

Grundlagenermittlung/Vorplanung zur energie- und kosteneffizienten Klimatisierung durch Integration von Sorptionskältetechnik auf Basis geothermalen Fernwärme

Projekt: „Thermische Kühlung des Rathauses in Pullach“



Auftraggeber (AG):

Innovative Energie für Pullach GmbH
Herr Quirin Marxer
Franziskus-Festing-Straße 1
82049 Pullach i. Isartal

Autor (AN):

green-engineers, Planungsbüro für thermische Kühlung
Herr Thomas Büttner
Erich-Zeigner-Allee 64a
04229 Leipzig

Leipzig, März 2021

*Nur zur hausinternen Verwendung; Vervielfältigung und Weitergabe – auch auszugsweise - an Dritte
bitte nur nach vorheriger Absprache und unter Nennung von Quellen.*

Aufgabenstellung

Es ist beabsichtigt, die Räumlichkeiten des Rathauses in Pullach mit Hilfe innovativer und umweltfreundlicher Kälteerzeugungstechnologie zu temperieren bzw. zu klimatisieren.

Das Gebäude besteht aus zwei Gebäudeabschnitten. Der ältere Teil mit 3 Obergeschossen stammt aus dem Jahre 1900, wurde 2013 umfassend saniert und beherbergt vor allem Büros, Besprechungsräume und den Trauungsraum des Standesamtes. Insbesondere letzterer und das Dachgeschoss weisen lt. Nutzer und AG im Sommer regelmäßig inakzeptabel hohe Raumtemperaturen auf.

Der neuere, zweigeschossige Gebäudeteil (Baujahr 1978) wurde 1999 saniert. In diesem sind Räumlichkeiten sehr unterschiedlicher Nutzung untergebracht. Vor allem der Sitzungssaal, das Bürgermeisterbüro, ein Besprechungsraum und weitere Büros weisen ebenfalls signifikanten Kühlbedarf auf.

Die Beheizung des Objektes erfolgt mit Fernwärme auf Basis von Tiefengeothermie der IEP GmbH. Die Fernwärmeübergabestation ist im Untergeschoss installiert. Im neueren Gebäudeteil ist über weite Bereiche der Nutzflächen Fußbodenheizung verbaut; im Altbauabschnitt erfolgt die Beheizung durch konventionelle Heizkörper.

Es existiert eine zentrale Lüftungsanlage mit Heiz- und Kühlfunktion im Untergeschoss, welche den erforderlichen Luftwechsel für den Sitzungssaal darstellt. Weder die Heiz-, noch die Kühlfunktion werden jedoch derzeit entsprechend genutzt. Eine zusätzliche luftbasierte Wärmezufuhr (neben der Fußbodenheizung) ist laut AG nicht erforderlich; das Heizregister dementsprechend deaktiviert. Das integrierte Kühlregister ist für eine Kühlung mittels Stadt-/Frischwasser ausgelegt und wird ebenfalls nicht aktiv genutzt.

Eine aktive Kühlung mittels kleiner Kompressions-Split-Klimageräten existiert derzeit nur für den Serverraum im Untergeschoss sowie für das Bürgermeisterbüro im 1. Obergeschoss des Neubauabschnitts.

Laut AG und Nutzer wird eine umfassende Klimatisierung für die beschriebenen Räumlichkeiten in beiden Gebäudeabschnitten angestrebt. Besondere Priorität haben hierbei der Sitzungssaal, der Trauungsraum sowie Bürgermeisterbüro nebst Vorzimmer und Foyer.

Die Kälteerzeugung soll dabei umweltfreundlich und energieeffizient soweit möglich auf Basis von Fernwärme erfolgen.

Nach überschlägiger Ermittlung der Außentemperatur- und nutzungsabhängigen Kühllast soll ein entsprechendes Systemlayout für ein thermisches Kühlsystem entwickelt und eine sinnvolle Vorauswahl / Dimensionierung der Hauptkomponenten vorgenommen werden. Eine Unterteilung in Grundlast- (sorptiv) und Spitzenlastkälteerzeugung (Kompression) soll hierbei Berücksichtigung finden.

Auf Basis der zu erwartenden Nutzung und der zu Grunde gelegten Kälteerzeugungstechnologien soll ferner die damit verbundene Last-/Leistungscharakteristik ermittelt, beschrieben und bewertet werden.

Ein überschlägiger Investitionsplan für das thermische Kühlsystem ist zu erstellen und gemeinsam mit Betriebs- und Kältegestehungskosten in eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen. Die erzielbaren Elektroenergie-/Kohlendioxideinsparungen sind hierbei auszuweisen und mögliche Fördermittelbezüge vorzustellen.

Hinweis

Die nachfolgenden Ausführungen und Rechnungen wurden mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen zusammengestellt und erarbeitet. Trotzdem erhebt dieses Dokument nicht den Anspruch, einen möglichen späteren Realisierungsstand umfassend und bis ins Detail korrekt abzubilden. Sie stellt ausgehend von Erfahrungen, Annahmen und Richtpreisangeboten lediglich eine Prognose für die möglicherweise erzielbare Performance und die damit einhergehenden Investitions- und Betriebskosten dar. Insofern übernimmt der Autor keine Haftung für eventuelle Abweichungen zwischen Prognose und Realität.

1. Der Energieberater: green-engineers

Der Autor der vorliegenden Arbeit, Herr Dipl.-Ing. (FH) Thomas Büttner (green-engineers, Planungsbüro für thermische Kühlung), ist seit 28.10.2016 beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Programm „Energieberatung im Mittelstand“ unter der Beraterkennung 217866 gelistet.

Alle notwendigen Qualifikationen und Nachweise zu Sachkunde und Berufserfahrung liegen dem BAFA vor und waren Voraussetzung für die Anerkennung als Berater im o.g. Programm.

Darüber hinaus ist der Autor seit 12/2012 beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Programm „Gewerbliche Kälte- und Klimaanlageanlagen“ unter der Beraterkennung 1262 als Sachverständiger gelistet. Seit Listung wurden insgesamt 56 BAFA-geförderte Projekte als Sachverständiger, weitere auch als Berater und Planer begleitet.

Das Planungsbüro green-engineers, dessen Inhaber Herr Thomas Büttner ist, beschäftigt sich seit Gründung im Jahre 2011 mit dem Themenfeld „Kälte aus Abwärme“ und der Energieeffizienzsteigerung in Unternehmen durch Integration von Sorptionskältetechnik.

Name:	green-engineers, Planungsbüro für thermische Kühlung
Telefon:	0341-1257 1277
eMail:	info@green-engineers.de
Web:	www.green-engineers.de
Adresse:	Erich-Zeigner-Allee 64a 04229 Leipzig
Ansprechpartner:	Herr Thomas Büttner (Berater ID BAFA 217866)
Anzahl der Mitarbeiter:	2

2. Überblick / Kurzergebnis

Aufgrund der uns übermittelten Anlagenparameter, Betriebsbedingungen und räumlichen Gegebenheiten wie besichtigt, wurde die hieraus mit hoher Wahrscheinlichkeit resultierende Performance eines sorptionsbasierten Kühlsystems abgeleitet. Dessen energetisch sinnvolle Konfiguration wurde ermittelt. Die wesentlichen Komponenten des Systems sind

- Duo-HybridChiller eCoo20-HCN60, Fabrikat: Fahrenheit
- Trockener Rückkühler (EC-Ventilatoren / Drehzahlregelung), eRec30 I 120, Fabrikat: Fahrenheit
- Kaltwasserspeicher 0,75 m³

Möglich ist hiermit die zuverlässige, energieeffiziente und umweltfreundliche Klimatisierung aller nachfolgend aufgeführten Räumlichkeiten des Gebäudekomplexes. Hierzu ist eine neue, installationsseitig umfangreiche kaltwasserbasierte Kälteverteilung mit Umluftkühlgeräten (Deckenkassetten) erforderlich. Gleichzeitig wird die Fußbodenheizung unterstützend zur Temperierung genutzt. Im Zentral-Lüftungsgerät wird ein 9kW-Kaltwasser-Kühlregister nachgerüstet, wodurch auch im Sitzungssaal eine erheblich bessere Kühlwirkung sichergestellt ist. Alle kältetechnischen Komponenten könnten im Sanitärraum/UG in Form einer Kältezentrale installiert werden.

Die überschlägig berechnete max. Kältelast / Jahreskältearbeit zur Klimatisierung des Objektes unter Berücksichtigung der Nutzungscharakteristik beträgt: **ca. 62 kW / 73,1 MWh/a**

Diese Kältearbeit wird laut Auslegung zu ca. 57% auf thermischem Wege mittels Adsorptionskältetechnik erzeugt. Dies entspricht: **ca. 41,8 MWh/a**

Hierfür erforderlich ist eine Wärmeenergiemenge basierend auf Fernwärme des AG von: **ca. 75,9 MWh/a**

Aus der effizienten Betriebsführung des thermischen Kühlsystems resultiert eine Minderung des jährlichen Elektroenergieverbrauchs gegenüber konventioneller Technik von **ca. – 10,1 MWh/a (-43%)**

Unter Berücksichtigung einer Förderung der innovativen Kälte-/Rückkühltechnik betragen die Investitionsmehrkosten für das Kälteerzeugungssystem gegenüber Basisvariante **ca. 19,9 T€**

Die jährlichen Betriebskosten für die Kälteerzeugung (ohne Berücksichtigung von Kapitaldienst / Preissteigerungen) können im Vergleich zu einer Standard-Lösung reduziert werden um: **ca. – 43%**

Das vorgestellte Kältesystem mit integrierter Adsorptionskältemaschine führt zu deutlich reduzierten Treibhausgas-Emissionen gegenüber konventioneller Technik: **– 5,6 Tonnen CO₂ / Jahr.**

Ein energetisch und wirtschaftlich sinnvoller Betrieb ist nachweislich möglich; eine Umsetzung gem. Systembeschreibung grundsätzlich empfehlenswert.

Eine vom Beschriebenen abweichende Nutzercharakteristik, unpräzise Systemauslegung und/oder – Installation sowie geänderte Randbedingungen können zu einer reduzierten Performance führen!

Insbesondere eine höhere jährliche Benutzungsstundenzahl und stärker steigende Strompreise können das zu erwartende Betriebsergebnis deutlich verbessern!

3. Objektbeschreibung und Kühllastabschätzung

Die nachfolgend relevante Kühlaufgabe besteht vornehmlich darin, weite Teile der Nutzflächen des Rathauses zu klimatisieren bzw. zu temperieren. Nebenräume, wie Sozial-, Lager-, Toilettenräume etc., werden ebenso wenig in das Kühlkonzept einbezogen, wie die Räumlichkeiten von angrenzender Musikschule, Turnhalle etc.

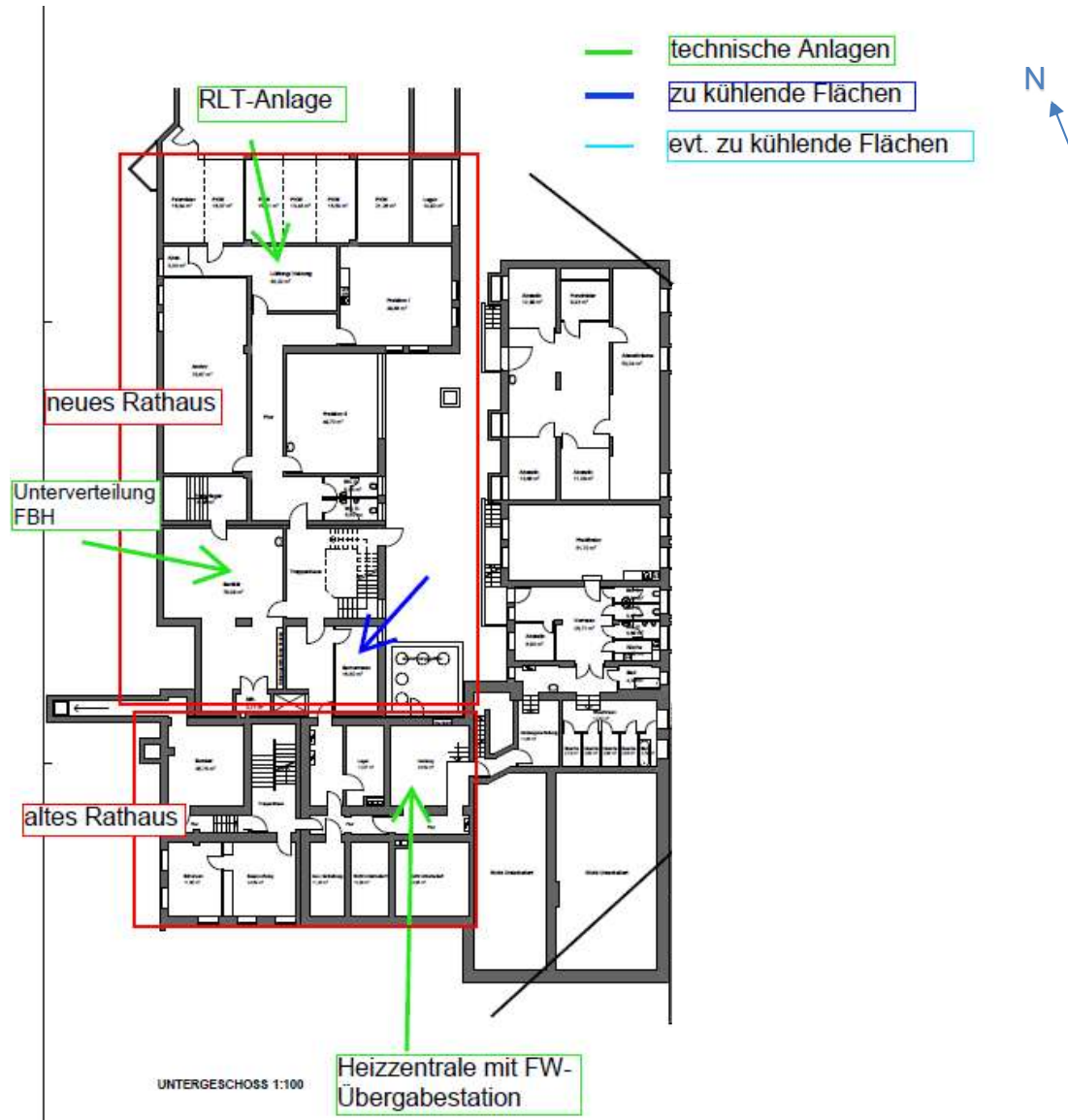


Abb. 1: Rathaus Pullach, Grundriss Untergeschoss



Abb. 2: Rathaus Pullach, Grundriss EG und 1.OG

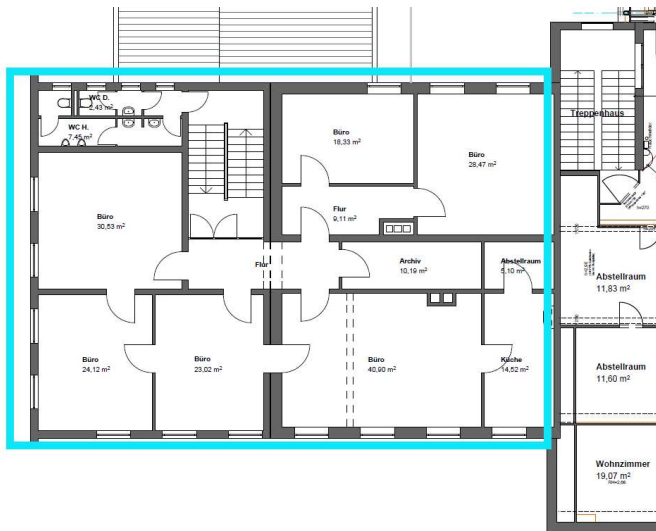


Abb. 3: Rathaus Pullach, Grundriss DG, Neuer Rathausabschnitt

Die Kühllast des Objektes setzt sich grundsätzlich aus den Komponenten

- Transmissionskühllast (Wärmeeintrag durch die Gebäudehülle)
- Lüftungs- und Strahlungskühllast (Wärmeeintrag im Zuge des Luftwechsels und durch Solarstrahlung)
- Innere Kühllasten (z.B. EDV- und Bürotechnik, aber auch Wärmeabgabe durch Personen und Beleuchtung)

zusammen.

