Wert sortiert und nicht im monatlichen Verlauf von Januar bis Dezember (Glockenkurve) anzutragen. Durch diese Maßnahme kann in dem Diagramm abgelesen werden wie lange eine bestimmte Leistung in einem Jahr benötigt wird. Der nächste Schritt zur Dimensionierung eines Grundlastaggregats kann über eine Festlegung der Betriebsdauer der Grundlastanlage erfolgen. Bei BHKWs zum Beispiel liegt diese Betriebsdauer zur Auslegung bei mindestens 5.000 Stunden [7]. In diesem Fall ist eine senkrechte Linie auf der X-Achse bei dem Wert von 5.000 Stunden anzutragen, um an dem Schnittpunkt mit der Jahresdauerlinie die Leistung abzulesen, die im Volllastbetrieb 5.000 Stunden lang abgenommen werden kann. Eine weitere Möglichkeit ist eine Geräteleistung auszuwählen und zu prüfen wie lange dieses Gerät betrieben wird, um über die Betriebsstunden, welche über den Schnittpunkt der Leistung mit der Jahresdauerlinie ablesbar sind, eine mögliche Wirtschaftlichkeit

zu ermitteln. Diese Methode kommt zum Einsatz, wenn nur bestimmte Leistungsklassen der Geräte zur Verfügung stehen.

Die Auslegung einer Jahresdauerlinie für den Heizfall ist in der alten VDI 2067 Blatt 6 beschrieben. Für den Kühlfall existiert keine Vorschrift zur Erstellung der Jahresdauerlinie, weshalb die Erstellung der Kühllastjahresdauerlinie nach dem oben beschriebenen Vorgehen erfolgte. Es wurden zwei Jahresdauerlinien für den Kühlfall des Firmengebäudes erstellt. Die erste Jahresdauerlinie basiert auf der maximalen Kühllast eines jeden Monats (Abbildung 3.2) und die zweite, aussagekräftigere Jahresdauerlinie basiert auf der stündlichen Kühllast während der Arbeitszeit von 7:00 bis 17:00 Uhr und der Zeit, in denen der Betrieb geschlossen ist (Abbildung 3.3). Die Leistungsangaben zu den jeweiligen Uhrzeiten gehen aus dem Ergebnis der Kühllastberechnung im Anhang 1 auf Seite 702 der Berechnung hervor. Die Leistung für die Lüftung des Ausstellungsbereiches wurde bei der Jahresdauerlinie bereits abgezogen, da diese Leistung nicht über die Kälteanlage bereitzustellen ist.

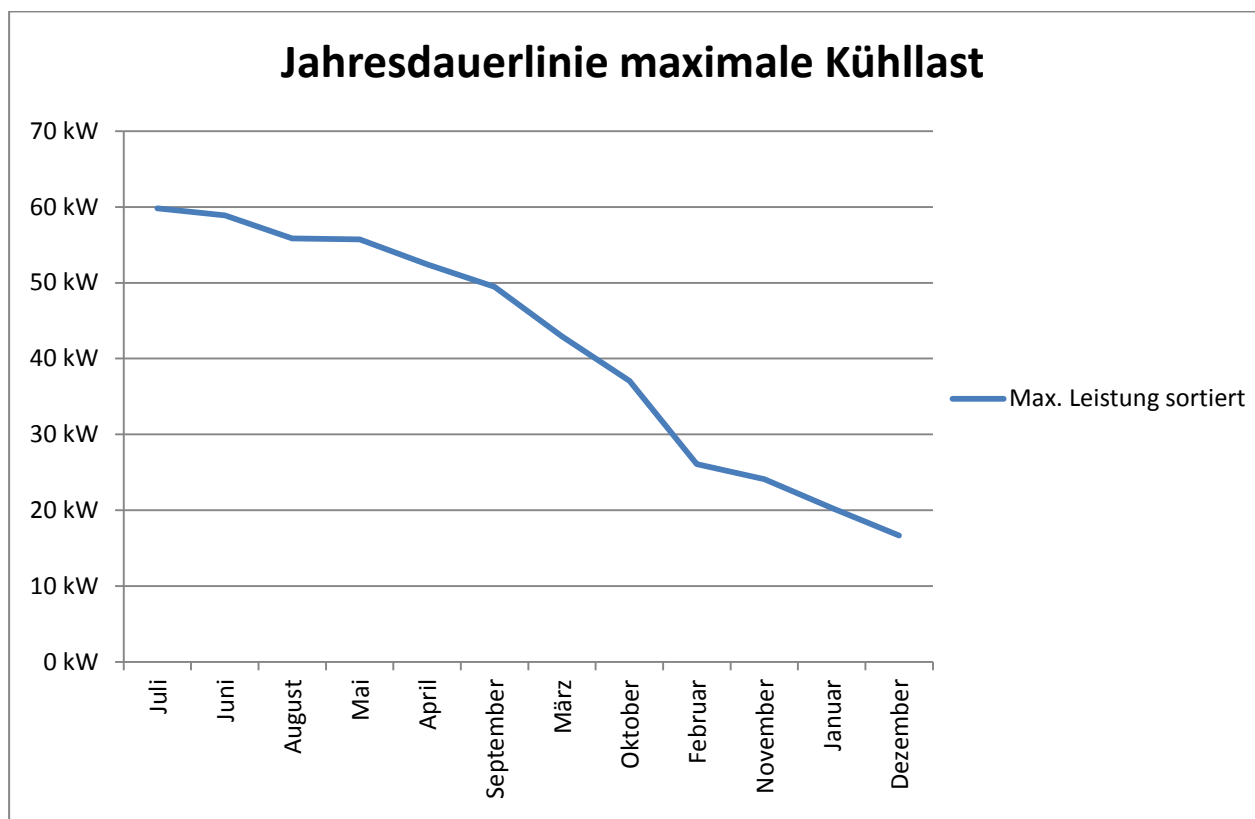


Abbildung 3.2 Jahresdauerlinie der maximalen Kühllast

Da die Kühllastberechnung pro Monat eine maximale Leistung angibt, zeigt das Diagramm die für den jeweiligen Monat erforderliche maximale Kühllast. Diese Darstellung kann nur zur Auslegung der maximalen Leitung herangezogen werden, nicht zur Angabe von Betriebszeiten in Bezug auf Grund- und Spitzenlast. Wird ein einzelnes Aggregat über dieses Diagramm ausgelegt, ist zu beachten, dass ein Zuschlag zur Kälteleistung hinzuzurechnen ist, falls Außenluft zu behandeln ist. Für einen reinen Umluftbetrieb kann die Auslegungskühlleistung gleich der maximalen Kühllast gesetzt werden.

Da bei diesem Projekt ein Grund- und Spitzenlastbetrieb vorgesehen ist, ist eine Darstellung der Leistung in Abhängigkeit der Betriebsstunden erforderlich. Der Datensatz zur Bildung der Jahresdauerlinie (Abbildung 3.3) ist in Anhang 2 dargestellt.

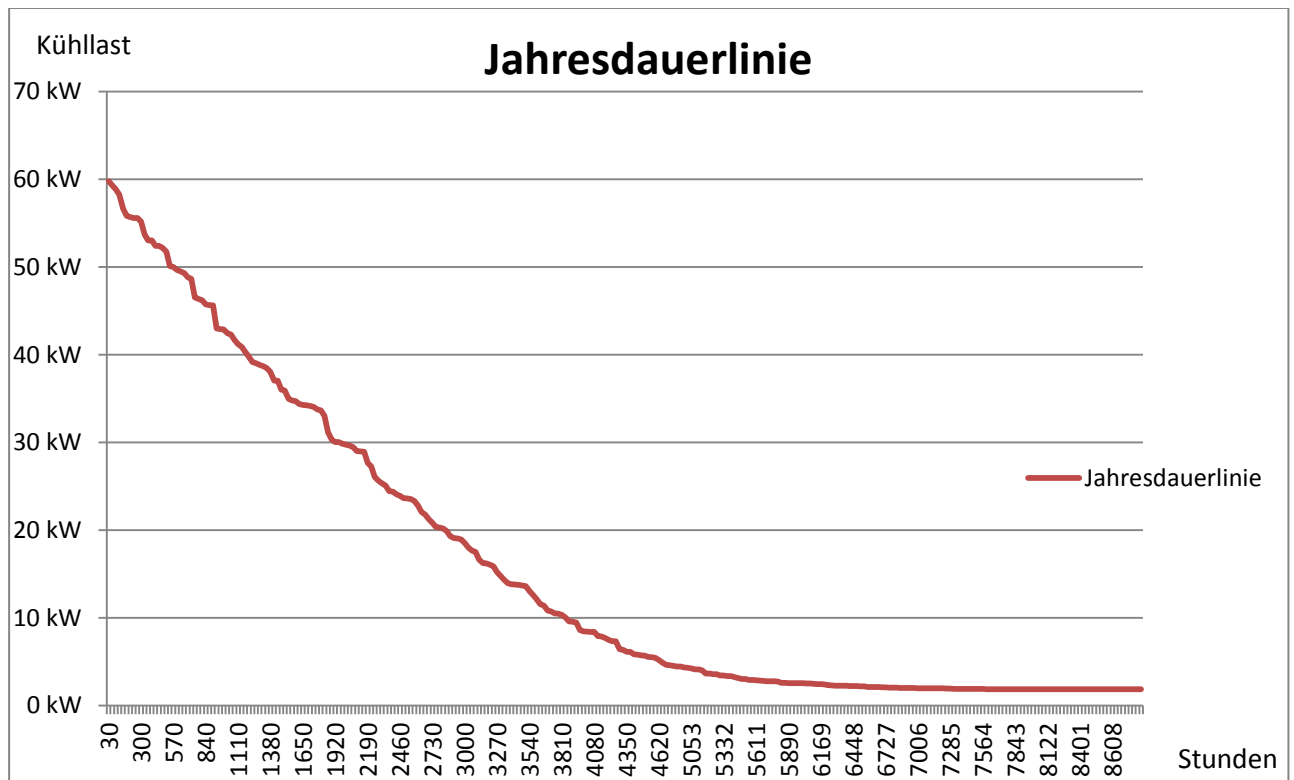


Abbildung 3.3 Jahresdauerlinie mit stündlicher Darstellung der Kühllast

Diese Darstellung ist aussagekräftiger als die Darstellung der maximalen Leistungen, da aus ihr hervorgeht, dass nach der Arbeitszeit nur eine Kühllast von 2 kW anliegt.

Bei der Dimensionierung der Grundlastkälteanlage ist zudem zu beachten, dass die installierten Luftauslässe ohne Kondensatablauf ausgeführt sind, wodurch nicht immer die gesamte Kühllast abgefahren werden kann, selbst wenn die notwendige Kälteleistung bereit steht. Des Weiteren ergab die Kühllastberechnung zum Beispiel auch im Januar eine Kühllast von 29,9 kW (mit Ausstellung), welche aber laut der Aufzeichnungen der Regelung im Januar 2016 nicht benötigt wurde. Durch diesen Umstand sind die Ergebnisse der Kühllastberechnung für die kälteren Monate für den praktischen Betrieb nur bedingt zu berücksichtigen.

Zusätzlich ist zur Dimensionierung der Absorptionskältemaschine die verfügbare thermische Leistung in den Sommermonaten zu beachten. Als Richtwert der Hersteller liegt die thermische Leistung für den Absorptionsbetrieb bei ungefähr dem anderthalbfachen Wert der Kälteleistung [6]. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden thermischen Leistungen im Sommer von 15 kW des BHKWs plus der Leistung der thermischen Solaranlage von 4 kW sollte die Kälteleistung des Aggregats bei maximal 12,6 kW liegen, um einen Dauerbetrieb sicherzustellen. Die aktuell installierte Anlagentechnik ist in Kapitel 4.1 aufgeführt und genauer beschrieben. Durch das große Pufferspeichervolumen der Heizungsanlage, ist es möglich auch eine höhere Leistung bereitzustellen. Dies ist genauer in dem Kapitel 4.2 beschrieben. Aufgrund des Puffervolumens, des Verlaufs der Jahresdauerlinie und den vorgegebenen Aggregatleistungen der Hersteller wird, zur weiteren Betrachtung, eine Kälteleistung von 15 kW verwendet. Im nächsten Schritt ist die Grundlastlinie mit 15 kW in das Jahresdauerliniendiagramm mit den stündlichen Leistungen einzutragen (Abbildung 3.4).

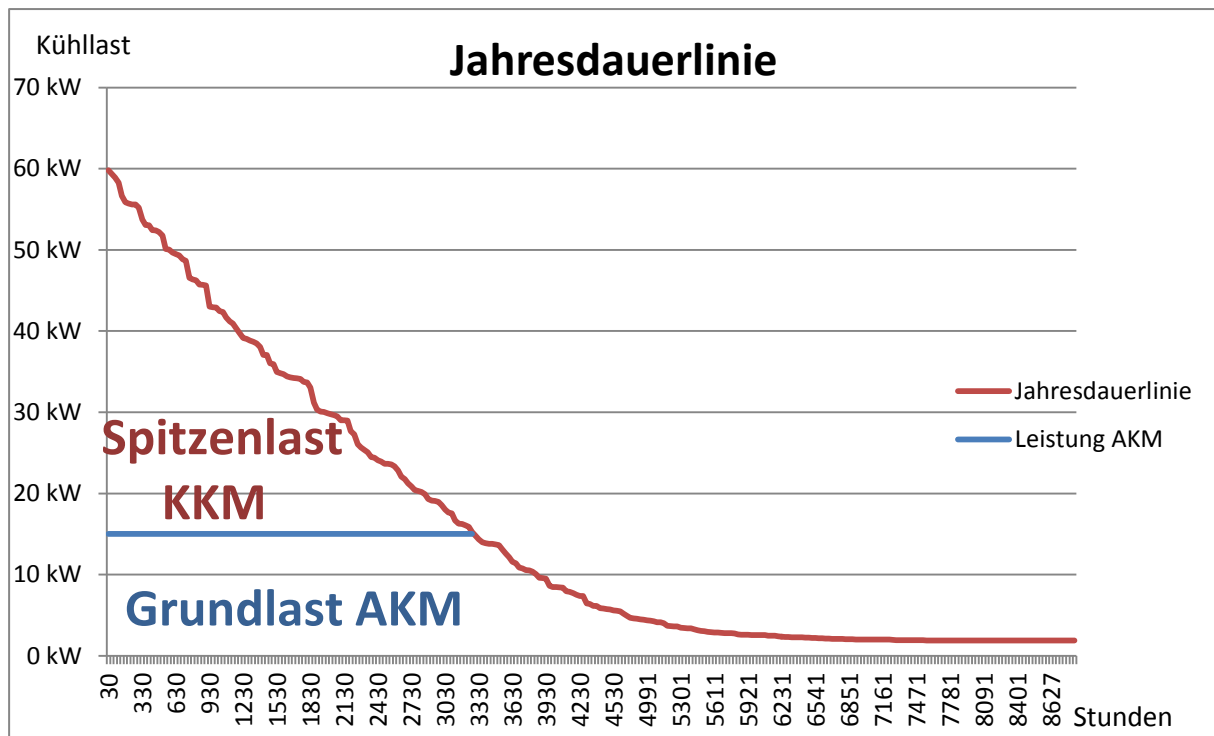


Abbildung 3.4 Jahresdauerlinie mit Darstellung der Grundlast und Spitzenlast

Die maximale Kühllast tritt bis zu 30 Stunden im Jahr auf und beträgt 59,81 kW. Die Summe aus der Kälteleistung der vorhandenen Kompressionskälte mit 34 kW und der geplanten Absorptionskälte mit circa 15 kW beträgt 49 kW. Aus der Berechnung geht hervor, dass die Anlage 660 Stunden unterdimensioniert ist. Da teilweise auch Außenluft aufbereitet wird, ist eine noch höhere Kälteleistung erforderlich. Diese Leistungsspitzen sollen mithilfe des aktuellen und einem eventuell zusätzlich nachzurüstenden Kältepufferspeicher kompensiert werden. Sollte sich der Pufferspeicher komplett entladen, so kann es zu minimalen Komforteinbußen kommen. Da die Leistung zur Vermeidung von Komforteinbußen konstant zur Verfügung stehen müsste, wäre die Anlage außerhalb dieser 660 Betriebsstunden überdimensioniert. Um nicht für einen Großteil der Laufzeit eine zu große Kälteanlage zu betreiben, werden diese Komforteinbuße in Kauf genommen.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass eine Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 15 kW circa 3270 Stunden im Jahr im Vollastbetrieb laufen kann. Die restlichen 5490 Stunden reicht die Kombination der Absorptionskältemaschine mit dem Kältepufferspeicher aus, um die erforderliche Kälteenergie bereitzustellen. Aufgrund der kälteseitigen hohen Betriebstemperaturen ist keine Ammoniak-Wasser Absorptionsmaschine erforderlich. Für den positiven Temperaturbereich über 6 °C

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum werden in der Regel Wasser-Lithiumbromid-Absorptionsanlagen eingesetzt, da diese geringere Investitionskosten-und Betriebskosten verursachen.

4 Die Anlagentechnik der Firma Veltum

4.1 Aktuelle Anlagentechnik

4.1.1 Heizungstechnik

Das aktuelle Hydraulikschema der Anlagentechnik der Firma Veltum ist komprimiert in Abbildung 4.1 und in Originalgröße im Anhang 4 dargestellt. Die Grundrisse des Firmengebäudes sind im Anhang 3 zu finden.

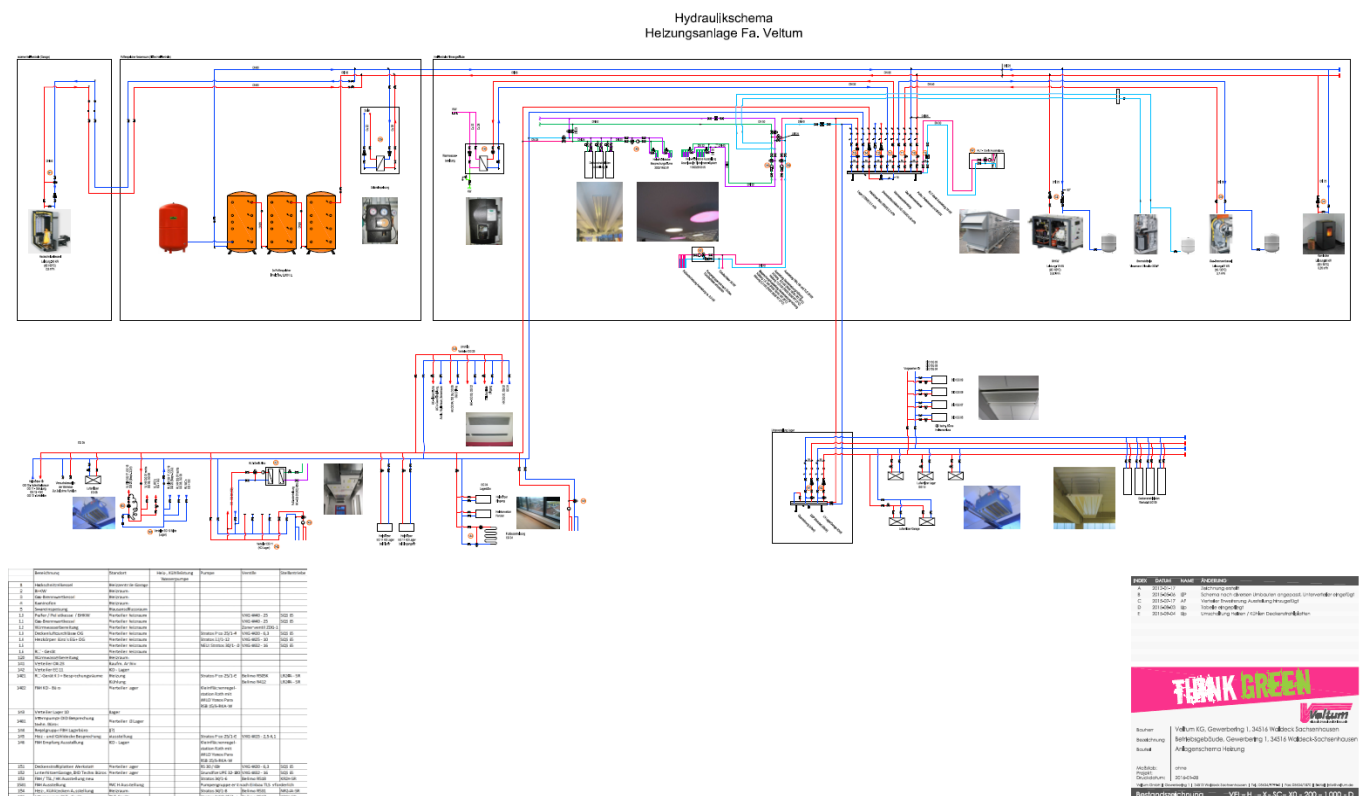


Abbildung 4.1 Hydraulikschema der Heizungsanlage [1]

Um verschiedene Technologien im Einsatz präsentieren zu können, sind mehrere Wärmeerzeuger installiert und hydraulisch eingebunden. In einer außen stehenden, ehemaligen Garage ist eine externe Heizzentrale (Abbildungen 4.2 und 4.3) eingerichtet. In dieser externen Heizzentrale ist ein Hackschnitzelkessel des Fabrikats „Vitoligno 300-H“ der Firma Viessmann mit einer Nennleistung von 80 kW installiert und über Erdleitungen in der Nennweite DN 50 an das Firmengebäude

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

angeschlossen. Die Brennstoffversorgung erfolgt über einen Hackschnitzzellagerraum mit einem Volumen von ca. 37 m³ direkt über der Heizzentrale (Abbildung 4.4). Der Hackschnitzzellagerraum wird über ein außen liegendes Förderschneckensystem (Abbildung 4.5) befüllt. Über einen 3-Wege-Mischventil erfolgt die Rücklaufanhebung, um die erforderliche Mindestrücklauftemperatur des Kessels zu gewährleisten. Um ein Takten des Hackschnitzelkessels zu vermeiden, ist er an die Pufferspeicher in dem Gebäude angeschlossen. Die Betriebstemperaturen dieses Biomassekessels liegen bei 80 °C Vorlauftemperatur und 60 °C Rücklauftemperatur.

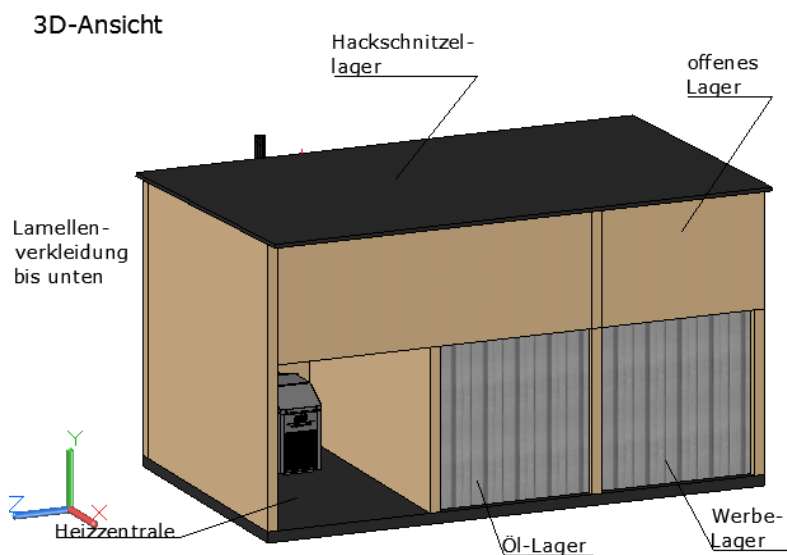


Abbildung 4.2 3D- Ansicht der externen Heizzentrale [1]

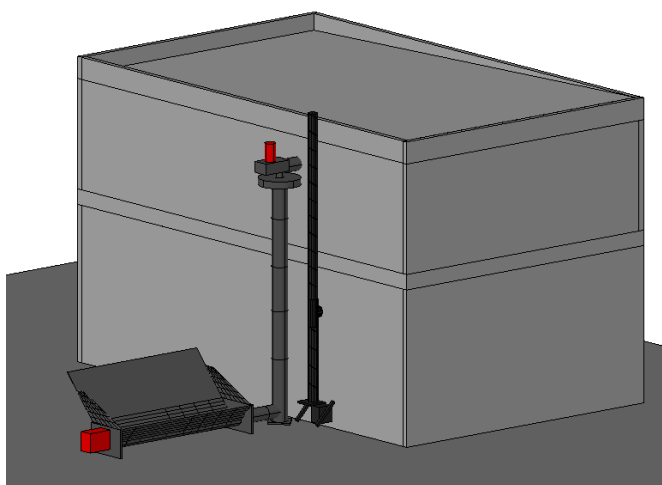


Abbildung 4.5 Hackschnitzelbefülleinrichtung [1]



Abbildung 4.3 Installation der externen Heizzentrale [1]

Seitenansicht Heizcontainer

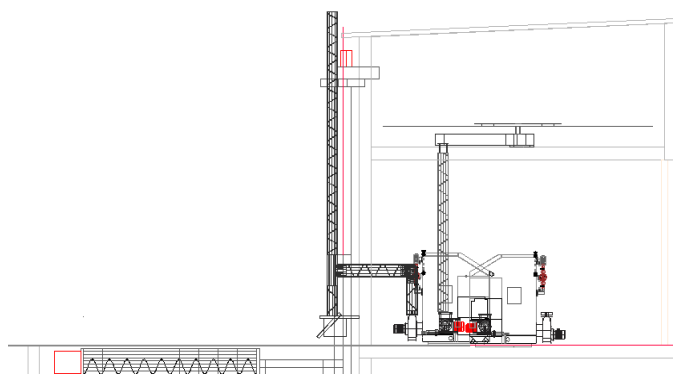


Abbildung 4.4 Schnitt der externen Heizzentrale [1]

In der internen Heizzentrale (Abbildung 4.6) ist ein erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) des Fabrikats „Vitobloc 300 EM 6/15“ der Firma Viessmann installiert. Das BHKW hat eine elektrische Leistung von 6 kW und eine thermische Leistung von 15 kW. Die elektrische Grundlast des Firmengebäudes wird durch die elektrische Leistung des BHKWs gedeckt. Durch einen internen Batteriesatz ist ein Netzersatzbetrieb möglich [7]. Der Netzersatzbetrieb unterscheidet sich zu einem Notstrombetrieb in der Reaktionszeit bei einem Netzausfall. Bei einem Notstrombetrieb kann unterhalb von 5 Sekunden [7] das Netz wieder aufgebaut werden. Diese schnelle Reaktionszeit ist in sehr sensiblen Bereichen, wie zum Beispiel Krankenhäusern, erforderlich. Der Netzersatzbetrieb hingegen darf eine Ausfallzeit von mehreren Sekunden aufweisen und ist damit leichter umsetzbar, da auf mehrere elektrische Kondensatoren verzichtet und die Batteriekapazität eventuell reduziert werden kann.



Abbildung 4.6 Installation in der internen Heizzentrale [1]

Bei beiden Betriebsarten ist eine allpolige Trennung vom Stromnetz des Netzversorgungsunternehmens erforderlich [8]. Ist keine solche Trenneinrichtung installiert, behält sich das Netzversorgungsunternehmen die Möglichkeit vor, das BHKW über ein internes Modul abzuschalten, um Reparaturarbeiten am Netz nicht zu behindern, beziehungsweise die Monteure, die zur Fehlerbeseitigung am Netz arbeiten, nicht zu gefährden. Die Betriebstemperaturen des BHKWs liegen, wie bei

dem Hackschnitzelkessel, bei 80/60°C. Um die elektrische Grundlast so lange wie möglich über das BHKW zu decken, ist das BHKW, genau wie der Hackschnitzelkessel, an drei in Reihe geschaltete 3.000-Liter-Pufferspeicher mit einem Gesamtvolumen von 9.000 Litern angeschlossen.

