Energieverbrauch und Jahresarbeitszahl

Messtechnische Erfassung des Energieverbrauchs und Ermittlung der Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Kälteanlage

Christian Steininger[1*], Katharina Eder[2], Barbara Beigelböck[2], Magdalena Wolf[1], Tobias Pröll[1]

[1] Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien, Österreich
[2] Vasko+Partner Ingenieure Ziviltechniker für Bauwesen und Verfahrenstechnik GmbH, Grinzinger Allee 18, 1190 Wien, Österreich

g.christian.steininger@students.boku.ac.at

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Im Zuge eines Forschungsprojektes wurden die elektrischen Energieverbräuche sowie die entzogene Wärmemenge von verschiedenen Kälteanlagen messtechnisch erfasst und die Jahresarbeitszahlen (JAZ) ermittelt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Messungen und Auswertungen einer ausgewählten Anlage vorgestellt und diskutiert.

Die Messtechnik für die Bestimmung der Energieverbräuche und der Jahresarbeitszahlen im eingebauten Zustand ist aufwendig. Es müssen dabei parallel die verschiedenen Subsysteme einer Kälteanlage gemessen und ausgewertet werden. Ebenso sind die jeweiligen Randbedingungen (Laststufe, Außentemperaturen, Massenströme etc.) zu erfassen und zu bewerten.

Arbeitszahlen (erzeugte Kälteenergie bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie) sind für die Bewertung von Kälteanlagen (Gesamtsysteme) aussagekräftiger als die alleinige Betrachtung von Leistungszahlen (EER) der Kältemaschine. Dies ist zwar allgemein bekannt, konkrete und vergleichbare Werte sind jedoch kaum veröffentlicht.

Für die Analyse wurden die elektrischen Energieverbräuche der Subsysteme (im Wesentlichen Pumpen und Rückkühler) und der EER (Energy Efficiency Ratio) / die Leistungszahl in Abhängigkeit der Kältemaschinenstufe bzw. der Belastung der Kältemaschine im Teillastbetrieb sowie Arbeitszahlen (Tages-, Monats-, Jahresarbeitszahlen, Arbeitszahl bezogen auf die Außentemperatur ermittelt.

Es zeigt sich, dass neben den Kältemaschinen die Hydraulik des Gesamtsystems mit den Pumpen für Kalt- und Kühlwasser einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch (und damit auf die Jahresarbeitszahl) haben. Der Verbrauch der Rückkühlung (offener Kühltürme) hat im untersuchten System einen geringen Anteil am Gesamtverbrauch.

Eine Messung und die Ermittlung von Tages- und Stundenmittelwerten nur über bestimmte Zeiträume (z. B. eine Woche im Sommer und eine Woche) verringert den Aufwand für die Messung - allerdings ist auch damit zu rechnen, dass gewisse Abweichungen zum tatsächlichen Jahresverbrauch und zur Jahresarbeitszahl entstehen werden.

Es wird untersucht, welche Abweichung zum tatsächlichen Jahresverbrauch eine Hochrechnung auf Basis von Tages- und Stundenmittelwerten (die nur über einen bestimmten Zeitraum ermittelt wurden) aufweist bzw. welche Daten (Verbrauch bei verschiedene Lastzuständen und Außentemperaturen) und anlagentechnischen Merkmale (Regelkonzept – Pumpen starr/variabel, Betriebszeiten etc.) für eine derartige Hochrechnung zu berücksichtigen sind.

Stichwörter:

Kompressions-Kältemaschinen, Kälteanlagen, Arbeitszahlen, Jahresarbeitszahlen, Messdatenerhebung

1 Einleitung

In Hinblick darauf, dass der Energieaufwand für den Betrieb von Kälteanlagen beträchtlich ist, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „ViCC – Virtual Cooling Control“ die Steigerung der Energieeffizienz von Kompressions-Kälteanlagen durch die intelligente Nutzung vorhandener Kommunikations- und Informationsschnittstellen untersucht. Das Forschungsprojekt ViCC wurde von der Wiener Wirtschaftsagentur – ein Fond der Stadt Wien – gefördert und wurde im Dezember 2021 abgeschlossen. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden u. a. die Energieverbräuche von verschiedenen Kälteanlagen (Gesamtsysteme) messtechnisch erfasst und die Jahresarbeitszahlen (JAZ) ermittelt.

Kälteanlagen sind komplexe Systeme mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller mit voneinander unabhängigen Regelungen. Die Einzelkomponenten sind im Allgemeinen auf das jeweils spezifische Optimum ausgelegt; eine übergeordnete Regelung über Gebäudeautomationssysteme (GA-Systeme), die über Freigabesignale des GA-Systems hinaus geht, ist lediglich in Ausnahmefällen vorhanden.

In Abbildung 1 ist erkennbar, dass die Kältemaschine (Systemgrenze I) nur ein Teil der gesamten Kälteanlage (Systemgrenze III) ist. Soll eine Aussage über die Effizienz einer Kälteanlage getroffen werden, sind auch Rückkühlung und Verteilerpumpen miteinzubeziehen. In realen Anlagen zeigt sich, dass die Nebenaggregate mitunter für einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs einer gesamten Kälteanlage verantwortlich sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden an den vermessenen Anlagen jeweils der Anteil der Einzelkomponenten bestimmt, um Optimierungspotenziale ableiten zu können

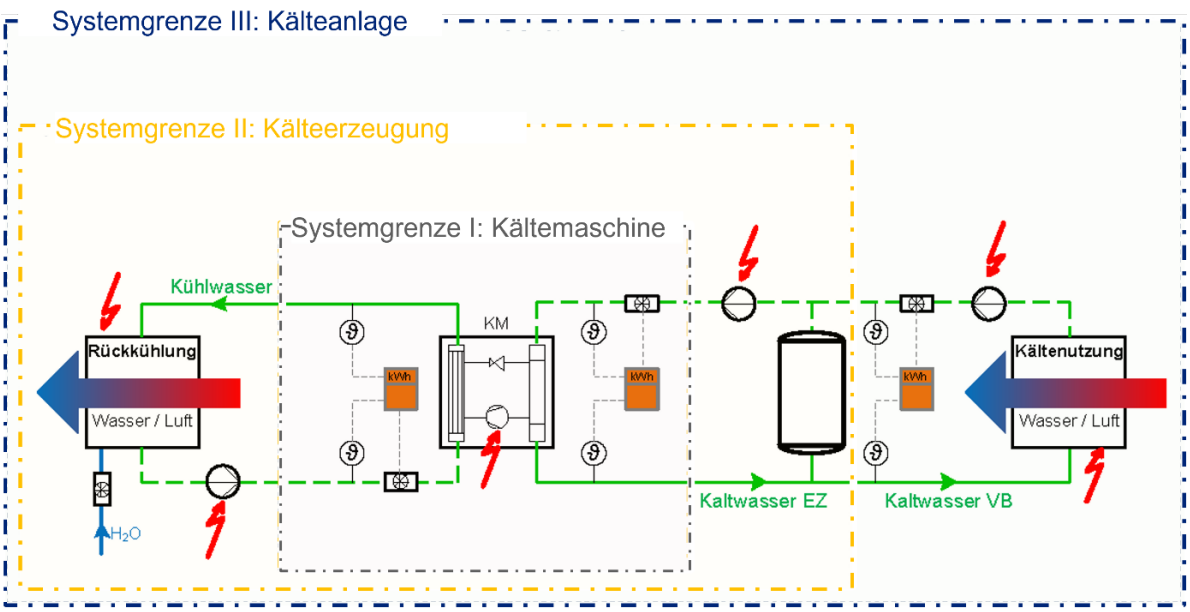

Abbildung 1: Komponenten und Systemgrenzen einer Kompressions-Kälteanlage – schematische Veranschaulichung der Komplexität und Einflussfaktoren auf einen energieeffizienten Betrieb (rote Blitze zeigen Verbraucher von elektrischer Energie; rot-blaue Pfeile zeigen zu- und abströmenden Energieflüsse).