Unter Berücksichtigung von Himmelsrichtung, Bausubstanz, Raumlage im Objekt und Gebäudetyp wurde ausgehend von den Grundrissen / der identifizierten Nutzflächen eine überschlägige Kühllastabschätzung vorgenommen. Diese stellt zwar keine Kühllastberechnung nach VDI 2078 dar, soll aber als robuste Basis für die nachstehende Machbarkeitsanalyse herangezogen werden. Insbesondere aufgrund der schwer quantifizierbaren inneren Lasten der unterschiedlichen Räume mussten plausibel erscheinende Kühllastwerte angenommen werden.

Hierbei wurde auch die Belegung der Büros und Arbeitsräume sowie deren vermutliche Nutzung berücksichtigt.

Im Ergebnis der vorgenommenen Betrachtung kann festgestellt werden, dass die in die Klimatisierung einzubeziehende Nutzfläche 1.338 m² beträgt.

Zudem ist die Dimensionierung der Kälteerzeugung von der der Kälteverteilung zu unterscheiden. Letztere muss sich auf die raumweise maximal mögliche Kältelast beziehen. Bei der Auslegung der Kälteerzeugung, also der Kältemaschinen selbst, sind auch die Gleichzeitigkeiten (GZ) zu berücksichtigen. Insofern ist die GZ-behaftete Kühllast entsprechend geringer.

Mangels exakter Informationen wurden auch hierbei praxisnahe Werte für die gleichzeitige Nutzung angesetzt. Während ein Serverraum eine Gleichzeitigkeit von 1 hat, kann für einen Besprechungsraum z.B. typischerweise von GZ=1/3 ausgegangen werden.

D.h. jahreszeitlich unabhängig werden nie 100 % der in die Kälteverteilung einbezogenen Flächen genutzt resp. zu kühlen sein.

Weiterhin wurde bereits abgeschätzt, in welchem Umfang eine Temperierung der Räume mit bestehender Fußbodenheizung möglich ist. Hierzu wurde davon ausgegangen, dass durchschnittlich 90% der Nutzfläche für die Fußbodenkühlung genutzt werden können. Bei typischen spezifischen Wärmeübertragungsleistungen von 25 bis 30 W/m² kann somit auch die maximal übertragbare Kälteleistung bestimmt werden.

Räume ohne vorhandene Fußbodenheizung können durch wasserbasierte Umluftkühlgeräte klimatisiert werden.

In nachfolgender Tabelle, welche die Ergebnisse der raumweisen Kühllastabschätzung widerspiegelt, wird bereits benannt, welche Art der Kälteverteilung jeweils sinnvoll/möglich ist.

Die hierbei genutzten Kürzel bedeuten:

ULK → Umluftkühlgerät (Deckenkassette, Wand-Umluftkühlgerät, etc.)

FB → Nutzung der Fußbodenheizung für die Kühlung

KR → Kühlregister (im Zentral-Lüftungsgerät)

Raum		Gesamtfläche	Klim. Nutzfläche	Gleichzeitigkeit	Kühllast, GZ	Kühllast, max.	Kälteverteilung via	Flächenkühlung nutzbare WÜ-Fläche	Übertragungsleistung FBK
		[m²]	[m²]		[kW]	[kW]		[m²]	kW
UG	Serverraum	16,3	16,3	1,00	2,4	2,4	ULK	0,0	0,0
	Summe UG	16,3	16,3	1,0	2,4	2,4		0,0	0,0
EG	Traungsraum	47,0	47,0	0,50	1,9	3,8	ULK	0,0	0,0
	"VHS1"	50,9	50,9	0,80	2,4	3,0	FB+ULK	45,8	1,3
	"VHS2"	28,4	28,4	0,80	1,6	2,0	FB+ULK	25,6	0,7
	Besprechung	46,0	46,0	0,67	2,2	3,3	FB+ULK	41,4	1,1
	Büro1	23,6	23,6	0,80	1,2	1,6	FB+ULK	21,2	0,6
	Büro2	24,0	24,0	0,80	1,3	1,6	FB+ULK	21,6	0,6
	Büro3	26,5	26,5	0,80	1,4	1,8	FB+ULK	23,9	0,7
	Büro5	19,6	19,6	0,80	0,9	1,1	FB+ULK	17,6	0,5
	Büro6	16,2	16,2	0,80	0,8	1,0	FB+ULK	14,6	0,4
	Material	17,2	17,2						
	Büro7	13,1	13,1	0,80	0,6	0,7	FB+ULK	11,8	0,3
	Küche	15,7	15,7						
	Polizei	28,8	28,8	0,80	1,3	1,6	FB+ULK	25,9	0,7
	Foyer/Auskunft	85,0	85,0	0,80	2,4	3,1	FB+ULK	76,5	2,1
Summe EG		409,1	409,1		18,0	24,4		325,9	9,0
1.OG	Kleiner Sitzungssaal	73,6	73,6	0,67	3,1	4,7	FB+ULK+KR	66,2	1,8
	Großer Sitzungssaal	158,8	158,8	0,33	3,2	9,8	FB+KR	142,9	3,9
	Lager	12,3	12,3						
	Bürgermeister 1	37,4	37,4	1,00	2,3	2,3	FB+ULK	33,7	0,9
	Bürgermeister 2	20,5	20,5	1,00	1,3	1,3	FB+ULK	18,5	0,5
	Büro 1	16,2	16,2	1,00	1,0	1,0	FB+ULK	14,6	0,4
	Büro 2	26,2	26,2	1,00	1,8	1,8	FB+ULK	23,6	0,6
	Wartebereich	45,0	45,0	0,80	1,7	2,1	FB	40,5	1,1
	Flur	75,2	75,2	0,80	2,1	2,6	EB	67,7	1,9
	Altes Rathaus								
	Büro 3	16,2	16,2	0,80	0,9	1,1	ULK		0,0
	Büro 4	24,1	24,1	0,80	1,2	1,5	ULK		0,0
	Büro 5	23,0	23,0	0,80	1,2	1,5	ULK		0,0
	Büro 6	13,3	13,3	0,80	0,7	0,8	ULK		0,0
	Büro 7	34,7	34,7	0,80	1,7	2,1	ULK		0,0
	Büro 8	28,5	28,5	0,80	1,4	1,7	ULK		0,0
Summe 1.OG		592,7	592,7		23,5	34,2		407,6	11,2
2.OG	Altes Rathaus								
	Büro 1	16,2	16,2	0,80	0,9	1,1	ULK		0,0
	Büro 2	24,1	24,1	0,80	1,3	1,6	ULK		0,0
	Büro 3	23,0	23,0	0,80	1,2	1,5	ULK		0,0
	Büro 4	13,3	13,3	0,80	0,7	0,9	ULK		0,0
	Büro 5	34,7	34,7	0,80	1,7	2,1	ULK		0,0
	Büro 6	28,5	28,5	0,80	1,3	1,6	ULK		0,0
Summe 2.OG		139,8	139,8		7,0	8,8			0,0
DG	Altes Rathaus								
	Büro 1	30,5	30,5	0,80	1,6	2,0	ULK		0,0
	Büro 2	24,1	24,1	0,80	1,3	1,6	ULK		0,0
	Büro 3	23,0	23,0	0,80	1,3	1,6	ULK		0,0
	Büro 4	40,9	40,9	0,80	2,2	2,7	ULK		0,0
	Server	14,5	14,5	1,00	2,0	2,0	ULK		0,0
	Büro 5	28,5	28,5	0,80	1,4	1,7	ULK		0,0
	Büro 6	18,3	18,3	0,80	0,9	1,2	ULK		0,0
Summe DG		179,8	179,8		10,7	12,9			0,0
Summe			1338 m²		61,6 kW	82,7 kW		733,5 m²	20,2 kW

Abb. 4.: Ergebnisse der überschlägigen Kühllastberechnung

- ➔ **Insgesamt, kann von einer maximalen Kühllast von ~83 kW ausgegangen werden. Dies entspricht der Übertragungsleistung der Kälteverteilung, mittels Umluftkühlgeräten / Kühlregister / Fußbodenkühlung.**
- ➔ **Gleichzeitigkeitsbewertet beträgt die Kühllast aller hier betrachteten Geschosse ~62 kW. Auf diese Leistung ist die Kälteerzeugungstechnik auszulegen.**
- ➔ **Die gemittelte spezifische Kühllast der zu klimatisierenden Räumlichkeiten im Objekt beträgt laut getroffenen Annahmen demnach ca. 46 W/m².**

Ausgehend von den übermittelten Angaben, insbesondere auf Basis der vorliegenden Bausubstanz und Nutzungscharakteristik wurde ein mögliches Kühllastprofil erstellt, welches den möglichen zeitlichen Verlauf der Kühllast geordnet nach Jahresstunden widerspiegelt.

Dargestellt wurde auch die zugehörige Außentemperatur, welches für die energetische Bewertung erforderlich ist. Der Standort des Objekts ist Pullach bei München. Die hierfür relevanten Klimadaten entstammen der Klimadatenbank (*meteonorm*) und wurden aus dem 10jährigen Stundenmaximalwerten (mit 2K bewertet) gebildet. Grün dargestellt ist die Außentemperaturverteilung nachfolgend abgebildet.

Die zu berücksichtigende Kühllast wird gleichzeitig durch Anteile des außentemperaturabhängigen Transmissions- und Lüftungskühlbedarfs und nur in geringerem Umfang durch innere Kühllasten geprägt. Dies zeigt sich in einem relativ steil abfallenden Kühllastprofil (vgl. Abb. 5).

Unterstellt sei, dass unterhalb 18°C Außentemperatur keine signifikante Kühlung mehr erforderlich sein wird. Interne Wärmegewinne und Wärmeverluste gleichen sich dann aus bzw. es wird dann in den Heizwärmebedarf gewechselt.

Stetige, außentemperaturunabhängige innere Kühllasten bestehen nur in geringem Umfang. Laut AG sind hierbei 2 Serverräume relevant. Es wurde exemplarisch unterstellt, dass hierbei ganzjährig konstant 5 kW Kühllast zu berücksichtigen sind.

Der dargestellte Verlauf des Kühllastprofils berücksichtigt noch keine Nutzungszeiten des Objektes. Es ist zu erwarten ist, dass sich die Temperierung im Wesentlichen nur auf die Tage mit Büro-/Geschäftsraumnutzung beschränkt. Dieser Annahme folgend wird die Kühllast durchschnittlich nur auf 5 Tage pro Woche, also Montag bis Freitag bezogen.

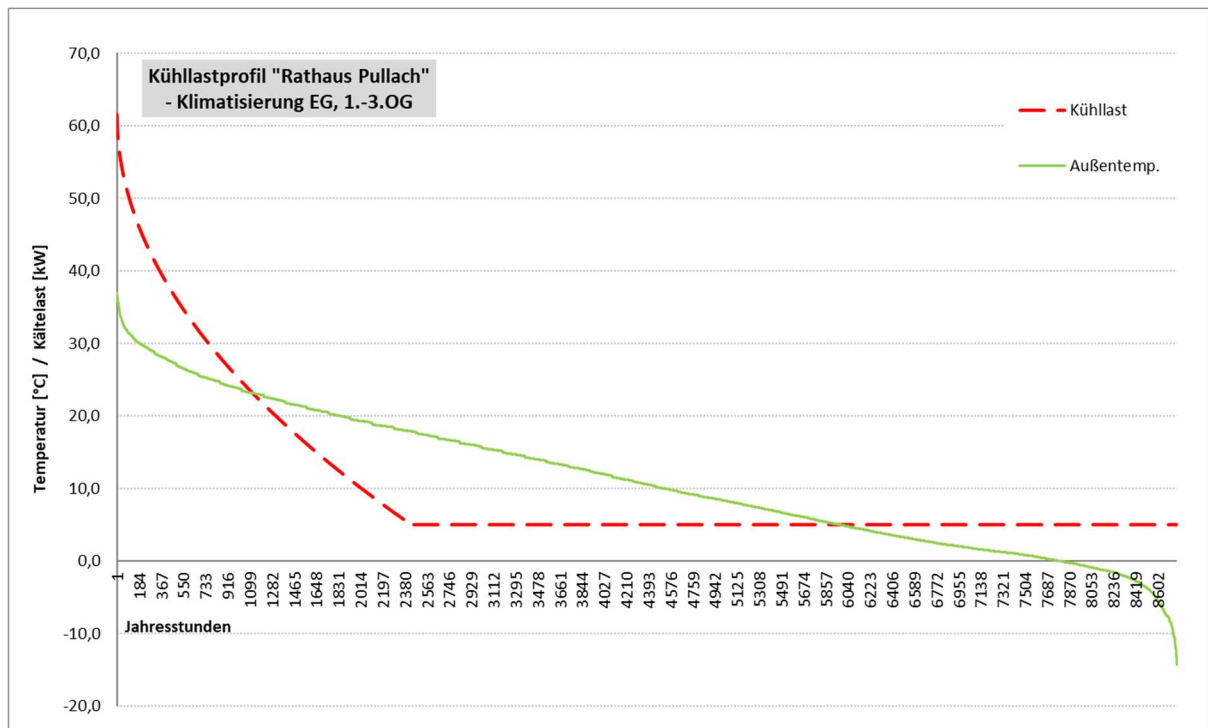


Abb. 5: Außentemperaturverteilung und Kühllastprofil

Wie ersichtlich, wird an wenigen Stunden im Jahr die maximale Kühllast von >60 kW benötigt, um die Raumtemperaturen konstant zu halten.