Zusätzlich ist ein Brennstoffzellenblockheizkraftwerk des Fabrikats „Vitovalor 300-P“, welches von den Firmen Viessmann und Panasonic hergestellt wird, in der Heizzentrale installiert. Das Brennstoffzellenblockheizkraftwerk ist ein Kombigerät mit zwei Wärmeerzeugern. Die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle hat eine elektrische Leistung von 0,75 kW und eine thermische Leistung von 1 kW. Der Brennstoffzellen-Stack kann 20 Stunden betrieben werden und benötigt dann eine Regenerationszeit von 4 Stunden [9]. Zusätzlich zur Brennstoffzelle ist eine Gasbrennwerteinheit in dem Gerät installiert. Die Gasbrennwerteinheit ist im normalen Einfamilienhaus als Spitzenlastbrenner vorgesehen und hat eine Leistung von 19 kW. Die Betriebstemperaturen der Brennstoffzelle liegen bei 70/50°C. Der Wasserkreislauf der Brennstoffzelle ist direkt an den Heiz- und Kühldeckenkreislauf angeschlossen und wird nicht erst bei dem Verteiler eingespeist.

Der dritte Wärmeerzeuger in der internen Heizzentrale ist ein bodenstehender Gasbrennwertkessel vom Fabrikat „Vitocrossal 300“ (Abbildung 4.6) der Firma Viessmann. Der Gasbrennwertkessel hat eine thermische Leistung von 87 kW und ist regelungstechnisch der letzte Wärmeerzeuger, der eingeschaltet wird. Die Betriebstemperaturen dieses Kessels liegen bei 50/30°C und er ist direkt an den Verteiler angeschlossen.

In dem Ausstellungsbereich ist zu Vorführungszwecken ein pelletbetriebener Kaminofen mit Wassertasche des Fabrikats „Pat Waterplus Typ P0“ der Firma Wodtke installiert. Der Kaminofen hat eine thermische Leistung von 8 kW. Die Betriebstemperaturen liegen bei 80/60°C.

Die drei Pufferspeicher stehen nicht in der Heizzentrale, da sie zu viel Platz in Anspruch nehmen und die Besucherkapazität der Heizzentrale stark reduzieren würden. Die Beladung der Puffer erfolgt durch den Hackschnitzelkessel, das Erdgas-BHKW, den Pellet-Kaminofen und durch eine Vakuumröhrensolaranlage mit 4 kW thermischer Leistung.

Die Trinkwasserversorgung des Gebäudes erfolgt über eine Frischwasserstation, welche direkt an dem Verteiler der internen Heizzentrale angeschlossen ist. Den

hygienischen Anforderungen an die Wasserauslauftemperaturen nach den DVGW Arbeitsblättern wird durch eine an der Frischwasserstation installierte Zirkulationspumpe im Dauerbetrieb entsprochen.

Das Erdgeschoss wird über Deckenstrahlplatten (Abbildung 4.7), Fußbodenheizung, Heizkörper und Klimadecken (Abbildung 4.8) beheizt. Die Garage und das Lager sind mit Luftheritzern ausgestattet, welche über eine separate Unterverteilung versorgt werden. In der Werkstatt erfolgt die Beheizung über Deckenstrahlplatten. Alle Büros werden über Deckeninduktionsgeräte, welche im 4-Leiter-System angeschlossen sind, beheizt und gekühlt. Drei Lüftungsgeräte versorgen die einzelnen Bereiche des Firmengebäudes mit der erforderlichen Außenluft und bereiten diese über Wärmerückgewinnung, Heiz-/Kühlregister und Be-/Entfeuchtung auf das erforderliche Temperaturniveau und die erforderliche Luftfeuchtigkeit auf. Durch eine Taupunktregelung wird die tiefste Lufttemperatur im Sommerfall geregelt, da keine Kondensatwannen an den Induktionsauslässen installiert sind. Einzelraumregler erlauben eine raumweise Einstellung der Zulufttemperatur (minimal ein Kelvin über der Taupunkttemperatur) der Büros.



Abbildung 4.7 Deckenstrahlplatten im Ausstellungsbereich [1]



Abbildung 4.8 Klimadecke im neuen Anbau [1]

4.1.2 Kältetechnik

Die Kälteversorgung des Ausstellungsbereiches erfolgt über eine, wie in Kapitel 4.1.1 beschriebenen, an das Kältenetz angeschlossene Klimadecke und eine Kompressionskältemaschine in dem Lüftungsgerät der Ausstellung. Das Lüftungsgerät für den neuen Ausstellungsbereich ist vom Fabrikat X-Cube der Firma Trox und ist mit einem eigenen Kompressionskälteaggregat ausgestattet, welches mit seiner Kälteleistung von 24,7 kW und dem geräteinternen Kreuzstromwärmeübertrager die 5.000m³/h Außenluft im Sommerfall auf bis zu 20 °C abkühlen kann [10]. Aus diesem Grund muss die Kühllast von 10 kW für Personen während den Veranstaltungen nicht von der Kälteanlage abgefahren werden, wodurch sich die Leistung der Kälteanlage reduziert. Die weiteren technischen Unterlagen zu dem Gerät sind im Anhang 13 [10] hinterlegt. Auf einer Bühne im Bereich der Werkstatt sind die Kompressionskältemaschine und ein 1.500-Liter-Pufferspeicher installiert. Die Kompressionskältemaschine ist vom Typ Epsilon 30 ST der Firma Air Blue (später Bluebox) und hat eine Kälteleistung von 34 kW. Mittlerweile wurde die Firma Bluebox von der Firma Swegon aufgekauft [11], sodass dieses Modell in dieser Ausführung nicht mehr verfügbar ist.

Der Kältepufferspeicher ist an ein Kaltwassernetz angeschlossen. Als Verbraucher in dem Kaltwassernetz werden Induktionsluftauslässe und Klimadecken verwendet. Dieses Kaltwassernetz ist schematisch in Abbildung 4.9 und im Anhang 4 dargestellt.

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

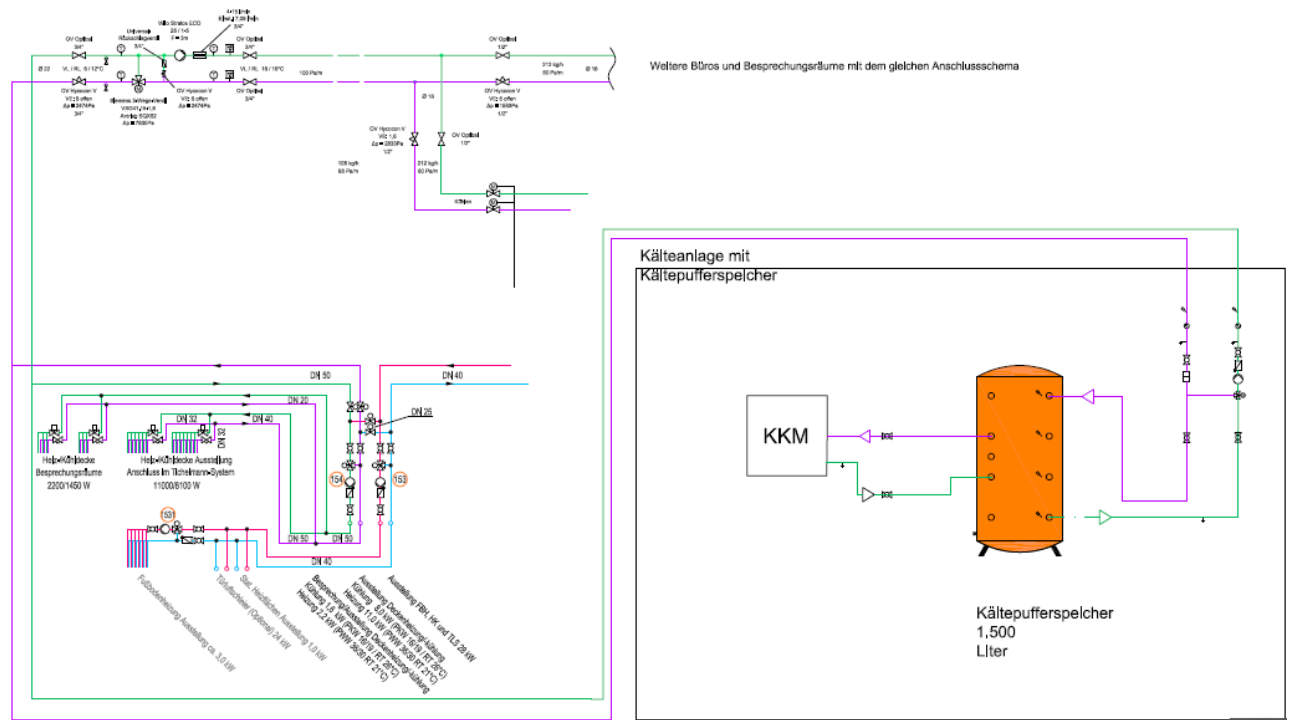


Abbildung 4.9 Schema des Kältenetzes [1]

Der Serverraum besitzt aktuell ein eigenes Splitgerät mit einer Kälteleistung von 2 kW, soll aber an das Kaltwassernetz angeschlossen werden, sobald eine Absorptionskältemaschine installiert wird.

4.2 Geplante Änderung der Anlagentechnik

Die heizungsseitige Einbindung des Absorptionskälteaggregats ist über die Heizungspuffer vorgesehen (Abbildung 4.10).

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

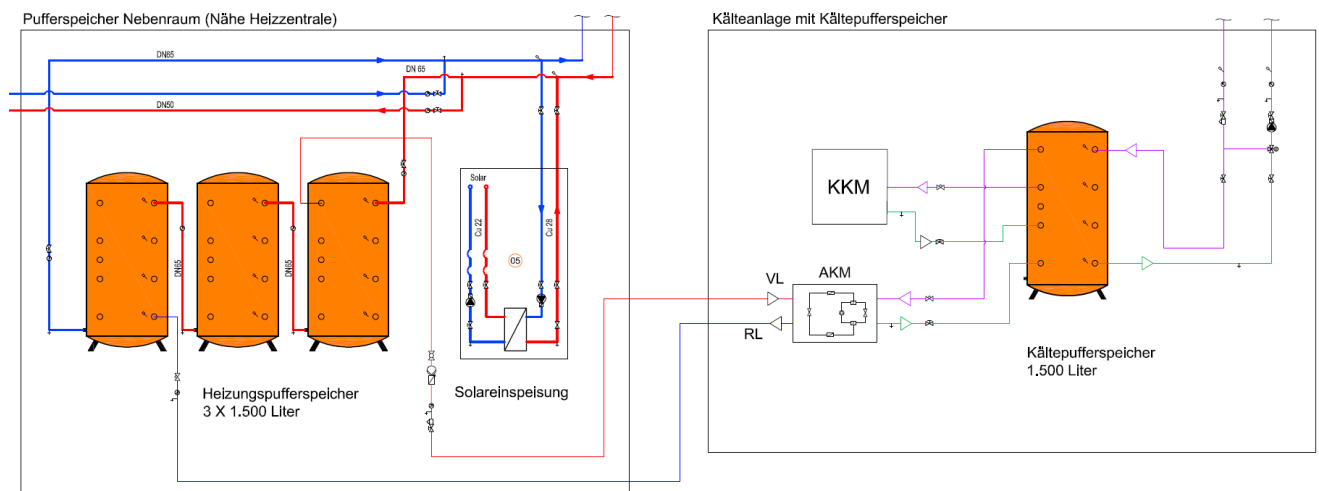


Abbildung 4.10 Schema der Anbindung des Absorptionskälteaggregats auf der Heizungsseite [1]

Der Vorlauf ist gegenüber der Vorlaufeinspeisung der Wärmeerzeuger (Hackschnitzelkessel, Erdgas-BHKW, Solaranlage und Kaminofen) im oberen Bereich des ersten Puffers zu installieren, um die maximale Vorlauftemperatur im System beziehen zu können. Im unteren Bereich des dritten Pufferspeichers kann das Rücklaufwasser des Kälteaggregats eingespeist werden. Durch diese Verschaltung ist eine hydraulische Beeinflussung der anderen Heizkreise ausgeschlossen und das gesamte Puffervolumen von 9.000 Litern steht der Kälteerzeugung zur Verfügung. Das Be- und Entladeverhalten der Pufferspeicher ist abhängig von den Wärmeleistungsverhältnissen der zugeführten und entnommenen Wärmeleistung. Je nach Gewichtung der Verhältnisse können drei Zustände auftreten (Abbildung 4.11):

$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{ab}$	vereinfacht betrachtet bei $\Delta\vartheta = konstant$	$\rightarrow$	$\dot{V}_{zu} = \dot{V}_{ab}$
$\dot{Q}_{zu} > \dot{Q}_{ab}$	vereinfacht betrachtet bei $\Delta\vartheta = konstant$	$\rightarrow$	$\dot{V}_{zu} > \dot{V}_{ab}$
$\dot{Q}_{zu} < \dot{Q}_{ab}$	vereinfacht betrachtet bei $\Delta\vartheta = konstant$	$\rightarrow$	$\dot{V}_{zu} < \dot{V}_{ab}$

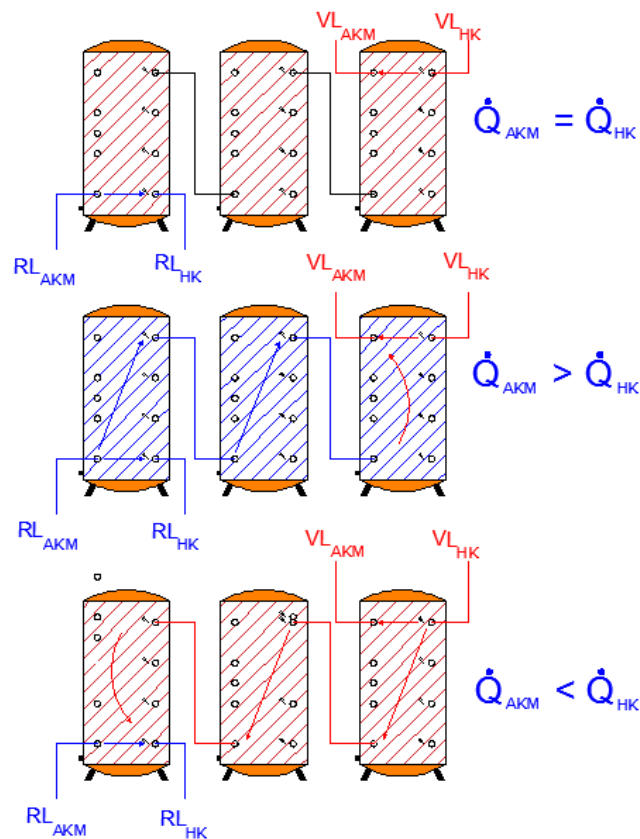


Abbildung 4.11 Zustände der Pufferspeicher Be- und Entladung [1]

Im ersten Zustand bleibt die Pufferwassertemperatur konstant im Ausgangszustand und die zugeführte Leistung wird direkt an das Kälteaggregat abgegeben. Der zweite Zustand führt zu einer Pufferbeladung während der Abnahme durch das Kälteaggregat. Die Wärmeerzeugung kann in diesem Fall, nach der vollständigen Pufferbeladung, reduziert werden. Im dritten Zustand kommt es zu einer Pufferspeicherentladung. Hierbei ist zu beachten, dass der Sorptionskältekreislauf bei Unterschreitung einer bestimmten Vorlauftemperatur nicht effizient beziehungsweise gar nicht betrieben werden kann. Sollte dieser Fall eintreten, so ist die Sorptionskälte abzuschalten und die Kompressionskälteerzeugung muss die gesamte Leistung bereitstellen. Durch diese Maßnahme kann die Wärmeerzeugung (BHKW, Solar und eventuell Kaminofen) die Pufferspeicher komplett durchladen und die Sorptionskälte kann im Anschluss wieder betrieben werden. Alternativ ist es möglich einen zusätzlichen Wärmeerzeuger (Hackschnitzelkessel oder Gasbrennwertkessel) hinzuschalten, um die Sorptionsanlage weiterhin zu betreiben und parallel die Pufferspeicher aufzuladen.

Da die Wärme des Hackschnitzelkessels und des Gasbrennwertkessels in Bezug auf die Solaranlage oder die Kraftwärmekopplung des BHKWs relativ teuer ist, sollte die Hinzuschaltung dieser Wärmeerzeuger zur Versorgung der Kälteanlage nur erfolgen, wenn dies unbedingt erforderlich ist. Durch die Tatsache, dass das BHKW durchgängig betrieben wird, aber die Kälteerzeugung nur während der Öffnungszeiten erforderlich ist, sind die Pufferspeicher morgens zum Anfahren der Absorptionskälte immer aufgeladen. Zudem liefert die Solaranlage ihre thermische Leistung von 4 kW, die während der maximal auftretenden Kühllast erforderlich ist. In der folgenden Abbildung 4.12 ist der idealisiert betrachtete Energiegehalt des Pufferspeichers in Abhängigkeit der Abnahme (AKM) und Beladung (BHKW) ohne den Einfluss der Solaranlage dargestellt.

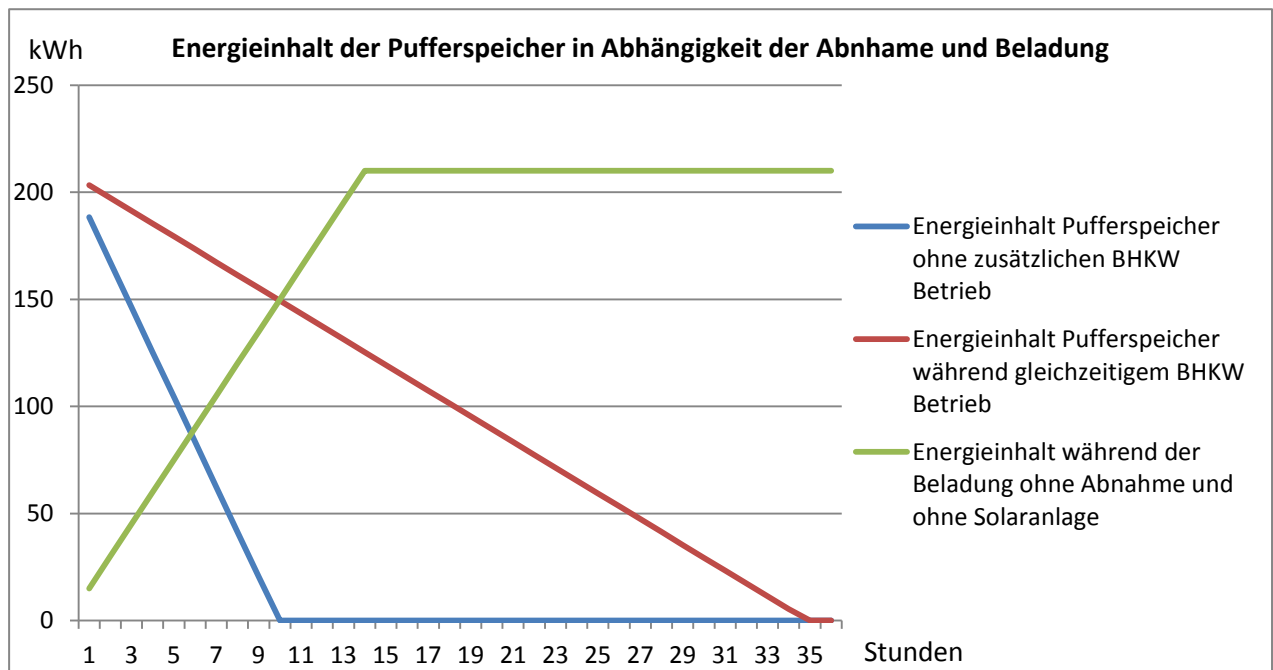


Abbildung 4.12 Energieinhalt der Pufferspeicher in Abhängigkeit der Abnahme und Beladung

Für diese Betrachtung wurde die Leistung des BHKWs mit 15 kW und die benötigte Leistung des Desorbers mit 21 kW angenommen. Die Solaranlage von 4 kW ist nicht Bestandteil dieser Betrachtung, da sie nicht ihre Leistung konstant an den Pufferspeicher abgeben kann. Die Standverluste des Pufferspeichers sind bei dieser idealisierten Betrachtung nicht berücksichtigt. Bei einem Pufferspeichervolumen von

9.000 Litern mit einer Dichte von 1 kg/dm³ und einer Spreizung von 20 Kelvin (80/60°C) ergibt sich nach der Formel

$$Q_{Puffer} = V_{Puffer} * \rho_{Wasser} * c_{p,Wasser} * \Delta\vartheta_{VL/RL} \quad \text{Gleichung 1}$$

ein Energieinhalt von 209,34 kWh.

Dieser Energieinhalt gibt pro Stunde eine Wärmemenge von 21 kWh an den Desorber ab. Die blaue Linie in dem Diagramm zeigt den Energieinhalt des Pufferspeichers bei einer konstanten Abnahme dieser Wärmeenergie ohne Nachladung eines Wärmeerzeugers. Bei dieser Konstellation ist es möglich die Absorptionskältemaschine 9,97 Stunden lang nur aus dem Pufferspeicher zu versorgen. Das bedeutet, dass die Absorptionskältemaschine während der bei der Kühlastberechnung angenommenen Betriebszeit von 7:00 bis 17:00 Uhr durchgehend betrieben werden kann, selbst wenn das BHKW nicht in den Pufferspeicher einspeist. Die Beladung des Pufferspeichers alleine durch das BHKW dauert ideal betrachtet 13,956 Stunden und ist in dem Diagramm mit der grünen Linie dargestellt. Die rote Linie zeigt den Verlauf des Energieinhaltes des Pufferspeichers bei gleichzeitigem BHKW- und Absorptionskältebetrieb ohne weitere Wärmeerzeuger und Verluste. In diesem Fall kann die Entnahmedauer auf 34,89 Stunden erhöht werden. Dieses Ergebnis zeigt auf, dass, wenn die Pufferspeicher beim Starten der Absorptionskältemaschine auf 80 °C hoch geheizt sind und das BHKW durchgehend betrieben wird, die Absorptionskältemaschine durchgehend während der Betriebszeiten Kälteenergie liefern kann und die Zeit, in der die Kältemaschine nur für die Serverkühlung zuständig ist, ausreicht, damit das BHKW die Pufferspeicher beladen kann. Da die Solaranlage bei solarer Strahlung den Pufferspeicher zusätzlich beheizt, verkürzt sich die Beladungszeit.

Diese Betrachtung basieren auf der Annahme, dass die Absorptionskältemaschine mit einer Spreizung von 20 Kelvin arbeitet. Kältemaschinen, die mit einer andern Spreizung betrieben werden, verursachen andere Be- und Entladezeiten. Zum Beispiel reduzieren sich die oben genannten Entladungszeiten um 50 % bei einer Spreizung von 10 Kelvin für den Desorber.

Als Aufstellort für die Absorptionskältemaschine sind zwei Positionen möglich. Die Installation kann auf der Bühne über der Werkstatt stattfinden, auf der bereits die

Kompressionskältemaschine und der Kältepufferspeicher installiert sind (Abbildung 4.13). Die kompletten Grundrisszeichnungen mit den Aufstellmöglichkeiten sind im Anhang 3 dargestellt.

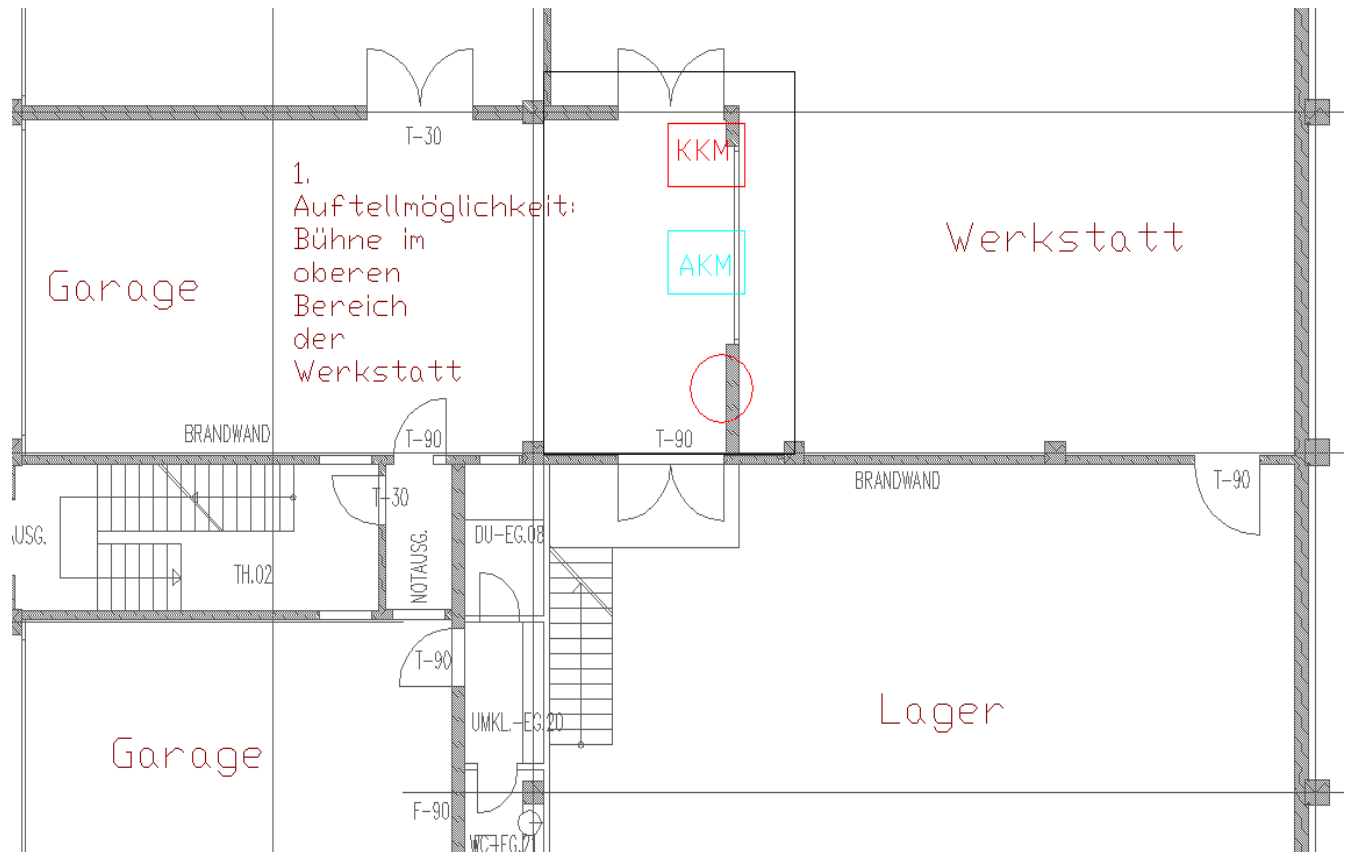


Abbildung 4.13 Ausschnitt der Grundrisszeichnung der ersten Aufstellmöglichkeit der Absorptionskältemaschine [1]

Die zweite Aufstellmöglichkeit sieht eine Demontage des Gasbrennwertkessels vor, welcher leistungstechnisch nicht mehr benötigt wird, um die Kältemaschine in der internen Heizzentrale zu montieren (Abbildung 4.14).