Im Fokus des Forschungsprojektes stand die Gesamtsystemoptimierung, wobei sich eine wesentliche Fragestellung auf den Teillastfall richtete. Technische Maßnahmen zur signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz im Betrieb von kältetechnischen Systemkomponenten (wie bspw. Kältemaschinen, Pumpen, Rückkühler, …) sind hinreichend bekannt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Methode zur Systemoptimierung mittels Nutzung von virtuellen Datenpunkten über dynamische Systemsimulationen und ggf. Kopplung an ein Gebäudeautomations-System entwickelt.

Die Einzelkomponenten einer Kälteanlage weisen wiederum verschiedene Bauformen (z. B. Verdichterbauart der Kältemaschine oder Art der Rückkühlung) auf, die eine Vielzahl an Systemkombinationen zulassen. Der erste Schritt zur Systemoptimierung ist ein Verständnis der Anlagen im Betrieb. Dazu ist eine umfassende messtechnische Erfassung erforderlich.

Der Anlagenbetrieb, und damit hauptsächlich das Teillastverhalten von verschiedenen Komponenten bei unterschiedlichen Regelstrategien, kann in der Planungsphase kaum abgeschätzt oder verglichen werden. Das Forschungsprojekt ViCC setzt hier an, und versucht, mit Simulationsmodellen Optimierungspotenziale in Bestandsanlagen zu erheben.

2 Jahresarbeitszahl (JAZ)

Entscheidend für die Bewertung der Gesamtperformance einer Kälteanlage (Systemgrenze III gem. Abbildung 1) ist die Jahresarbeitszahl (JAZ), d. h. wie viel elektrische Energie $\Sigma W_{el,i}$ (Aufwand) im Betrachtungszeitraum (ein Jahr) für das gesamte System einer Kälteanlage erforderlich ist, um eine bestimmte „Kältemenge“[1] $Q_{0,Nutz}$ (Nutzen) zu erzeugen.

Um Jahresarbeitszahlen (JAZ) rechnerisch zu bestimmen, sind Berechnungen erforderlich, die auch die konkrete Betriebsführung einer Anlage berücksichtigen. Die genauen Energieflüsse einer Anlage für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl ohne Messungen zu bestimmen, ist daher aufwendig.

Während zur Bewertung einer Kältemaschine (Systemgrenze I) normierte Verfahren zur Verfügung stehen, fehlen entsprechende Richtlinien für die Bewertung von Kälteanlagen (Systemgrenze III). Es gibt wenig verfügbare Literatur, die sich mit dem Thema der Jahresarbeitszahl von Kälteanlagen (Gesamtsystemen) auseinandersetzt.[2] Dies ist insofern bemerkenswert, da die Kosten für die Kühlung von Gebäuden im Allgemeinen als hoch angesehen werden – genaue Zahlen und Daten jedoch kaum verfügbar sind. Die Literaturrecherche zu dem Thema wird nachfolgend zusammengefasst.

- In der Studie „Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnützung eines kleinen Temperaturhubes“ [2] werden Energie- und Exergieanalysen durchgeführt sowie Messungen an 2 realen Anlagen detailliert beschrieben. Für die gemessenen Anlagen werden die Jahresarbeitszahlen ermittelt. Wesentliche Aussage ist das wohlbekannte Prinzip, dass der Temperaturhub möglichst klein gehalten werden sollte.
- Im Projekt „KaP - Kälteanlagen in der Praxis“ [3] wurden Werkzeuge (Excel-Tools) für die energetische Optimierung von Kälteanlagen entwickelt. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von einfach anzuwendenden Werkzeugen für die Betriebsanalyse und Systemoptimierung von Kälteanlagen in Büro-, Produktions- und Industriegebäuden. Am Test der entwickelten Tools waren 38 Gebäude mit insgesamt 38 Kältesystemen beteiligt. 28 Kältesysteme wurden in einer Detailanalyse betrachtet. Anhand der Detailanalyse wurden Einsparmöglichkeiten unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen für 19 Kältesysteme ermittelt. Genauere Informationen sind nicht abrufbar.
- In der ÖNORM H 5058 „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Kühltechnik-Energiebedarf“ [4] werden Kennwerte (Fixwerte) für Verbrauchszahlen von unterschiedlichen Kältemaschinen und Rückkühlern angeführt. Ebenso sind in dieser Norm typische Werte (Defaultwerte) für die Nebenaggregate (Umwälzpumpen etc.) dargestellt. Grundsätzlich könnten mit diesen Daten Jahresarbeitszahlen ermittelt werden – es sind jedoch keine Ziel-/Vergleichswerte für Gesamtanlagen angeführt. Die Datenbasis für die angeführten Werte ist nicht angegeben.
- Der Beitrag „Übersicht zu Energieeffizienzkenngrößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik“ [5] beschäftigt sich mit vorhandenen Bewertungsverfahren für Kälteanlagen, ihren Einschränkungen bezüglich der Bewertung von Anlagen im laufenden Betrieb und den Entwicklungen, die vorgenommen werden sollten, um zukünftig eine einheitliche Energieeffizienz-Bewertung vom Hersteller bis zum Betreiber zu erreichen. Des Weiteren werden Messergebnisse präsentiert, die nach dem im VDMA-Einheitsblatt 24247-7 beschriebenen Bewertungsverfahren für Kälteanlagen im Betrieb gemessen wurden.

[1] Auf den physikalisch „korrekteren“ Begriff Wärme wurde im Zusammenhang mit dem Thema Kältetechnik aufgrund der besseren Lesbarkeit verzichtet.

[2] Im Gegensatz dazu, ist die Anwendung der Jahresarbeitszahl im Bereich von Wärmepumpenanlagen gebräuchlich.

- Das Projekt EnEff_Cool [6] beschäftigte sich mit dem Vorhaben, ein praktikables, indirektes Verfahren zu erforschen und zu entwickeln, mit dem im laufenden Betrieb der energetische Zustand einer Kälteanlage kontinuierlich erfasst und als Key Performance Indikator (KPI) angezeigt werden kann.

Eine Auswertung einschlägiger kältetechnischer Publikationen (OIB-Richtlinien, Dokumentation der DKV-Tagungen, Fachzeitschriften für Kältetechnik) zeigt, dass die Betrachtung einer Jahresarbeitszahl von Gesamtsystemen nicht erfolgt bzw. nicht publiziert wird. Lediglich die Forderung nach einem entsprechend hohen Wert für die Energieeffizienz EER bzw. ESEER der Kältemaschine findet man in verschiedenen Unterlagen.

