



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Energieforschung

**Schlussbericht 27.01.2020**

---

## **EXERATE**

Proof of Concept:  
Exergie-Ansatz zur Beurteilung der  
Energieeffizienz von Klimakälteanlagen

---

**Datum:** 27. Januar 2020

**Ort:** Winterthur

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Wärmepumpe und Kälte  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmerin:**

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW  
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering IEFE  
Technikumstrasse 9  
8408 Winterthur  
[www.iefe.zhaw.ch](http://www.iefe.zhaw.ch)

**Autoren:**

Lorenz Brenner, ZHAW / IEFE, [lorenz.brenner1@zhaw.ch](mailto:lorenz.brenner1@zhaw.ch)  
Silvan Steiger, ZHAW / IEFE, [silvan.steiger@zhaw.ch](mailto:silvan.steiger@zhaw.ch)  
Besetar Shehu, ZHAW / IEFE, [besetar.shehu@zhaw.ch](mailto:besetar.shehu@zhaw.ch)  
Martin Schneider, ZHAW / IEFE, [m.schneider@zhaw.ch](mailto:m.schneider@zhaw.ch)  
Frank Tillenkamp, ZHAW / IEFE, [frank.tillenkamp@zhaw.ch](mailto:frank.tillenkamp@zhaw.ch)

**BFE-Bereichs- / Programmleitung:** Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)  
Stephan Renz, [info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)

**BFE-Projektbegleitung:** Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)  
Stephan Renz, [info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501748-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## **Vorwort**

Der Dank für die wertvolle Unterstützung während der Bearbeitung des vorliegenden Projektes geht an alle teilnehmenden Personen und Unternehmen, welche sich Zeit für ein Gespräch genommen und Informationen zur Verfügung gestellt haben, sowie dem Bundesamt für Energie für die Finanzierung des Projektes.

## Zusammenfassung

Anhand des Proof of Concept konnte das bestehende exergiebasierte Effizienzbeurteilungssystem für Klimakälteanlagen weiterentwickelt und dessen Funktionalität aufgezeigt werden. Der eingeführte Optimierungspotentialindex OPI zeigt auf einen Blick die Performance und das einhergehende Optimierungspotential einzelner Teilsysteme auf. Anhand technischer Informationen zu bestehenden Anlagen konnte deren Instrumentierung bewertet sowie die Nachrüstkosten für den Einsatz des Beurteilungssystems eruiert werden. Die Auswertung zeigte, dass sich eine Nachrüstung durchaus lohnen kann, wenn bereits Grundmessmittel vorhanden sind. Durch Anwendung von EXERATE an der Best-Case Anlage bezüglich Instrumentierung und Datenerfassung konnte die Performance im Kältemaschinen- sowie Freecoolingbetrieb beurteilt werden.

## Résumé

Sur la base du Proof of Concept, le système existant d'évaluation exergetic de l'efficacité des systèmes de réfrigération dans la domain de climatisation a pu être optimisé et sa fonctionnalité démontrée. L'indicateur du potentiel d'optimisation OPI introduit montre la performance et le potentiel d'optimisation associé des différents sous-systèmes en un coup d'oeil. Avec d'informations techniques concernant les installations existantes, leur instrumentation a pu être évaluée et les coûts de modernisation pour l'application du système d'évaluation ont été déterminés. L'évaluation a montré qu'il vaut la peine de procéder à un rééquipement s'il existe déjà un équipement de mesure de base. En utilisant EXERATE sur le meilleur système en termes d'instrumentation et des données disponible, la performance en deux modes d'opération, machine de réfrigération et free cooling, a pu être évalué.

## Abstract

With the Proof of Concept, the existing exergy-based efficiency assessment system for HVAC chillers was enhanced and its functionality demonstrated. The introduced optimization potential index OPI shows the performance and the associated optimization potential of individual subsystems at a glance. On the basis of technical information from existing plants, their instrumentation was evaluated and the upgrade costs for the use of the evaluation system determined. The evaluation showed that retrofitting can be worthwhile if basic measuring equipment is already available. By applying EXERATE to the best-case system with regard to instrumentation and data availability, the performance in refrigeration machine and free cooling operation was assessed.



## Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
EER	Energy Efficiency Ratio
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
JAZ	Jahresarbeitszahl
OPI	Optimierungspotentialindex
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$E$	Exergie	J
$f_{el,th}$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor (ETV)	-
$K$	Kosten	CHF
$\bar{K}$	Mittelwert der Kosten	CHF
$n$	Anzahl	-
$P$	elektrische Leistung	W
$Q$	thermische Energie	J
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$s$	Standardabweichung	CHF
$T$	Temperatur	K
$\zeta$	exergetische Kennzahl	-
$\eta$	Wirkungsgrad	-

Index	Beschreibung
0	Verdampfung
$A$	Aufwand
$C$	Verflüssigung
$D$	Verteilung (Distribution)
$DE$	Datenerfassung
$el$	elektrisch
$ex$	exergetisch
$EZ$	Elektrozähler
$FC$	Freecooling
$HW$	Hardware
$i$	Laufvariable allgemein
$Inst$	Installation
$j$	Laufvariable allgemein
$k$	Laufvariable allgemein