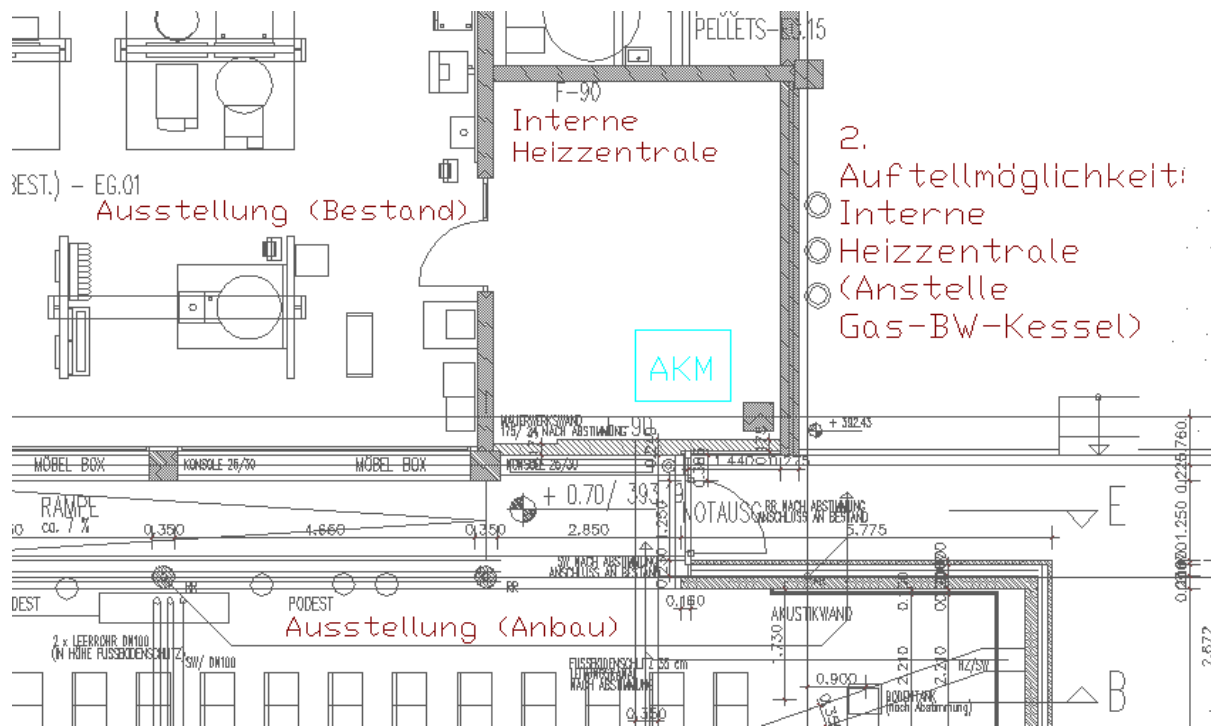


Abbildung 4.14 Zweite Aufstellmöglichkeit der Absorptionskältemaschine [1]

Der erste Aufstellort bietet den Vorteil, dass kurze Leitungswege auf der Kälteseite die Druck- und Energieverluste gering halten. Die Anbindung an den Heizungspufferspeicher würde eine lange Leitungsführung erfordern. Als Alternative hierzu ist es möglich die Absorptionskältemaschine an die Vor- und Rücklaufleitung des Hackschnitzelkessels anzubinden, welche direkt durch den Bereich der Bühne mit dem Kälteaggregat verlegt sind. Hierdurch gibt es zwar keine hydraulische Trennung der Systeme, aber da die Leitung des Hackschnitzelkessels ebenfalls an den Puffer angebunden ist, kann die Absorptionskältemaschine die Wärme aus dem Puffer und von dem BHKW und der Solaranlage beziehen (Abbildung 4.15).

Nachteilig an dem Aufstellort ist eine mögliche Staubbelastung durch den Werkstattbereich und die Entfernung zum geplanten Rückkühlwerk in der Nähe des außen aufgestellten Lüftungsgerätes.

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

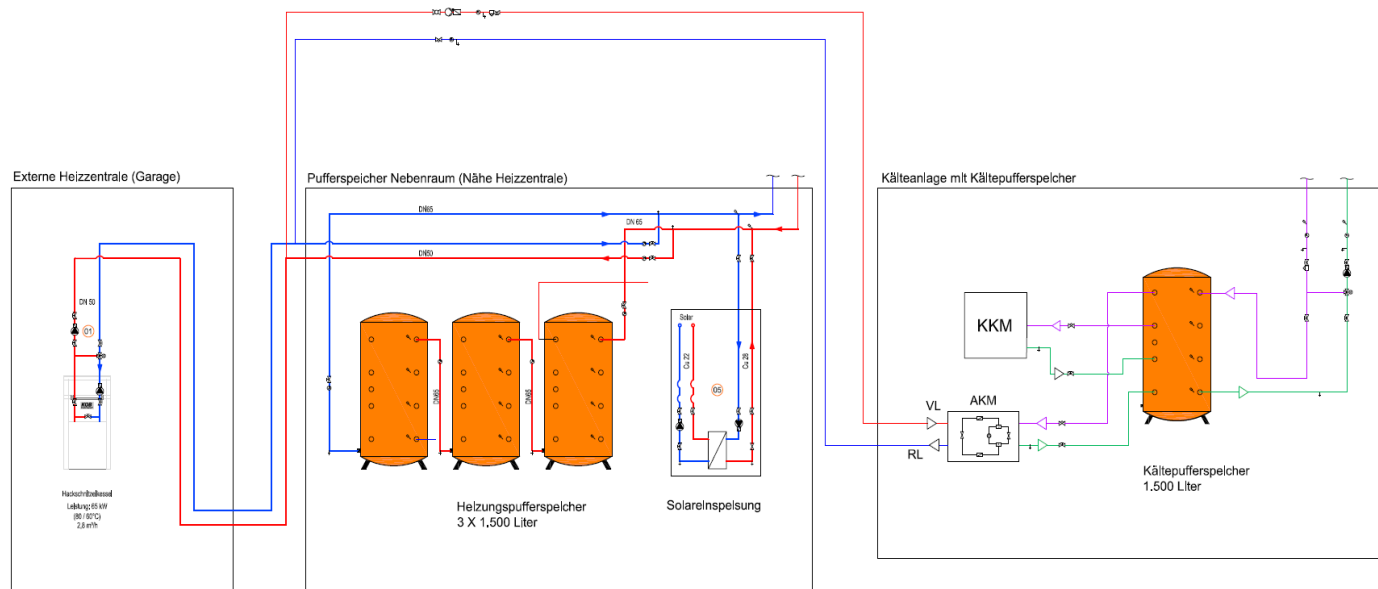


Abbildung 4.15 Alternative Heizungsanbindung bei der ersten Aufstellmöglichkeit [1]

Der zweite Aufstellort, die interne Heizzentrale, bietet einen sehr kurzen Leitungsweg für die Anbindung an den Heizungspufferspeicher. Die Anbindung an Kältepufferspeicher erfordert eine längere Leitungsführung durch den Lagerbereich. Des Weiteren dient die Positionierung in der internen Heizzentrale auch zu Vorführungs Zwecken, wohingegen der erste Aufstellort diesen Vorteil nicht bietet. Ein zusätzlicher Vorteil ist ein wesentlich kürzerer Leitungsweg zu dem Rückkühlwerk.

Da das Aggregat aber auch leicht für Kunden und andere interessierte Personen zugänglich sein soll, ist vorgesehen den zweiten Aufstellort für die Absorptionskältemaschine zu verwenden.

Der Absorber- und der Verflüssigerkühlkreis müssen auf einem aggregatabhängigen Temperaturniveau von circa 35°C um 6 Kelvin abgekühlt werden, damit der Absorptionsprozess stabil ablaufen kann [6]. Diese Abkühlung kann über Wärmeabnehmer wie zum Beispiel eine Fußbodenheizung erfolgen. Da aber in der Regel kein Heizungsbedarf während dem Vollastbetrieb der Kälteanlage erforderlich und der Volumenstrom des Rückkühlkreislaufer relativ groß ist, muss eine weitere Rückkühlmaßnahme installiert werden. Als Rückkühlwerk kommen fünf Varianten in Frage:

- Trockener Rückkühler
- Feuchter Rückkühler; offenes und geschlossenes System
- Ableitung in das Erdreich, Grundwasser oder Flusswasser [6]
- Alternative Wärmenutzung: Fußbodenheizung, Hackschnitzeltrocknung, etc..
- Saisonspeicher

Ein Vorteil der Rückkühler ist die Möglichkeit, als Notkühler des BHKWs im Netzersatzbetrieb zu fungieren. In dieser Betriebsweise muss die Absorptionskälteanlage ausgeschaltet und der Rückkühler hydraulisch mit einem Motorventil und regelungstechnisch an das BHKW angebunden sein. Ein wichtiges Auswahlkriterium bei der Auswahl eines Rückkühlers sind die Rückkühlbreiten oder Kühlzonenbereiten. Dieser Wert beschreibt die Temperaturdifferenz zwischen Rückkühlwassereintritt und Rückkühlwasseraustritt [33].

Bei der trockenen Rückkühlung kommt ein Tischkühler im Außenbereich zum Einsatz (Abbildung 4.16, 4,17). Der Rückkühlkreis wird mit Rohrleitungen an den Tischkühler angeschlossen, welcher mit einem Ventilator Umgebungsluft über einen Wärmeübertrager leitet und somit Wärme von dem Rückkühlkreis an die Umgebung abgibt. Ein großer Nachteil dieser Technik ist, dass die Rückkühltemperatur auf maximal 4 Kelvin über der Umgebungslufttemperatur abgekühlt werden kann. Die Rückkühlbreite bei der trockenen Rückkühlung kann bis zu maximal 5 Kelvin betragen [30]. Dieser Nachteil kann gerade im Sommer zu hohen Rückkühltemperaturen führen, welche im ungünstigsten Fall ein Abschalten der Anlage zur Folge haben können.



Abbildung 4.16 Tischkühler für trocken Rückkühlung[12]

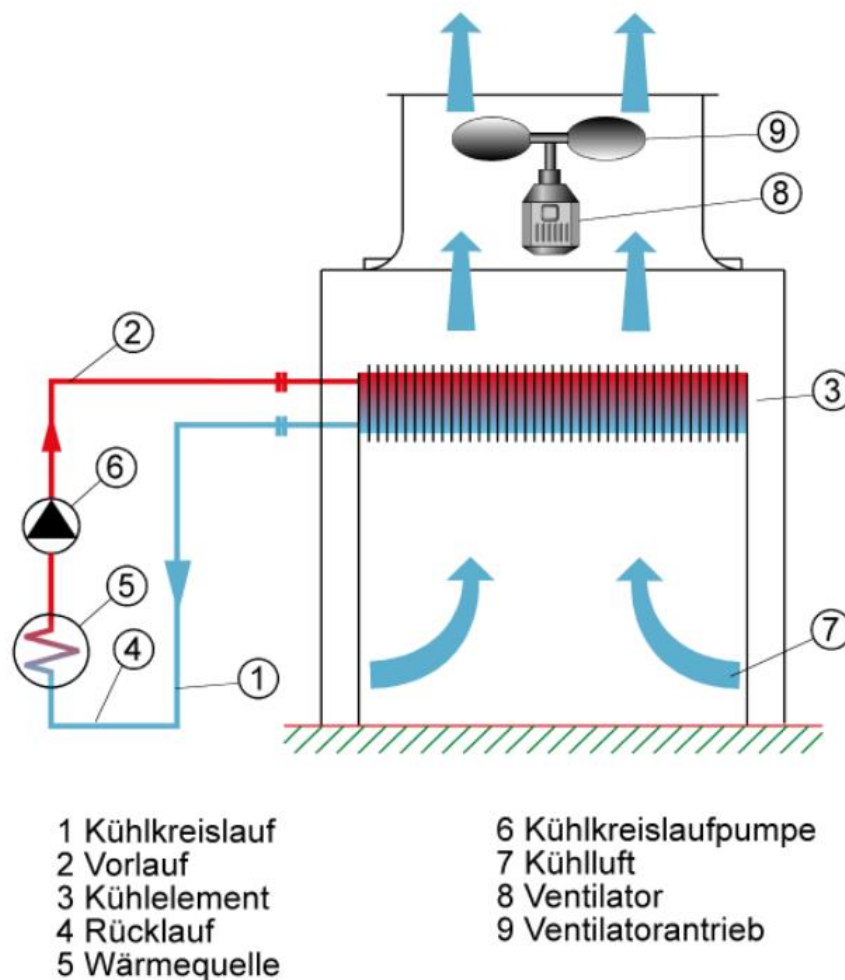


Abbildung 4.17 Trockenkühler [16]

Feuchte Rückkühlwerke werden auch als Verdunstungskühler bezeichnet. Hybridkühler sind eine Kombination aus trockener und feuchter Rückkühlung. Neben der Kühlung durch Umgebungsluft mithilfe von Ventilatoren findet eine Abkühlung mittels Sprühbefeuchtung an den Registern statt. Durch den Einsatz der Sprühbefeuchtung wird die Umgebungsluft, welche zu dem Register zuströmt, annähernd adiabat (vereinfacht $\rightarrow$ Enthalpie $[h] = \text{konstant}$) abgekühlt. Theoretisch findet die Befeuchtung entlang der rückwärts verlängerten Nebelisothermen (t_{KG}) statt. Durch diese Zustandsänderung sinkt die Temperatur der Umgebungsluft und die absolute und relative Luftfeuchtigkeit steigen an. Die Rückkühlbreite bei diesem Verfahren liegt bei 5 bis 7 Kelvin [33]. Die Darstellung der Zustandsänderung erfolgt in einem Mollier h - x Diagramm (Abbildung 4.18).

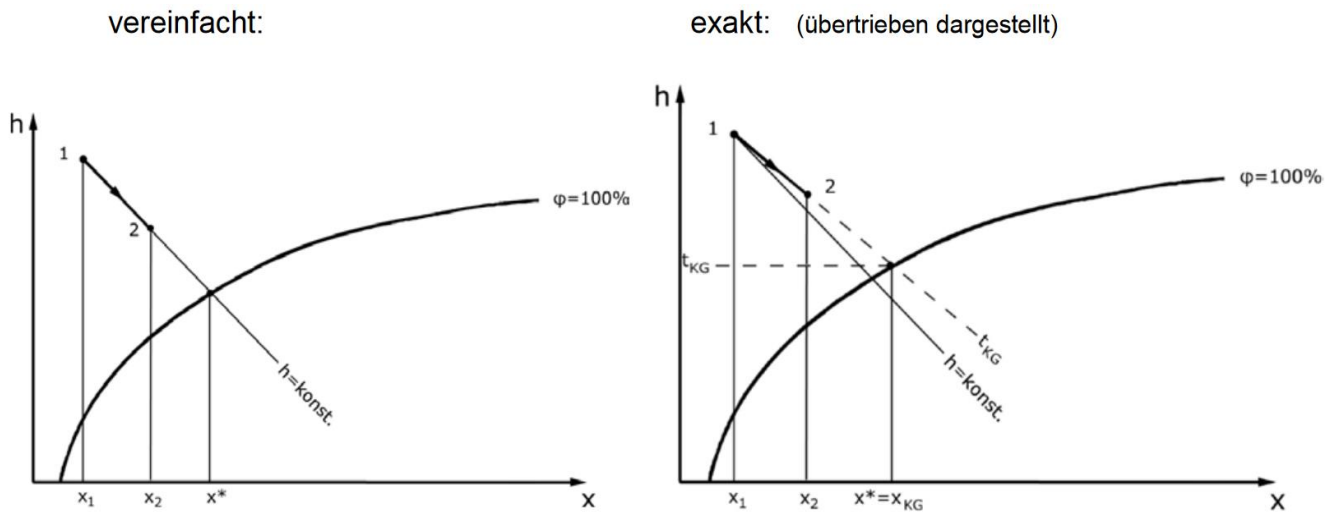


Abbildung 4.18 Darstellung der Befeuchtung in einem h-x Diagramm [13]

Durch die abgekühlte Umgebungsluft kann die Rückkühltemperatur sogar unter das Umgebungslufttemperaturniveau gesenkt werden, solange die relative Luftfeuchtigkeit nicht vorher auf 100% ansteigt und das Wasser auskondensiert, beziehungsweise die Luft kein Wasser mehr aufnehmen kann. Durch den Einsatz von zerstäubtem Wasser in Rückkühlwerken ist die VDI 3803 „VDI Lüftungsregeln“ einzuhalten [14]. Zusätzlich sind die Grenzwerte des VDMA Einheitsblattes 24649 [15] „Hinweise und Empfehlungen zum wirksamen und sicheren Betrieb von Verdunstungskühlanlagen“ zu beachten (Abbildung 4.19).

5.4 Wasserqualität

In der nachstehenden Tabelle sind die empfohlenen Kontrollparameter und die einzuhaltenden Richtwerte angegeben. Die zulässigen Richtwerte im Hinblick auf Korrosion sind vom Lieferanten oder der Wasserbehandlungsfirma vorzugeben.

Tabelle 3: Kontrollparameter und Richtwerte

Art des Kontrollparameters	Richtwert im Umlaufwasser
Gesamtkeimzahl	Nicht höher als 10.000 KBE/ml ⁽¹⁾
Legionellen	Nicht höher als 10 KBE/ml ⁽¹⁾
pH-Wert	Zwischen 7 und 9
„Karbonathärte“ ⁽²⁾	<20 °d <3,6 mmol/l <360 mg/l als CaCO ₃
Chloride, Sulfate, Leitfähigkeit u.a.	Je nach Spezifikation des Systems oder gemäß Angaben der verantwortlichen Fachfirmen.

Bemerkung: ⁽¹⁾ KBE/ml = Kolonie bildende Einheiten pro Milliliter

⁽²⁾ Normgerecht wäre der Begriff Härte mit der Einheit mmol/l zu verwenden. Im üblichen Sprachgebrauch haben sich jedoch die Bezeichnungen Gesamthärte (GH) und Karbonathärte (KH) mit den Einheiten °d, mmol/l oder mg/l als CaCO₃ eingebürgert und bewährt. Sie werden daher auch in diesem Einheitsblatt verwendet.

Die Karbonathärte ist der an Hydrogencarbonat (HCO₃) gebundene Anteil der Gesamthärte (= Härte = Gehalt des Wassers an Calcium + Magnesium).

Bei Wässern mit KH < GH errechnet sich die Karbonathärte aus dem Messwert Säurekapazität Ks_{4,3} wie folgt: KH in °d = 2,8 × Ks_{4,3} in mmol/l.

Bei Wässern mit GH in °d < 2,8 × Ks_{4,3} in mmol/l ist KH = GH.

Abbildung 4.19 Auszug aus dem VDMA Einheitsblatt 24649 [15]

Des Weiteren ist das Gefrieren des Wassers bei geringen Außentemperaturen zu vermeiden. Dies kann zum Beispiel durch eine Begleitheizung oder das Umschalten auf eine wasserlose Kühlung erfolgen. Bei der Umschaltung ist zu beachten, dass die Wasserleitung entleert werden muss. Die Hybridkühler (Abbildung 4.20) haben in der Regel eine wesentlich höhere Rückkühlleistung, als die Tischkühler bei gleicher Baugröße.

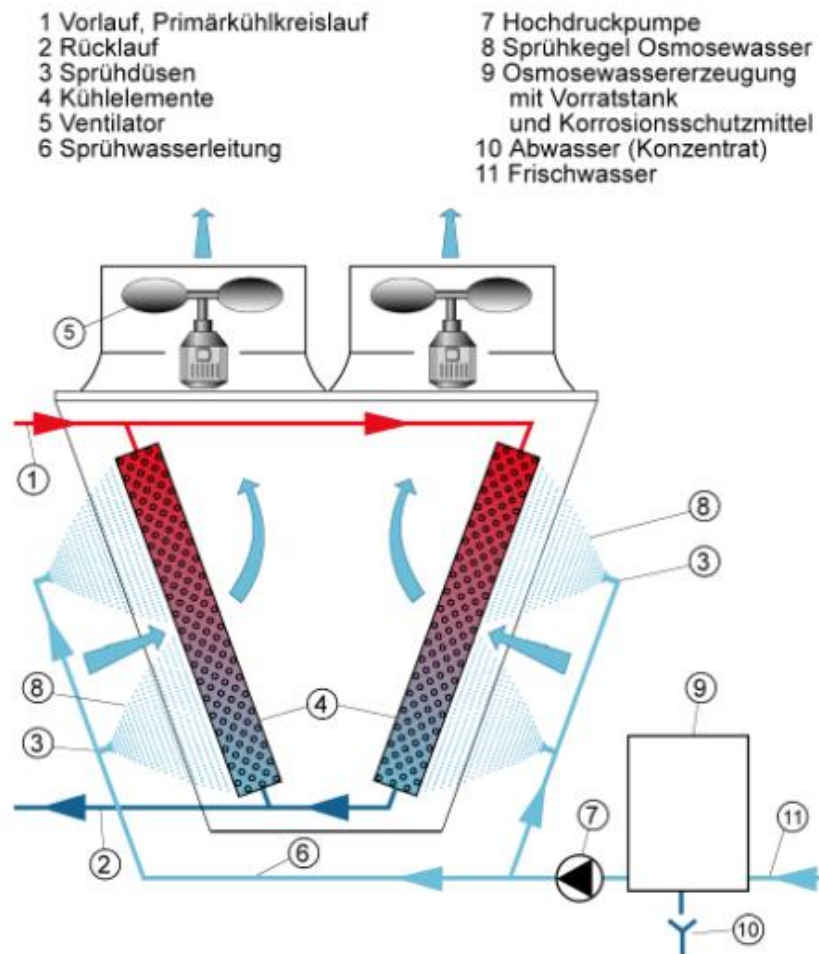


Abbildung 4.20 Hybridkühler für eine feuchte Rückkühlung [16]

Nachteilig hierbei sind die bei ungünstigen Umständen entstehenden Wasserdampfschwaden, welche aufgrund des Temperaturniveaus auch Legionellen und andere Keime enthalten können. Die Keime und Legionellen können präventiv durch eine Biozid- oder eine Ozondosierung abgetötet beziehungsweise reduziert werden [17]. Eine Überdosierung ist dringend zu vermeiden, da die verwendeten Stoffe schädlich für Menschen sind. Die Wärmeabfuhr für den Netzersatzbetrieb eines BHKWs kann auch über einen Hybridkühler erfolgen.

Weitere feuchte Rückkühler sind Verdunstungskühltürme in offener (Abbildung 4.21) und geschlossener (Abbildung 4.22) Ausführung. Beide Verfahren haben die Vorteile einer sehr geringen Schallemission und eines geringen Platzbedarfes. Die offenen Kühltürme können die Kühlwassertemperatur auf ein sehr niedriges Temperaturniveau abkühlen und haben geringere Investitionskosten als die geschlossenen Verdunstungskühltürme. Große Nachteile des offenen Systems

gegenüber dem geschlossenen System sind der hohe Wasserverbrauch, die Entstehung von Wasserdampfschwaden und die Möglichkeit der Verschmutzung durch Staub, Blätter, etc. [18].

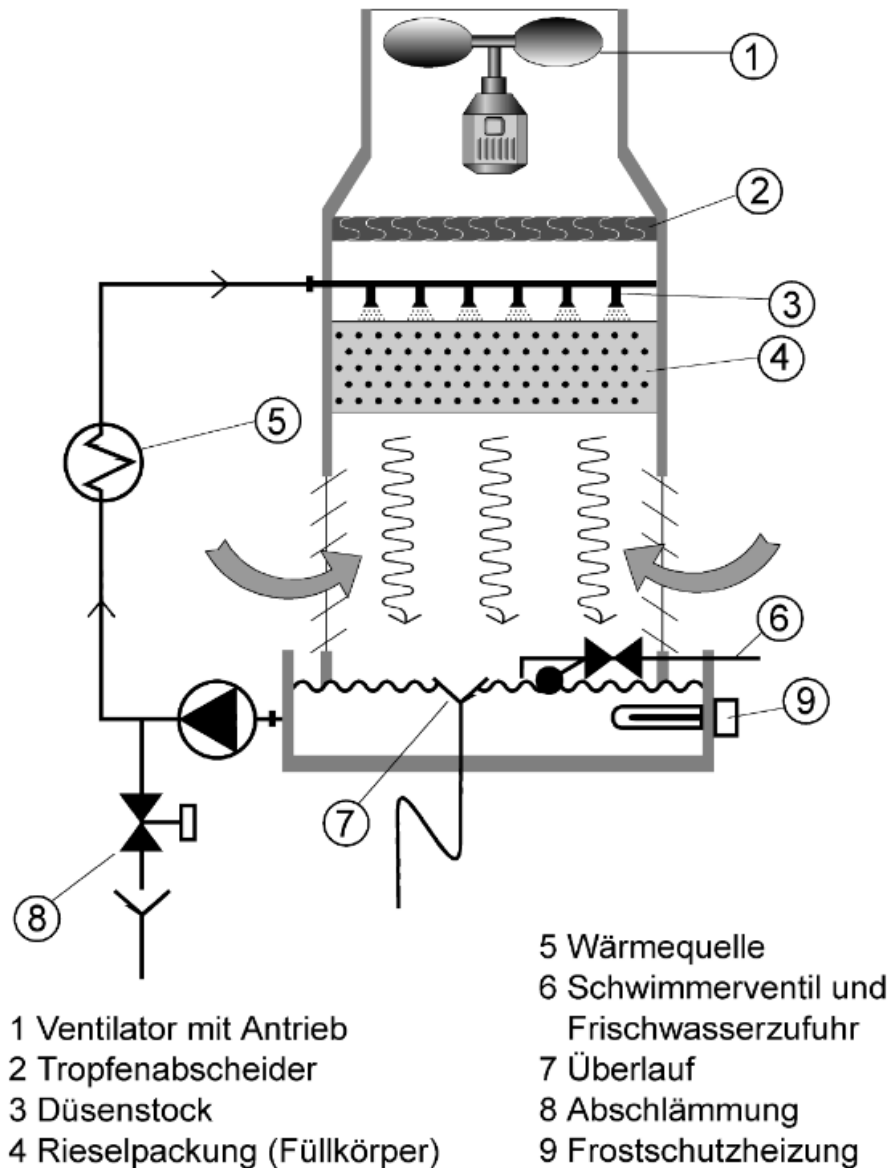


Abbildung 4.21 Offener Verdunstungskühlturm der Firma EWK [16]

Die Rückkühlbreite offener Verdunstungskühltürme wird in der Literatur mit ca. 8 Kelvin angegeben [34].