Die Kriterien für einen effizienten Betrieb von einzelnen Komponenten und Anlagenteilen sind im Grunde (weitgehend) bekannt und gelten als gut erforscht. Auf eine Beschreibung dieser wesentlichen Einflussfaktoren wird hier verzichtet. Zu beachten ist, dass sich die Aufführungen in diesem Beitrag auf einen Großteil der Anlagen in der Gebäudetechnik gelten. Insbesondere in der Kältetechnik gibt es für viele Aufgaben Sondermaschinen (z.B. Eiserzeugung, Kryokälte etc.) welche hier nicht näher betrachtet werden sollen.

3 Energieverbrauch Gesamtanlagen

Die Messtechnik für die Bestimmung der Energieverbräuche und der Jahresarbeitszahlen im eingebauten Zustand ist aufwendig. Es müssen dabei parallel die verschiedenen Subsysteme einer Kälteanlage gemessen und ausgewertet werden. Ebenso sind die jeweiligen Randbedingungen (Laststufe, Außentemperaturen, Massenströme etc.) zu erfassen und zu bewerten. Die Erfahrungen, die im Zuge der Messdatenerfassung gemacht wurden, sind in Wolf et al. [1] zusammengefasst.

Für die Anlagenvermessung wurden Messobjekte ausgewählt, die einen größtmöglichen Querschnitt abbilden, wobei folgenden Systemkombinationen vermessen wurden:

- Messobjekt 1: Kälteerzeugung: Scrollverdichter | Rückkühlung: über Donaukanal
- Messobjekt 2: Kälteerzeugung: magnetgelagerte Turbokompressoren | Rückkühlung: adiabate Rückkühler
- Messobjekt 3 („HadW“): Kälteerzeugung: Schraubenkompressoren (2 Kreise 6 Stufen) | Rückkühlung: offener Kühlturm, Kältemaschinen kühlwasserseitig in Serie geschalten

Im Rahmen der Datenauswertung wurde als übergeordnete Kenngröße die Jahresarbeitszahl (Systemeffizienz) der betrachteten Kälteanlagen bewertet. Wesentlich für die Definition und Identifikation von Optimierungsmaßnahmen ist der Anteil der jeweiligen Systemkomponenten am Gesamtstromverbrauch. In Abbildung 2**:** Vergleich der Verteilung des elektrischen Energieverbrauchs der untersuchten Anlagen sind die Ergebnisse für die Messobjekte zusammengefasst. Zu erkennen ist, dass der Anteil der Kältemaschine zwischen 46 % und 77 % liegt. Erhebliche Einsparpotentiale konnten einerseits bei den Abnehmerpumpen und andererseits auf der Kühlwasserseite (hauptsächlich Kühlwasserpumpen) identifiziert werden. Speziell bei offenen Kühltürmen spielt die Kühlwasserpumpe (Pu_KüW) eine signifikante Rolle (siehe Messobjekt 3; Anteil Kühlwasserpumpe 22 % bzw. 28 %). In der Abbildung wird beim Messobjekt 3 noch in den Betriebsfall a und b unterschieden. Im Messobjekt 3 sind 2 Kältemaschinen kühlwasserseitig in Serie geschalten, Betriebsfall a beschreibt den Betrieb beider Kältemaschinen, Betriebsfall b beschreibt den Betrieb einer Kältemaschine.

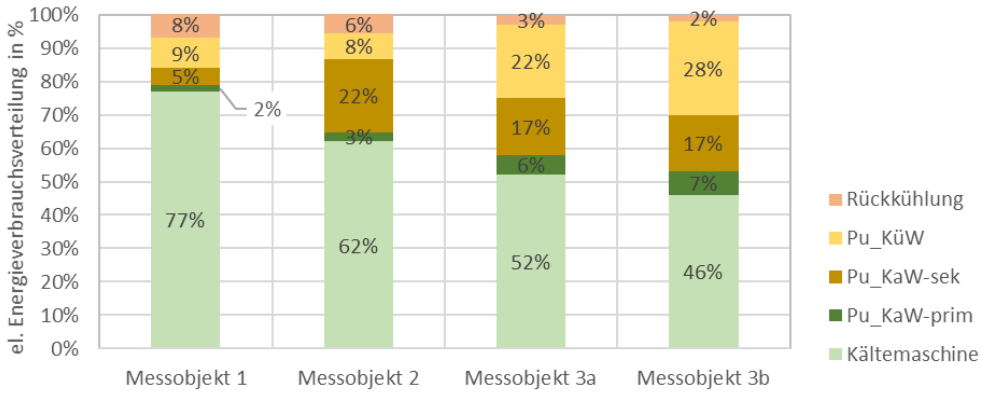

Abbildung 2: Vergleich der Verteilung des elektrischen Energieverbrauchs der untersuchten Anlagen

Die Ergebnisse der Messungen und Auswertungen des Messobjektes 3 werden im vorliegenden Beitrag genauer vorgestellt und diskutiert.

4 Anlagenbeschreibung Messobjekt 3 („HadW“)

4.1 Eckdaten des Gebäudes

Das Gebäude befindet sich im 3. Wiener Gemeindebezirk. Das Objekt wurde 1965 als neue Hauptanstalt einer Bank errichtet und beherbergt heute nach seiner 2012 abgeschlossenen Generalsanierung u.a. die Büros eines Verlags sowie weiterer namhafter Mieter. Das mit LEED-Platinum und einem EU Green Building Zertifikat ausgezeichnete Gebäude verfügt über rund 14 300 m² Bürofläche, die sich auf acht Stockwerke verteilen.

4.2 Technische Daten: Beschreibung der Hauptkälteanlage

Die kältetechnische Versorgung des Objekts erfolgt über zwei wassergekühlte Kältemaschinen. Wesentliche technischen Daten (gemäß Datenblätter) der Hauptkomponenten sind nachstehend aufgelistet. Die Kältemaschinen sind in der Technikzentrale im 3.UG situiert. Die Kältemaschinen versorgen jeweils eine eigene Temperaturschiene (6/12 °C und 12/18 °C) mit je einem eigenen Pufferspeicher (siehe Abbildung 3: Schema der Kälteanlage).

<u>Kältemaschine 1 (KM1)</u>

Auslegungsdaten:

- Leistung (thermisch) KM1: 407 kW
- Leistungsaufnahme (elektrisch) / EER: 107 kW / 3,79
- Kaltwasser: 6/12 °C
- Kühlwasser: 36,7/41,8 °C
- Schraubenkompressoren mit je 3 Stufen
- Kaltwasser-Pumpe primär: 56 m³/h (fixe Drehzahl)

Versorgungsbereich:

- Kaltwasser-Pumpe sekundär: 56m³/h (differenzdruckgeregelt)
- Kühlregister der Lüftungsanlagen (nur im Sommer in Betrieb)

<u>Kältemaschine 2 (KM2)</u>

Auslegungsdaten:

- Leistung (thermisch) KM2: 660 kW
- Leistungsaufnahme (elektrisch) / EER: 120 kW / 5,49
- Kaltwasser: 12/18 °C
- Kühlwasser: 29/36,7 °C
- Schraubenkompressoren mit je 3 Stufen
- Kaltwasser-Pumpe primär: 94 m³/h (fixe Drehzahl))

Versorgungsbereich:

- Kaltwasser-Pumpe sekundär: 94 m³/h (differenzdruckgeregelt)
- Kälteverteiler (Abgänge Kühldecken, Server-/LAN-Räume)

Offener Kühlturm (KT)

Durch den Einsatz eines frequenzgesteuerten Ventilators wird das Kühlwasser (Serienschaltung der beiden Kondensatoren) durch Verdunstung und Wärmeabgabe an die Umgebung lt. Schema von +42°C auf +29°C abgekühlt. Das rückgekühlte Kühlwasser tritt durch einen Bodenablauf im Kühlturm aus und wird über einen Zwischenbehälter wieder den Kältemaschinen zugeführt.