- ➔ Auslegungsrelevant ist eine Maximal-Kühllast für das beschriebene Objekt von ca. ~62 kW bei einer Außentemperatur von 36°C.
- ➔ Während der Kühlperiode ist mit einer durchschnittlichen Kühllast von ca. 24 kW zu kalkulieren. Unter Berücksichtigung der Kühllast der Server reduziert sich die Kühllast im Jahresmittel auf ca. 10 kW.
- ➔ Pro Jahr ist folglich eine Kältearbeit von ca. 73,1 MWh für das beschriebene Objekt erforderlich.

4. Umsetzung der Kühlaufgabe / Technische Systembeschreibung

Gemäß Aufgabenstellung wurde im Folgenden der optimale Einsatz von Sorptionskältetechnik in Verbindung mit Fernwärme und ggf. erforderlicher Spitzenlast-Kompressionskältetechnik zur Lösung der beschriebenen Kühlaufgaben geprüft. Maßgebend für die Technologiewahl sind neben dem zu erwartenden / notwendigen Kaltwasser-, Antriebs- und Rückkühltemperaturniveau auch die Aspekte Maschinendimension, Platzbedarfe sowie die resultierenden Betriebs- und Investitionskosten.

a. Technologieauswahl

Möglich ist die Kälteerzeugung grundsätzlich unter Nutzung von elektrischer, mechanischer oder thermischer Antriebsenergie. Elektrisch getriebene Kältemaschinen (i. d. R. Kompressionskältetechnik) dominieren den stationären Kältemarkt; mechanisch angetrieben (Kältemittel-)Verdichter finden sich vor allem in mobilen Anwendungen wieder. Bei beiden Verfahren werden heute noch überwiegend fluorierte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel eingesetzt, die ein erhebliches Treibhauspotenzial bedingen.

Der Grundgedanke für den Einsatz thermischer Kühlung ist, überschüssige (preiswerte) Wärme statt hochwertiger (teurer) Elektroenergie einzusetzen. Hierin unterscheiden sich Ab- oder Adsorptionskältemaschinen (AKM) grundsätzlich von konventionellen, stromgetriebenen Kompressionskältemaschinen, da die Kältemittel-Verdichtung bei AKM durch Wärme erfolgt. Elektroenergie ist dennoch erforderlich, um die erforderlichen Volumenströme zu bewegen und die Rückkühlung der Wärmeströme an die Umgebung, z. B. mittels Ventilatoren, darzustellen.

Um Wärme als Antriebsenergie zu nutzen, bieten sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Technologien der s. g. Sorptionskältetechnik an.

Adsorptionskälteaggregate: Diese arbeiten nach dem Prinzip der Anlagerung eines Adsorbens (Wasser) an einen hygroskopischen Feststoff, z.B. Silikagel, unter Vakuum. Arbeitsstoffpaar ist also Silikagel/Wasser oder Zeolith/Wasser. Da der Adsorptionsprozess endlich ist, werden stets zwei Adsorber-Module in einem Aggregat kombiniert, so dass zeitgleich regeneriert und Kälte erzeugt werden kann. Merkmale dieser Geräte sind also neben der quasikontinuierlichen Kälteerzeugung durch wechselnde Ad-/Desorption, ein verhältnismäßig einfacher Aufbau und eine robuste Betriebsweise. Schon relativ niedrige Antriebstemperaturen ab ca. 60°C können bei geeigneten sonstigen Randbedingungen genutzt werden. Adsorptionskälteaggregate finden sich vor allem im kleinen und mittleren Leistungsbereich wieder, weisen aber wegen der relativ geringen thermischen Wirkungsgrade ($COP=0,5...0,6$) etwas höhere spezifische Systemkosten auf.

Absorptionskältemaschinen: Hier dient ein zusätzlicher Lösungsmittelkreislauf als „thermischer Verdichter“ des Kältemittels. Arbeitsstoffpaar ist Wasser/Lithiumbromid oder Ammoniak/Wasser. Da die chemische Bindung und anschließende Trennung zweier Flüssigkeiten unterbrechungsfrei stattfinden, kann die Kälteerzeugung kontinuierlich stattfinden. Dies bedingt eine deutlich höhere thermische Effizienz, was sich in besseren COP ($0,6...0,8$) und damit niedrigeren spezifischen Systemkosten niederschlägt. Notwendig sind höhere Antriebstemperaturen als bei Adsorptionskälteaggregaten.

Ab permanent verfügbaren Heißwassertemperaturen von ca. >80°C können LiBr-AKM zuverlässig, wirtschaftlich und effizient arbeiten. Absorptionskälteaggregate finden sich vor allem im mittleren und größeren Leistungsbereich wieder und sind seit Jahrzehnten marktetabliert.

Sowohl Ab- als auch Adsorptionskälteaggregate nutzen R718 (Wasser) als absolut umweltfreundliches Kältemittel. Alle gegenwärtig relevanten und künftig zu erwartenden gesetzlichen Vorgaben werden mit diesen Technologien erfüllt (Vgl. EU-VO517-2014, „F-Gase-VO“). Daher fördert der deutsche Gesetzgeber derartige Vorhaben aktiv.

Sorptionskältemaschinen haben keinen mechanischen Verdichter, arbeiten daher nahezu verschleißfrei, und sind verhältnismäßig wartungsarm. AKM haben folglich auch eine deutlich längere Lebensdauer als Kompressionskältemaschinen, bei welchen Verdichter-Lebensdauer und –Effizienz verschleißbedingt limitiert sind.

Grundsätzliche Nachteile der thermischen Kälteerzeugung liegen darin, dass sie trotz kompakter Bauweise platzintensiver und auch deutlich teurer als Kompressionskältemaschinen ist. Die höheren Investitionskosten müssen über die Nutzungsdauer durch entsprechend geringere Betriebs-/Stromkosten egalisiert werden.

Prämissen bei der Technologieauswahl und beim Layout des Kühlkonzepts:

- Aufgrund des unterstellten Kühllastprofils mit wenigen Kühllaststunden oberhalb 50 kW sollte keine monovalente (sorptionsbasierte) Kälteerzeugung umgesetzt werden. Vielmehr ist es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, eine Sorptionskältemaschine mit einer nominalen Kälteleistung von ca. < 25 kW als Grundlastaggregat einzusetzen. Es wird folglich ein Spitzenlast-Kompressionskälteaggregat (KKM) erforderlich sein.
- Wegen des zu erwartenden Temperaturniveaus von 85°C, welches die Fernwärme im Stadtgebiet Pullach aufweist, bietet sich grundsätzlich der Einsatz einer Absorptionskältemaschine (AKM) für die beschriebene Kühlaufgabe an. Zwar sind auch Absorptionskältemaschinen der Dimension 15...50 kW marktverfügbar, allerdings sind diese mitsamt aller Peripheriekomponenten in diesem Leistungssegment deutlich teurer als Adsorptionskälteaggregate, weshalb letztgenannte berücksichtigt werden sollen.
- Wie geschildert sind bei der Kälteverteilung zwei unterschiedliche Konzepte zu berücksichtigen. Die vorhandene Fußbodenheizung soll auch für Kühlzwecke, zur Temperierung genutzt werden. Da die damit möglichen Übertragungsleistungen auf <30 W/m² limitiert sind, müssen darüber hinaus Umluftkühlgeräte installiert werden, um eine zufriedenstellende Klimatisierung sicherzustellen. Folglich werden zwei unterschiedliche Kaltwassertemperaturniveaus erforderlich sein: Für die Fußbodenkühlung 19/21°C, für die Umluftkühlgeräte z.B. 8/13°C.
- Die detaillierte Auslegung und Bewertung unterschiedlicher Verknüpfungskonzepte ergab, dass es im vorliegenden Projekt energetisch und wirtschaftlich deutlich sinnvoller ist, die Kälteerzeugung nicht nur bzgl. Grund- und Spitzenlast, sondern auch hinsichtlich des Kaltwassertemperaturniveaus zu unterteilen. D.h. AKM und KKM erzeugen keine einheitliche Kaltwassertemperatur von 8°C, welche dann für die Fußbodenkühlung wieder „hochgemischt“ wird. Vielmehr soll die AKM sehr effizient arbeitend ausschließlich die Fußbodenkühlung (= Grundlastkälte) bedienen. Die KKM erzeugt das tiefere Kaltwassertemperaturniveau von 8/13°C, welches den ULK und damit der Spitzenlastabdeckung dient. Würde das Temperatur für letztgenannte höher gewählt werden, müssten auch alle ULK entsprechend größer dimensioniert werden, was installations- und kostenseitig nicht sonderlich vorteilhaft wäre.
- Hydraulisch soll die AKM so eingebunden sein, dass die Kälteverteilung der Umluftkühlgeräte temporär auch bedient werden kann. Nur so können auch die Serverräume in Zeiten geringer Außentemperaturen von der (dann effizienter arbeitenden) AKM gekühlt werden.

- Da sich laut AG im Objekt mehrere Serverräume befinden, ist zudem eine ganzjährige Abfuhr der inneren Kühllasten erforderlich. Hierfür bietet sich aus Effizienzgründen auch Freie Kühlung / free cooling – die direkte Abfuhr der Kühllast über den Rückkühler, ohne aktive Kälteerzeugung – an. Unterhalb einer Außentemperatur von 8°C ist dies möglich, wobei die Umluftkühlgeräte entsprechend zu dimensionieren sind.

b. Thermische Randbedingungen

Antriebsleistung / -temperatur

Entsprechend den getroffenen Angaben kann im Sommer Fernwärme des AG auf einem Temperaturniveau von ca. 85/75°C genutzt werden. Für die Auslegung der AKM wurde folglich eine effektiv nutzbare Eintrittstemperatur von 85°C zu Grunde gelegt. Die Temperaturspreizung soll im Sinne eines wirtschaftlichen Betriebs weitestgehend eingehalten werden; eine kurzzeitige Unterschreitung ist aber grundsätzlich zulässig. Eine geringere Temperaturdifferenz erhöht die Kälteleistung der AKM!

Kälteleistung / Kaltwassertemperatur

Die nominale Kälteleistung der Adsorptionskältemaschine wird maßgeblich von der Übertragungsleistung der Fußbodenkühlung bestimmt. Ausgehend von der Kühllastabschätzung können hierfür ~20kW berücksichtigt werden. Weiter ca. 42 kW sind von der KKM beizutragen, um in Summe die maximale Kühllast abzudecken. Dieses Verhältnis stellt eine solide Auslastung resp. eine verhältnismäßig hohe Kühllaststundenzahl der thermischen Kühlung sicher.

Rückkühlung / Rückkühltemperatur

Alle AKM haben gemein, dass ihre Performance maßgeblich vom Rückkühltemperaturniveau abhängt. Um eine adäquate Kälteleistung bei gutem COP auch bei hohen Außentemperaturen sicherzustellen, werden Sorptionskältemaschinen i. d. R. mit verdunstungsbasierter Rückkühlung kombiniert. Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben bzgl. Wasserhygiene (VDI 2047 Bl. 2 und 42. BImSchV) bedingen jedoch gerade bei kleineren thermischen Kühlprojekten (wie hier der Fall) einen erheblichen baulichen, organisatorischen und monetären Zusatzaufwand.

Daher und wegen der Berücksichtigung einer zusätzlichen KKM als Spitzenlastkältetechnik soll die Rückkühlung einheitlich über einen Rückkühler der Dimension 120 kW in rein trockener Fahrweise erfolgen. Wegen der Unterteilung des Kaltwassertemperaturniveaus reduziert sich bei hohen Außentemperaturen selbst bei trockener Rückkühlung die minimale Kälteleistung der AKM in einem vertretbaren Maße.

Die Rückkühltemperatur folgt der jeweils aktuellen Außentemperatur, unterschreitet jedoch 22°C nur im Falle der freien Kühlung.

c. Kälteerzeuger / Adsorptions-/Kompressionskältemaschine

Nach genauer Kenntnis der Kühllasten und thermischen Randbedingungen erfolgte die Auswahl einer geeigneten und auch die bauliche Situation vor Ort berücksichtigende Kältemaschine.

Es wird vorgeschlagen einen s. g. *Duo-HybridChiller* Typ eCoo20ST/HCN60 der Fa. FAHRENHEIT GmbH zu installieren. Dieser wird als Sonderausführung benötigt, wobei zwei separate Kaltwasserkreise unterschiedlicher Temperatur an (einem) Gerät anzuschließen sind.

Im HybridChiller sind beide Kälteerzeugertechnologien, Adsorptions- und Kompressionskältetechnik, respektive Grund- und Spitzenlasterzeuger, kombiniert.

Das Adsorptionskältemodul (AKM) mit 20 kW Nennkälteleistung dient als Energieeffizienzkomponente und kühlt das Kälteübertragungsmedium (Wasser) mit Hilfe thermischer Antriebsenergie, hier also Fernwärme, in höchstem Maße energieeffizient ab. Da das AKM-Modul vornehmlich die Fußbodenkühlung übernehmen wird, reicht hier ein sehr hohes Kaltwassertemperaturniveau von 19/21°C. Das absolut umweltfreundliche Arbeitsstoffpaar ist hierbei Wasser/Silikagel. Wann immer möglich, also soweit die Kühlung über die Fußbodenheizung ausreichend ist, arbeitet ausschließlich das AKM-Modul.