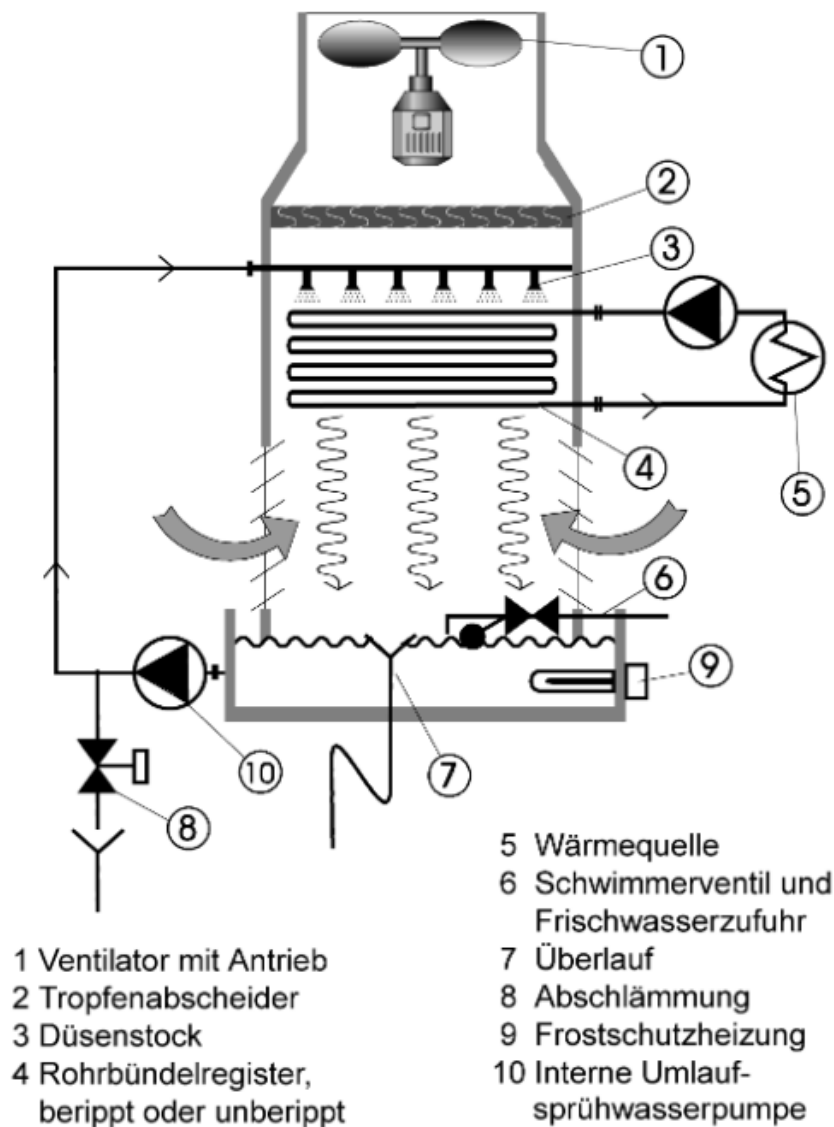


Abbildung 4.22 Geschlossener Verdunstungskühlturm der Firma EWK [16]

Nachteilig bei dem geschlossenen Verdunstungskühlturm sind die sehr hohen Investitionskosten und das etwas höhere Temperaturniveau als bei dem offenen Verdunstungskühlturm. Die Rückkühlbreite geschlossener Verdunstungskühltürme liegt mit 6 bis 7 Kelvin leicht unter der Rückkühlbreite der offenen Verdunstungskühltürme [34]. Beide Systeme haben sehr hohe Anforderungen an die Wasserqualität des Kühlwassers [18,19].

Über Erdkollektorfelder oder Tiefenbohrungen kann die Wärme an das Erdreich abgegeben werden und im Winter können die Erdwärmeübertrager als Wärmequelle für eine Wärmepumpe dienen [6]. Alternativ hierzu ist es möglich Grundwasser oder

Flusswasser zur Wärmeabfuhr zu nutzen. In diesem Fall sind unbedingt die Auflagen der unteren Wasserbehörde zu beachten. In der Regel ist eine maximale Temperaturerhöhung von 3 Kelvin erlaubt. Durch diese geringe Spreizung ist ein großer Wasservolumenstrom erforderlich, um die benötigte Rückkühlleistung bereitzustellen. Durch diese Vorgaben und den Umstand, dass die Grundwasser- oder Flusssanbindung nur an wenigen Orten einsetzbar ist, wird diese Form der Wärmabgabe äußerst selten genutzt.

Die wirtschaftlichste Form der Rückkühlung ist die Nutzung der entstehenden Niedertemperaturwärme für Heizzwecke. Durch das geringe Temperaturniveau ist der Einsatz der Wärmeenergie für Flächenheizsysteme, wie Fußboden- oder Wandheizungen, prädestiniert. Bei der Verwendung für Heizzwecke ist unbedingt der hohe Volumenstrom beziehungsweise die hohe thermische Leistung des Rückkühlkreislauftes zu beachten. Die Rückkühlleistung liegt in der Regel bei dem zwei- bis zweieinhalbfachen Wert der Kälteleistung. Ist eine so hohe Leistung für den Heizbetrieb nicht erforderlich, kann eine Systemkombination von Heizungsnutzung und Rückkühlwerk verwendet werden. Spezielle Wärmenutzungen wie eine Freibadbeheizung oder eine Hackschnitzeltrocknung sind ebenfalls Möglichkeiten die Wärme kontinuierlich und effizient zu nutzen. Bei der Dimensionierung der Leitungen und Wärmeübertrager ist der aufgrund der geringen Spreizung große Volumenstrom zu beachten, durch den die Bauteile sehr groß werden können. Die Idee zur Verwendung von Wärme zum Trocknen von Hackschnitzeln, um so deren Heizwert und somit auch Verkaufswert zu steigern, kommt von ländlichen Biogasanlagen in Absprache mit dem Maschinenring, die keine alternative Abwärmenutzung im Sinne des Erneuerbare Energien Gesetzes 2012 [EEG 2012] vorweisen konnten, aber dennoch die erhöhten Einspeisevergütungen beziehen wollten [21]. Diese Wärmenutzung der Abwärme von Biogasanlagen ist im nordhessischen Landkreis Waldeck-Frankenberg weit verbreitet und könnte auch in diesem Fall verwendet werden.

Bei der Hackschnitzeltrocknung sind die Hackschnitzel in Containern mit einem Lochblechdoppelboden gelagert. Durch einen Lüftungsanschluss an der Frontseite kann erwärmte Luft durch ein Lüftungsgerät mit Heizregister in den Container geleitet werden. Durch die Zuführung der warmen Luft trocknen die Hackschnitzel schneller als bei einer offenen Lagerung.

Da das bei dem Rückkühlkreislauf zur Verfügung stehende Temperaturniveau weit unter den circa 80°C der BHKWs der Biogasanlagen liegt, ist eine wesentlich längere Trocknungsdauer zu erwarten [20].

Eine weitere Alternative der Wärmenutzung ist die Einspeicherung in einem Saisonspeicher. Da die Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasser mit 10 °C und dem Rückkühlwasser mit circa 36°C sehr gering ist, müsste ein sehr großer Saisonspeicher eingesetzt werden, um einen langen Absorptionsbetrieb ohne zusätzliche Wärmeabnahme zu gewährleisten. Zudem ist eine spätere Wärmenutzung der Energie aus dem Speicher mit einer Temperatur von circa 36°C stark auf Flächenheizungen eingeschränkt, da Systeme mit Heizkörper oder Deckenstrahlplatten in der Regel höhere Temperaturen benötigen. Durch diese Nachteile können Saisonspeicher für Absorptionskältemaschinen nur in seltenen Ausnahmefällen wirtschaftlich betrieben werden.

Für die Rückkühlung der geplanten Absorptionskältemaschine der Firma Veltum ist eine Systemkombination vorgesehen. Die Wärme soll, solange Wärmebedarf vorhanden ist, in die Fußbodenheizung eingespeist werden. In der Betriebszeit ohne oder mit wenig Wärmebedarf im Bereich der Fußbodenheizung wird das von dem jeweiligen Anbieter vorgeschlagene Rückkühlwerk vorgesehen. Im Falle der Umsetzung ist zusätzlich eine Hackschnitzeltrocknung vorgesehen, insofern dies in Absprache mit dem Maschinenring möglich ist.

Die erforderliche Rückkühlleistung ist abhängig von der verwendeten Kältetechnologie und von den Leistungsdaten des Aggregats. Eine Kompressionskälteanlage benötigt nur eine Rückkühlleistung für den Ablauf des Kondensationsprozesses. Die Absorptionskälteanlagen hingegen benötigen eine höhere Rückkühlleistung, da zusätzlich die Lösungswärme des Absorbers abgeführt werden muss. Die Rückkühlleistung für die Kompressionskältemaschinen und die Absorptionskältemaschinen berechnen sich wie folgt:

$$\dot{Q}_{R,KKM} = \dot{Q}_C = \dot{Q}_0 * (1 + \frac{1}{EER}) \quad [22,23] \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\dot{Q}_{R,AKM} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A = \dot{Q}_0 * (1 + \frac{1}{\xi}) \quad [22,23] \quad \text{Gleichung 3}$$

$$\dot{Q}_{R,KKM} \leq \dot{Q}_{R,AKM}) \quad [22,23] \quad \text{Gleichung 4}$$

$$Q_{R,el} = \dot{Q}_R * q_{R,el} * f_{R,el} * t_R \quad [23] \quad \text{Gleichung 5}$$

$Q_{R,el}$	-	Endenergiebedarf der Rückkühlung	[kWh/a]
$\dot{Q}_{R,KKM}$	-	Rückkühlleistung der Kompressionskältemaschine	[kW]
$\dot{Q}_{R,AKM}$	-	Rückkühlleistung der Absorptionskälte	[kW]
$\dot{Q}_C$	-	Kondensator-/ Verflüssigerleistung	[kW]
$\dot{Q}_A$	-	Absorberabwärmeleistung	[kW]
$q_{R,el}$	-	spezifische elektrischer Leistungsbedarf	[kW/kW]
$f_{R,el}$	-	mittlerer Nutzungsfaktor für die Rückkühlung	[]
t_R	-	mittlere jährliche Betriebszeit	[h/a]

Mit der Gleichung 5 lässt sich der Endenergiebedarf für die Rückkühlung berechnen, welcher in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 6 erforderlich ist. Des Weiteren ist der Wasserverbrauch während des Betriebs der Rückkühlanlage zu beachten.

Die kälteseitige Einbindung der Sorptionskälte erfolgt über den Kältepufferspeicher, an den die Kompressionskältemaschine bereits angeschlossen ist (Abbildung 4.23). Das restliche Kältenetz bleibt unberührt.

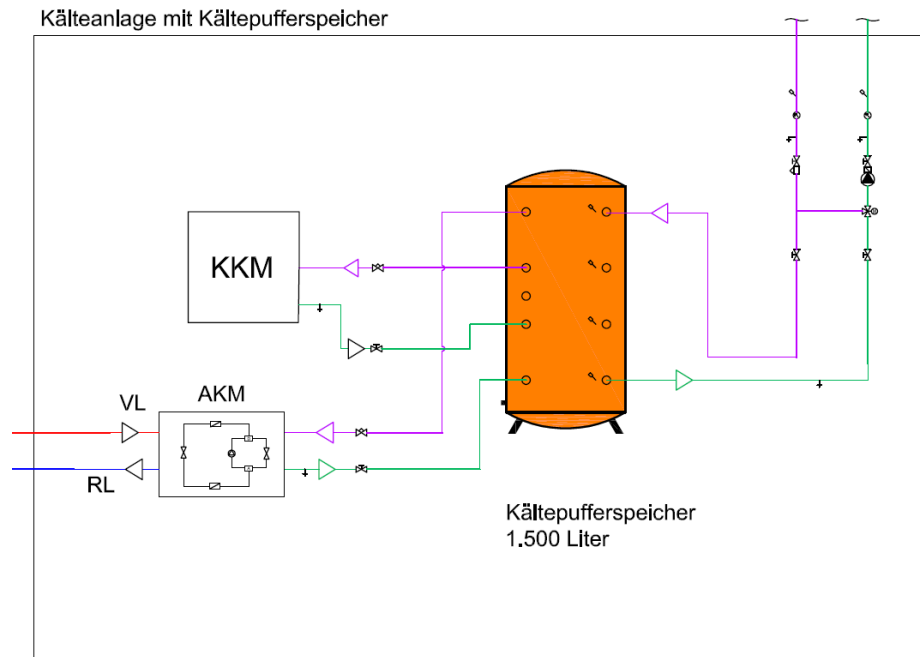


Abbildung 4.23 Kälteseitige Anbindung der Absorptionsmaschine [1]

In dem Vorlauf der Kältemaschine ist ein Strangreguliertventil und im Rücklauf ein Absperrventil vorgesehen, um die Absorptionskälte bei Bedarf komplett von dem Kältepufferspeicher abtrennen zu können, ohne diesen leerzulassen. Das Kälteaggregat hat in der Regel eine interne Umwälzpumpe mit Rückflussverhinderer und Schwerkraftbremse, um keine ungewollte Wasserbewegung im System zu erhalten. Da es sich um eine elektronisch geregelte Umwälzpumpe handelt, kann diese nach Bedarf betrieben werden und ein Strangreguliertventil ist theoretisch nicht erforderlich. Es wird dennoch installiert, um während des Betriebes den Volumenstrom und den vorhandenen Druckverlust ermitteln und kontrollieren zu können.

Die Auslegung des Membranausdehnungsgefäßes zur Absicherung der Absorptionskältemaschine erfolgt über folgende Berechnung:

Expansionskoeffizient
$$e = 1 - \frac{\rho_{\vartheta \max}(40^{\circ}\text{C})}{\rho_{\vartheta \min}(6^{\circ}\text{C})} \quad [24] \quad \text{Gleichung 6}$$

$$e = 1 - \frac{0,9923 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}}{1,0000 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}} = 0,0077$$

Ausdehnungsvolumen $V_{ex} = e * V_{System}$ [24] Gleichung 7

$$V_{ex} = 0,0077 * 1740 \text{ l} = 13,398 \text{ l}$$

Mindestwasservorlage $V_{wr,min} = \frac{0,5 * V_{System}}{100}$ [24] Gleichung 8

$$V_{wr,min} = \frac{0,5 * 1740 \text{ l}}{100} = 8,7 \text{ l}$$

Enddruck $p_{fin} = p_{SiV} - 0,1 * p_{SiV}$ [24] Gleichung 9

$$p_{fin} = 6 \text{ bar} - 0,1 * 6 \text{ bar} = 5,4 \text{ bar}$$

Mindestnennvolumen MAG $V_{N,min} = (V_{ex} + V_{wr,min}) \frac{p_{fin}+1}{p_{fin}-p_0}$ Gleichung 10

$$V_{N,min} = (13,398 \text{ l} + 8,7 \text{ l}) \frac{5,4 \text{ bar} + 1 \text{ bar}}{5,4 \text{ bar} - 1,2 \text{ bar}} = 33,67 \text{ l}$$

Auswahl Nutzinhalt MAG $V_N \geq V_{N,min}$ [24] Gleichung 11

$$45 \text{ Liter} \geq 33,67 \text{ Liter} \rightarrow N50 \text{ MAG}$$

Anfangsdruck $p_{ini} = \frac{p_{fin}+1}{1 + \frac{V_{ex} * p_{fin}+1}{V_N * p_0+1}} - 1$ [24] Gleichung 12

$$p_{ini} = \frac{5,4 \text{ bar} + 1 \text{ bar}}{1 + \frac{13,398 \text{ l} * 5,4 \text{ bar} + 1 \text{ bar}}{45 \text{ l} * 1 \text{ bar} + 1,2 \text{ bar}}} - 1 \text{ bar} = 2,43 \text{ bar}$$

p_{SiV} - Ansprechdruck des Sicherheitsventil [bar]

$\rho_{\vartheta_{max}}$ - Dichte des Mediums bei maximaler Betriebstemperatur [kg/dm³]

$\rho_{\vartheta_{min}}$ - Dichte des Mediums bei minimaler Betriebstemperatur [kg/dm³]

V_{System} - Volumen des Mediums im System [dm³; Liter]

V_N - Nennvolumen des ausgewählten MAGs [dm³; Liter]

Aus der Berechnung geht hervor, dass ein 50-Liter-Membranausdehnungsgefäß für die Kälteanlage ausreicht und ein Anfangsdruck von 2,43 bar im System einzustellen ist. Zur Überprüfung der Auslegung des Membranausdehnungsgefäßes wurde die

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum
Berechnung mit der Auslegungssoftware [25] der Firma Reflex nachgerechnet
(Anhang 14).

5 Absorptionskälteaggregate

In diesem Kapitel werden zwei in Frage kommende Absorptionskältemaschinen vorgestellt. Da es in diesem Leistungsbereich nur wenige Aggregate [Wegracal/Yazaki] für Wasser- Lithiumbromid Absorptionskältemaschinen gibt, ist zusätzlich eine Adsorptionskältemaschine [Invensor] aufgeführt. Die anlagentechnische Einbindung der Adsorptionsmaschine erfolgt ebenso wie bei der Adsorption.

5.1 Kälteaggregat WEGRACAL SE 15 der Firma EAW

Das Angebot für das Aggregat vom Typ Wegracal SE 15 (Abbildung 5.1) der Firma EAW Energieanlagenbau ist im Anhang 6 hinterlegt und wird bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Kapitel 6 genauer betrachtet.



Abbildung 5.1 Absorptionskältemaschine Wegracal SE 15 [6]

Zur Größenzuordnung ist das Aggregat in Abbildung 5.2 in drei Ansichten dargestellt und bemaßt.

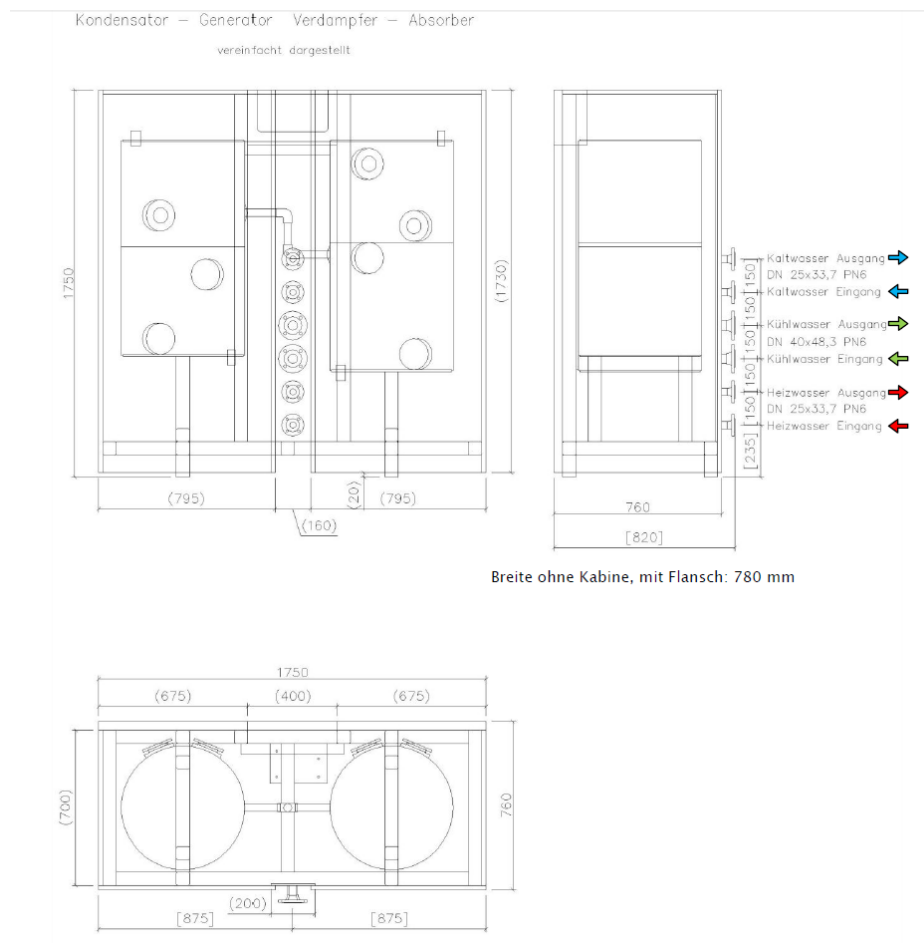


Abbildung 5.2 Ansichten der Absorptionskältemaschine Wegracal SE 15 [6]

Die Kälteleistung liegt nach Herstellerangabe bei den im Anhang 7 aufgelisteten Ausgangsparametern bei 15 kW und kann das Kaltwasser auf bis zu 9°C abkühlen. Bei abweichenden Parametern zu den Ausgangsparametern des Herstellers, ist die Kälteleistung aus dem entsprechenden Leistungsdiagramm abzulesen (Abbildung 5.3). In den Leistungsdiagrammen ist in der Regel an der Y- Achse die abgebbare Kälteleistung aufgelistet und auf der X- Achse die Eintrittstemperatur des Kaltwassers. Über Temperaturlinien im Diagramm, welche die Heizwassertemperaturen darstellen, kann bei einer von der Anlagentechnik vorgegebenen Heizwasservorlauftemperatur und einer Kaltwassereintrittstemperatur die maximal zur Verfügung stehende Kälteleistung abgelesen werden. Die Angaben in den Leistungsdiagrammen variieren unter den Herstellern, so hat zum Beispiel die Firma Yazaki Leistungsdiagramme, auf denen die Heizwassertemperatur auf der X-

Achse angetragen ist und die im Diagramm dargestellten Temperaturlinien dienen zur Kälteleistungsermittlung in Abhängigkeit von der Rückkühltemperatur. Dieses Diagramm ist in Kapitel 5.2 dargestellt. Über diese Diagramme kann mit den von der Anlagenkonfiguration vorgegebenen Parametern die zur Verfügung stehende Kälteleistung bestimmt werden.

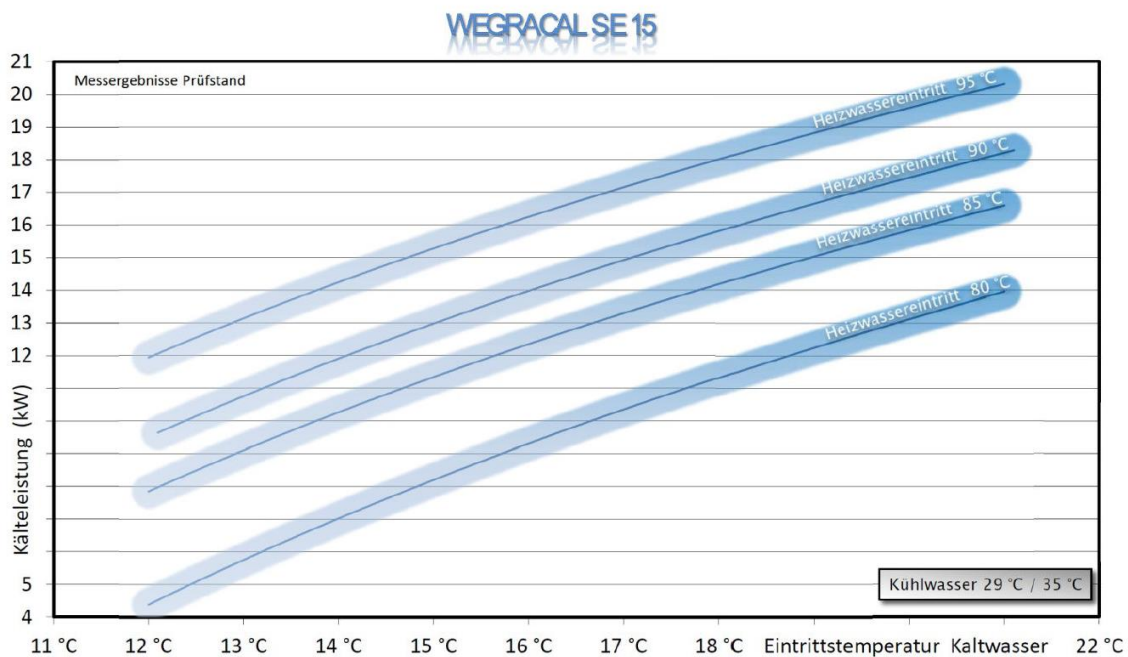


Abbildung 5.3 Leistungsdiagramm Wegracal SE15 [6]

Unter der Vorgabe einer Heizwasservorlauftemperatur von 80 °C kann bei einer Kaltwassereintrittstemperatur von 19°C eine Kälteleistung von 12,5 kW erreicht werden, welche auch zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung heranzuziehen ist. Näherungsweise kann die Leistungsbestimmung bei einer Vorlauftemperatur von 80 °C und einer Rückkühltemperatur von 29 °C über folgende Funktion ermittelt werden:

$$y = -0,0384x^2 + 1,4892x + 2,8595$$

(y= Kälteleistung; x= Kennzahl für die Position der Kaltwassereintrittswerte im Diagramm)[Darstellung der Berechnung und der Kennzahlen im Anhang 16].

Weichen die Anlagenparameter von den aufgelisteten Parametern ab, ist eine neue Funktion durch das Leistungsdiagramm zu ermitteln. Bei einer Reduzierung der Heizwassertemperatur unter 75°C schaltet das Gerät ab.

Der Desorber benötigt eine Heizleistung von 21 kW auf einem Temperaturniveau von 70° bis 90°C. Über einen Rückkühler muss die Temperatur des Wassers zur Kühlung des Absorbers und des Kondensators von 35°C auf 29°C reduziert werden. Die Rückkühlleistung liegt bei 35 kW[6,26]. Das von EAW vorgesehene Rückkühlwerk wird in der feuchten Betriebsweise verwendet [6]. Hierdurch entsteht ein Verdunstungsverlust von ca. 0,06 m³/h, welcher mit aufbereitetem Wasser nach VDI 3803 (Abbildung 5.4) nachgespeist werden muss. Die Nachspeisung erfolgt mit enthärtetem Trinkwasser, sodass keine Grenzwertüberschreitung stattfindet [6,26].

Auszug aus VDI 3803 (Ausg. Okt. 02)

Empfohlene Richtwerte für die Beschaffenheit des Rückkühlwerk-Umlaufwassers / Zusatzwassers
Empfehlung für Verdunstungskühlung bei Wandungstemperaturen im Kondensator < 60 °C

Beschaffenheit			Material wasserberührt		
			C-Stahl- und Buntmetalle ¹⁾		
Aussehen		--	möglichst farblos, klar und ohne Bodensatz		
pH-Wert ⁴⁾		--	7,5 bis 9,0		
Gesamtsalzgehalt	GSG	g/m³	< 1800	< 600	EZ = 3
El. Leitfähigkeit		mS/m	< 220	< 70	3
		µS/cm	< 2200	< 700	3
Calcium	Ca ⁺⁺	mol/m³	> 0,5	> 0,16	3
		g/m³	> 20	> 6,7	3
Karbonathärte ⁸⁾	KH	°d	< 4	< 1,33	3
Karbonathärte ⁶⁾ bei Härttestabilisierung ²⁾	KH	°d	< 20	< 6,7	3
Chlorid ⁵⁾	Cl ⁻	mol/m³	< 4,2 ⁶⁾	< 1,4	3
		g/m³	< 150 ⁶⁾	< 50	3
Sulfat ⁵⁾	SO ₄ ⁻⁻	mol/m³	< 3,4	< 1,1	3
		g/m³	< 325	< 105	3
KMnO ₄ -Verbrauch		g/m³	< 100	< 30	3
Keimzahl		KBE/ml	< 10 000 ³⁾		
Legionellen		KBE/ml	< 10		
			Umlaufwasser	Zusatzwasser	Eindickung

Abbildung 5.4 Anforderungen an das Nachspeisewasser nach VDI 3803 [14]

Als Richtwert zur Dimensionierung des Kaltwasserpufferspeichers gibt EAW eine Beladungsdauer von mindestens 15 bis 20 Minuten[6] an. Durch die Formel

$$m = \dot{m} * t = \frac{\dot{Q}_0 * t}{c * \Delta \vartheta} \quad \text{Gleichung 13}$$

kann die Speichermasse ermittelt werden. Bei einer Kälteleistung [$\dot{Q}_0$] von 12,5 kW, einer Temperaturspreizung [$\Delta\vartheta$] von 6 Kelvin und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser [$c = 1,163 \text{ Wh}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] ergibt sich eine Speichermasse von mindestens 447,8 kg. Bei einer Annahme von $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ als Dichte für Wasser, ergibt sich ein Mindestvolumen von 447,8 Liter. Da aktuell ein 1500 Liter Pufferspeicher in der Kälteanlage installiert ist, ist diese Anforderung erfüllt und das Aggregat kann ohne Abnahme für 50,25 Minuten betrieben werden, auch wenn keine Abnahme auf der Kälteseite erfolgt.