- 2 Kühlwasser-Pumpen: gesamt 86 m³/h, beschränkt auf 71 m³/h (differenzdruckgeregelt) da der Kühlturm keine größere Wassermenge erlaubt
- Nominalleistung: 1.240 kW bei 44/29 °C und 23°C Feuchtkugel-Temperatur Außenluft

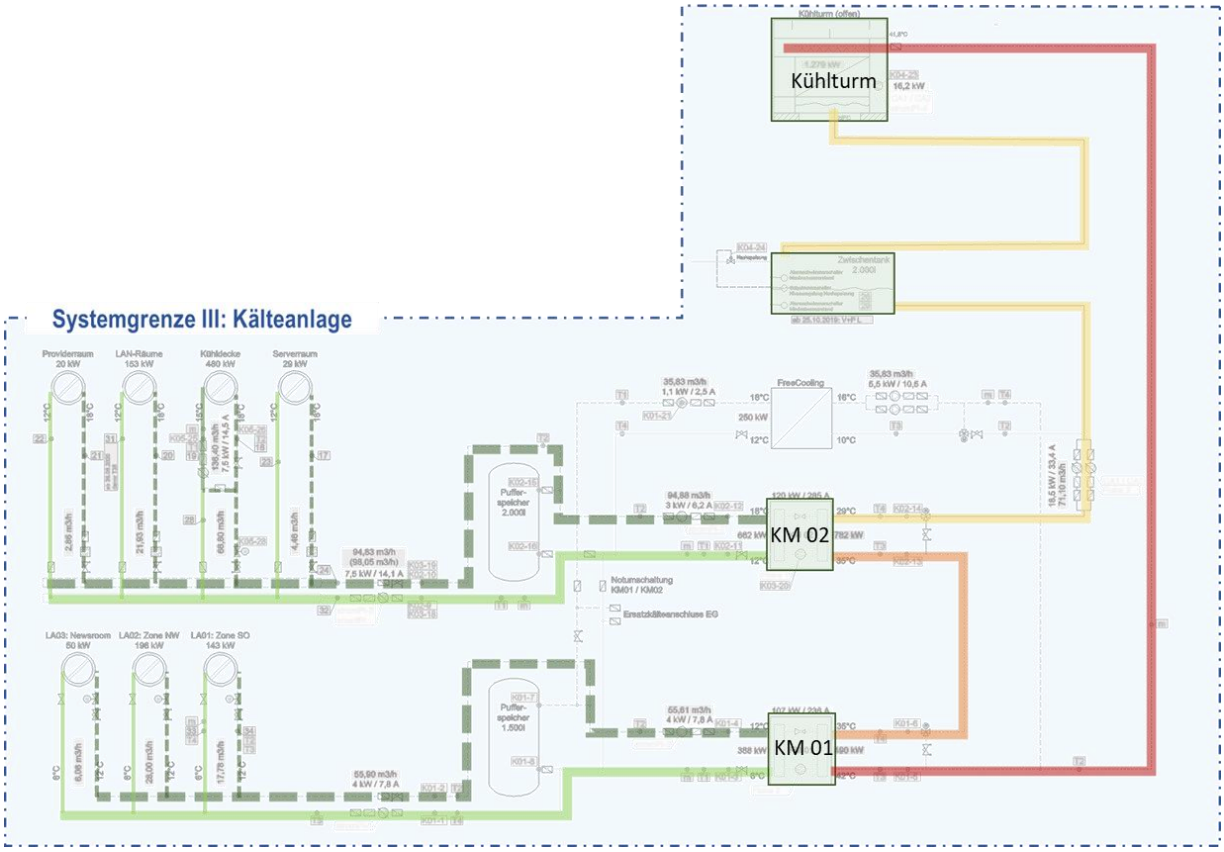

Abbildung 3: Schema der Kälteanlage Messobjekt 3 („HadW“)

5 Detailergebnisse Messobjekt 3 („HadW“)

5.1 Monatlicher und jährlicher Energieverbrauch

In wird der monatliche Energieverbrauch der einzelnen Komponenten dargestellt; in Abbildung 5 die jeweilige Jahressumme.

Es zeigt sich, dass neben den Kältemaschinen die Hydraulik des Gesamtsystems mit den Pumpen für Kalt- und Kühlwasser einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch (und damit auf die Jahresarbeitszahl) haben. Der Verbrauch der Rückkühlung (offene Kühltürme) hat im untersuchten System einen geringen Anteil am Gesamtverbrauch.

Die Kältemaschine 1 versorgt als Abnehmer nur Kühlregister von Lüftungsanlagen. Daher ist hier nur in den Sommermonaten Kältebedarf gegeben. Kältemaschine 2 versorgt neben den Serverräumen auch die Kühldecken des Gebäudes, weshalb auch hier ein jahreszeitlicher Verlauf ersichtlich ist.

Auffällig ist, dass der Anteil Pumpenstrom der Kühlwasserpumpe im Vergleich zum Kühlturm sehr hoch ausfällt. Dies ist auf die offene Funktionsweise des Kühlturms zurückzuführen und weicht bei anderen Rückkühlsystemen ab (siehe auch Abbildung 2).

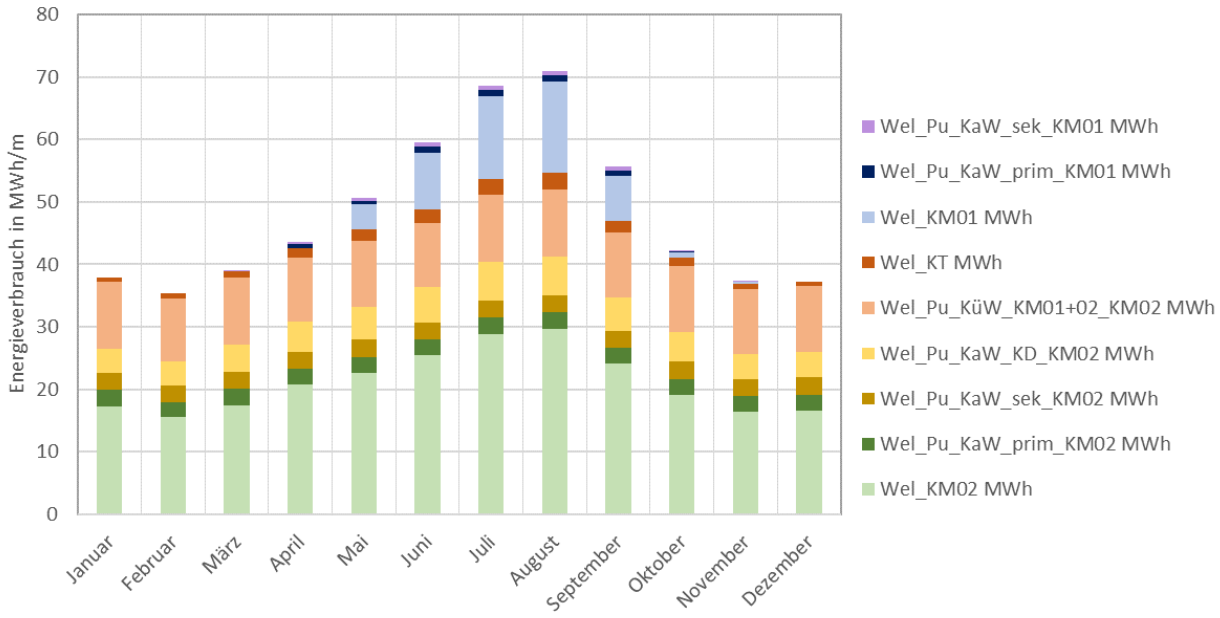

Abbildung 4: monatlicher Energieverbrauch (elektrisch) der Kälteanlage (2020)