Für die Auskopplung des niedrigeren Temperaturniveaus für die Umluftkühlung (8/13°C) dient der integrierte, kompakte, wassergekühlte Kompressionskältekreis. Als ebenfalls umweltfreundliches und klimaneutrales Kältemittel wird hierbei R290 (Propan) eingesetzt. Verdampfer und Verflüssiger sind als Plattenwärmetauscher ausgeführt.

Damit erfüllt das Gerät alle aktuellen und künftigen gesetzlichen Anforderungen im Sinne der EU-VO517-2014 (s.g. F-Gas-Verordnung)! Durch diese Verordnung reglementiert, werden synthetisch hergestellte Kältemittel mit einem entsprechenden GWP-Wert (*global warming potential*) bis 2030 stufenweise auf 21 % Gesamt-CO₂-Äquivalent verknappt, was mit signifikanten Preissteigerungen für das Kältemittelnachfüllung im Wartungsfall einhergeht. (vgl. z.B. R410 in den Bestands-Klima-Split-Geräten)

Effizient arbeitende Kompressionskältemaschinen mit natürlichen Kältemitteln werden vom Gesetzgeber bezuschusst.



Abb.6 : HybridChiller eCoo20 HCN60 (Quelle Fahrenheit)

Durch die interne Verschaltung besteht die Möglichkeit, Antriebs- und Verflüssigungswärme beider Kälteerzeugertechnologien über ein gemeinsam genutztes Rückkühlsystem an die Umgebung abzuführen. Hierzu soll ein trockener Rückkühler Typ eRec 30 I 120 der Fa. FAHRENHEIT eingesetzt werden.

Dessen 6 EC-Ventilatoren mit je maximal 0,51 kW Leistungsaufnahme werden vom Controller des HybridChillers drehzahl geregelt, der auch die Regelung der internen Thermodynamik und der bereits integrierten, ebenfalls drehzahl geregelten Hocheffizienz-Pumpen übernimmt. Die maximal abzuführende Rückkühlleistung beträgt 120 kW bei einem Schalldruckpegel von 45 dB(A) in 10 m.

Da der Rückkühler im Freien installiert wird ist es erforderlich, diesen mit Wasser/Glykol-Gemisch im Sinne der Frostsicherheit zu betreiben. Eine entsprechende Systemtrennung ist folglich notwendig, da alle weiteren Kreisläufe mit zusatzfreiem Wasser betrieben werden sollen. Diese Systemtrennung ist bereits im Kälteerzeuger integriert.

Die Option der Freien Kühlung zur effizienten Serverraumkühlung ist ohne zusätzliche Systemkomponenten oder Regelungstechnik umsetzbar. Durch die interne hydraulische Verschaltung zwischen Kalt- und Kühlwasserkreislauf in der Maschine, kann free cooling unkompliziert umgesetzt werden. Dann wird weder das Adsorptions- noch das Kompressionskältemodul benötigt, sondern lediglich der Rückkühler sowie die beiden zugehörigen Umwälzpumpen müssen betrieben werden.

Angemerkt sei aber, dass die angesetzte Kühllast von 5 kW für die EDV-Kühlung in Bezug auf die Leistungsfähigkeit von Rückkühler und Pumpen verhältnismäßig gering ist.

Der vorgestellte Kälteerzeuger hat für den hier relevanten Einsatzfall entscheidende Vorteile:

1. Kompakte Kombination beider Kälteerzeuger und somit minimaler Platzbedarf.
2. Intelligente Abstimmung des Scroll-Verdichterbetriebs auf maximale Energieeffizienz.
3. Reduzierter Installations- und Rohrleitungsaufwand im Vergleich zu zwei getrennten Systemen.
4. Keine zusätzliche Regelungstechnik; beide Kälteerzeuger werden von einer SPS bedient.
5. Beide Kälteerzeugungstechnologien können unabhängig voneinander betrieben werden.
6. Einfache Bedienbarkeit; der Nutzer muss nur ein Gerät mit einem Controller bedienen.
7. Reduzierter Wartungsaufwand, kein getrennter Service erforderlich.

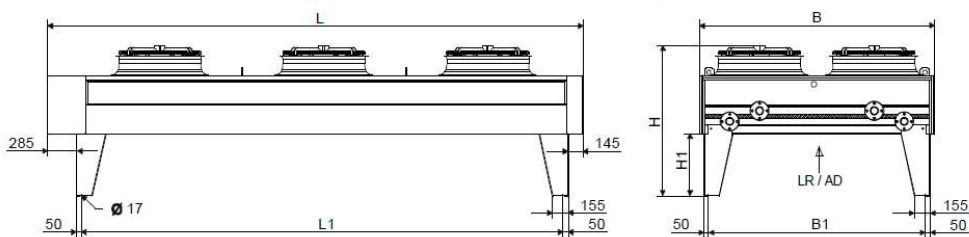
Das heißt auch, die Kühlaufgabe wird wegen der berücksichtigten Redundanz stets zuverlässig erfüllt. Von den internen Verschiebungen bzw. der internen Aufteilung zwischen den Betriebsweisen wird die Gesamtpformance nicht beeinflusst. Die Adsorptionskältemaschine ist für die Effizienzsteigerung des Gesamtsystems verantwortlich; der Kompressionskälteteil sicher die Abdeckung der Spitzenlasten und dient als Redundanz.

Da das AKM-Modul mit dem Kältemittel R718 (Wasser) arbeitet und der Heißwasserkreis ebenfalls mit Wasser als Wärmeträger betrieben wird, besteht die Notwendigkeit, den HybridChiller frostgeschützt in Innenaufstellung zu installieren.

Technische Daten HybridChiller eCoo20-HCN60 und Rückkühler eRec 30 I 120

MODELL		LEISTUNGSECKDATEN	
eCoo 20 HC 60		Kälteleistung Gesamt	bis zu 92,8 kW
EINSATZBEREICH		Adsorptionskälteleistung	bis zu 33,4 kW
Heißwassertemperatur	50 - 95°C	Kompressionskälteleistung	bis zu 59,4 kW
Rückkühlwassertemperatur	22 - 40°C	COP _{TH}	bis zu 0,65
Kaltwassertemperatur	8 - 21°C	HEISSWASSERKREISLAUF	
Max. Betriebsdruck	4 bar	Volumenstrom	5,00 m³/h
ABMESSUNGEN / GEWICHT		Verfügbare Förderhöhe	320 mbar
B x T x H	875 x 2.930 x 2.004 mm	Anschluss	G 2" AG
Aufstellfläche	2,56 m²	RÜCKKÜHLWASSERKREISLAUF	
Leergewicht	ca. 1.700 kg	Volumenstrom	13,00 m³/h
ELEKTR. LEISTUNGS-AUFNAHME / ANSCHLUSS		Verfügbare Förderhöhe	640 mbar
Max. Stromaufnahme	-	Anschluss	G 2 ½" AG
Elektrischer Anschluss	400 V, 3 Ph, 50/60 Hz	KALTWASSERKREISLAUF	
KÄLTEMITTEL		Volumenstrom	14,80 m³/h
Adsorptionsteil	R718 (Wasser)	Verfügbare Förderhöhe	150 mbar
Kompressionsteil	R-290 (Propan)	Anschluss	G 2 ½" AG

eRec 30|120 Rückkühler

Leistung 120,0 kW		Medium Ethylenglykol 34%	
Flächenreserve:	2,38 %	Eintrittstemperatur:	31,3 °C
Luft:	Eintritt	Austrittstemperatur:	25,0 °C
Temperatur:	23,0 °C	Massenstrom:	18701,94 kg/h
Volumenstrom:	86343 m³/h	Volumenstrom:	17,7 m³/h
Geodätische Höhe:	0 m	Druckabfall:	0,18 bar
Ventilatoren: 6x3~400V 50Hz(E)			
Artikel-Nr.:	KT0000433		
Daten je Motor:	Nenndaten	Betriebsdaten	
Drehzahl:	610 1/min	601 1/min	Schalldruckpegel:
Leistung:	0,63 kW	0,51 kW	Abstand:
Strom:	1,1 A	0,94 A	Schallleistungspegel:
Lamellenteilung:	2,4 mm		
Fläche:	1739,2 m²		
Rohrinhalt:	178,3 l		
Leergewicht:	1150 kg		
Rohrmaterial:	Kupfer		
Lamellenmaterial:	Aluminium		
Gehäusematerial:	Stahl verzinkt, pulverbeschichtet		
	RAL 7035		
		Eintrittsstutzen:	1 x 64,0 * 2,0 mm
		Austrittsstutzen:	1 x 64,0 * 2,0 mm
		Pässe:	4
		L	6130 mm
		B	2290 mm
		H	1510 mm
		H1	600 mm
		L1	5605 mm
		B1	2115 mm

d. Performance des Kühlsystems

Da die Randbedingungen des Nenn-Betriebspunktes nur bedingt die Performance unter realen Last- / Teillast- und Außentemperaturzuständen widerspiegeln, ist eine projektspezifische Auslegung von AKM und KKM anhand der Herstellerangaben erforderlich. Nach einer entsprechenden Simulationsrechnung wurde die zu erwartende jahresstundenbezogenen Kühllast / Kühlleistung je Kälteerzeugungstechnologie ermittelt.

Der Betriebspunkt des thermischen Kühlsystems bei einer sommerlichen Rückkühltemperatur von typischerweise 30°C und einer damit einhergehenden Kältelast von 46 kW für die gleichzeitig genutzten Räumlichkeiten im Rathaus gestaltet sich demnach wie folgt:

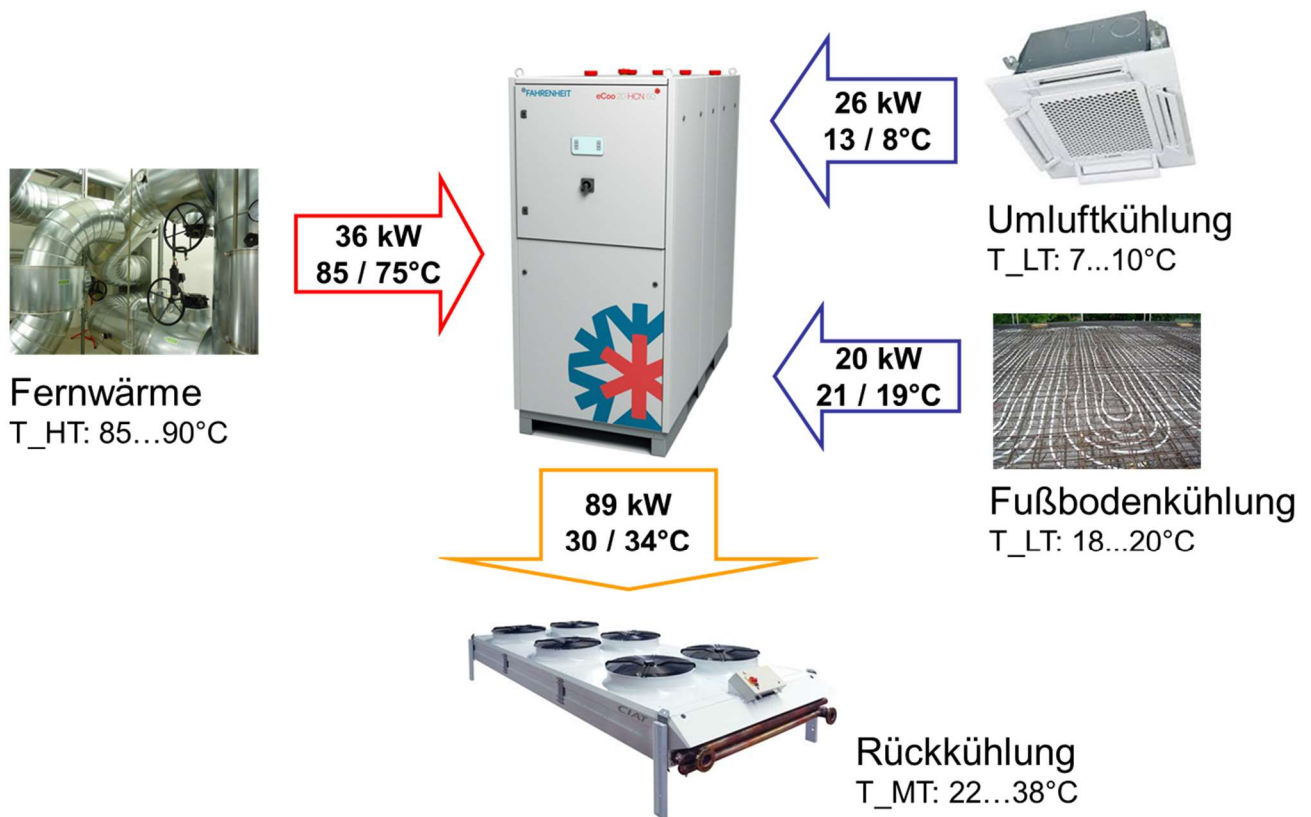


Abb. 7: Typischer Betriebspunkt des thermischen Kühlsystems

Im Jahresmittel ist von einer, auch die Serverkühlung berücksichtigenden Kühllast von ca. 10 kW, während der Kühlperiode jedoch von durchschnittlich ca. 24 kW auszugehen. Das bedeutet, dass die AKM mit Ihrer maximalen Kälteleistung von ~20 kW über weite Teile der Betriebszeit in Volllast arbeiten kann. Im dennoch auftretenden Teillastmodus reduzieren sich die aufzunehmende thermische Antriebsleistung und der damit verbundene Rückkühlaufwand.

Überschreitet die reale Kühllast die maximale Kälteleistung der AKM, wird unterstützend die integrierende wassergekühlte Kompressionskältemaschine zugeschaltet. Mit 60 kW Nennkälteleistung ist diese in der Lage, auch im Falle einer gestörten oder deaktivierten AKM – dann ausschließlich über die Umluftkühlgeräte bzw. das Kühlregister des Lüftungsgerätes – das Objekt zu kühlen.

Es sei unterstellt, dass unterhalb 18°C Außentemperatur keine signifikante aktive Kälteerzeugung mehr erforderlich ist. Im Wesentlichen beschränkt sich die Kühlaufgabe dann auf die Temperierung der Serverräume.

Auf Basis der getroffenen Auslegungen und geschilderten Annahmen wurde das Kühllastprofil um das jahresstundenbasierte Kälteleistungsprofil ergänzt. Dieses zeigt, wann welche Kälteerzeuger das Kühllastprofil (schwarz) bedienen.