Der Hersteller fordert für den reibungslosen Betrieb konstante Volumenströme und idealerweise auch konstante Temperaturspreizungen. Um diese Forderungen erfüllen zu können, werden elektronisch geregelte Umwälzpumpen und 3-Wege-Mischer in einer Beimischschaltung eingesetzt. Der kV-Wert des Mischers ist nach Gleichung 14 auf den nominalen Durchsatz auszulegen.

$$k_V = \dot{V} \sqrt{\frac{\rho}{1000 \cdot \Delta p_V}} \quad [24] \quad \text{Gleichung 14}$$

k_V	-	Ventilkennwert	$[\text{m}^3/\text{h}]$
$\dot{V}$	-	Volumenstrom/ nominaler Durchsatz	$[\text{m}^3/\text{h}]$
Δp_V	-	Druckverlust über dem Ventil	$[\text{m}^3/\text{h}]$

Bei einer Ventilautorität von 50% ist nach Gleichung 15 der Druckverlust über dem Ventil genau so groß wie der Druckverlust über dem volumenstromvariablen Teil des Kreises.

$$a = P_V = \frac{\Delta p_V}{\Delta p_{ges}} = \frac{\Delta p_V}{\Delta p_{var} + \Delta p_V} = 0,3 \leq a \leq 0,7 \quad [24] \quad \text{Gleichung 15}$$

$a; P_V$	-	Ventilautorität	[]
Δp_{var}	-	Druckverlust über den volumenstromvariablen Teil der Anlage	$[\text{bar}]$

Unter dieser Festlegung kann der Druckverlust über den volumenstromvariablen Anlagenteil bestimmt und zur Auslegung verwendet werden. Die genaue Auslegung

des Ventils kann erst erfolgen, wenn die Ausführungsplanung erfolgt, da sich der Druckverlust aufgrund der Rohrführung und des internen Druckverlustes des gewählten Aggregats verändert.

Durch die feuchte Betriebsweise ist eine höhere Wärmeabgabe, als bei der trockenen Betriebsweise möglich. Da das Rückkühlwerk im Außenbereich steht, ist auf den Frostschutz des Rückkühlwassers zu achten. Die weiteren technischen Unterlagen sind im Anhang 7 hinterlegt.

Ein Schemenvorschlag zur Installation des Herstellers ist in Abbildung 5.5 dargestellt. In diesem Schema sind alle externen Wasserkreisläufe (Kaltwasserkreis, Heizungskreis und der Rückkühlkreis) und erforderlichen Daten- beziehungsweise Fühlerkabel für die Regelung der Absorptionskältemaschine dargestellt. Die Einbauegegenstände, wie Rückschlagklappen und Ventile, sind aufgrund der vereinfachten Darstellung nicht in diesem Schema dargestellt.

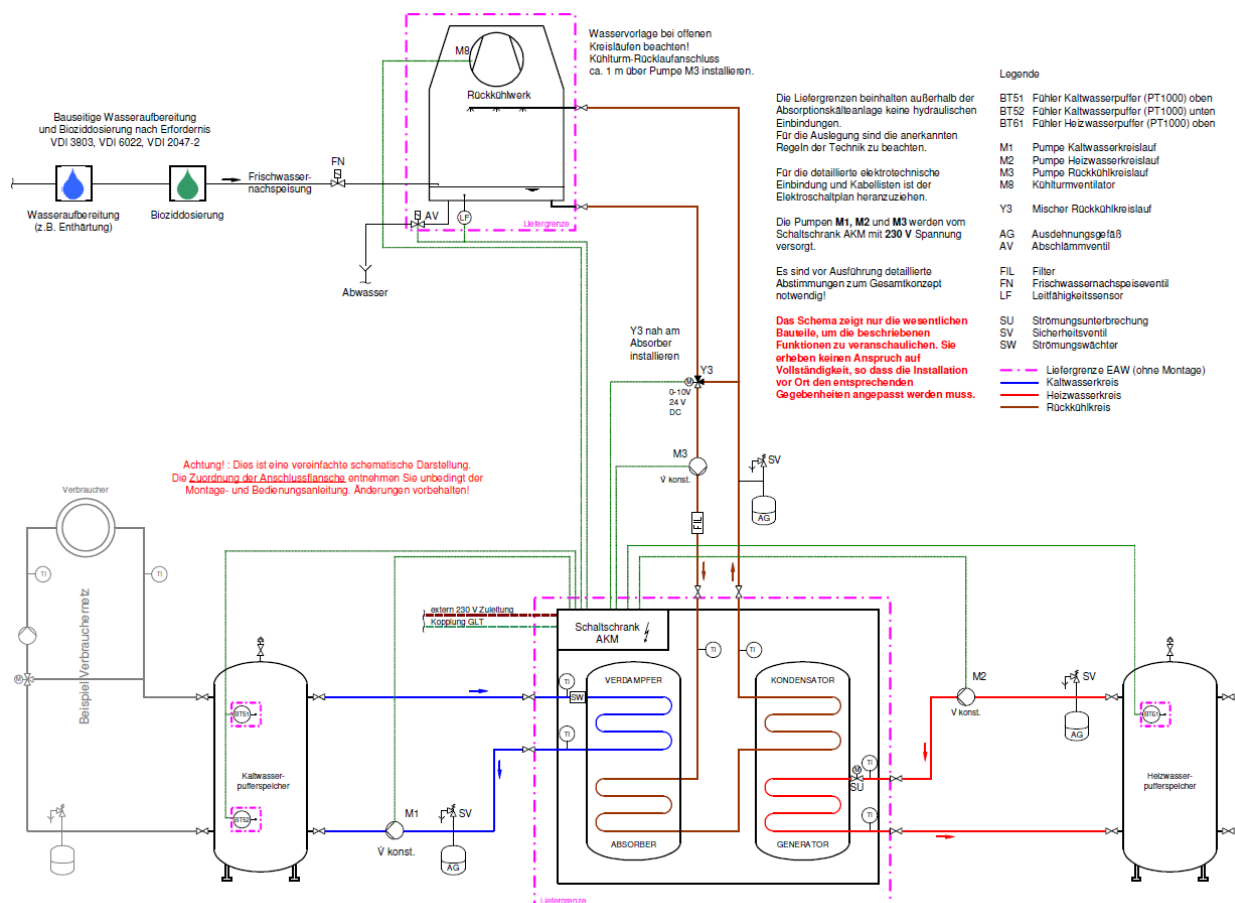


Abbildung 5.5 Schemenvorschlag von EAW [6,26]

Abweichend von diesem Schema ist in Kapitel 4.2 die Einbindung des Aggregates in das Anlagenschema der Firma Veltum dargestellt. Der Schaltschrank der

Absorptionskältemaschine wird an die Gebäudeleittechnik des Firmengebäudes angeschlossen.

Um die voraussichtlich erzeugte Kälteenergie dieses Aggregats zu bestimmen, können die Berechnungen auf Basis der Jahresdauerlinie verwendet werden. Da die Berechnung nach der DIN V 18599-7 nur den Jahresgesamtkälteenergiebedarf [23] ergibt und für diese Berechnung nur die Grundlastkälteenergie zu betrachten ist, ist die Berechnung nach dieser Norm nicht zielführend und wird nicht durchgeführt.

5.2 Kälteaggregat Typ Yazaki WFC-SC 05 der Firma Yazaki

Das Angebot für das Aggregat vom Typ Yazaki WFC-SC 05 (Abbildung 5.6) der Firma Gasklima ist im Anhang 8 hinterlegt und wird bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Kapitel 6 verwendet.



Abbildung 5.6 Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC 05 [27]

Um die Größenverhältnisse des Aggregats einschätzen zu können, ist die Kältemaschine in Abbildung 5.7 in verschiedenen Ansichten dargestellt und bemaßt.

Die Kälteleistung dieser Kältemaschine liegt bei 17,6 kW und kann das Kaltwasser auf bis zu 7°C herabkühlen, wenn die Eingangsparameter, welche im Anhang 9 beschrieben sind, eingehalten werden [27,28]. Die minimale Heizwassertemperatur beträgt 63°C und die maximale Heizwassertemperatur 95°C. Die angegebene Kälteleistung von 17,6 kW wird nur erreicht, wenn die Heizwassertemperatur 88°C beträgt. Da bei diesem Projekt in der Regel eine Temperatur von 80°C anliegt, ist eine Leistungskorrektur erforderlich. Für diesen Fall stellt der Hersteller mehrere Leitungsdiagramme bereit (Abbildung 5.8).

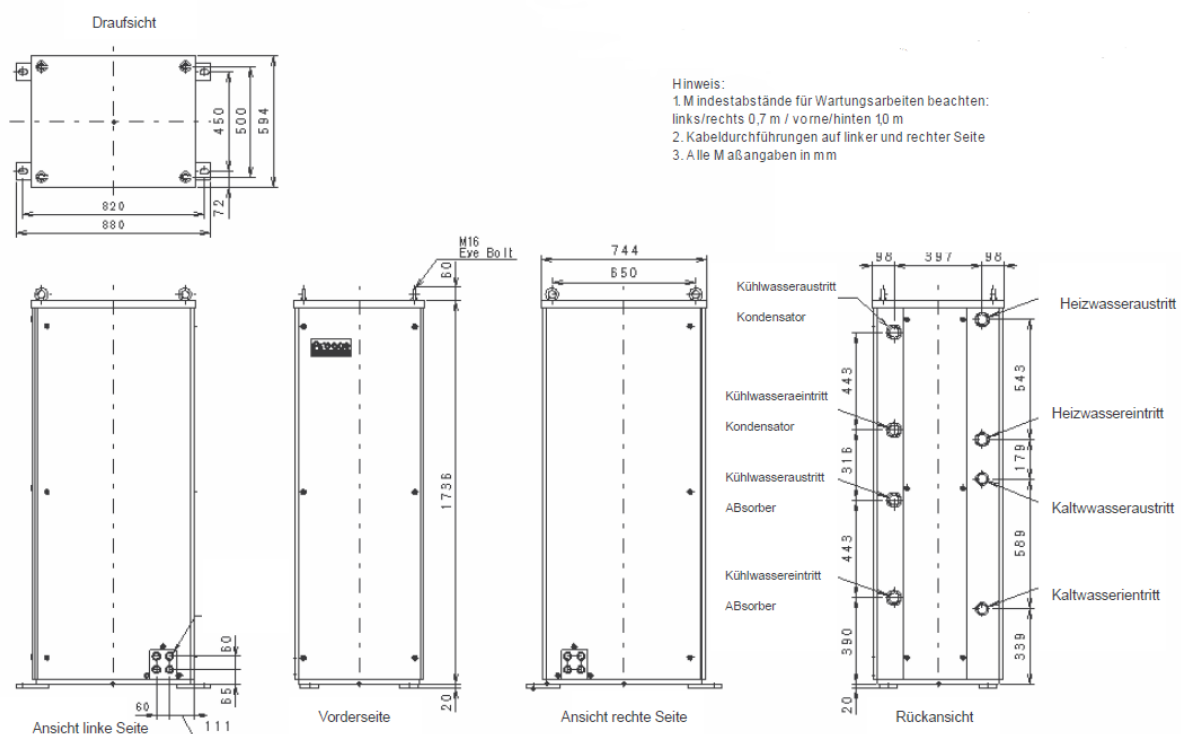


Abbildung 5.7 Ansichtszeichnung Yazaki WFC-SC 05 [27,28]

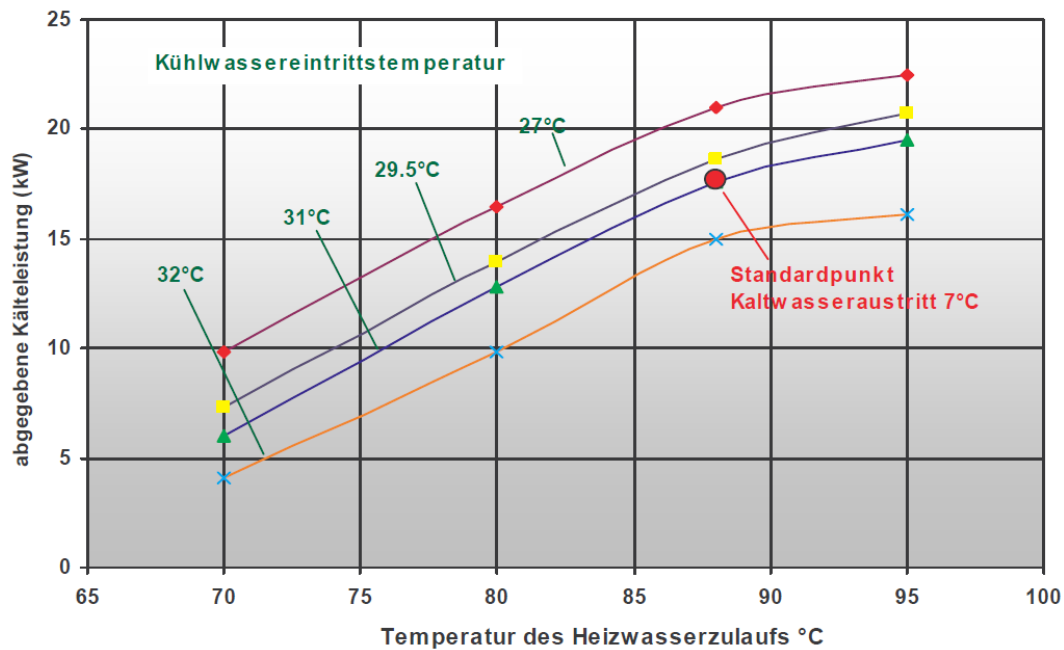


Abbildung 5.8 Leistungsdiagramm in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur [27,28]

Unter Berücksichtigung des Leistungsdiagramms steht bei einer Heizwassertemperatur von 80°C und einer Kühlwassereintrittstemperatur von 29,5°C eine Kälteleistung von 15 kW an. Diese Kälteleistung ist bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 6 heranzuziehen. Näherungsweise kann die Leistungsbestimmung bei einer Vorlauftemperatur von 80 °C und einer Rückkühltemperatur von 28,5 °C über folgende Funktion ermittelt werden:

$$y = -0,2393x^2 + 4,4836x + 3,92$$

(y= Kälteleistung; x= Kennzahl für die Position der Heizungsvorlauftemperatur im Diagramm)[Darstellung der Berechnung und der Kennzahlen im Anhang 17]. Weichen die Anlagenparameter von den aufgelisteten Parametern ab, ist eine neue Funktion durch das Leistungsdiagramm zu ermitteln.

In Abbildung 5.9 ist die Wärmebilanz an einem Schema des Kreislaufes dargestellt. Die angetragenen Leistungen ergeben sich bei der Einhaltung der Ausgangsparameter in Anhang 9.

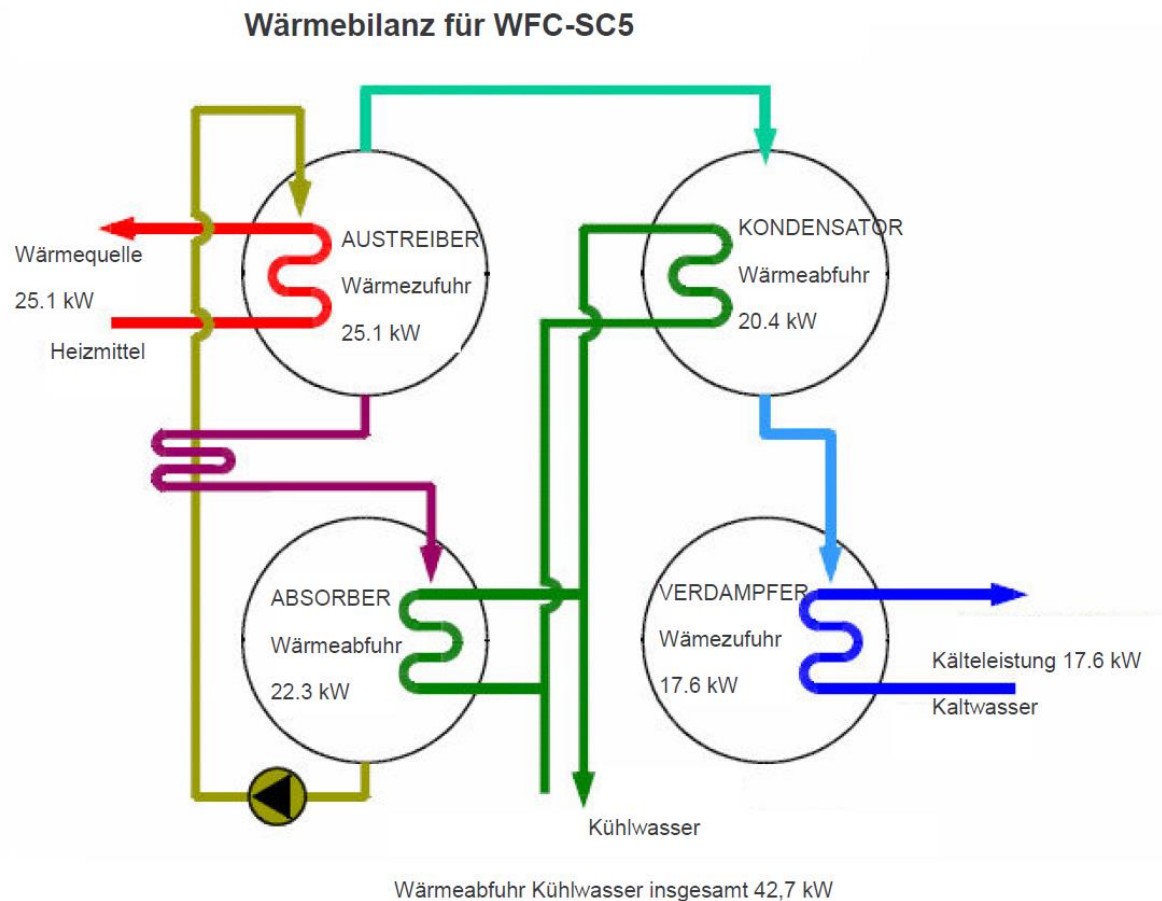


Abbildung 5.9 Wärmebilanz der Absorptionskältemaschine [27,28]

Der Hersteller schreibt eine direkte Anbindung an einen Pufferspeicher auf der Heizungsseite und auf der Kälteseite vor. Um die geforderten Temperaturdifferenzen und Volumenströme einzuhalten, ist auf beiden Anlagenseiten ein 3-Wege-Mischer erforderlich, welcher in der Beimischschaltung installiert ist. Die Auslegung der Mischer erfolgt wie bei dem Aggregat der Firma EAW in Kapitel 5.1.

Von der Firma Gasklima wurde die Empfehlung ausgesprochen einen Rückkühlturm von der Firma Huckle (Anhang 12; Abbildung 5.10) zu verwenden. Dieser Rückkühler arbeitet mit der feuchten Rückkühlung. Hierbei ist keine Begleitheizung oder Glykol erforderlich, da der Rückkühler höher positioniert ist als das Kälteaggregat und das Kühlwasser in einen geschlossenen Auffangbehälter innerhalb des Gebäudes zurückläuft [29].



Abbildung 5.10 Kühlturm der Firma Huckle mit einer Rückkühlleistung von 43 kW [29]

5.3 Kälteaggregat der Firma Invector

Das Angebot für das Aggregat vom Typ Invector LTC 15 e plus (Abbildung 5.10) der Firma Invector ist im Anhang 10 hinterlegt und wird bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Kapitel 6 verwendet.

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

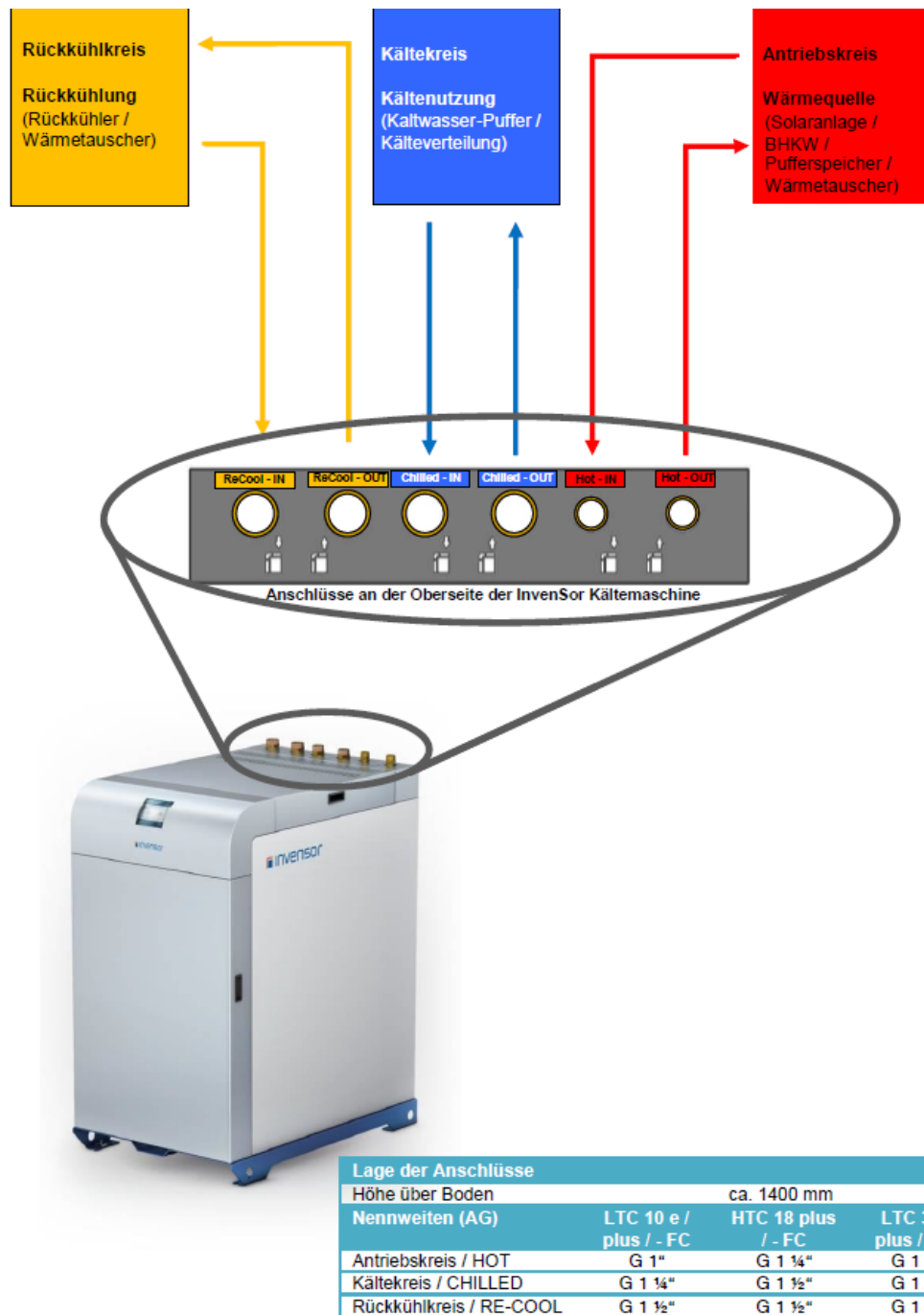


Abbildung 5.11 InvenSor LTC 10 e plus [30]

Zur Verdeutlichung der Aggregatabmessungen ist die Ansichtszeichnung in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Nennkälteleistung des Aggregats liegt bei 10 kW. Um höhere Kälteleistungen zu erzielen, wird vom Hersteller als Alternative zum nächst größeren Aggregat eine Kaskadenschaltung empfohlen.

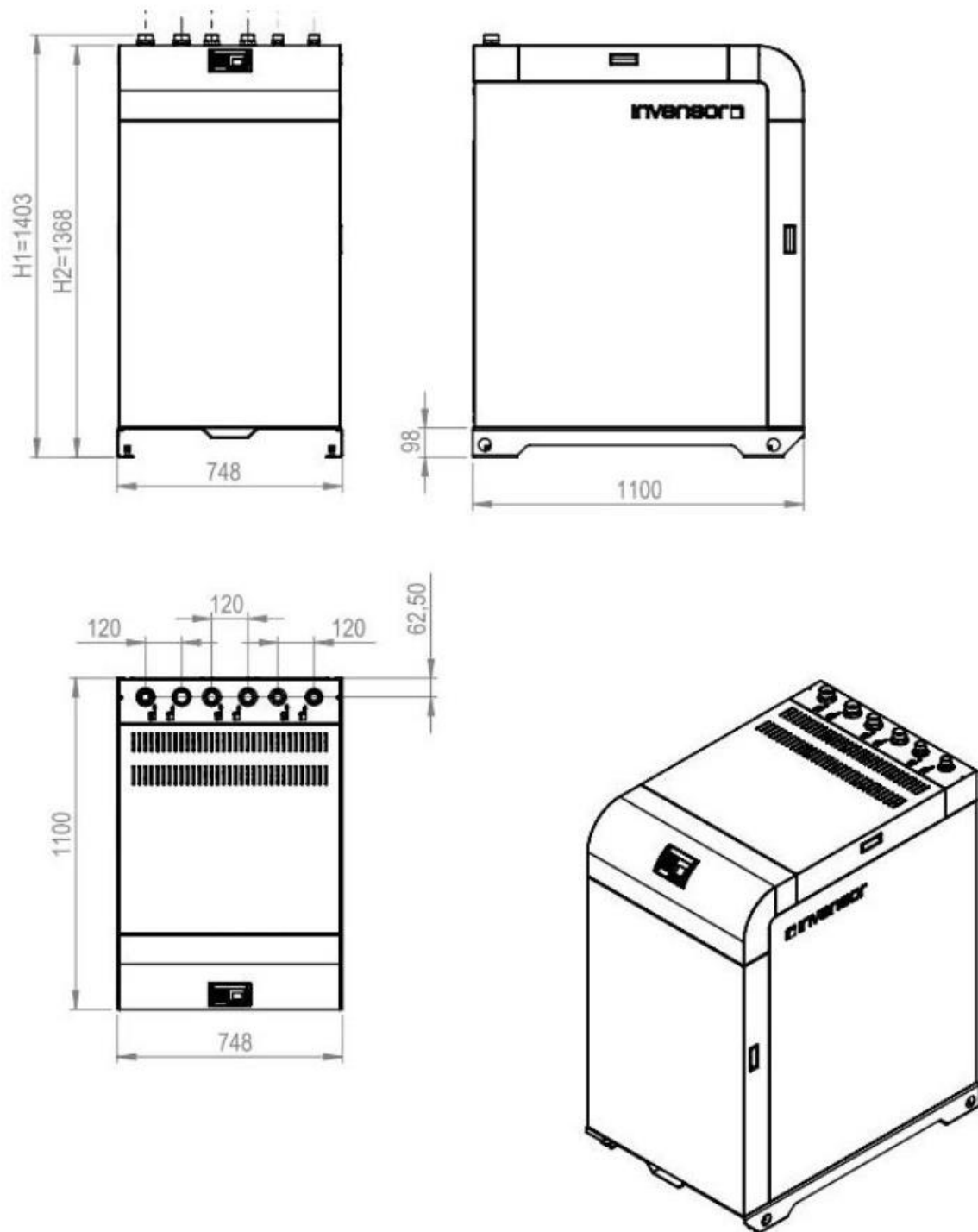


Abbildung 5.12 Ansichten der Adsorptionskältemaschine [30]

Wie bei den Adsorptionsaggregaten können die Betriebskälteleistung und der COP durch Leistungsdiagramme auf Basis der vorhandenen Parameter bestimmt werden (Anhang 11, Abbildung 5.13).