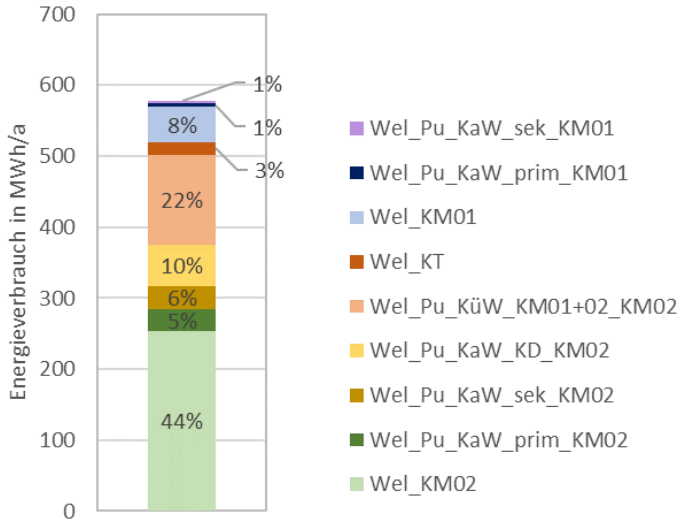

Abbildung 5: jährlicher Energieverbrauch (elektrisch) der Kälteanlage (2020)

Im untersuchten Objekt gibt es für die Abrechnung der Verbräuche eine monatliche Erfassung von wesentlichen Verbrauchsdaten der Kälteanlage (Verbrauch elektrische Energie der Kältemaschinen sowie der Kühltürme). Damit konnten die im Zuge der Messung erfassten Daten überprüft werden. Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen Werten und den abgelesenen Daten der Betriebsführung am Beispiel der Kältemaschine 2.

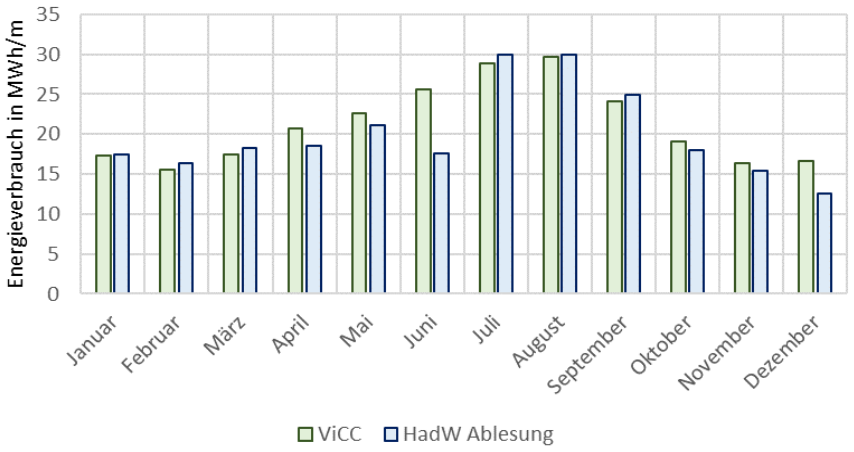

Abbildung 6: Energieverbrauch (elektrisch) Messung vs. Ablesung Kältemaschine 2 (2020)

5.2 Monatliche Kälteerzeugung

Die monatlichen Energieverbräuche der Abnehmer über den Messzeitraum zeigen einen typischen Verlauf eines Bürogebäudes mit einem relevanten IT-Anteil. Als Bandlast sind die Serverräume und als variable Last die Kühldecken sowie die Kühlregister der Lüftungsanlagen erkennbar.

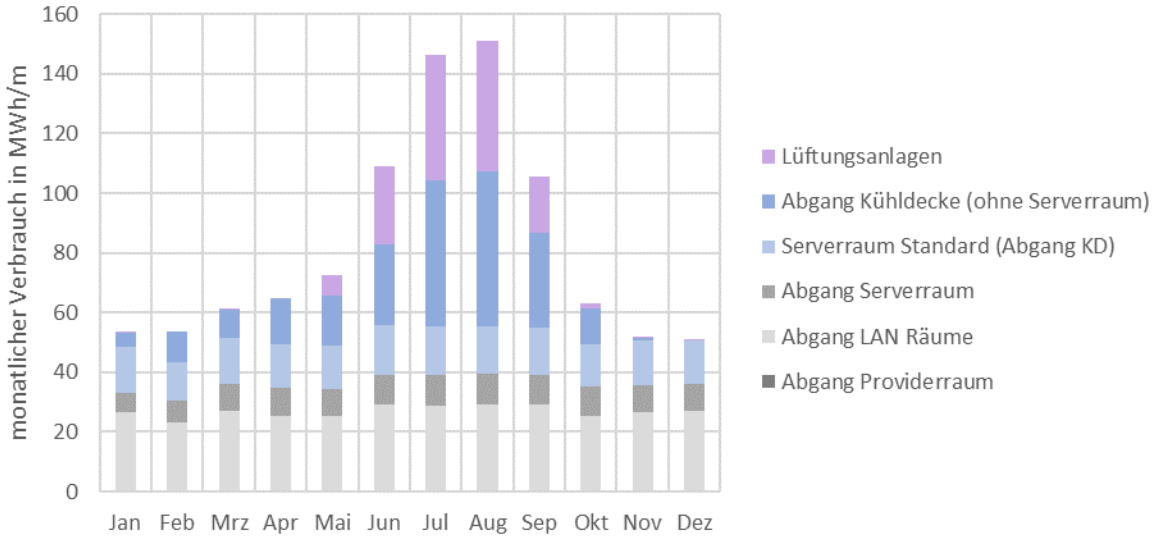

Abbildung 7: Kälteerzeugung/monatlicher Energieverbrauch der Abnehmer (2020)

5.3 Monats- und Jahresarbeitszahlen

Arbeitszahlen (erzeugte Kälteenergie bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie) sind für die Bewertung von Kälteanlagen (Gesamtsysteme) aussagekräftiger als die alleinige Betrachtung von Leistungszahlen (EER) der Kältemaschine.