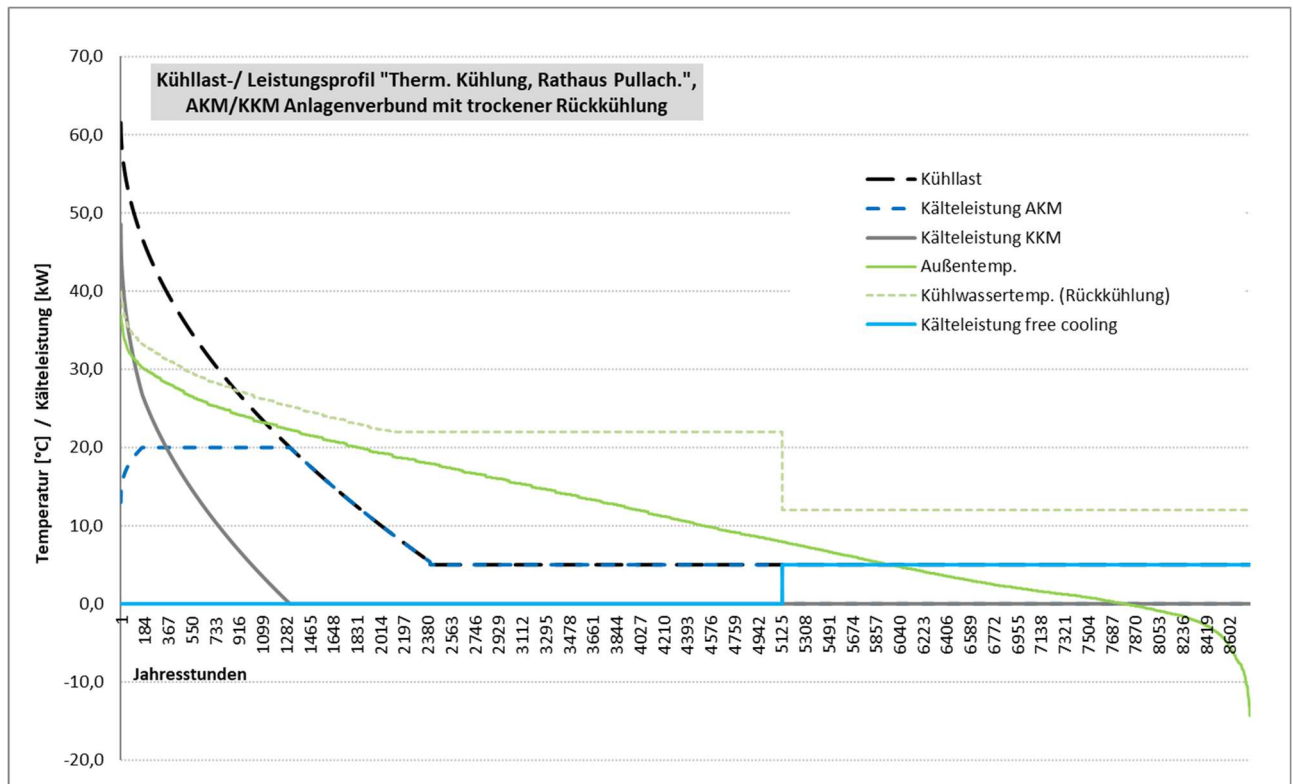


Abb. 8: Kühllast-/Leistungsprofil / Unterteilung nach Kälteerzeuger

Es wird ersichtlich, dass die AKM (blau gestrichelt) im Fall höchster Außentemperaturen eine etwas reduzierte Kälteleistung von ca. 13 kW erbringen kann. Die damit verbundene Defizitleistung von ca. 49 kW leistet der interne Kompressionskältekreis des HybridChillers.

Mit sinkenden Außentemperaturen erhöht sich stetig das Leistungspotenzial der AKM bis auf ca. 20 kW, was auch die maximale Übertragungsleistung der Fußbodenkühlung darstellt. Entsprechend nimmt der Anteil strombasierter Kälteerzeugung und auch die elektr. Leistungsaufnahme der Rückkühlerlüfter ab. Theoretisch (und entsprechend der getroffenen Annahmen) ist das AKM-Modul ab einer Außentemperatur von ca. 22°C in der Lage, die Kühlung allein ohne Spitzenlastkälteerzeugung vorzunehmen. Dann folgt die Kälteleistung der AKM dem Kühllastprofil.

Bei entsprechender Leistungsreserve bzw. dann, wenn keine Fußbodenkühlung mehr erforderlich ist, können/sollen auch die Umluftkühlgeräte der Serverräume von der AKM bedient werden, so dass dann die KKM deaktiviert bleiben kann. Dann wird auch der Kaltwassersollwert der AKM entsprechend abgesenkt.

Der free cooling-Betrieb kann ab ca. 8°C Außentemperatur erfolgen. Dann muss weder elektrische noch thermische Energie zum Antrieb der Kältetechnik eingesetzt werden.

Ausgehend vom entwickelten Kälteleistungsprofil wurde zudem die zugehörige Heizleistungsaufnahme, also die thermische Antriebsleistung des Adsorbers, betrachtet. Demnach kann das Fernwärmenutzungsprofil und wie folgt beschrieben werden.

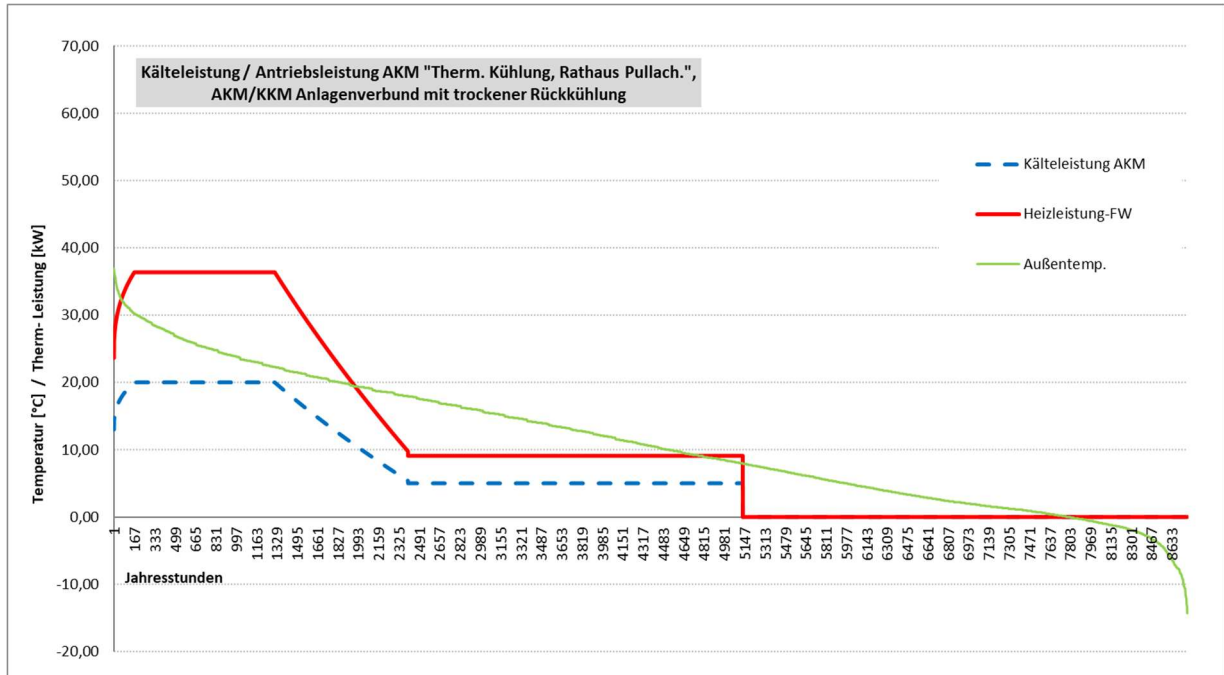


Abb. 9: Kälteleistung AKM und Antriebsleistungsprofil / Nutzung Fernwärme

Rot dargestellt ist hierbei die erforderliche und aufgenommene Antriebsleistung der AKM. Maximal beträgt diese ca. 36 kW.

→ Aufsummiert kann von einem wahrscheinlichen Wärmeenergiebedarf der AKM von ca. 75,9 MWh pro Jahr ausgegangen werden.

Zusammengefasst resultieren folgende Ergebnisse:

• Kühllast, maximal:	62 kW
• Kühllast, Kühlperiode, gemittelt:	24 kW
• Kälteleistung, AKM, maximal:	20,1 kW
• Kälteleistung, AKM, gemittelt:	10,3 kW
• Kälteleistung, KKM, maximal:	48,6 kW
• Kälteleistung, KKM, gemittelt:	16,7 kW
• Temperatur AKM, Kaltwasser (in/out):	21/19°C
• Temperatur KKM, Kaltwasser (in/out):	13/8°C
• Thermische Antriebsleistung, maximal:	36,4 kW
• Thermische Antriebsleistung, gemittelt:	18,8 kW
• Temperatur, Heißwasser (in/out, sekundärseitig, Volllast):	85/77°C
• Temperatur, Heißwasser (- II -, Teillast):	85/75°C
• Rückkühlleistung, maximal:	121,1 kW
• Rückkühlleistung, maximal:	50,2 kW
• Temperatur, Rückkühlung (in/out):	=f(T _{amb})
• Thermischer COP (AKM, Jahresmittel):	0,55
• Elektrischer COP / EER (KKM, Jahresmittel):	3,5
• Grundlastanteil AKM:	57%
• Kältearbeit, gesamt:	73,1 MWh/a
• Kältearbeit durch AKM:	41,8 MWh/a
• Kältearbeit durch KKM:	13,2 MWh/a
• Kältearbeit durch free cooling:	18,1 MWh/a
• Laststunden AKM:	4.044 Bh/a
• Laststunden KKM:	793 Bh/a

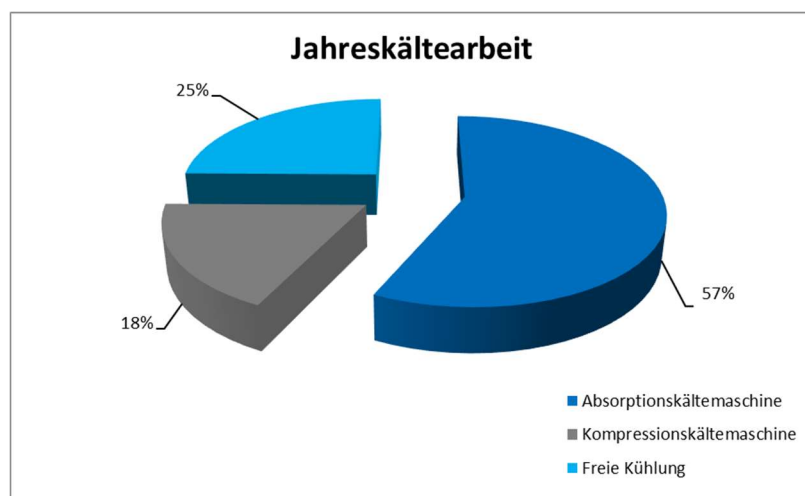


Abb. 10: Aufteilung der Jahreskältearbeit nach Kälteerzeugungstechnologie

e. Systemlayout und Anlagenbetrieb

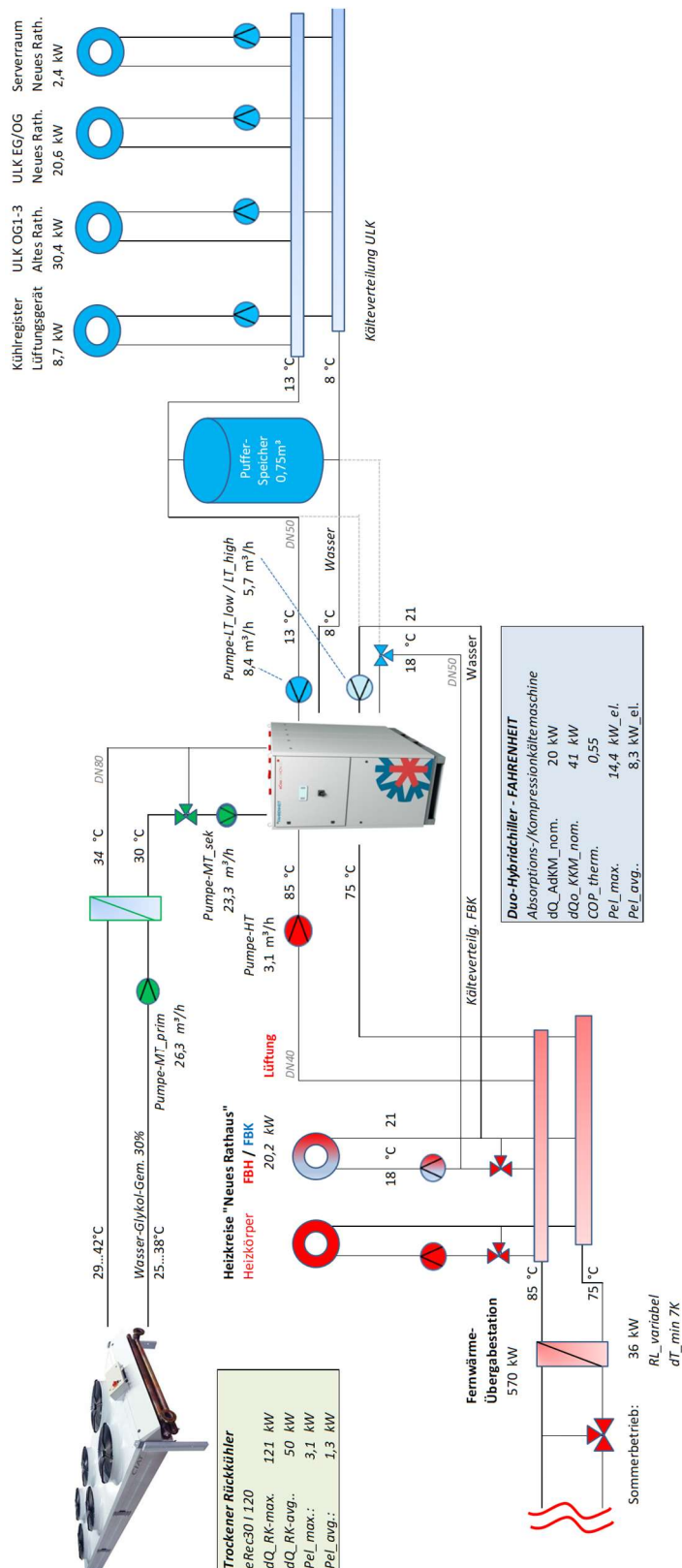


Abb. 11: Konzeptionelles Hydraulikschema Thermisches Kühlsystem

Um die beschriebene System-Performance zu erreichen ist basierend auf den örtlichen Gegebenheiten, Randbedingungen und Annahmen ein entsprechend abgestimmtes Systemlayout entwickelt worden (vgl. Abb. 11). Die wesentlichsten kältetechnischen Komponenten und Bestandteile der Anlage wurden kurz beschrieben.