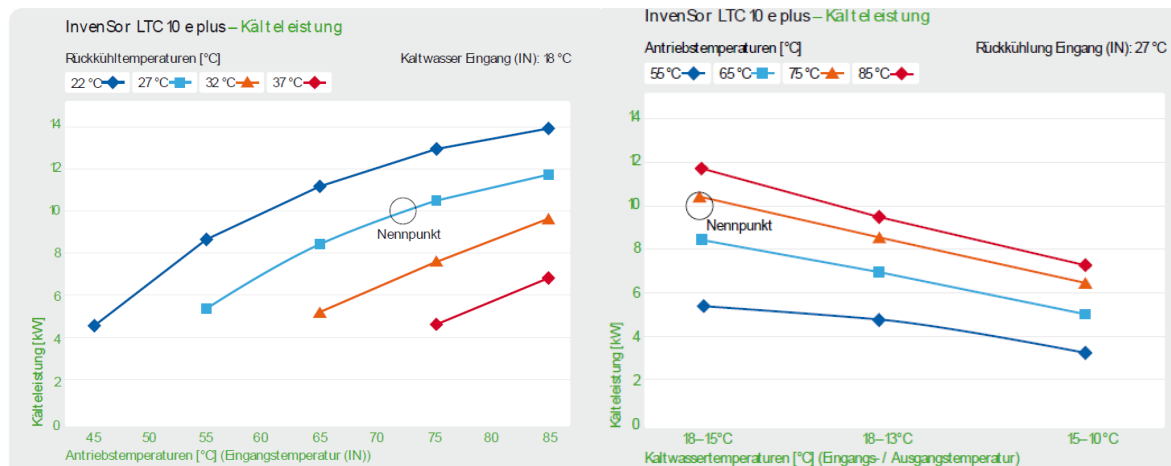


Abbildung 5.13 Leistungsdiagramm InvenSor LTC 10 e plus [30]

Aus den Leistungsdiagrammen geht hervor, dass bei den vorhandenen Parametern (Rückkühltemperatur 27°C und Heizungsvorlauftemperatur 80°C), eine Kälteleistung von 10 kW abgegeben werden kann. Näherungsweise kann die Leistungsbestimmung bei einer Vorlauftemperatur von 80 °C und einer Rückkühltemperatur von 29 °C über folgende Funktion ermittelt werden:

$$y = -0,1179x^2 + 1,9793x + 3,26$$

(y= Kälteleistung; x= Kennzahl für die Position der Heizungsvorlauftemperatur im Diagramm)[Darstellung der Berechnung und der Kennzahlen im Anhang 18].

Weichen die Anlagenparameter von den aufgelisteten Parametern ab, ist eine neue Funktion durch das Leistungsdiagramm zu ermitteln.

In Abbildung 5.14 ist ein Schemenvorschlag der Firma InvenSor dargestellt. Aus dem Schema und der Installations- und Bedienungsanleitung geht hervor, dass das Aggregat direkt an einen Heizungs- und einen Kältepufferspeicher angeschlossen werden muss. Dieser Anforderung wird bei der in Kapitel 4.2 beschriebenen Einbindung entsprochen.

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

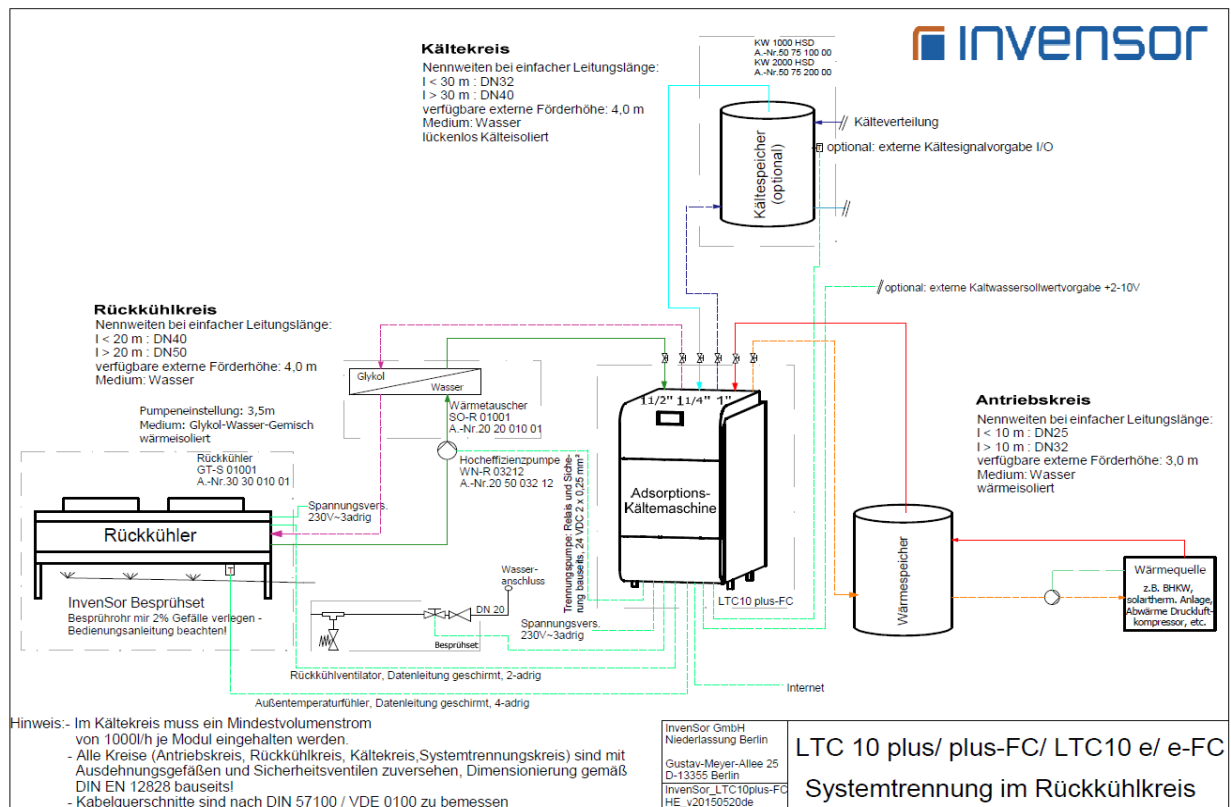


Abbildung 5.14 Anlagenschema InvenSor [30]

Aus dem Schema geht hervor, dass der Außenbereich des Rückkühlkreises über einen Wärmeübertrager vom Innenbereich hydraulisch getrennt ist. Hierdurch kann der Außenbereich mit einem Wasser-Glykol-Gemisch und der Innbereich mit Wasser betrieben werden. Der vorgeschlagene Rückkühler ist ein Tischkühler mit einer Spitzenlastbesprühung, welcher direkt von dem Aggregat angesteuert wird. Da die Besprühung nur im Spitzenlastfall und bei hohen Außentemperaturen stattfindet, ist der Wasserverbrauch mit 2 m³/a im Vergleich zu den anderen feuchten Rückkühlern sehr gering. Da die Spitzenlastbesprühung in der Regel nur im Sommer erforderlich ist, ist die Leitung für die Besprühung vorzugsweise ab den Übergangsmonaten zu entleeren, um somit Frostschäden zu vermeiden [30].

6 Wirtschaftlicher Vergleich nach VDI 2067

6.1 Berechnungsweg der Annuitätenmethode

Die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen erfolgt über die Kostenberechnung nach der Richtlinie VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen der Kostenberechnung“. Für die Berechnung dieses Projekts wird die Annuitätenmethode verwendet. Hierdurch können die Lebenszykluskosten ermittelt, verglichen und auf einen konstanten, regelmäßig zu zahlenden Betrag umgerechnet werden. Zusätzlich ist es möglich nach einer bestimmten Betriebszeit Ersatzinvestitionen auf den Anfangszeitpunkt abzuzinsen und in der Annuitätenberechnung zu berücksichtigen. Durch die Bestimmung des Restwertes der Ersatzinvestition und der Grundinvestition können alle beliebigen Betrachtungszeiträume verglichen werden. Die Annuitätenmethode unterscheidet in vier verschiedene Kostengruppen:

- Kapitalgebundene Kosten (beinhaltet Erneuerung)
- Bedarfsgebundene Kosten (früher verbrauchsgebundene Kosten)
- Betriebsgebundene Kosten (beinhaltet Instandsetzung) [31]
- Sonstige Kosten (Versicherungen, Steuern...)

6.1.1 Kapitalgebundene Kosten

Für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten nach der Annuitätenmethode sind die Investitionskosten und die abgezinsten Ersatzinvestitionskosten zu bestimmen. Wird in dem Betrachtungszeitraum nicht die rechnerische Nutzungsdauer der Bauteile überschritten, so ist keine Ersatzinvestition erforderlich. Die Berechnung der kapitalgebunden Kosten erfolgt nach dem nachfolgendem Berechnungsweg.

Bestimmung des Zinsfaktors:

$$q = 1 + \frac{i}{100} \quad [31;32] \quad \text{Gleichung 16}$$

q - Zinsfaktor []

i - Zinssatz [%]

Mit dem Zinsfaktor ist es möglich den Annuitätsfaktor zu ermitteln:

$$a = \frac{q^T * (q-1)}{q^T - 1} \quad [31] \quad \text{Gleichung 17}$$

a - Annuitätsfaktor []

T - Betrachtungszeitraum [a]

Der in den Gleichungen für die Ersatzinvestitionen erforderliche
Preisänderungsfaktor errechnet sich wie folgt:

$$r = 1 + \frac{j}{100} \quad [31] \quad \text{Gleichung 18}$$

r - Preisänderungsfaktor []

j - Preisänderungssatz []

Wird die rechnerische Nutzungsdauer eines Aggregats oder Bauteils in dem
betrachteten Zeitraum überschritten, so ist eine Ersatzinvestition erforderlich. Über
die folgende Gleichung ist es möglich den Barwert der Ersatzinvestition zu ermitteln:

$$A_n = A_0 * \frac{r^{(n*T_N)}}{q^{(n*T_N)}} \quad [31] \quad \text{Gleichung 19}$$

A_n	-	Barwert der Ersatzinvestition	[€]
A_0	-	Investitionskosten	[€]
n	-	Anzahl der Ersatzinvestitionen im Betrachtungszeitraum	[]
T_N	-	Rechnerische Nutzungsdauer der Anlage	[a]

Der tendenzielle Verlauf der Barwerte der Ersatzbeschaffungen ($A_0, A_1, \dots, A_n$) ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

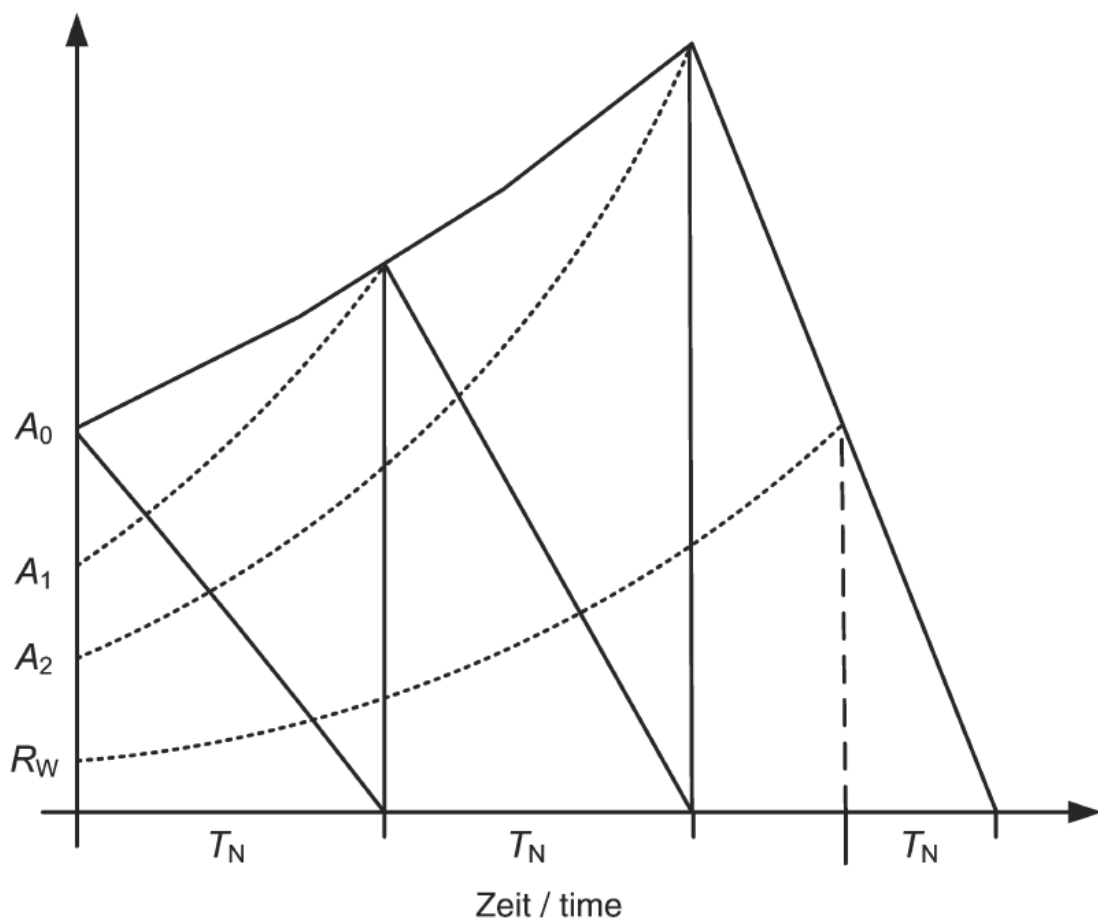


Abbildung 6.1 tendenzieller Verlauf der Barwerte der Ersatzbeschaffungen [31]

Diese Darstellung zeigt das Verhältnis der Investitionen nach der rechnerischen Nutzungsdauer der vorgehenden Investition. Die Steilheit der Kurven ist abhängig von dem Preisänderungsfaktor und dem Zinsfaktor, wie in Gleichung 19 beschrieben. Ist der Preisänderungsfaktor kleiner als der Zinsfaktor, so bildet die Kurve entgegen der Darstellung einen degressiven Verlauf ab.

Liegt die rechnerische Nutzungsdauer außerhalb des Betrachtungszeitraums, ist der Barwert des Restwertes zu bestimmen und in der Gesamtbetrachtung abzuziehen, um die Ergebnisse der Aggregate bei unterschiedlichen rechnerischen Nutzungsdauern vergleichen zu können:

$$B_{RW} = A_0 * r^{(n*T_N)} \left[\frac{(n+1)*T_N - T}{T_N} \right] * \frac{1}{q^T} \quad [31] \quad \text{Gleichung 20}$$

B_{RW} - Barwert des Restwertes [€]

T - Betrachtungszeitraum [a]

Die für die Gesamtbetrachtung erforderlichen, jährlichen kapitalgebundenen Kosten können anschließend nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - B_{RW}) * a \quad [31,32] \quad \text{Gleichung 21}$$

$A_{N,K}$ - Jährliche Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€/a]

$A_{0,1,\dots,n}$ - Barwert der ersten, zweiten, ..., n-ten Ersatzinvestition [€]

In der alten VDI 2067 waren die Instandsetzungskosten Bestandteil der kapitalgebundenen Kosten. Nach der neuen VDI 2067 sind die Instandsetzungskosten den betriebsgebundenen Kosten hinzuzurechnen und daher in Kapitel 6.1.3 aufgeführt.

6.1.2 Bedarfsgebundene Kosten

Zu den bedarfsgebundenen Kosten zählen nach VDI 2067 die Energiekosten und die Bereitstellungskosten, die in Form eines Grundpreises oder Messpreises auftreten können, insofern diese nur aufgrund der betrachteten Anlage entstehen. Des

Weiteren sind die Kosten zu beachten, die für die Energieträgerlieferung entstehen. Da für die Rückkühlung Wasser erforderlich ist, muss der Wasserverbrauch auch den bedarfsgebundenen Kosten hinzugerechnet werden. [32]

Da es sich hierbei um laufende Kosten handelt, welche in der Regel Preissteigerungen unterliegen, ist ein zusätzlicher Faktor, der preisdynamische Barwertfaktor, zu berücksichtigen:

$$b = \frac{1 - \left[\frac{r}{q}\right]^T}{q - r} \quad [31] \quad \text{Gleichung 22}$$

$$\text{für } r = q \text{ gilt } b = \frac{T}{q} \quad [31] \quad \text{Gleichung 23}$$

b - preisdynamischer Barwertfaktor []

Ein Index an dem preisdynamischen Barwertfaktor gibt an, für welche Kosten dieser Faktor zu verwenden ist. Ist der Barwertfaktor mit einem „V“ indiziert, so ist er für die bedarfsgebundenen Kosten zu verwenden. Die einzelnen Barwertfaktoren können unterschiedliche Werte aufweisen in Abhängigkeit davon welcher Preissteigerungsfaktor für die betrachtete Investition gilt.

Die bedarfsgebundenen Kosten können durch nachfolgende Formel ermittelt werden:

$$A_{V1} = Q_{\text{Wärme}} * \text{Preis}_{\text{Wärme}} + Q_{\text{Kälte}} * \text{Preis}_{\text{Kälte}} + \\ Q_{\text{Strom}} * \text{Preis}_{\text{Strom}} + Q_{\text{Wasser}} * \text{Preis}_{\text{Wasser}} \quad [31] \quad \text{Gleichung 24}$$

A_{V1} - bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr [€/a]

$Q_{\text{Wärme}}$ - Energieaufwand der Wärmeerzeugung [kWh/a]

$Q_{\text{Kälte}}$ - Energieaufwand der Kälteerzeugung [kWh/a]

Q_{Strom} - Stromaufwand [kWh/a]

Q_{Wasser}	-	Wasseraufwand	[m ³ /a]
$Preis$	-	Energie- oder Wasserpreis	[€/kWh; €/m ³]

Um die einzelnen Energieaufwände und den Wasseraufwand zu bestimmen, muss die von der Absorptionskältemaschine zu erzeugende Kälteenergie errechnet werden. Da die betrachtete Anlage in eine Grund- und eine Spitzenlastanlage aufgegliedert wird, ist eine Ermittlung des Gesamtkältebedarfes nach DIN V 18599 Teil 7 für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Grundlastanlage nicht zielführend, da bei dieser Methode keine Unterteilung in die Grund- und Spitzenlast vorgesehen ist. Um nur die von der Absorptionskältemaschine erzeugte Kälteenergie zu bestimmen, ist die Jahresdauerlinie mit der Eintragung der jeweiligen Kälteleistung der Absorptionskältemaschine zu verwenden. Der Leistungsbereich, in dem die Grundkälteleistung über der erforderlichen Leistung liegt, ist von der Kombination der Absorptionskältemaschine mit dem Kältepufferspeicher zu decken. Nach der Bestimmung der erzeugten Kälteenergie kann über Gleichung 25 die Laufzeit der Absorptionskältemaschine berechnet werden:

$$t_{AKM} = \frac{Q_{Kälte,Grundlast}}{\dot{Q}_{AKM}} \quad \text{Gleichung 25}$$

t_{AKM}	-	Laufzeit der Absorptionskältemaschine	[h/a]
$Q_{Kälte,Grundlast}$	-	Erzeugte Kälteenergie der Grundlastanlage	[kWh/a]
$\dot{Q}_{AKM}$	-	Kälteleistung der Absorptionskältemaschine	[kW]

Über die Laufzeit der Absorptionskältemaschine ist es möglich mithilfe der Herstellerangaben, die anderen Energiebedarfe und den Wasserbedarf zu bestimmen:

$$Q_{Aufwand} = \dot{Q}_{Aufwand} * t_{AKM} \quad \text{Gleichung 26}$$

$Q_{Aufwand}$ - Energieaufwand [kWh/a]

$\dot{Q}_{Aufwand}$ - Leistung des jeweiligen Bereiches [kW]

$$V_{Aufwand} = \dot{V}_{Aufwand} * t_{AKM} \quad \text{Gleichung 27}$$

$V_{Aufwand}$ - erforderlicher Wasserbedarf [m³/a]

$\dot{V}_{Aufwand}$ - erforderlicher Wasservolumenstrom [m³/h; l/s]

Nach der Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten im ersten Jahr wird über Gleichung 28 die Annuität der bedarfsgebundenen Kosten ermittelt:

$$A_{N,V} = A_{V1} * a * b_V \quad [31] \quad \text{Gleichung 28}$$

$A_{N,V}$ - Annuität der bedarfsgebundenen Kosten [€/a]

6.1.3 Betriebsgebundene Kosten

Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten die Kosten der Aufwände für die Wartung, Inspektion und der Instandsetzung. Auch die betriebsgebundenen Kosten sind aufgrund steigender Lohn- und Materialkosten mit einem preisdynamischen Barwertfaktor zu multiplizieren:

$$A_{IN} = A_0 * (f_{Inst} + f_{W+Insp}) \quad [31] \quad \text{Gleichung 29}$$

$$A_{N,B} = A_{B1} * a * b_B + A_{IN} * a * b_{IN} \quad [31] \quad \text{Gleichung 30}$$

A_{IN} - Instandhaltungskosten im ersten Jahr [€/a]

f_{Inst} - Faktor für den Aufwand der Instandsetzung []

f_{W+Insp}	-	Faktor für Wartung und Inspektion	[]
$A_{N,B}$	-	Annuität der betriebsgebundenen Kosten	[€/a]
A_{B1}	-	Betriebsgebundene Kosten für Bedienung im ersten Jahr	[€]
b_B	-	Preisdynamischer Barwertfaktor der betriebsgebunden Kosten	[]
b_{IN}	-	Preisdynamischer Barwertfaktor der Instandhaltungskosten	[]

6.1.4 Sontige Kosten

Zu den sonstigen Kosten zählen die Aufwendungen für Versicherungen oder Steuern. Auch die sonstigen Kosten sind mit einem preisdynamischen Barwertfaktor zu multiplizieren:

$A_{N,S} = A_{S1} * a * b_S$	[31]	Gleichung 31
$A_{N,S}$	-	Annuität der sonstigen Kosten [€/a]
A_{S1}	-	Sonstige Kosten in dem ersten Jahr [€/a]
b_S	-	Preisdynamischer Barwertfaktor für sonstige Kosten []

6.1.5 Erlöse

Erlöse können den vorher beschriebenen Kostenarten zugeordnet werden. Fördermittel und andere Investitionszuschüsse zählen zu den kapitalgebundenen Erlösen. Einspeisevergütungen sind den bedarfsgebundenen Erlösen zuzuordnen.

Der Verkauf von Wärme, Strom oder Kälte ist ebenfalls den bedarfsgebundenen Erlösen anzurechnen. Des Weiteren muss unterschieden werden, ob eine jährliche oder eine einmalige Zahlung erfolgt. Bei den jährlichen Zahlungen ist der preisdynamische Barwertfaktor für Erlöse zu verwenden, da diese Zahlungen ebenfalls Preisänderungen unterliegen.

$$A_{NE} = E_1 * a * b_E \quad [31] \quad \text{Gleichung 32}$$

A_{NE} - Annuität der Erlöse [€/a]

E_1 - Erlöse im ersten Jahr [€]

b_E - Preisdynamischer Barwertfaktor für Erlöse []

Handelt es sich um einmalige Zahlungen, wie zum Beispiel bei den kapitalgebundenen Erlösen, so ist deren Annuität ohne den preisdynamischen Barwertfaktor für Erlöse zu berechnen.

$$A_{NE} = E_{\text{Einmalzahlung}} * a \quad \text{Gleichung 33}$$

6.1.6 Annuität der Jahresgesamtzahlungen

Die Berechnung der Gesamtannuität erfolgt durch die Bildung der Differenz aus der Annuität der Erlöse und der Summe der Annuitäten der vier Kostenarten:

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S}) \quad [31] \quad \text{Gleichung 34}$$

Die VDI 2067 unterscheidet bei der Betrachtung der Gesamtannuität in zwei Möglichkeiten:

- Die erste Möglichkeit bezieht sich auf Anlagen, welche durch den Verkauf von Wärme, Kälte oder Strom erwirtschaftet werden sollen. Bei diesen Anlagen muss das Ergebnis aus Gleichung 34 $A_N > 0$ sein. In einer Vergleichsrechnung ist die Anlage mit der größten Gesamtannuität zu bevorzugen. [31]
- Die zweite Möglichkeit betrachtet Anlagen, bei denen keine Erlöse in Form von Energieverkauf auftreten. Dies ist bei Heizungs- und Kälteanlagen für den Eigenbetrieb von Gebäuden der Fall. In diesem Fall ist die Anlage mit den geringsten Kosten nach der Gleichung 34 $[A_N < 0]$ zu bevorzugen. [31]

Um die Anlagen wirtschaftlich vergleichen zu können, werden spezifische Kälteerzeugungskosten der einzelnen Anlagen ermittelt. Die Bildung der spezifischen Kälteerzeugungskosten erfolgt durch Gleichung 35.

$$k_{0, \text{spezifisch}} = \frac{-A_N}{Q_{0, AKM}} \quad \text{Gleichung 35}$$

6.2 Annuitätenmethode WEGRACAL SE 15

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach dem Annuitätenverfahren der VDI 2067 ist für das erste Aggregat ausführlich in diesem Kapitel dargestellt. Die Berechnungen der anderen Aggregate sind durch eine selbst programmierte Excel-Tabelle erstellt worden und in dem entsprechenden Kapitel aufgeführt. In Tabelle 6.1 sind die Ausgangswerte der Berechnung dargestellt. Die aufgeführten Preisänderungssätze sind Mittelwerte aus den Preisen der letzten 5 Jahre.