Abbildung 8 zeigt die monatlichen Arbeitszahlen sowie die Jahresarbeitszahl der vermessenen Anlage. Es zeigt sich, dass sich die Arbeitszahl bei Betrachtung der gesamten Kälteerzeugung (Systemgrenze III gem. Abbildung **1**) im Vergleich zur Einzelbetrachtung der Kältemaschinen (Systemgrenze I gem. Abbildung 1: Komponenten und Systemgrenzen einer Kompressions-Kälteanlage – schematische Veranschaulichung der Komplexität und Einflussfaktoren auf einen energieeffizienten Betrieb (rote Blitze zeigen Verbraucher von elektrischer Energie; rot-blaue Pfeile zeigen zu- und abströmenden Energieflüsse). im Schnitt nahezu halbiert. Die Arbeitszahl des

Gesamtsystems ist in der betrachteten Anlage in den Sommermonaten höher, da der Anteil des nahezu konstanten Verbrauchs der Pumpen für die Kühlwasserseite am Gesamtverbrauch entsprechend geringer ist.

Dass die Arbeitszahl der Kältemaschine 02 in den Wintermonaten schlechter ausfällt als in den Sommermonaten weist auf ein schlechtes Teillastverhalten hin. Hier kann die Arbeitszahl einen Hinweis darauf geben, das Betriebsverhalten genauer zu analysieren.

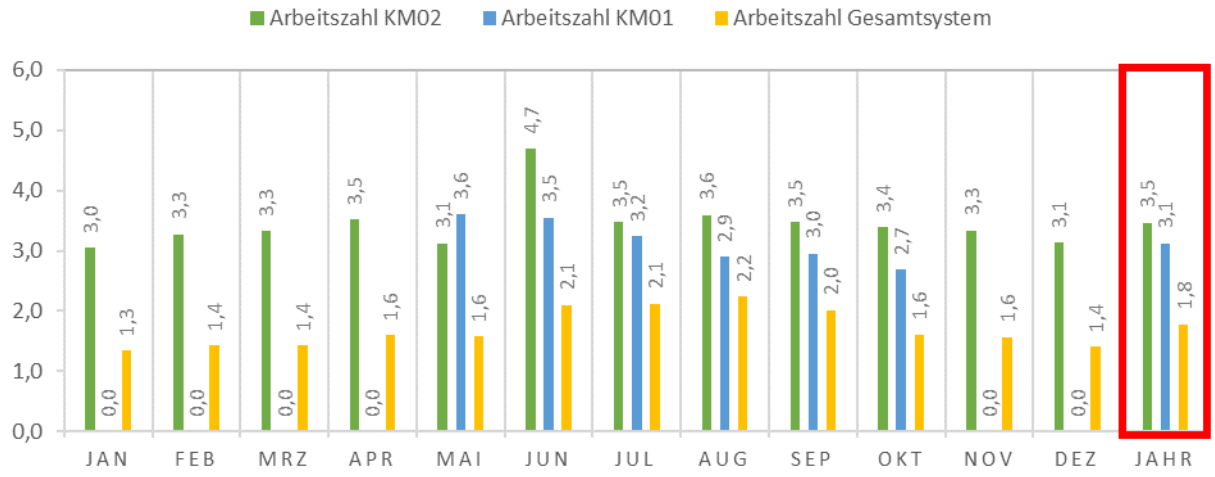

Abbildung 8: monatliche Arbeitszahlen (2020)

Aufgrund von fehlenden Benchmarks ist eine Bewertung der Jahresarbeitszahlen schwierig. Vergleicht man die ermittelten Jahresarbeitszahlen für die Kältemaschinen mit den publizierten Werten für den EER gemäß [3] so liegen diese unterhalb des Durchschnitts der in diesem Messprogramm untersuchten Anlagen. Genauere Randbedingungen dazu sind jedoch nicht bekannt bzw. nicht publiziert.

5.4 Zusammenfassung der detaillierten Auswertungen

Betrachtet man nur die Gesamtergebnisse ergeben sich Jahresarbeitszahlen, welche auf eine „übliche“ Kälteanlage hinweisen würden. Allerdings muss auch festgehalten werden, dass die Datenlage in Bezug auf Jahresarbeitszahlen sehr dürftig ist. Erst die Kenntnis der Verbräuche der einzelnen Hauptkomponenten zeigt, dass Optimierungspotenzial vorliegt (siehe Kapitel 7).

Tatsache ist, dass eine detaillierte Messdatenerfassung über ein gesamtes Jahr zur Ermittlung der Jahresarbeitszahl ist mit einem großen Aufwand verbunden ist. Es wird daher nachfolgend untersucht, inwieweit Jahresarbeitszahlen auf Basis von kurzen Messperioden aussagekräftig sind.

6 Optimierung Messaufwand

Im Zuge des Projektes wurden die wesentlichen Verbräuche der einzelnen Komponenten getrennt erfasst und auch in Abhängigkeit der Außentemperatur ausgewertet. Es sind daher auch Auswertungen für jede Stunde des Jahres möglich.

6.1 Ermittlung Jahresverbrauch auf Basis von Messwerten von kurzen Messzeiträumen

Angesichts dessen, dass eine Messwerterfassung über einen längeren Zeitraum (ein gesamtes Jahr) - wie erwähnt - sehr aufwendig ist, soll nun untersucht werden, welche Abweichungen sich zum tatsächlichen Jahresverbrauch ergeben, wenn die Messwerte (Stundenmittelwerte für den Verbrauch der Hauptkomponenten wie Kältemaschine, Kühlturm und Pumpen sowie für die erzeugte Kältemenge) über einen Zeitraum von 1 Kalenderwoche im Sommer (KW 29/2020) und im Winter (KW 03/2020) erfasst, jeweils eine lineare Regressionsgerade ermittelt und über den Temperaturverlauf der Außentemperatur auf den Jahresverbrauch und auf die erzeugte Kältemenge hochgerechnet werden.

In Abbildung 9 bis Abbildung 12 werden beispielhaft die Messdaten der elektrischen Leistungsaufnahme der Kältemaschinen 01 und 02, des Kühlturms sowie die produzierte Kälteleistung (entzogene Wärme) der Kältemaschine 02 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für 2 ausgewählte Kalenderwochen dargestellt. Während im Sommer der Verbrauch mit der Außenlufttemperatur linear zunimmt, ist der Verbrauch in der Woche im Winter nahezu unabhängig von der Außenlufttemperatur, da der Kältebedarf im Winter durch die inneren Lasten hervorgerufen wird. Die Kältemaschine 01 ist nur im Sommer für die Kühlregister der Lüftungsgeräte in Betrieb.