Positionierung und Beschreibung des Anlagenbetriebes

Ausgehend von der Sichtung der Grundrisse Neues/Altes Rathaus und der örtlichen Gegebenheiten vor Ort wird vorgeschlagen, den Kälteerzeuger im Raum „Sanitär, 78,1 m²“ im Untergeschoss unterzubringen. Sofern eine teilweise Umnutzung dessen (der Lager) möglich ist, hätte dies einige wesentliche Vorteile.

Anzuführen sei hier:

- die zentrale Lage im Objekt,
- die geringe Distanz zu Lüftungskühlgerät, Fernwärmeanschluss-/ Serverraum,
- eine direkte Anbindung an Heizkreisverteiler Fußbodenheizung,
- die Zugänglichkeit im Servicefall,
- vertretbarer Aufwand bzgl. Einbringung (via Aufzug / Treppenhaus, jedoch noch final zu verifizieren).

Der Platzbedarf für HybridChiller, Kaltwasserpufferspeicher und neu zu installierenden „Kältekreisverteiler Umluftkühlung“ wird auf ca. 16 m² geschätzt. D.h. es würde nur ein abgrenzbarer Bereich des Raumes für die Kälteerzeugung und die neu aufzubauende Kälteverteilung genutzt werden.

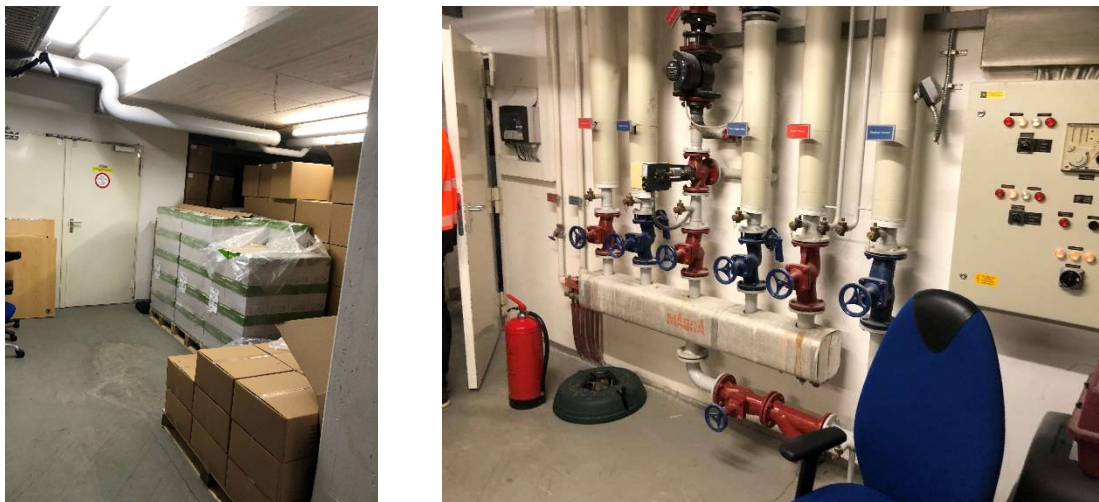


Abb. 12: links: potenzieller Standort für die Kälteerzeugung, rechts: Heizkreisverteiler (Fußbodenheizung)

Die heißwasserseitige Anbindung könnte ggf. direkt (ohne neu zu verlegender Rohrleitung) an die nicht mehr genutzte Heißwasserrohrleitung des Lüftungsgerätes erfolgen. Nennweite und Eignung ist im Zuge einer weiterführenden Planung zu prüfen.

Der Heizkreisverteiler-Fußbodenheizung befindet sich in unmittelbarer Nähe und wäre mit minimalem Aufwand an den Kälteerzeuger anzubinden.

Ein neuer Kältekreisverteiler ist in jedem Fall erforderlich, um die Kreise

- ULK - Altes Rathaus
- ULK - Neues Rathaus
- Kühlregister Lüftungsgerät
- ULK Serverraum

separat und bedarfsgerecht mit Kaltwasser zu versorgen.

Der Serverraum im Untergeschoss befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite des Flures und kann ebenfalls unkompliziert angebunden werden. Neben dem Bestands-Klima-Split-Gerät, welches beibehalten werden kann, ist ein neues Umluftkühlgerät zu installieren.

Das Lüftungsgerät des Sitzungssaales (ebenfalls im UG) kann auch ohne großen Aufwand hydraulisch angeschlossen werden. Hier ist ein entsprechend dimensioniertes Kühlregister (ca. 9 kW) nachzurüsten.

Die Versorgung der Umluftkühlgeräte für die Gebäudeabschnitte Altes und Neues Rathaus mit Kaltwasser ist ggf. über Steigstränge gem. Abbildung 14 möglich. Insbesondere die Rohrleitungsführung in den Geschossen und zwischen den Räumen erfordert jedoch einen nicht unerheblichen Installationsaufwand mit entsprechenden baulichen Anpassungen (Brandschutz, Durchbrüche, Verkofferungen, Trockenbau, ...). Die bauliche Umsetzung der Kälteverteilung, auch hinsichtlich Nutzungsunterbrechnungen, ist weiterführend detailliert zu bewerten.

Als möglichen Standort des Rückkühlers wurde die Stirnseite nördlich der Turnhalle identifiziert. Hierbei müssten die vorhandenen Sträucher weichen und ein Streifenfundament ausgeführt werden. Zur optisch besseren Einbindung des Rückkühlers wäre auch ein vorgesetzter begrünter Sichtschutz / eine Rankhilfe denkbar. Mit max. 45 dB(A) in 10m kann der Rückkühler als akustisch unauffällig eingestuft werden. Die Freifläche vor dem Rathaus selbst scheidet aus optischen und akustischen Gründen aus.

Der Rohrleitungsverlauf, die Anbindung des Rückkühlers an den Kälteerzeuger, kann entweder durch das UG des Turnhallengebäudes oder durch Kreuzung der Hofzugangs und weiterführend durch die Kellerräume des neuen Rathauses erfolgen. Die Distanz resp. die Rohrleitungslänge ist hierbei jeweils identisch und vertretbar.



Abb. 13: Potenzieller Standort für den Rückkühler

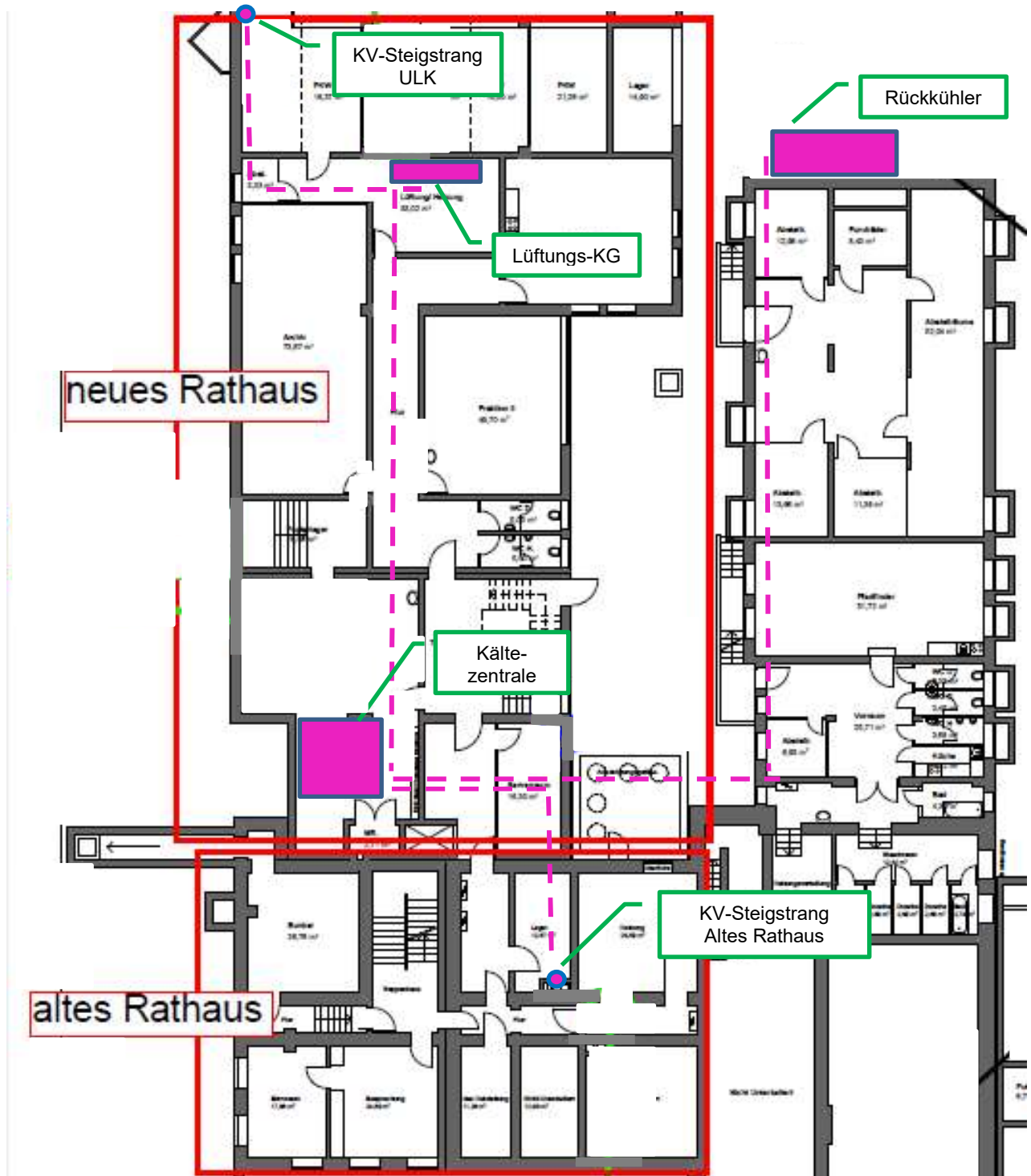


Abb. 14: Positionierungsvorschlag zu Kälteerzeugung / Kälteverteilung / Rückkühlung

Die Betriebsweise des Kälteerzeugers richtet sich nach dem tatsächlichen Kühlbedarf. Die Fußbodenkühlung erfolgt ab entsprechend definierbaren Außentemperaturen durch das AKM-Modul des HybridChillers. Dieser regelt intern auf die Soll-Kaltwassertemperatur von ca. 19°C. Eine Unterschreitung ist hierbei bis auf minimal 16°C zulässig, um eine Taupunktunterschreitung sicher auszuschließen. D.h. ein zusätzlicher Mischer ist im Kältekreis „Fußbodenkühlung“ nicht erforderlich. Die Leistungsregelung erfolgt maschinenintern.

Wann immer die Kälteleistung der AKM zur Deckung der Kühllast nicht ausreicht, wird die Redundanz-/Spitzenlast-KKM hinzugeschaltet, um keine Kälteerzeugungsdefizite auftreten zu lassen.

Das Kompressionskälte-Modul regelt auf die Temperatur im Pufferspeicher. Dieser ist sinnvoll und notwendig, um definierte Mindestlaufzeiten sicherzustellen und um auf kleinere Lastschwankungen robust reagieren zu können.

Die Pumpen des ULK-Kältekreisverteilers bedienen sich aus dem Pufferspeicher und versorgen die einzelnen Abschnitte des Objektes mit Kaltwasser auf einem konstanten Temperaturniveau von 8/13°C.

Der Rückkühler wird vom HybridChiller angesteuert und dessen Lüfter via 0-10V-Signal entsprechend der Kühllast drehzahlgeregelt. Die Pumpen der Kälteerzeugung sind bereits in der Kältemaschine integriert und werden von dieser ebenfalls drehzahlgeregelt.

Im Freikühlfall erfolgt die Regelung von Rückkühlerlüfter und Pumpen ebenfalls durch den HybridChiller; externe Wärmetauscher o.ä. sind nicht erforderlich.

Unter den benannten Bedingungen und insbesondere durch den elektroenergieeffizienten Betrieb der AKM können sehr hohe Energie-Effizienzwerte von ESEER > 10 und vergleichsweise geringe CO₂-Emissionen / Betriebskosten dargestellt werden.

5. Betriebswirtschaftliche Bewertung

7.1 Investitionskosten

Im Folgenden wird das beschriebene System bzgl. der erforderlichen Investitions- und Betriebskosten für einen definierten Betrachtungszeitraum, der technischen Nutzungsdauer der Kältetechnik (hier 15 Jahre), bewertet.

Grundlegende Annahme ist dabei, dass die Kühlaufgabe künftig entweder durch ein neues, zentral im Außenbereich angeordnetes luftgekühltes Kompressionskühlaggregat (monovalent arbeitender Kaltwassersatz, typisches, konventionelles Kältemittel, z. B. R410A) oder alternativ durch den beschriebenen Anlagenverbund aus Absorptionskältemaschine und R290-Spitzenlast-Kompressionskältemaschine realisiert wird.

Die Investitionskosten für die notwendige Erweiterung der Kälteverteilung (Deckenkassetten, Kühltruhen, Kühlregister, isolierte Rohrleitungen, Kondensatabläufe, elektrischer Anschluss der ULK, etc.) wurden an dieser Stelle vereinfachend mit für beide Szenarien einheitlich ca. 86.000€ angesetzt. Die entsprechenden Rohrleitungslängen wurden hierbei näherungsweise aus den Grundrissen bestimmt.

Weiterhin wurde die zu erwartende Performance des Systems so realistisch wie möglich beschrieben. Die Werte für EER, COP und spezifische Verbräuche entstammen dabei Herstellerangaben oder Extrapolationen dieser. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Effizienzwerte praxisrelevant sind.