Ausgangswerte			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	T	20	a
Rechnerische Nutzungsdauer	T_N	20	a
Zinssatz	i	1,00%	
Zinsfaktor	q	1,010	

Preisänderungssatz für Ersatzinvestitionen	j_k	3,00%
Preisänderungsfaktor für Ersatzinvestitionen	r_k	1,030
Preisänderungssatz für Instandhaltung	j_{Inst}	3,50%
Preisänderungsfaktor für Instandhaltung	r_{Inst}	1,035
Preisänderungssatz für bedarfsgebundene Kosten	Gas	j_v 5,00%
	Strom	7,00%
	Wasser	5,00%
Preisänderungsfaktor für bedarfsgebundene Kosten	Gas	r_v 1,050
	Strom	1,070
	Wasser	1,050
Preisänderungssatz für betriebsgebundene Kosten	j_B	3,50%
Preisänderungsfaktor für betriebsgebundene Kosten	r_B	1,035
Gaspreis im ersten Jahr		4,8 Ct/kWh
Strompreis im ersten Jahr		27,0 Ct/kWh
Wasserpreis im ersten Jahr		3,0 €/m ³

Tabelle 6.1 Ausgangswerte für die Annuitätenberechnung

Berechnung der Annuität:

$$a = \frac{1,01^{20} * (1,01 - 1)}{1,01^{20} - 1} = 0,05542$$

Berechnung der kapitalgebundenen Kosten (entnommen aus dem Angebot der Fa. EAW Anhang 6 und dem Angebot der Firma Veltum für die Installation Anhang 15):

$$A_0 = K_{AKM} + K_{Rückkühler} + K_{Montage+Rohrleitungen} + K_{IBN} \quad \text{Gleichung 36}$$

$$= 29.414\text{€} + 4.745\text{€} + 10.317,65\text{€} + 2.100\text{€} = 46.576,65\text{€}$$

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

Da keine Ersatzinvestition notwendig ist, muss der preisdynamische Barwertfaktor der Ersatzinvestition bei der Bestimmung der Annuität nicht berücksichtigt werden.

$$A_{N,K} = 46.576,65\text{€} * 0,05542 = 2.581,06 \text{ €/a}$$

Die Berechnung der durch die Absorptionskältemaschine bereitgestellten Kälteenergie ist im Anhang 2 hinterlegt. Hierfür wurde die Jahresdauerlinie (Abbildung 6.2) verwendet. Die bereitgestellte Kälteenergiemenge der Grundlastkälteleistung von 12,5 kW beträgt, durch Ermittlung der Fläche unter der Grundlastlinie, 63.716,8 kWh/a (Anhang 2). Um auch dem Bereich der geringeren Kühllast eine Vollaststundenanzahl der Absorptionskältemaschine zuordnen zu können, ist der Kältepufferspeicher erforderlich. Hierdurch kann eine Mindestlaufzeit des Aggregats gewährleistet werden und es ist möglich die Energie durch die Kälteleistung der Absorptionskälte zu dividieren, um die Gesamtlaufzeit zu erhalten (Gleichung 37). Die Leistungen des Aggregats und die, aufgrund der Betriebszeit, berechneten Energiewerte sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

$$t_{AKM} = \frac{Q_0}{\dot{Q}_0} = \frac{63.716,8 \text{ kWh}}{12,5 \text{ kW}} = 5097,35 \text{ h} \quad \text{Gleichung 37}$$

Ermittlung der erzeugten Kälteenergie der Absorptionskältemaschine	
Aggregat: Wegracal SE15	
Kälteleistung unter gegebenen Anlagenparametern:	12,5 kW
erforderliche Heizleistung	21 kW
Rückkühlleistung	36 kW
Motorleistung Rückkühler	0,37 kW
Verdunstungsverlust Rückkühler	0,015 l/s

Vollastbetrieb ohne Pufferspeicher:	3570 h
Kälteenergie durch AKM (Vollast und Teillast)	63.716,83 kWh
Vollastbetrieb mit Pufferspeicher:	5.097,35 h
erforderliche Wärmeenergie	107.044,28 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch die Solaranlage	5250 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch BHKW für AKM	101.794,28 kWh
Betriebsstunden BHKW für AKM	6.786,29 h
Stromverbrauch Rückkühler	1.886,02 kWh
Wasserverbrauch Rückkühler	275,26 m³/a

Tabelle 6.2 Kälteenergie und Betriebsstunden Wegracal

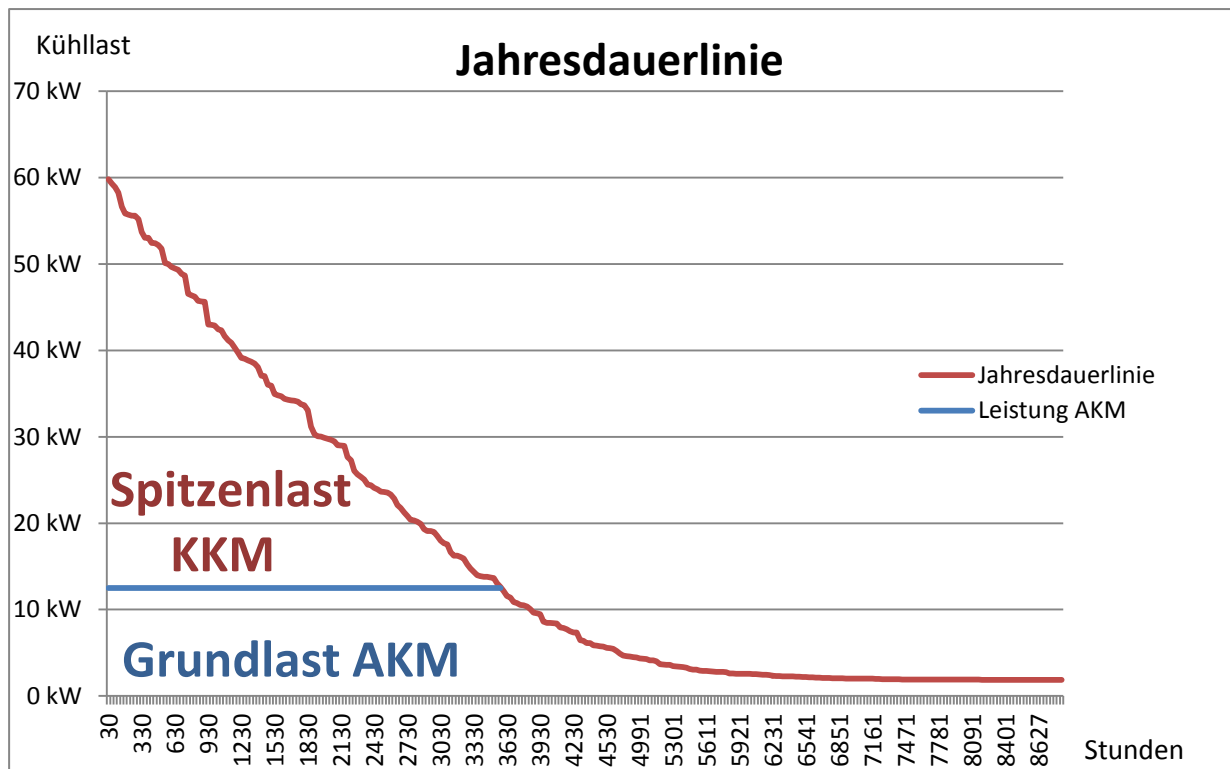


Abbildung 6.2 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Wegracal SE 15

Die Berechnung der erforderlichen Wärmemenge erfolgt durch die Multiplikation der Betriebszeit mit der benötigten Wärmeleistung:

$$Q_h = 5.097,35 \text{ h} * 21 \text{ kW} = 107.044,27 \text{ kWh}$$

Von dieser Wärmeenergie kann die von der Solaranlage zur Verfügung gestellte Wärmeenergie abgezogen werden, um die von dem BHKW bereitzustellende Wärmeenergie zu erhalten.

$$Q_{BHKW} = Q_h - A_{Solar} * S_{Solar} \quad \text{Gleichung 38}$$

$$Q_{BHKW} = 107.044,27 \text{ kWh} - 5 \text{ m}^2 * 1050 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} = 101.794,27 \text{ kWh}$$

Zur Berechnung der Rückkühlerverbräuche wird bei jeder Anlage immer der vom Hersteller empfohlene Rückkühler betrachtet. Der Wasserverbrauch des Rückkühlers errechnet sich aus dem Verdunstungsverlust des Rückkühlers (Angabe im Angebot im Anhang 7) multipliziert mit der Betriebszeit:

$$V_{\text{Rückkühler}} = \frac{5.097,35 \text{ h} * 0,015 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{1.000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}} = 275,26 \text{ m}^3/\text{a}$$

Der Stromverbrauch des Rückkühlers errechnet sich aus dem Strombedarf des Rückkühlers (Angabe im Angebot im Anhang 7) multipliziert mit der Betriebszeit:

$$Q_{\text{Strom}} = 5.097,35 \text{ h} * 0,37 \text{ kW} = 1.886,02 \text{ kWh/a}$$

Eine Reduzierung der beiden Verbräuche ist durch eine alternative Wärmenutzung, wie zum Beispiel eine Fußbodenheizung oder eine Hackschnitzeltrocknung, möglich. Hierdurch lassen sich die spezifischen Kälteerzeugungskosten mindern. Da diese alternativen Wärmenutzungen in dieser Diplomarbeit nur als Empfehlung ausgesprochen und nicht näher behandelt werden, gilt für die Berechnung die Annahme, dass die komplette Wärmeenergie durch den Rückkühler abzugeben ist.

Um die Annuität der bedarfsgebundenen Kosten zu ermitteln, sind die preisdynamischen Barwertfaktoren der bedarfsgebundenen Kosten für Gas, Wasser und Strom erforderlich. Die drei Barwertfaktoren berechnen sich wie folgt:

$$b_{\text{Gas}} = \frac{1 - \left[\frac{1,05}{1,01} \right]^{20}}{1,01 - 1,05} = 29,36$$

$$b_{\text{Strom}} = \frac{1 - \left[\frac{1,07}{1,01} \right]^{20}}{1,01 - 1,07} = 36,19$$

$$b_{Wasser} = \frac{1 - \left[\frac{1,05}{1,01}\right]^{20}}{1,01 - 1,05} = 29,36$$

Berechnung der Annuität der bedarfsgebundenen Kosten:

$$A_{N,V} = (Q_{Wärme} * k_{Wärme} * b_{Gas} * a) + (Q_{Strom} * k_{Strom} * b_{Strom} * a) + \\ (Q_{Wasser} * k_{Wasser} * b_{Wasser} * a) \quad \text{Gleichung 38}$$

$$A_{N,V} = \left(101.794,27 kWh * \frac{0,0495€}{kWh} * 29,36 * 0,05542\right) + \\ \left(1.886 kWh * \frac{0,2136€}{kWh} * 36,19 * 0,05542\right) + \\ \left(275,26 m^3 * 1,9 \frac{€}{m^3} * 29,36 * 0,05542\right) = 9.890,79€/a$$

Wenn die Aggregate mit einer Kompressionsanlage verglichen werden müssen, so ist der Erlös des zusätzlich erzeugten Stroms aus dem BHKW-Betrieb zu berücksichtigen, wodurch sich in der Gesamtbetrachtung der Wärmepreis reduzieren kann. Diese Betrachtung ist nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit.

Die Faktoren für den Aufwand der Instandsetzung, der Wartung und der Inspektion sind aus dem Anhang der VDI 2067 zu entnehmen. Um die Annuität der betriebsgebundenen Kosten zu ermitteln, sind die preisdynamischen Barwertfaktoren der Instandhaltungskosten und der betriebsgebundenen Kosten zu ermitteln.

$$b_{IN} = \frac{1 - \left[\frac{1,035}{1,01}\right]^{20}}{1,01 - 1,035} = 25,2288$$

$$b_B = \frac{1 - \left[\frac{1,035}{1,01}\right]^{20}}{1,01 - 1,035} = 25,2288$$

Über die Gleichungen 29 und 30 werden die Instandhaltungskosten im ersten Jahr und anschließend die Annuität der betriebsgebundenen Kosten berechnet. Aus dem Anhang der VDI 2067 ergeben sich betriebsgebundene Kosten für die Bedienung von 0€.

$$A_{IN} = 46.576,65\text{€} * (0,02 + 0,04) = 2.794,60\text{€}$$

$$A_{N,B} = 0\text{€} * 0,05542 * 25,2288 + 2.794,60\text{€} * 0,05542 * 25,2288 = 3.907,03\text{€/a}$$

Bei dieser Anlage fallen keine sonstigen Kosten an. Daraus ergibt sich eine Annuität der sonstigen Kosten mit 0€/a.

Die Erhöhung der Laufzeit des BHKWs und der damit bereitgestellte Strom wird in dieser Berechnung nicht als Erlös betrachtet. Der einzige Erlös ist die Förderung der Investition durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in einer Höhe von 25% der gesamten Investitionskosten. Da es sich hier um eine Einmalzahlung handelt, ist kein preisdynamischer Barwertfaktor erforderlich.

$$A_{N,E} = (46.576,65\text{€} * 0,25) * 0,05542 = 645,26 \text{ €/a}$$

Die Gesamtannuität ergibt sich aus der Annuität der Erlöse abzüglich aller anderen Annuitäten (Gleichung 34).

$$A_N = 645,26 \frac{\text{€}}{\text{a}} - \left[2.581,06 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 9.890,79 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 3.907,03 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 0 \frac{\text{€}}{\text{a}} \right] = -15.733,61 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der VDI 2067 für Anlagen, die nicht zum Erwirtschaften ausgelegt sind [Fall b], ist die wirtschaftlichste Anlage diejenige, welche die geringsten Kosten verursacht $A_N < 0$. Da kein Energieverkauf stattfindet, ist im Fall b die Gesamtannuität in der Regel negativ. Zum wirtschaftlichen Vergleich werden die spezifischen Kälteerzeugungskosten nach Gleichung 35 herangezogen.

$$k_{0, \text{spezifisch}} = \frac{15.733,61 \text{ €}}{63.716,83 \text{ kWh}} = 0,247 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 24,7 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

Zum Vergleich mit den anderen Berechnungen ist nachfolgend der Berechnungsgang mit der Excel-Tabelle aufgeführt, mit der auch die anderen Aggregate berechnet wurden.

Annuitätenmethode nach der VDI 2067

Projekt: Veltum Betriebsgebäude

Betrachtete Kältemaschine: Wegracal

Ausgangswerte

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	T	20	a
Rechnerische Nutzungsdauer	T_N	20	a
Zinssatz	i	1,00%	
Zinsfaktor	q	1,010	
Preisänderungssatz für Ersatzinvestitionen	j_k	3,00%	
Preisänderungsfaktor für Ersatzinvestitionen	r_k	1,030	
Preisänderungssatz für Instandhaltung	j_{Inst}	3,50%	
Preisänderungsfaktor für Instandhaltung	r_{Inst}	1,035	
Preisänderungssatz für bedarfsgebundene Kosten	Gas	j_v	5,00%
	Strom		7,00%
	Wasser		5,00%
Preisänderungsfaktor für bedarfsgebundene Kosten	Gas	r_v	1,050
	Strom		1,070
	Wasser		1,050
Preisänderungssatz für betriebsgebundene Kosten	j_B	3,50%	
Preisänderungsfaktor für betriebsgebundene Kosten	r_B	1,035	
Gaspreis im ersten Jahr	$\text{Preis}_{\text{Brennstoff}}$	4,97	Ct/kWh
Strompreis im ersten Jahr	$\text{Preis}_{\text{Strom}}$	21,36	Ct/kWh
Wasserpreis im ersten Jahr	$\text{Preis}_{\text{Wasser}}$	1,90	€/m ³

$$q = 1 + \frac{i}{100}$$

$$r = 1 + \frac{j}{100}$$

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

Kapitalgebundene Kosten

		29.414,00 €
Aggregat inklusive Lieferung und Befüllung mit der Lösung		
Rückkühler		4.745,00 €
Installation (Rohrleitung, Pumpen, Ventile,...)		10.317,65 €
Inbetriebnahme		2.100,00 €
Kapitalgebundene Kosten	A_0	46.576,65 €
Annuitätsfaktor	a	0,05542
Annuität der kapitalgebundenen Kosten	$A_{N,K}$	2.581,060 € /a

$$a = \frac{q^T * (q - 1)}{q^T - 1}$$

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - B_{RW}) * a$$

Bedarfsgebundene Kosten

Betriebsstunden mit Pufferspeicher		5.097,35 h
Kälteenergie durch Absorptionskälte		63.716,83 kWh/a
Wärmeenergie durch die Solaranlage		5.250,00 kWh/a
Erforderliche Wärmeenergie [BHKW]	$Q_{Wärme}$	101.794,27 kWh/a
Wasserverbrauch Rückkühler	Q_{Wasser}	275,26 m³/a
Stromverbrauch Rückkühler	Q_{Strom}	1.886,00 kWh/a
Preisdynamischer Barwertfaktor Gas	b	29,36
Preisdynamischer Barwertfaktor Strom	b	36,19
Preisdynamischer Barwertfaktor Wasser	b	29,36
Bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr (Berechnung im Anhang 2)		5.985,02 € /a
Annuität der bedarfsgebundenen Kosten		9.890,79 € /a

$$A_{V1} = Q_{Wärme} * Preis_{Wärme} + Q_{Kälte} * Preis_{Kälte} + Q_{Strom} * Preis_{Strom} + Q_{Wasser} * Preis_{Wasser}$$

$$b = \frac{1 - \left[\frac{r}{q}\right]^T}{q - r}$$

$$A_{N,V} = A_{V1} * a * b_V$$

Betriebsgebundene Kosten

Faktor für den Aufwand der Instandsetzung	f_{Inst}	2% (VDI 2067)
Faktor für Wartung und Inspektion	f_{W+Insp}	4% (VDI 2067)
Preisdynamischer Barwertfaktor der Instandhaltungskosten	b_{IN}	25,2288
Preisdynamischer Barwertfaktor der betriebsgebundenen Kosten	b_B	25,2288
	A_{B1}	0,00 € (VDI 2067)
Betriebsgebundene Kosten für Bedienung im ersten Jahr	A_{IN}	2.794,60 €
Annuität der betriebsgebundenen Kosten	$A_{N,B}$	3.907,03 € /a

$$A_{IN} = A_0 * (f_{Inst} + f_{W+Insp})$$

$$A_{N,B} = A_{B1} * a * b_B + A_{IN} * a * b_{IN}$$

Sonstige Kosten

Es werden keine sonstige Kosten angerechnet	A_{S1}	0,00 €
Preisdynamischer Barwertfaktor für sonstige Kosten	b_S	25,23
Annuität der sonstigen Kosten	$A_{N,S}$	0,00 € /a

$$A_{N,S} = A_{S1} * a * b_S$$

Erlöse

BAFA Förderung 25% der Investitionskosten	E_1	11.644,16 €
Annuität der Erlöse	$A_{N,E}$	645,26 /a

$$A_{NE} = E_{Einmalzahlung} * a$$

Annuität der Jahresgesamtzahlung

Gesamtannuität	A_N	-15.733,61 € /a
Gesamtkosten pro kWh Kälteenergie		0,247 € /kWh

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S})$$

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der VDI 2067 für Anlagen die nicht zum Erwirtschaften ausgelegt sind [Fall b] ist die wirtschaftlichste Anlage diejenige, welche die geringsten Kosten verursacht $A_N < 0$. Da kein Energieverkauf stattfindet ist im Fall b die Gesamtannuität immer negativ.

Tabelle 6.3 Berechnung Wegracal

6.3 Annuitätenmethode Yazaki WFC-SC 05

Die Berechnung der Kältegestehungskosten der Absorptionskältemaschine Yazaki der Firma Gasklima ist in Tabelle 6.5 dargestellt. Die Basis dieser Berechnung sind die Angebote in den Anhängen 8,12 und 15. Über die Jahresdauerlinie (Abbildung 6.3) und die Tabelle 6.4 wurden die bereitgestellte Kälteenergie und die Betriebsstunden der Absorptionskältemaschine ermittelt.

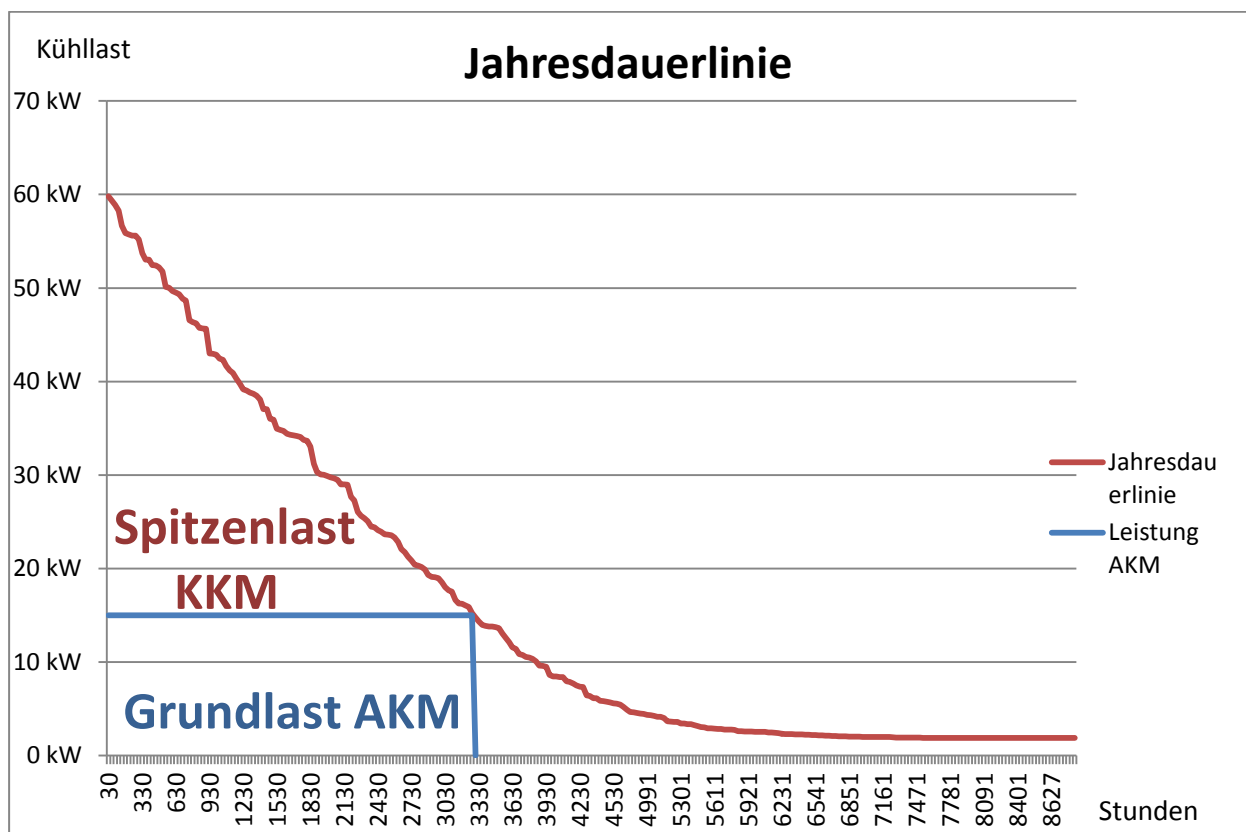


Abbildung 6.3 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Yazaki WFC-SC05

Ermittlung der erzeugten Kälteenergie der Absorptionskältemaschine		
Aggregat	Yazaki	
Kälteleistung unter gegebenen Anlagenparametern:		15 kW
erforderliche Heizleistung		25,1 kW
Rückkühlleistung		42,7 kW
Motorleistung Rückkühler		0,37 kW
Verdunstungsverlust Rückkühler		0,06 m³/h

Vollastbetrieb ohne Pufferspeicher:	3570 h
Kälteenergie durch AKM (Vollast und Teillast)	72.269,14 kWh
Vollastbetrieb mit Pufferspeicher:	4.817,94 h
erforderliche Wärmeenergie	120.930,36 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch die Solaranlage	5250 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch BHKW für AKM	115.680,36 kWh
Betriebsstunden BHKW für AKM	7.712,02 h

Stromverbrauch Rückkühler	1.782,64 kWh
Wasserverbrauch Rückkühler	289,08 m³/a

Tabelle 6.4 Kälteenergie und Betriebsstunden Yazaki

Annuitätenmethode nach der VDI 2067

Projekt: Veltum Betriebsgebäude

Betrachtete Kältemaschine: Yazaki

Ausgangswerte

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	T	20 a	
Rechnerische Nutzungsdauer	T _N	20 a	
Zinssatz	i	1,00%	
Zinsfaktor	q	1,010	
Preisänderungssatz für Ersatzinvestitionen	j _k	3,00%	
Preisänderungsfaktor für Ersatzinvestitionen	r _k	1,030	
Preisänderungssatz für Instandhaltung	j _{inst}	3,50%	
Preisänderungsfaktor für Instandhaltung	r _{inst}	1,035	
Preisänderungssatz für bedarfsgebundene Kosten	Gas	j _v	5,00%
	Strom		7,00%
	Wasser		5,00%
Preisänderungsfaktor für bedarfsgebundene Kosten	Gas	r _v	1,050
	Strom		1,070
	Wasser		1,050
Preisänderungssatz für betriebsgebundene Kosten	j _B	3,50%	
Preisänderungsfaktor für betriebsgebundene Kosten	r _B	1,035	
Gaspreis im ersten Jahr	Preis _{Brennstoff}	4,97 Ct/kWh	
Strompreis im ersten Jahr	Preis _{Strom}	21,36 Ct/kWh	
Wasserpreis im ersten Jahr	Preis _{Wasser}	1,90 €/m³	

$$q = 1 + \frac{i}{100}$$

$$r = 1 + \frac{j}{100}$$

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

Kapitalgebundene Kosten		
		24.140,00 €
Aggregat inklusive Lieferung und Befüllung mit der Lösung		
Rückkühler (Firma Huckle)		2.832,00 €
Installation (Rohrleitung, Pumpen, Ventile,...)		10.317,65 €
Inbetriebnahme		1.360,00 €
Kapitalgebundene Kosten	A_0	38.649,65 €
Annuitätsfaktor	a	0,05542
Annuität der kapitalgebundenen Kosten	$A_{N,K}$	2.141,783 € /a

$$a = \frac{q^T * (q - 1)}{q^T - 1}$$

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - B_{RW}) * a$$

Bedarfsgebundene Kosten		
Betriebsstunden mit Pufferspeicher		4.817,94 h
Kälteenergie durch Absorptionskälte		72.269,14 kWh/a
Wärmeenergie durch die Solaranlage		5.250,00 kWh/a
Erforderliche Wärmeenergie [BHKW]	$Q_{Wärme}$	115.680,36 kWh/a
Wasserverbrauch Rückkühler	Q_{Wasser}	289,08 m³/a
Stromverbrauch Rückkühler	Q_{Strom}	1.782,64 kWh/a
Preisdynamischer Barwertfaktor Gas	b	29,36
Preisdynamischer Barwertfaktor Strom	b	36,19
Preisdynamischer Barwertfaktor Wasser	b	29,36
Bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr (Berechnung im Anhang 2)		6.679,34 € /a
Annuität der bedarfsgebundenen Kosten		11.012,18 € /a

$$A_{V1} = Q_{Wärme} * Preis_{Wärme} + Q_{Kälte} * Preis_{Kälte} + Q_{Strom} * Preis_{Strom} + Q_{Wasser} * Preis_{Wasser}$$

$$b = \frac{1 - \left[\frac{r}{q}\right]^T}{q - r}$$

$$A_{N,V} = A_{V1} * a * b_V$$

Betriebsgebundene Kosten		
Faktor für den Aufwand der Instandsetzung	f_{Inst}	2% (VDI 2067)
Faktor für Wartung und Inspektion	f_{W+Insp}	4% (VDI 2067)
Preisdynamischer Barwertfaktor der Instandhaltungskosten	b_{IN}	25,2288
Preisdynamischer Barwertfaktor der betriebsgebundenen Kosten	b_B	25,2288
	A_{B1}	0,00 € (VDI 2067)
Betriebsgebundene Kosten für Bedienung im ersten Jahr		
Instandhaltungskosten im ersten Jahr	A_{IN}	2.318,98 €
Annuität der betriebsgebundenen Kosten	$A_{N,B}$	3.242,08 € /a

$$A_{IN} = A_0 * (f_{Inst} + f_{W+Insp})$$

$$A_{N,B} = A_{B1} * a * b_B + A_{IN} * a * b_{IN}$$

Sonstige Kosten		
Es werden keine sonstige Kosten angerechnet	A_{S1}	0,00 €
Preisdynamischer Barwertfaktor für sonstige Kosten	b_S	25,23
Annuität der sonstigen Kosten	$A_{N,S}$	0,00 € /a

$$A_{N,S} = A_{S1} * a * b_S$$

Erlöse		
BAFA Förderung 25% der Investitionskosten	E_1	9.662,41 €
Annuität der Erlöse	$A_{N,E}$	535,45 /a

$$A_{N,E} = E_{Einmalzahlung} * a$$

Annuität der Jahresgesamtzahlung		
Gesamtannuität	A_N	-15.860,60 € /a
Gesamtkosten pro kWh Kälteenergie		0,219 € /kWh

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S})$$

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der VDI 2067 für Anlagen die nicht zum Erwirtschaften ausgelegt sind [Fall b] ist die wirtschaftlichste Anlage diejenige, welche die geringsten Kosten verursacht $AN < 0$. Da kein Energieverkauf stattfindet ist im Fall b die Gesamtannuität immer negativ.

Tabelle 6.5 Berechnung Yazaki

6.4 Annuitätenmethode Invensor

Die Berechnung der Kältegestehungskosten für die Adsorptionskältemaschine der Firma Invensor ist Tabelle 6.7 dargestellt. Die Basis dieser Berechnung sind die Angebote in den Anhängen 10 und 15. Über die Jahresdauerlinie (Abbildung 6.4) und die Tabelle 6.5 wurden die bereitgestellte Kälteenergie und die Betriebsstunden der Absorptionskältemaschine ermittelt.