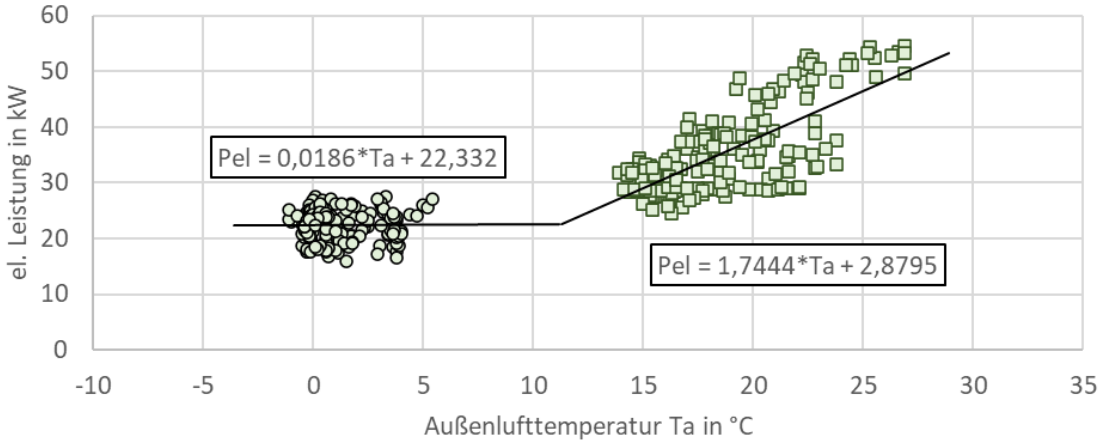

Abbildung 9: Auswertung elektr. Leistungsaufnahme Kältemaschine 02 in KW 29/2020 und KW 03/2020

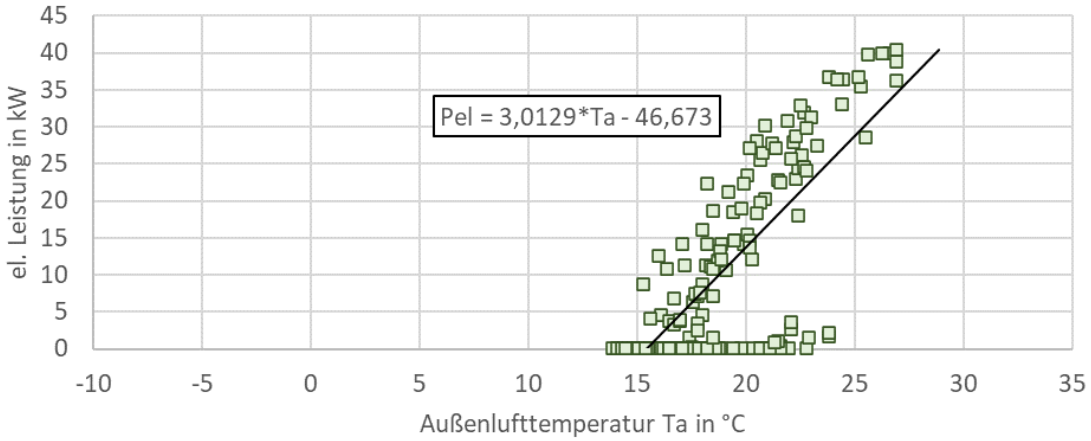

Abbildung 10: Auswertung elektr. Leistungsaufnahme Kältemaschine 01 in KW 29/2020

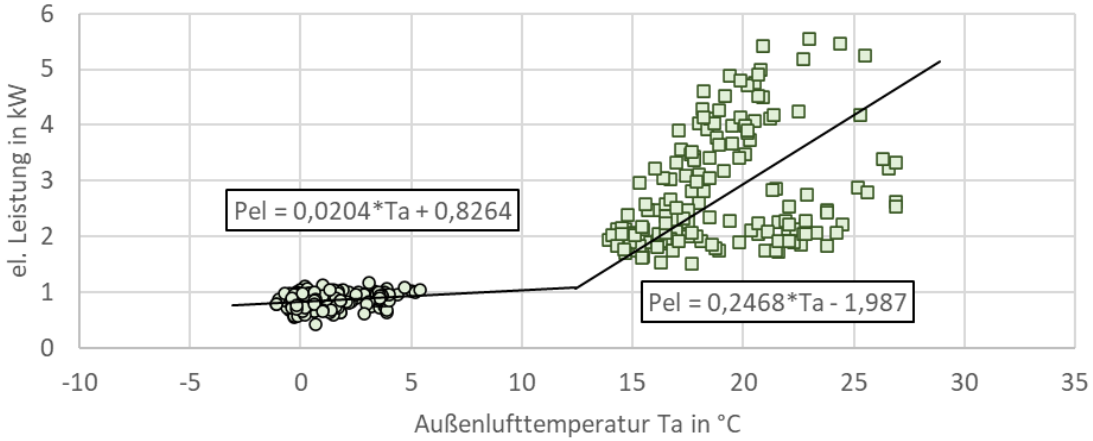

Abbildung 11: Auswertung elektr. Leistungsaufnahme Kühlturm in KW 29/2020 und KW 03/2020

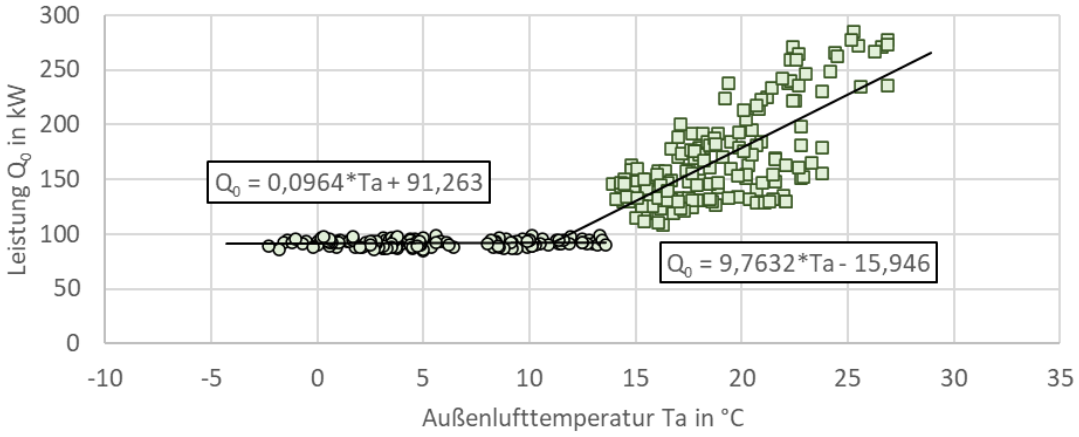

Abbildung 12: Auswertung Kälteleistung Kältemaschine 02 in KW 29/2020 und KW 03/2020

Sowohl die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} für die Hauptkomponenten der Kälteanlage als auch die Kälteleistung der Kältemaschine $\dot{Q}_0$ gemäß den Abbildungen 9 bis 12 korrelieren gut mit der Außentemperatur. Die Berechnung bzw. die Hochrechnung des gesamten Aufwandes (elektrische Energie) und der entzogenen Wärme erfolgt über die Außentemperatur und den ermittelten Regressionsgeraden. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Hochrechnung auf die Jahresverbräuche auf Basis der Messung von 2 Kalenderwochen und die über die Ablesung der Zähleinrichtungen erfassten Jahresverbräuche sowie die Abweichung (Hochrechnung / Ablesung) dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich Vor-Ort-Ablesung und Hochrechnung von elektr. Verbrauch und Wärme-/Kältemenge; Ablesungen für die einzelnen Pumpen sind nicht vorhanden (n. v.)