Die Investitionskosten für die Kältemaschinen- und Rückkühltechnik wurden Richtpreis-Angeboten entnommen. Die Preise für alle weiteren Komponenten wurden entweder Preislisten oder vorläufigen Preisinformationen der Hersteller entnommen bzw. realitätsnah relativ zu den Komponentenkosten nach Erfahrungswerten angesetzt. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass die vorliegende Auflistung der Investitionskosten natürlich nur eine Prognose darstellen kann.

Einbezogen wurde in den nachfolgenden monetären Betrachtungen auch eine Bezuschussung der Investition für das vorgestellte Kühlsystem.

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) fördert nach dem Programm „Gewerbliche Klima- und Kälteanlagen“ sowohl die Absorptionskältemaschine nebst Speicher und Rückkühler als auch die integrierte R290-Spitzenlast-Kompressionskältemaschine, da diese mit dem natürlichen Kältemittel Propan und zudem besonders effizient arbeitet. Die nachfolgend angegebenen leistungsabhängigen Zuschusshöhen wurden anhand der Berechnungsgrundlage des BAFA ermittelt. Anteilig sind hierbei auch Planungskosten Kosten für Rohrleitungen und ULK enthalten. Die genauer Zuschusshöhe wird im Zuge der Antragstellung zu ermitteln sein; final maßgeblich ist der Zuwendungsbescheid des BAFA.

Investitionskosten, statisch	Einheit	KKM	AKM / KKM
Performance Kältetechnik			
Kältelast, maximal	kW		61,6
Kältelast, Jahresmittel (ohne Freikühlung)	kW		24,1
Kälteleistung Kompressions-KM, max.	kW	61,6	48,6
Kälteleistung Kompressions-KM, avg.	kW	24,1	16,7
Kälteleistung Kompressions-KM, avg., inkl. Serverräume	kW	10,2	-
Kälteleistung Adsorptions-KM, max.	kW	-	20,0
Kälteleistung Adsorptions-KM, avg.	kW	-	10,3
Kälteleistung, "free cooling"	kW	-	5,0
ESEER Kompressions-KM	-	3,5	3,5
ESEER Thermisches Kühlsystem	-	-	11
Wärmeverhältnis (Jahresmittel)	-	-	0,55
spez. Verbräuche			
Elektroenergie KKM, inkl. interne Pumpe	kW	7,8	4,8
Elektroenergie AKM inkl. int. Pumpen	kW	-	0,5
Elektroenergie Kälteverteilung, avg	kW	2,1	2,1
Elektroenergie Rückkühlwerk, avg.	kW	-	1,3
Elektroenergie free-cooling	kW	-	0,7
Desorptionsleistung, therm., max.	kW	-	36,4
Desorptionsleistung, therm., avg.	kW	-	18,8
Rückkühlleistung, gesamt, max.	kW	79,1	121,1
Rückkühlleistung, gesamt, avg.	kW	31,0	50,2
Wasser (Besprühung), avg.	m³/Bh	-	-
Investitionskosten			
Kälteerzeugug			
Kompressions-KM, luftgek. Kaltwassersatz inkl. Puffersp.	€	26.293	-
Systemtrennungswärmetauscher, Sekundärpumpe	€	4.850	
HybridChiller eCoo20/ST-HCN60, inkl. Systemtrenng.	€	-	64.900,00
Maschinengehäuseentlüftung KKM (Wickelfalzrohr DN100)	€	-	750,00
Hocheffizienzrückkühler eRec30 I 120	€	-	15.930,00
KW-Speicher, 0,75m³, inkl. Isolierung, Arm. & Aufstellung	€	-	1.150,00
Rohrsystem Rückkühlung (kälteisoliert)	€	-	10.662,00
Rohrsystem Heißwasser (Mineralwolle, Alu-kaschiert)	€	-	2.904,00
Rohrsystem Kaltwasser (kälteisoliert)	€	9.595,80	2.101,00
MSR/Verkabelung/Elektroanschluss	€	2.200,00	2.200,00
Nebenkosten (Glykol, Spülen, Dichtheitsprüfung, etc.)	€	2.469,00	2.469,00
Bauliche Maßnahmen (inkl. Fundament Außengeräte)	€	7.500,00	7.500,00
Kälteverteilung			
Anpassungen Kälteverteilung Fußbodenkühlg.	€	1.350,00	1.350,00
Kältekreisverteiler, Umluftkühlgeräte, 4 Stränge, inkl. Pumpen	€	9.073,00	9.073,00
Integration Kühlregister Lüftungsgerät 9 kW, hydr. Anbindung	€	5.385,00	5.385,00
Umluftkühlgerät Serverraum, 2,5 kW, hydr. Anbindung	€	1.709,00	1.709,00
Umluftkühlgeräte Altes Rathaus, hydr. / elektr. Anbindung	€	29.343,00	29.343,00
Umluftkühlgeräte Neues Rathaus, hydr. / elektr. Anbindung	€	29.414,00	29.414,00
Bauliche Anpassungen	€	10.000,00	10.000,00
Transport & Einbringung	€	1.350,00	1.650,00
Inbetriebnahme	€	1.500,00	1.850,00
zzgl. optional Kältemittelöl / Glykol-Auffangwannen,	€	6.500,00	6.500,00
BAFA-Zuschuss (Kälte/Klima)_AKM und Rückkühler	€		-25.867,00
BAFA-Zuschuss (Kälte/Klima)_R290 KKM	€		-12.557,00
Summe Investitionskosten, gesamt	€	148.532,24	206.840,00
Summe Investitionskosten, Kälteerzeugung (vor Förderung)	€	62.258,24	120.566,00
Summe Investitionskosten, Kälteerzeugung (nach Förderung)	€	62.258,24	82.142,00
spezifischer Systempreis (inkl. Kälteverteilung!)	€/kW	1.011,50	1.334,54

- ➔ Ohne Berücksichtigung eines Fördermittelbezuges, betragen die Investitionsmehrkosten des vorgestellten neuen Kälteerzeugungssystems gegenüber einer konventionellen Kompressionskältemaschine in Außen-Aufstellung nebst deren Einbindung ca. 58.300€.
- ➔ Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Förderung i. H. v. ca. 38 T€ reduzieren sich die Investitionsmehrkosten auf ca. 19,9 T€.

7.2 Betriebskosten, statisch

An die Vorbetrachtungen anschließend wurde die jeweilige Nutzercharakteristik mit den zugehörigen Kosten und Verbräuchen kombiniert. Die Berechnung der absoluten Verbräuche basiert auf den zu erwartenden Benutzungsstunden der Maschinen nebst Pumpentechnik/Ventilatoren ausgehend vom beschriebenen Kühllastprofil respektive der Nutzungscharakteristik.

Der aktuelle Preis für Elektroenergie wurde gemäß Angaben des AG dabei als Mischpreis mit 0,20 €/kWh angesetzt und beinhaltet neben dem Arbeitspreis auch Mess- und Grundpreisannteile (Netzentgelte, Umlagen, Stromsteuer, etc.); Wasser zum Betrieb des Rückkühlers wird nicht benötigt.

Die Wärmegestehungskosten wurden laut AG mit 0€/kWh berücksichtigt.

Betriebskosten, statisch	Einheit	KKM	AKM / KKM
Nutzercharakteristik	100%		
Laststunden KKM	h/a	3.034	793
Laststunden AKM	h/a	-	4.044
Laststunden free cooling	h/a	-	3.628
Verbrauchspreise			
Mischpreis Elektroenergie (AP, LP, GP)	€/kWh	0,20	
Wärmegestehungskosten/-preis	€/kWh	0,00	
Wasser	€/m³	0,00	
Verbräuche, Kälteerzeugung, absolut			
Elektroenergie	kWh/a	23.773	13.656
Wärmeenergie	kWh/a	-	75.910
Wasser	m³/a	-	0
Erzeugte Kälteenergie			
aus KKM	kWh/a	73.117	13.226
aus AKM	kWh/a	-	41.751
aus free cooling	kWh/a	-	18.140
Betriebskosten			
Elektroenergie	€/a	4.754,52	2.731,17
Wärme	€/a	-	0,00
Wartung / Service KKM / KKM-Spligeräte / AKM/Rückkühler	€/a	1.950,00	1.100,00
Wasser	€/a	-	0,00
Summe jährliche Betriebskosten	€/a	6.704,52	3.831,17
Kälteerzeugungskosten ohne Kapitaldienst	€/a	6.704,52	3.831,17
Gesamtkosten in 15 Jahren	€	100.567,84	57.467,48
Spezif. Kälteerzeugungskosten	€/kWh	0,092	0,052

- ➔ Die Kosten für die Kälteerzeugung können durch den energieeffizienten Betrieb des vorgeschlagenen Systems im Vergleich zu einem typischen Standardkältesystem erheblich reduziert und auch langfristig auf einem sehr geringen Niveau gehalten werden.
- ➔ Der notwendige Elektroenergieeinsatz für die Kälteerzeugung kann um ca. 43 % gesenkt werden.
(- 10.117 kWh/a)
- ➔ Zunächst ohne Berücksichtigung des Kapitaldienstes und von Preissteigerungen reduzieren sich die jährlichen Betriebskosten gegenüber dem Referenzszenario um 2.873€ und damit ebenfalls um ca. 43%.
- ➔ Die spezifischen Kälteerzeugungskosten (Grenzkosten) betragen im Falle der sorptionsgestützten Kälteerzeugung 0,052 €/kWh_Kälte, wobei keine WärmeGESTEHUNGSKOSTEN einkalkuliert wurden.

7.3 Kältegestehungskosten, dynamisch

Da für eine aussagekräftige betriebswirtschaftliche Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahme auch realistisch erwartbare Preissteigerungen sowie die interne / externe Verzinsung der Investition zu berücksichtigen sind, sollen die Gesamt-Kältegestehungskosten dynamisch, d. h. auf die einzelnen Betriebsjahre bezogen, kalkuliert werden.

Zur Bewertung des Kapitaldienstes wurde die Aufnahme eines Darlehens mit 8 Jahren Tilgungsdauer und entspr. Verzinsung unterstellt. Als Zinssatz für hocheffiziente Kältetechnik wurden hierbei aktuelle KfW-Konditionen (1,0 % p.a.) angenommen. Im Sinne einer konservativen Betrachtung gelte dies vereinfacht auch für die weniger effiziente Referenztechnologie.

Adsorptionskältemaschinen arbeiten sehr verschleißarm, da kaum bewegliche Teile enthalten sind. Grundsätzlich kann ein neu zu installierendes thermisches Kühltssystem ohne Einschränkungen 20 Jahre ohne Totalausfall oder signifikanten Leistungsverlust arbeiten können. Dies belegen entsprechende Praxisbeispiele. Als technische Nutzungsdauer des Kühltystems sollen 15 Jahre berücksichtigt werden.

Für den Bezug von Elektroenergie wurde eine jährliche und konstante Preissteigerung von 4,0%/a unterstellt, was unter der durchschnittlichen Preissteigerung der vergangenen 10 Jahre liegt. Servicetätigkeiten an der AKM verteuern sich geschätzt jährlich um 1,5%.

Aufgrund der erwartbaren Kontingentierung / Verknappung des eingesetzten konventionellen Kältemittels im Referenzszenario muss allerdings mit deutlicheren Preissteigerungen für die Wartung der Kompressionskältemaschinen – hier angenommen 10 % - gerechnet werden. Angemerkt sei, dass auch die gegenwärtig verbauten Split-Klimageräte einer regelmäßigen Wartung unterliegen.

Kapitalrelevante Größen			Bemerkung
Zinssatz Finanzierung Thermische Kühlung	%	1,0	lt. KfW-Konditionen
Zinssatz Finanzierung konv. Kältetechnik	%	1,0	normale Kreditkonditionen
Laufzeit Tilgung	a	8	entspricht AFA
Technische Nutzungsdauer AKM	a	15	wahrscheinliche Mindestnutzungsdauer AKM
Maximale Nutzungsdauer AKM	a	20	typische Nutzungsdauer
Technische Nutzungsdauer KKM	a	12	keine Generalüberholung im Anschluss berücksichtigt
Preissteigerung Elektroenergie	%/a	4,0	geringer Prognose UBA
Preissteigerung , Wartung AKM, R290-KKM, Wasser	%/a	1,5	Annahme
Preissteigerung , Wartung konventionelle KKM	%/a	10	Annahme, vgl. "F-Gase-VO"

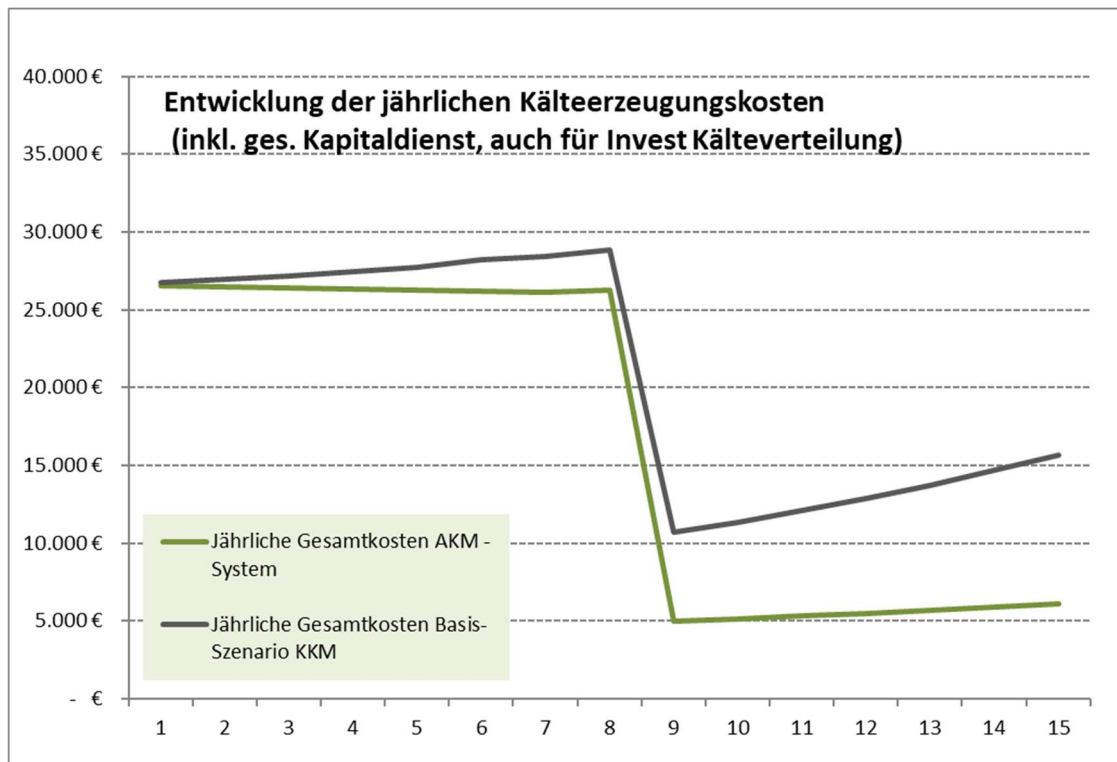


Abb. 15: Prognose zu den jährlich resultierenden Kälteerzeugungskosten bei Berücksichtigung von Preissteigerungen und kapitalgebundenen Kosten der Gesamtinvestition