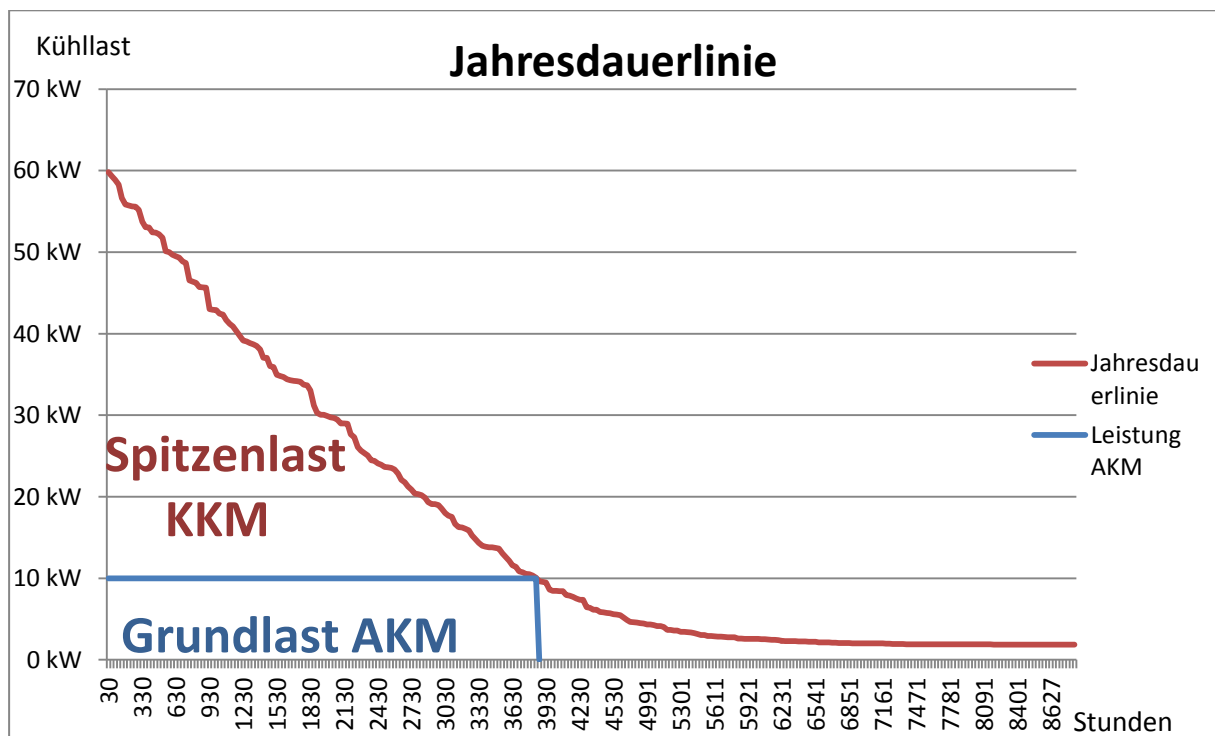


Abbildung 6.4 Jahresdauerlinie mit der Grundlastlinie Invensor LTV 10 e plus

Ermittlung der erzeugten Kälteenergie der Absorptionskältemaschine		
Aggregat	Invensor LTC 10 e plus	
Kälteleistung unter gegebenen Anlagenparametern:		10 kW
erforderliche Heizleistung		15,4 kW
Rückkühlleistung		25,4 kW
Motorleistung Rückkühler		0,49 kW
Verdunstungsverlust Rückkühler		0,37 l/h

Ausgangswerte	
Gaspreis	4,97 Ct/kWh
Strompreis	21,36 Ct/kWh
Wasserpreis	1,9 €/m³

Vollastbetrieb ohne Pufferspeicher:	3570 h
Kälteenergie durch AKM (Vollast und Teillast)	54.546,52 kWh
Vollastbetrieb mit Pufferspeicher:	5.454,65 h
erforderliche Wärmeenergie	84.001,64 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch die Solaranlage	5250 kWh
erzeugte Wärmeenergie durch BHKW für AKM	78.751,64 kWh
Betriebsstunden BHKW für AKM	5.250,11 h

Stromverbrauch Rückkühler	2.672,78 kWh
Wasserverbrauch Rückkühler	2,00 m³/a

Tabelle 6.6 Kälteenergie und Betriebsstunden Invensorl

Annuitätenmethode nach der VDI 2067

Projekt: Veltum Betriebsgebäude

Betrachtete Kältemaschine: Invensor LTC 10 e plus

Ausgangswerte

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	T	20 a	
Rechnerische Nutzungsdauer	T _N	20 a	
Zinssatz	i	1,00%	
Zinsfaktor	q	1,010	
Preisänderungssatz für Ersatzinvestitionen	j _k	3,00%	
Preisänderungsfaktor für Ersatzinvestitionen	r _k	1,030	
Preisänderungssatz für Instandhaltung	j _{inst}	3,50%	
Preisänderungsfaktor für Instandhaltung	r _{inst}	1,035	
Preisänderungssatz für bedarfsgebundene Kosten	Gas	j _v	5,00%
	Strom		7,00%
	Wasser		5,00%
Preisänderungsfaktor für bedarfsgebundene Kosten	Gas	r _v	1,050
	Strom		1,070
	Wasser		1,050
Preisänderungssatz für betriebsgebundene Kosten	j _B	3,50%	
Preisänderungsfaktor für betriebsgebundene Kosten	r _B	1,035	
Gaspreis im ersten Jahr	Preis _{Brennstoff}	4,97 Ct/kWh	
Strompreis im ersten Jahr	Preis _{Strom}	21,36 Ct/kWh	
Wasserpreis im ersten Jahr	Preis _{Wasser}	1,90 €/m³	

$$q = 1 + \frac{i}{100}$$

$$r = 1 + \frac{j}{100}$$

Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit
regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum

Kapitalgebundene Kosten

		22.000,00 €
Aggregat inklusive Lieferung und Befüllung mit der Lösung		
Rückkühler		5.500,00 €
Installation (Rohrleitung, Pumpen, Ventile,...)		10.317,65 €
Inbetriebnahme		1.040,00 €
Kapitalgebundene Kosten	A_0	38.857,65 €
Annuitätsfaktor	a	0,05542
Annuität der kapitalgebundenen Kosten	$A_{N,K}$	2.153,309 € /a

$$a = \frac{q^T * (q - 1)}{q^T - 1}$$

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - B_{RW}) * a$$

Bedarfsgebundene Kosten

Betriebsstunden mit Pufferspeicher		4.363,72 h
Kälteenergie durch Absorptionskälte		54.546,52 kWh/a
Wärmeenergie durch die Solaranlage		5.250,00 kWh/a
Erforderliche Wärmeenergie [BHKW]	$Q_{Wärme}$	78.751,64 kWh/a
Wasserverbrauch Rückkühler	Q_{Wasser}	2,00 m³/a
Stromverbrauch Rückkühler	Q_{Strom}	2.672,78 kWh/a
Preisdynamischer Barwertfaktor Gas	b	29,36
Preisdynamischer Barwertfaktor Strom	b	36,19
Preisdynamischer Barwertfaktor Wasser	b	29,36
Bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr (Berechnung im Anhang 2)		4.488,66 € /a
Annuität der bedarfsgebundenen Kosten		7.519,61 € /a

$$A_{V1} = Q_{Wärme} * Preis_{Wärme} + Q_{Kälte} * Preis_{Kälte} + Q_{Strom} * Preis_{Strom} + Q_{Wasser} * Preis_{Wasser}$$

$$b = \frac{1 - \left[\frac{r}{q}\right]^T}{q - r}$$

$$A_{N,V} = A_{V1} * a * b_V$$

Betriebsgebundene Kosten

Faktor für den Aufwand der Instandsetzung	f_{Inst}	2% (VDI 2067)
Faktor für Wartung und Inspektion	f_{W+Insp}	4% (VDI 2067)
Preisdynamischer Barwertfaktor der Instandhaltungskosten	b_{IN}	25,2288
Preisdynamischer Barwertfaktor der betriebsgebundenen Kosten	b_B	25,2288
Betriebsgebundene Kosten für Bedienung im ersten Jahr	A_{B1}	0,00 € (VDI 2067)
Instandhaltungskosten im ersten Jahr	A_{IN}	2.331,46 €
Annuität der betriebsgebundenen Kosten	$A_{N,B}$	3.259,53 € /a

$$A_{IN} = A_0 * (f_{Inst} + f_{W+Insp})$$

$$A_{N,B} = A_{B1} * a * b_B + A_{IN} * a * b_{IN}$$

Sonstige Kosten

Es werden keine sonstige Kosten angerechnet	A_{S1}	0,00 €
Preisdynamischer Barwertfaktor für sonstige Kosten	b_S	25,23
Annuität der sonstigen Kosten	$A_{N,S}$	0,00 € /a

$$A_{N,S} = A_{S1} * a * b_S$$

Erlöse

BAFA Förderung 25% der Investitionskosten	E_1	9.714,41 €
Annuität der Erlöse	$A_{N,E}$	538,33 /a

$$A_{N,E} = E_{Einmalzahlung} * a$$

Annuität der Jahresgesamtzahlung

Gesamtannuität	A_N	-12.394,12 € /a
Gesamtkosten pro kWh Kälteenergie		0,227 € /kWh

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S})$$

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der VDI 2067 für Anlagen die nicht zum Erwirtschaften ausgelegt sind [Fall b] ist die wirtschaftlichste Anlage diejenige, welche die geringsten Kosten verursacht $A_N < 0$. Da kein Energieverkauf stattfindet ist im Fall b die Gesamtannuität immer negativ.

Tabelle 6.7 Berechnung Invenstor

6.6 Vergleich der Kältegestehungskosten

In der Tabelle 6.8 sind die drei Aggregate und deren Betriebsleistungen, bereitgestellte Kälteenergien, Gesamtannuitäten und Kältegestehungskosten aufgeführt.

Aggregat	Betriebskälteleistung	Bereitgestellte Kälteenergie	Gesamtannuität	Kältegestehungskosten
Wegracal SE 15	12,5 kW	63.716,83 kWh/a	-15.733,61 €	0,2469 Ct/kWh
Yazaki WFC-SC 05	15 kW	72.269,14 kWh/a	-15.860,60 €	0,2195 Ct/kWh
Invensor LTC 10 e plus	10 kW	54.546,52 kWh/a	-12.394,12 €	0,2272 Ct/kWh

Tabelle 6.8 Berechnungsendwerte der Aggregate

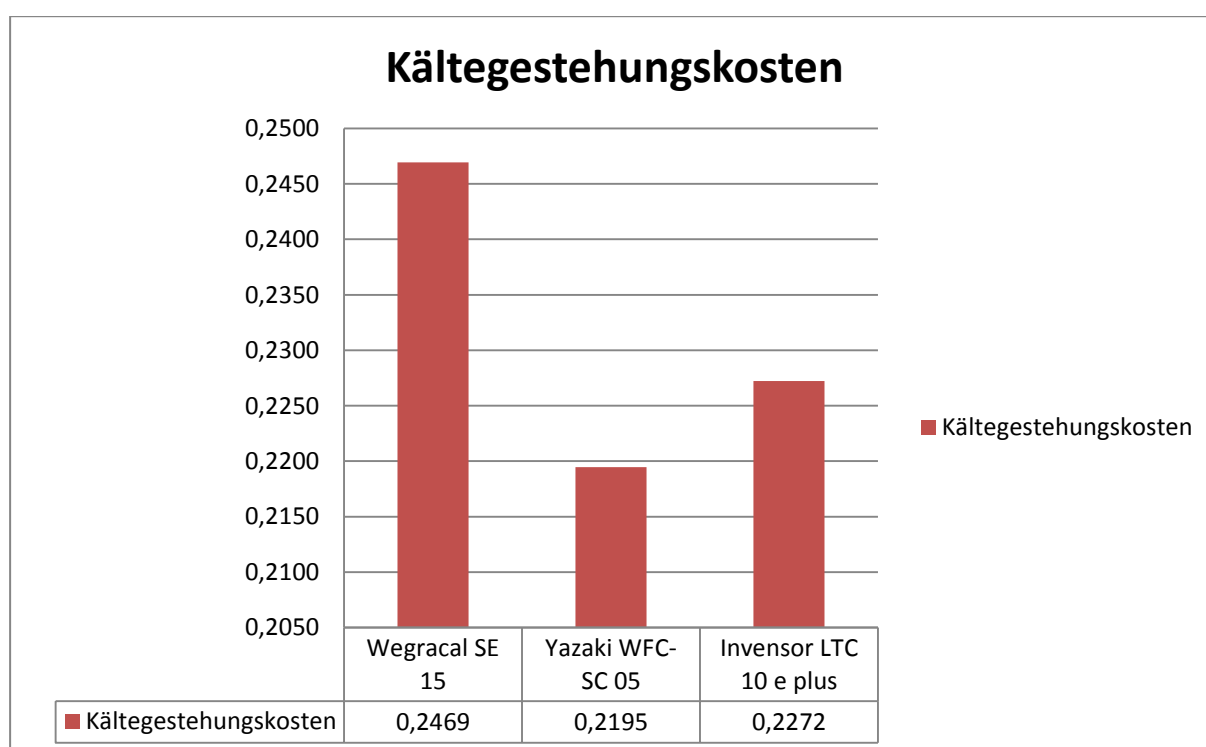


Abbildung 6.5 Vergleich der Kältegestehungspreise

Aus Abbildung 6.5 geht hervor, dass das Aggregat Yazaki WFC- SC 05 zwar die schlechteste Gesamtannuität mit -15.860,60€ besitzt, aber in Betrachtung mit der bereitgestellten Kälteenergie von 72.269,14 kWh/a die niedrigsten Kältegestehungskosten von 21,95 Ct/kWh vorweisen kann. Hierdurch ist die Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-05 die wirtschaftlichste der drei Anlagen.

7 Auswertung und Empfehlung

Es wird empfohlen, die Serverkühlung durch das Kaltwassernetz und eine entsprechende Umluftkühlung vorzunehmen, und nicht durch ein eigenes Split-Klimagerät. Durch diese Maßnahme erhöht sich die Grundkühllast um 2 kW und ermöglicht der Absorptionskältemaschine in Kombination mit dem Pufferspeicher eine längere Laufzeit und somit günstigere spezifische Kälteerzeugungskosten. Diese Umbaumaßnahme ist mit der Firma Veltum abgesprochen und in dieser Diplomarbeit und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bereits berücksichtigt.

Um auch die komplette feuchte Kühllast abfahren zu können und Komforteinbuße aufgrund der Taupunktregelung zu vermeiden, wird empfohlen, Luftauslässe mit Kondensatanschlüssen zu verwenden. Hierdurch kann die Kaltwassertemperatur auch bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden. Die minimale Unterkühlungstemperatur ist abhängig von der Absorptionskältemaschine. Da in dieser das Kältemittel Wasser zum Einsatz kommt, sind nur Temperaturen über 6°C möglich [9]. Zudem verlängert sich durch diese Maßnahme die Laufzeit der Kälteaggregate, da ein höherer Kälteenergiebedarf entsteht. Durch die längere Laufzeit ist es möglich, die spezifischen Kälteerzeugungskosten der Absorptionsmaschine leicht zu reduzieren.

Aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 6 geht hervor, dass die Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC 05 nach dem Angebot der Firma Gasklima die wirtschaftlichere Absorptionskältemaschine mit einem Kältegestehungspreis von 21,95 Ct/kWh. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde jeweils der von dem Hersteller empfohlene Rückkühler betrachtet. Unter der Maßgabe, dass alle Kälteaggregate den gleichen Rückkühler verwenden, bleibt die Absorptionskältemaschine der Firma Gasklima die wirtschaftlichste Option.

Die aufgeführte Adsorptionsanlage der Firma Invensor (Anhang 10) stellt die im Vergleich zu den Absorptionsanlagen als zweitwirtschaftlichste Anlage dar und ist durch geringere Temperaturanforderungen leichter einsetzbar als die Absorptionsanlagen. Ein geringerer Wartungsaufwand und ein geringerer Strombedarf sprechen ebenfalls für den Einsatz einer Adsorptionsanlage.

Da die Aufgabenstellung der Diplomarbeit auf Absorptionskälteanlagen abzielt, ist die Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC 05 zu favorisieren.

Regelungstechnisch ist eine Kältespeichertemperaturregelung vorgesehen. Hierbei schaltet die Absorptionskältemaschine bei einer Speichertemperaturüberschreitung von 16°C (im oberen Speicherbereich) ein und bei einer Unterschreitung von 10°C aus. Bei einer Umstellung der Luftauslässe, auf Luftauslässe mit Kondensatanschluss, muss die Temperatur angepasst werden.

Um die Niedertemperaturwärme des Absorber- und Kondensatorkreislaufes abgeben zu können, wird der Rückkühler der Firma Huckle (Anhang 12; Abbildung 7.1) empfohlen. Hierbei ist keine Begleitheizung oder Glykol erforderlich, da der Rückkühler höher positioniert ist als das Kälteaggregat und das Kühlwasser in einen geschlossenen Auffangbehälter innerhalb des Gebäudes zurückläuft. [29]

Die Wasserqualität muss die Richtwerte nach DIN 3803 [14] einhalten. Das enthärtete Trinkwasser, welches zum Nachspeisen verwendet wird, erfüllt diese Richtwerte. Des Weiteren ist es möglich die Niedertemperaturwärme in Übergangszeiten zur Fußbodentemperierung und für die Klimadecke zu verwenden. Als alternativer Wärmeabnehmer ist eine Hackschnitzeltrocknung vorgesehen, welche in Absprache mit dem Maschinenring Waldeck-Frankenberg und der Biomasse-Brennstoff-Logistik in Goddelsheim organisiert wird, wenn es zur Umsetzung dieses Projekts kommt. In diesem Fall sind die Energie- und Wasserkosten für die Rückkühlung in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf die Energiekosten des Ventilators der Hackschnitzeltrocknung anzupassen.

Da bei anderen Projekten ein Vergleich gegenüber Kompressionskälteanlagen erforderlich sein kann, sind bei dieser Betrachtung die erhöhte Laufzeit des BHKWs und der daraus resultierende Wärmegestehungspreis zu beachten. Zudem können anstatt der von der VDI 2067 vorgegebenen Wartungs-, Inspektions- und Instandhaltungsfaktoren die realen Wartungskosten angesetzt werden. Da sich die vorgegebenen Faktoren auf die Investitionskosten beziehen, entstehen im Vergleich zur Kompressionskälte wesentlich höhere Kosten, obwohl der Wartungsaufwand der Sorptionsaggregate laut Herstellern unter dem Wartungsaufwand der Kompressionsaggregate liegt. Die Kosten für die Rückkühlung müssen, bei einer alternativen Wärmenutzung, ebenfalls an die örtlichen Gegebenheiten angepasst und in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt werden.

Um im kleinen Leistungsbereich im Vergleich zu Kompressionsanlagen kostentechnisch wettbewerbsfähig zu sein, ist der bezogene Wärmepreis ausschlaggebend. Bei der aktuellen Anlagenkonzeption ist der Wärmepreis der Absorptionsanlage zu hoch, um mit den Kältegestehungskosten einer Kompressionsanlage mithalten. Steigende Stromkosten oder sinkende Wärmekosten können die Wirtschaftlichkeit der Absorptionsanlage gegenüber einer Kompressionsanlage erhöhen. In der Berechnung nach der VDI 2067 wird die reguläre Steigerung der beiden Kosten durch den preisdynamischen Barwertfaktor berücksichtigt. Sollten stark abweichende Faktoren in Zukunft auftreten oder eine andere kostengünstigere Wärmequelle zur Verfügung stehen, so ist eine neue Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu erstellen.

8 Quellenverzeichnis

- [1] Bildaufnahmen und Zeichnungen aus dem Archiv der Firma Veltum mit eigenen Ergänzungen über CAD
- [2] Studienarbeit Ralf Heinemann „Kompressions-, Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen [Abgegeben am 04.05.2016; BA Glauchau]
- [3] VDI 2078- Juni 2015
- [4] Berechnungsparameter der Software C.A.T.S. für die dynamische Kühllastberechnung nach der VDI 2078
- [5] <https://enargus.fit.fraunhofer.de/pub/bscw.cgi/d4841341/Jahresdauerlinie-Jahresdauerlinie.JPG> ; Stand 11.08.16 16:22
- [6] „Planungstipps WEGRACAL 2015-11“ Handbuch der Firma EAW von November 2015
- [7] „Fachreihe Erdgas-Blockheizkraftwerke Planungsanleitung für Vitobloc 200“
<http://www.wpdf.de/19%20Datenblatt%20Viessmann%20Vitobloc%20200.pdf>
Stand 11.08.16 16:25
- [8] Angabe der Energieversorgung Waldeck-Frankenberg (EWF Korbach)
http://www.ewf.de/fileadmin/medienablage/netz/strom/tab/FNN_Speicher_2014-06.pdf; Stand 11.08.16 16:30
- [9] Planungsanleitung-Vitovvalor
<http://www.wpdf.de/18%20Datenblatt%20Viessmann%20Vitovvalor%20300-P.pdf>
- [10] Technische Daten der Firma Trox aus dem X-CUBE Configurator Version 1.15w41 im [Anhang 13]
- [11] http://www.kka-online.info/artikel/kka_Blue_Box_Group_uebernommen_1036408.html; am 16.08.2016 ; 10:44
- [12] http://www.resale.de/images/1283466_a_TKS_5.JPG; Stand 11.08.16 16:42
- [13] <https://www.tu-chemnitz.de/mb/TechnThDyn/hxDokumentation.pdf>; Stand 11.08.16 17:22
- [14] VDI 3803 – Stand Februar 2010
- [15] VDMA Einheitsblatt 24649
- [16] http://www.jaeggi-hybrid.ch/fileadmin/sites/jaeggi/ch/Fachartikel/07-09-13_Vortrag_HDT_DE.pdf; Stand 11.08.16 17:03

[17]

[https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-)
[&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-)

[YbOAhVJJ8AKHdLCAQoQFgg3MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ihks-](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-YbOAhVJJ8AKHdLCAQoQFgg3MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ihks-fachjournal.de%2Ffachartikel%2Fdownload.php%3Ftitle%3Dgefahr-aus-dem-kuehlturm&usg=AFQjCNFGwOBDKB9E7GIWt5ZI2MFrCu1g&bvm=bv.127521224,d.ZGg)
[fachjournal.de%2Ffachartikel%2Fdownload.php%3Ftitle%3Dgefahr-aus-dem-](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-YbOAhVJJ8AKHdLCAQoQFgg3MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ihks-fachjournal.de%2Ffachartikel%2Fdownload.php%3Ftitle%3Dgefahr-aus-dem-kuehlturm&usg=AFQjCNFGwOBDKB9E7GIWt5ZI2MFrCu1g&bvm=bv.127521224,d.ZGg)
[kuehlturm&usg=AFQjCNFGwOBDKB9E7GIWt5ZI2MFrCu1g&bvm=bv.1275](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-YbOAhVJJ8AKHdLCAQoQFgg3MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ihks-fachjournal.de%2Ffachartikel%2Fdownload.php%3Ftitle%3Dgefahr-aus-dem-kuehlturm&usg=AFQjCNFGwOBDKB9E7GIWt5ZI2MFrCu1g&bvm=bv.127521224,d.ZGg)
[21224,d.ZGg](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjB3Ln6-YbOAhVJJ8AKHdLCAQoQFgg3MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ihks-fachjournal.de%2Ffachartikel%2Fdownload.php%3Ftitle%3Dgefahr-aus-dem-kuehlturm&usg=AFQjCNFGwOBDKB9E7GIWt5ZI2MFrCu1g&bvm=bv.127521224,d.ZGg);

- Stand 11.08.16 17:22

[18] [http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-](http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-site/ewk-maintenance-manual-en-fr-de.pdf)
[site/ewk-maintenance-manual-en-fr-de.pdf](http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-site/ewk-maintenance-manual-en-fr-de.pdf); Stand 11.08.16 17:26

[19] [http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-](http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-site/ewk-c-maintenance-manual-en-fr-de.pdf)
[site/ewk-c-maintenance-manual-en-fr-de.pdf](http://www.ewk.eu/descargas/operating-and-maintenance-manuals-web-site/ewk-c-maintenance-manual-en-fr-de.pdf) ; Stand 11.08.16 17:26

[20] Technikerarbeit, Ralf Heinemann und Tristan Krink an der Hans-Viessmann-Schule in Frankenberg 2013

[21] EEG 2012

[22] Aufzeichnungen aus der Vorlesungsreihe Kältetechnik von Prof. Dr.-Ing. Holger Hahn (FH Erfurt) an der Berufsakademie Glauchau (3. und 4. Semester) im Zeitraum vom 01.09.2014 bis zum 12.04.2015

[23] DIN V 18599 -Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftheizung- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau; mit CD-ROM- Stand Dezember 2011

[24] Aufzeichnungen aus der Vorlesungsreihe angewandte Heizungstechnik von Prof. Dipl.-Ing. Ingolf Tiator an der Berufsakademie Glauchau (5. und 6. Semester) im Zeitraum vom 20.11.2015 bis zum 01.07.2016

[25] <http://www.reflex-pro.de/> ; Stand 11.08.16; 17:33

[26] Technische Beschreibung EAW; [www.eaw-](http://www.eaw-energieanlagenbau.de/index.php/absorber-akm.html?file=files/theme_data/pdf-dokumente/akm/15_Technische_Beschreibung_WEGRACAL_SE_15.pdf)
[energieanlagenbau.de/index.php/absorber-](http://www.eaw-energieanlagenbau.de/index.php/absorber-akm.html?file=files/theme_data/pdf-dokumente/akm/15_Technische_Beschreibung_WEGRACAL_SE_15.pdf)
[akm.html?file=files/theme_data/pdf-](http://www.eaw-energieanlagenbau.de/index.php/absorber-akm.html?file=files/theme_data/pdf-dokumente/akm/15_Technische_Beschreibung_WEGRACAL_SE_15.pdf)
[dokumente/akm/15_Technische_Beschreibung_WEGRACAL_SE_15.pdf](http://www.eaw-energieanlagenbau.de/index.php/absorber-akm.html?file=files/theme_data/pdf-dokumente/akm/15_Technische_Beschreibung_WEGRACAL_SE_15.pdf) ;
Stand 11.08.2016 ; 17:36

[27] Yazaki Handbuch

[http://www.gasklima.de/fileadmin/filemounts/gkl/pdf/Produkte_Yazaki/Technik_](http://www.gasklima.de/fileadmin/filemounts/gkl/pdf/Produkte_Yazaki/Technik_und_Daten.pdf)
[und_Daten.pdf](http://www.gasklima.de/fileadmin/filemounts/gkl/pdf/Produkte_Yazaki/Technik_und_Daten.pdf) ; Stand 11.08.2016; 17:40

- [28] Angebot Gasklima [Anhang 8]
- [29] Fotoaufnahme und Aussagen von Herr Albring (Fa. Gasklima) in einem Telefonat mit Herr Albring am 29.07.2016; 13:47
- [30] InvenSor Adsorptionskältemaschinen Installations- und Bedienungsanleitung
- [31] VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen der Kostenberechnung“. September 2012
- [32] Aufzeichnungen aus der Vorlesungsreihe energetische Systemanalyse von Prof. Dr.-Ing. Jörg Scheibe an der Berufsakademie Glauchau (5. und 6. Semester) im Zeitraum vom 20.11.2015 bis zum 01.07.2016
- [33] Kältetechnik für Ingenieure; Thomas Maurer; 1 Auflage; Seite 235
- [34] Kühlen und Klimatisieren mit Wärme; Hans-Martin Henning und Thorsten Urbaneck; 2. Auflage; S.51

9 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich,

1. dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema „Auslegung einer Absorptionskältemaschine für den Grundlastbetrieb mit regelungstechnischer und hydraulischer Einbindung in die Anlagentechnik der Firma Veltum“ ohne fremde Hilfe angefertigt habe,
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Waldeck, 19.08.2016



Ort, Datum

Unterschrift