		Ablesung	Hochrechnung	Abweichung
		MWh/a	MWh/a	%
Aufwand (Verbrauch elektr. Energie)	KM01	44,8	53,3	19%
	KM02	240,0	253,1	5%
	Kühlturm	17,8	17,2	-3%
	Pu_KaW_KM02_prim	n. v.	30,7	-
	Pu_KaW_KM02_sek	n. v.	32,5	-
	Pu_KaW_KM02_KD	n. v.	58,3	-
	Pu_KaW_KM01_prim	n. v.	5,4	-
	Pu_KaW_KM01_sek	n. v.	3,8	-
	Pu_KüW	n. v.	126,5	-
	Nebenaggregate Kältezentrale (Pumpen ges.)	244,0	257,3	5%
Nutzen (entzogene Wärmemenge)	KM01	140,6	241,7	72%
	KM02	831,1	1 050,1	26%

Gemäß der oben angeführten Ergebnistabelle zeigt sich, dass der Verbrauch an elektrischer Energie für die Komponenten/Systeme der Gesamtanlage mit der beschriebenen Methode im untersuchten Projekt gut ermittelt werden kann. Die Abweichung der Hochrechnung auf Basis von zwei Kalenderwochen im Vergleich zu den Ablesungen eines Jahres beträgt zwischen -3 und 19 %. Die Aufteilung der Verbräuche an elektrischer Energie im untersuchten Projekt auf Basis von Messwerten von zwei Kalenderwochen konnten für die gegenständliche Anlage gut prognostiziert werden.

Bei der Ermittlung der erzeugten Kaltwasser-Menge auf der Basis von Messungen in zwei Kalenderwochen ergeben sich deutliche Unterschiede zum abgelesenen Gesamtverbrauch eines Jahres. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei Ermittlung von Wärmemengen aufgrund der teilweise geringen Temperaturdifferenzen zwischen

Vorlauf und Rücklauf (in bestimmten Zeiträumen nur ca. 2 K) entsprechend hohe Ungenauigkeiten bei der Messung entstehen.

Die Verteilung der Verbräuche an elektrischer Energie der einzelnen Komponenten kann auch aus den hochgerechneten Daten gut erkannt werden und als Basis für eine Grobanalyse für Optimierungspotentiale herangezogen werden. Ein Rückschluss auf die Jahresarbeitszahl kann mit der Hochrechnung des Kälteverbrauchs nur mit Einschränkungen erfolgen. Für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl können grundsätzlich auch die (oftmals) vorhandenen Zähleinrichtungen für die Kälteverbräuche herangezogen werden.

7 Optimierungspotenziale

In einer Grobanalyse soll nun untersucht werden welche Erkenntnisse sich „auf den ersten Blick“ aus der Jahresarbeitszahl bzw. aus der Zusammensetzung des Verbrauchs der einzelnen Subsysteme auf den Gesamtverbrauch ableiten lassen und welche weiteren Fragen sich ergeben.

- Betriebspunkt Pumpe Kühlwasser

  Die eingesetzte Pumpe wird in einem sehr ungünstigen Betriebspunkt betrieben. Darüber hinaus besteht hinsichtlich des Wirkungsgrades der Pumpe deutliches Optimierungspotenzial.

- Einsatz von Pumpen mit konstanten Volumenstrom

  Die Pumpen werden mit konstanten Volumenstrom betrieben. Dies ist für Kühlwasserpumpen bei Kälteanlagen eine übliche Betriebsart. Die Detailanalysen zeigen, dass dieser Umstand ein erhebliches Optimierungspotenzial aufweist.

- Verbesserung des Teillastverhaltens der Kältemaschine 02 in den Wintermonaten

  Die Leistung der Kältemaschine 02 ist für den Bedarf in den Wintermonaten zu hoch. Das Sperren eines Kältemittelkreises könnten das Verhalten verbessern. Alternativ kann ein Einsatz der kleineren Kältemaschine 01 für die Verbraucher der Kältemaschine 02 im Winter geprüft werden.

8 Zusammenfassung / Ausblick

Die Ermittlung der Jahresarbeitszahl über Messungen ist für die Kenntnis des Verbrauchs von Kälteanlagen essenziell. Wesentlich ist dabei die Kenntnis des Verbrauchs der einzelnen Hauptkomponenten. Dadurch ergibt sich eine klarere Sicht auf die Effizienz von gesamten Anlagen.

Auch bei an sich unauffälligen Jahresarbeitszahlen, d. h. die Jahresarbeitszahlen liegt in einem „üblichen“ Bereich, kann aufgrund der Kenntnis des Verbrauchs der einzelnen Komponenten in einer Grobanalyse bereits erhebliche Optimierungspotenziale erkannt werden.

Es zeigt sich allerdings, dass die detaillierte Erfassung der Jahresarbeitszahl bzw. des Verbrauchs von einzelnen Komponenten mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Messung von frei gewählten Zeitfenstern (je eine Woche Sommer- und Winterbetrieb) und eine Hochrechnung über die Außentemperatur Ergebnisse erzielt werden können, welche die wesentlichen Optimierungspotenziale erkennbar machen. Im vermessenen Objekt ergibt eine Hochrechnung auf der Basis von 2 Kalenderwochen gute Ergebnisse

Diese Methode (Messung von ausgewählten Zeiträumen und Hochrechnung auf den elektrischen Jahresverbrauch) wäre nun bei weiteren Anlagen zu verifizieren.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

[1] Wolf, M., et al.: *Praxiserfahrungen bei der Performance-Bewertung von Kompressionskälteanlagen.* KI Kälte Luft Klimatechnik 05-2021, 42-49, https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2021/05/KI_2021_05_Wissenschaft_Wolf_6Seiten.pdf (Zugriff am 21.08.2022)

[2] Wellig B., Kegel B., Meier M.: *Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch die Ausnützung eines kleinen Temperaturhubes*. Bundesamt für Energie, 2006

[3] Steinbeis-Innovationszentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik (Projektkoordinator): *KaP* - Kälteanlagen in der Praxis. Homepage: Kältesystemcheck.de, http://xn--kltesystemcheck-0kb.de/kontakt/ (Zugriff am 21.08.2022)

[4] ÖNORM H 5058:2011-03-01: *Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Kühltechnik-Energiebedarf*. Wien, (2011)

[5] Köberle, T. und Becker, M.: Übersicht zu Energieeffizienzkenngrößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik. GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, vol. 134, no. 01, pp. 54-64, 2013

[6] Meyer, F., Gerlach, O.; Kratzert, C.; Lübke, H.: *Untersuchungen zu einem Online-Verfahren für die kontinuierliche Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von gewerblichen Kälteanlagen (EnEff_Cool).* Cool Expert Entwicklungs GmbH Besenacker 14 35109 Allendorf/Eder, (2012), Endbericht unter: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27352.pdf (Zugriff am 21.08.2021)

9.2 Nomenklatur

Formelzeichen

W	Arbeit, Aufwand (kWh)
Q	Energie, Nutzen (kWh)
P	Leistung (kW)
$\dot{Q}$	Wärmestrom (W)
T	Temperatur (K)

Indizes

el	elektrisch
0	Verdampfer
sek	sekundär
prim	primär
Nutz	Nutzenergie

Abkürzungen

(E)SEER	European seasonal EER
EER	Energy efficiency ratio
GA	Gebäudeautomation
HadW	Name Messobjekt (intern)
JAZ	Jahresarbeitszahl
KaW	(Klima-)Kaltwasser
KD	Kühldecke
KM	Kältemaschine
KT	Kühlturm
KüW	Kühlwasser
Pu	Pumpe, Umwälzpumpe
Ta	Außentemperatur
ViCC	Forschungsprojekt (Virtual Cooling Control)