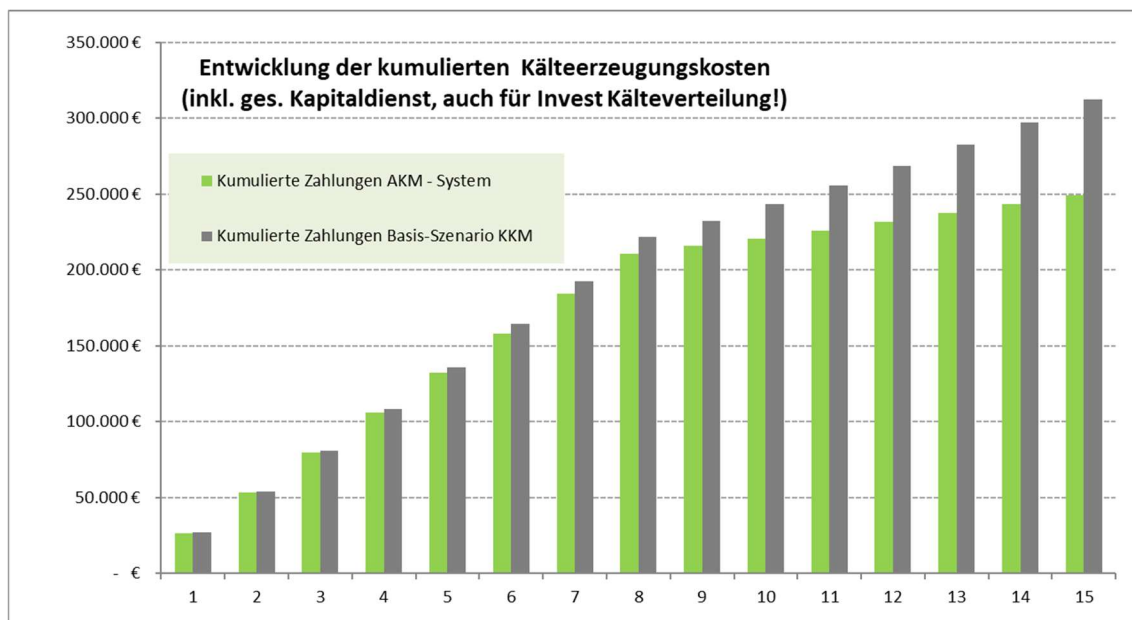


Abb. 16: Prognose zu den kumulierten Kälteerzeugungskosten bei Berücksichtigung von Preissteigerungen und kapitalgebundenen Kosten der Gesamtinvestition

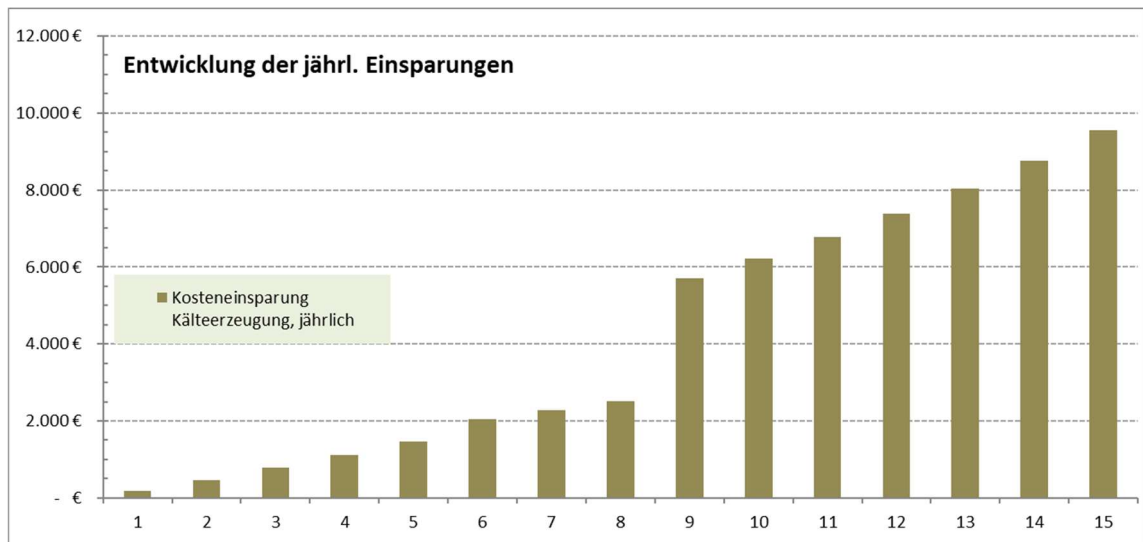


Abb. 17: Prognose zu den jährlichen Einsparungen

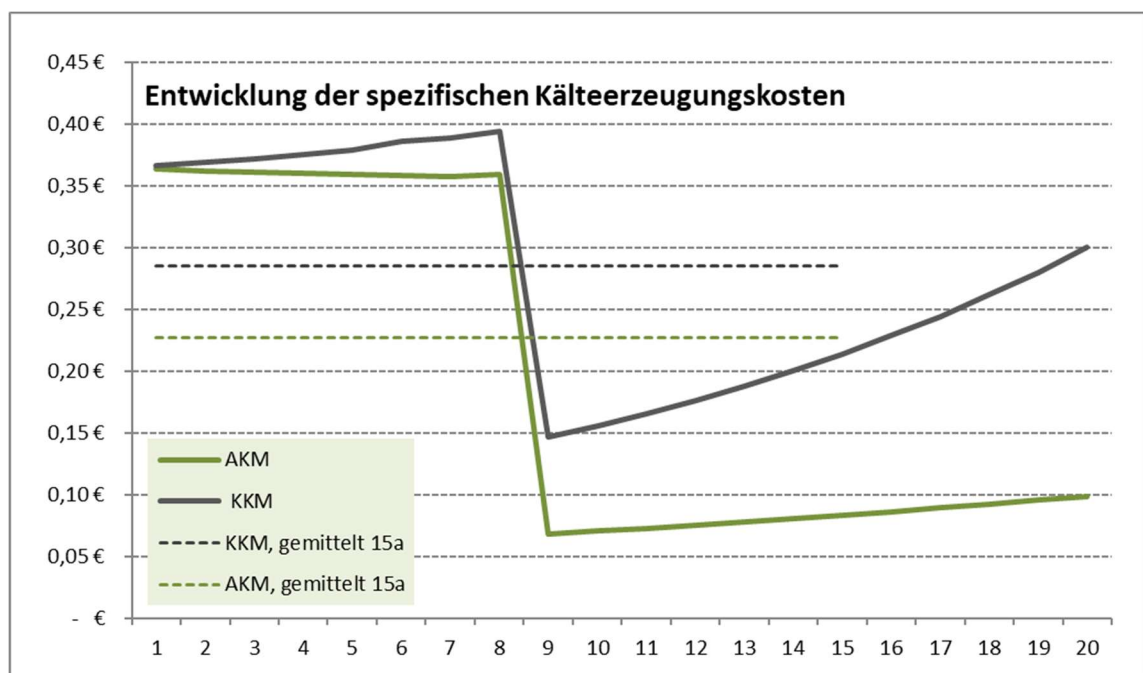


Abb. 18: Prognose zu den spezifischen Kälteerzeugungskosten

Ergebnis gem. Tilgungsplan Thermisches Kühlsystem

Investitionskosten:	168.416,00 €
Gesamtzahlung (Summe Raten):	175.994,72 €
berücksichtigte Fördermittel:	38.424,00 €
berücksichtigte Zinszahlungen:	7.578,72 €
Anschaffung abgeschrieben und getilgt in	8 Jahren
Return of Invest (in 15a)	3,0
Kostenersparnis kumuliert in technischer Nutzungsdauer	63.317 €
Kostenersparnis kumuliert in maximaler Nutzungsdauer	125.698 €

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen kann in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der vorgestellten Maßnahme folgendes festgestellt werden:

- ➔ Das beschriebene thermische Kühlsystem wird energetisch sinnvoll arbeiten können. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist grundsätzlich auch sichergestellt, hängt aber von den zu Grunde gelegten Wärmegegestehungskosten ab.
- ➔ Nach abgeschlossener Tilgung innerhalb 8 Jahren sind erhebliche und dauerhafte jährliche Einsparungen gegenüber einem konventionellen Kälteerzeuger zu erwarten.
- ➔ Die auf eine Laufzeit von 15 Jahren gemittelten, realen Kältegegestehungskosten inkl. aller Zinszahlungen (auch der Kälteverteilung) sind im Falle der sorptionsbasierten Kälteerzeugung ca. 5 ct/kWh und damit ca. 20% geringer als mit konventioneller Technik möglich.
- ➔ Die getätigte Investition nebst Zinszahlungen fließt gemäß den getroffenen Annahmen und Randbedingungen innerhalb 15 Jahren ca. 3,0-mal zurück.

6. CO₂- Emissionen

Ergänzend wurde zudem eine Berechnung der resultierenden Reduktion an Treibhausgasemissionen durchgeführt. Durch den deutlich geringeren Verbrauch an Elektroenergie können unter Berücksichtigung des Ursprungs der Elektroenergie (deutscher Strom-Mix: 474 g_{CO2}/kWh) entsprechend geringere Treibhausgas-Emissionen gelten gemacht werden.

Da Adsorptionskältemaschinen wie auch das ausgewählte R290-Aggregat mit umweltfreundlichen Kältemittel arbeiten, sind zudem klimaschädliche Leckagen von flüchtigen Kohlenwasserstoffen, wie in herkömmlichen Klima-/Kälteanlagen unvermeidbar, hierbei nicht von Relevanz.

Berechnung der CO₂-Einsparungen		KKM	AKM/KKM
Jahreskältearbeit (Jahreskühllast)	[kWh/a]	73.117	73.117
Jahresstromverbrauch Kühlsystem, gesamt	[kWh/a]	23.773	13.656
CO ₂ -Emission aus Elektroenergieerzeugung, absolut	t CO ₂ /a	11,3	6,5
CO ₂ -Emission aus Elektroenergieerzeugung, spezif.	g CO ₂ /kWh*a	154	89
Füllmenge Kältemittel (R410a/R290)	kg	15,0	12,1
GWP-Wert (<i>global warming potential</i>)		2.088	3
Durchschnittliche Leckage	%/a	2,5	2,5
Leckage, absolut	kg/a	0,4	0,3
CO ₂ -Äquivalent aus Leckage, absolut	t CO ₂ /a	0,8	0,001
CO ₂ -Reduktion, absolut	t CO ₂ /a		5,6
CO ₂ -Reduktion, spezifisch	g CO ₂ /kWh*a		76
CO₂-Reduktion, relativ	%		-42,6
CO₂-Einsparung in 15 Jahren	t CO₂		84
entspricht einer jährl. Laufleistung von PKW		entspr.	3

Unter Einbeziehung von Sorptionskältetechnik wie beschrieben lassen sich ca. 43% Kohlendioxid-Emissionen gegenüber einer heute durchaus typischen Standardlösung vermeiden. Somit werden den Annahmen folgend jährlich ca. 5,6 t Kohlendioxid weniger emittiert. Das entspricht in etwa dem jährlichen CO₂-Ausstoß von 3 Mittelklasse-PKW bei einer typischen Fahrleistung von 15.000 km/Jahr.

Im Betrachtungszeitraum von 15 Jahren ließen sich unter den beschriebenen Annahmen insgesamt ca. 84 t Kohlendioxidemissionen vermeiden. Damit leistet das thermische Kühlsystem einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz.

Eine absehbare Bepreisung von emittiertem Kohlendioxid und deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit auch in diesem Projekt wurde im Sinne einer konservativen Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt.

Abgesehen von den erzielbaren monetären Vorteilen ist die Integration thermischer Kühlung mit reinem Wasser als Kältemittel auch aus ökologischen Aspekten empfehlenswert.

Alle aktuellen und zu erwartenden nationalen bzw. EU-weiten gesetzlichen Anforderungen werden bei Integration von Adsorptions- und R290-Kältetechnik uneingeschränkt erfüllt.

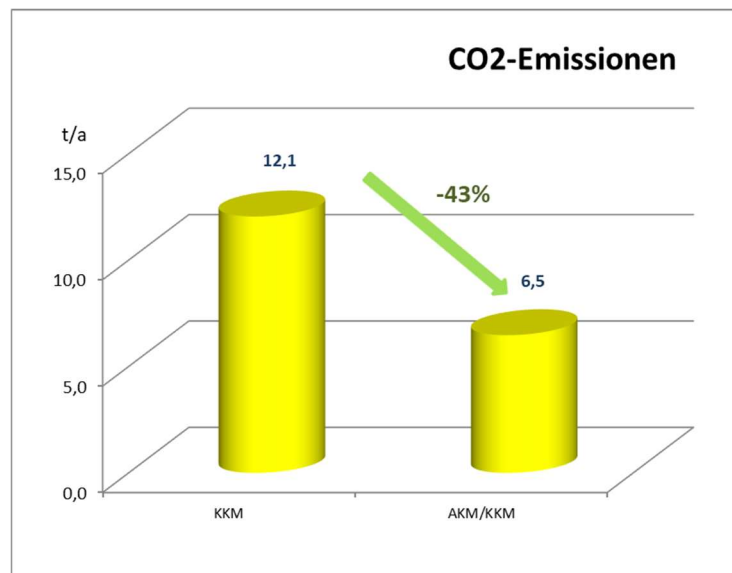


Abb. 19: CO2-Reduktion, jährlich