**Index**    **Beschreibung**

---

<i>KM</i>	Kältemaschine
<i>KS</i>	Kühlstelle
<i>KST</i>	Kältespeicherung & -transport
<i>N</i>	Nutzen
<i>opt</i>	optimal
<i>R</i>	Referenz
<i>RK</i>	Rückkühlung
<i>RKV</i>	Rückkühlventilator
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>Sp</i>	Speicherung
<i>Sys</i>	System
<i>TF</i>	Tauchfühler
<i>th</i>	thermisch
<i>U</i>	Umgebung
<i>UWP</i>	Umwälzpumpe
<i>V</i>	Verlust
<i>VD</i>	Verdichter
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>WA</i>	Wärmeauskopplung
<i>WZ</i>	Wärmezähler
<i>zul</i>	zulässig
*	Referenzwert gemäss Norm

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ausgangslage</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Ziele der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Randbedingungen</b>	<b>12</b>
3.1	Akquisition . . . . .	12
3.1.1	Auswahlkriterien . . . . .	12
3.1.2	Kontaktliste . . . . .	13
3.2	Messkonzept und Nachrüstaufwand . . . . .	13
3.2.1	Messkonzept . . . . .	13
3.2.2	Nachrüstaufwand . . . . .	13
3.3	Proof of Concept . . . . .	14
3.3.1	Optimierungspotentialindex (OPI) . . . . .	14
3.3.2	Unterscheidung Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb . . . . .	15
3.3.3	Limitierungsfunktion für die thermische Exergie . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Vorgehen und Methode</b>	<b>22</b>
4.1	Akquisition . . . . .	22
4.1.1	Kontaktaufnahme mit Unternehmen aus der Branche . . . . .	22
4.1.2	Bearbeitung von Anlagendokumenten und Anlagenbesichtigungen . . . . .	22
4.2	Messkonzept und Nachrüstaufwand . . . . .	22
4.2.1	Analyse bestehender Messkonzepte . . . . .	22
4.2.2	Vorgaben & Annahmen für die Bestimmung des Nachrüstaufwandes . . . . .	23
4.2.3	Offertanfragen an Messmittelhersteller . . . . .	24
4.2.4	Kostenfunktionen für die Bestimmung des Nachrüstaufwandes . . . . .	26
4.3	Proof of Concept . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>28</b>
5.1	Akquisition . . . . .	28
5.1.1	Kontaktaufnahme mit Unternehmen aus der Branche . . . . .	28
5.1.2	Eckdaten der erhaltenen Kälteanlagen . . . . .	28
5.2	Messkonzept und Nachrüstaufwand . . . . .	29
5.2.1	Analyse bestehender Messkonzepte . . . . .	29
5.2.2	Offertanfragen Messmittelhersteller . . . . .	31
5.2.3	Nachrüstaufwand einzelner Komponenten und Kostenfunktionen . . . . .	31
5.2.4	Nachrüstaufwand der Anlagen . . . . .	35
5.2.5	Best- und Worst-Case nach Instrumentierung . . . . .	37
5.2.6	Best- und Worst-Case nach Nachrüstaufwand . . . . .	38



5.3	Proof of Concept . . . . .	38
5.3.1	Kältemaschinenbetrieb . . . . .	39
5.3.2	Freecoolingbetrieb . . . . .	44
5.3.3	Vergleich Kältemaschinen- / Freecoolingbetrieb . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick und weiteres Vorgehen</b>	<b>53</b>
	<b>Referenzen</b>	<b>54</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>55</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>58</b>
A.1	Flussdiagramme des Vorgehens zur Erarbeitung des Beurteilungssystems . . . . .	58
A.2	Kennzahlenkatalog . . . . .	60
A.3	Leitfaden . . . . .	77
A.4	Infoblatt . . . . .	80
A.5	Checkliste . . . . .	82



# 1 Ausgangslage

Um dem steigenden Energieverbrauch von vermehrt eingesetzten Klimakälteanlagen entgegenzuwirken, entstand die Idee ein exergiebasiertes Beurteilungssystem zu entwickeln, um die Effizienz sowie das Optimierungspotential von Klimakälteanlagen zu ermitteln. Der gewählte Ansatz erlaubt die Verfolgung hochwertiger Energie im System und lässt Rückschlüsse über Ort und Grössenordnung der Energieentwertung zu, woraus mögliche Massnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet werden können. Ein allgemeines Vorgehen wurde definiert (siehe Abb. A.2), mit dem Ziel, ein einheitliches und marktfähiges Tool zu entwickeln, welches den Vergleich von Klimakälteanlagen (Neuanlagen sowie bestehende Anlagen) mit dem heutigen Stand der Technik zulässt. Der Fokus liegt hierbei in der Einfachheit des Systems, wonach die Beurteilung vor allem auch von Laien vorgenommen werden soll, um nötige Systemoptimierungen durch entsprechendes Fachpersonal einzuleiten. In einer Untersuchung hinsichtlich der hydraulischen Einbindung von Klimakälteanlagen wurde ausserdem auf den Forschungsbedarf für eine konsistente Bewertung von Kältemaschinensystemen sowie die Bildung verlässlicher Beurteilungskriterien für Optimierungsmassnahmen hingewiesen [1].

Eine erste Version des Beurteilungssystems wurde im Rahmen einer BFE-Studie [2] erarbeitet und anschliessend in einem Folgeprojekt weiterentwickelt [3]. Der Fokus lag hierbei auf Klimakälteanlagen mit Kaltwassersätzen. Mit der Entwicklung einer Kennzahl, basierend auf dem exergetischen Wirkungsgrad sowie Angaben aus technischen Normen als Referenzwerte, konnten erstmals einzelne Teilsysteme einer Gesamtanlage unabhängig voneinander beurteilt werden, was neu gezielte Optimierungen ermöglicht. Nach dem heutigen Wissensstand sind jedoch nicht alle Referenzwerte anhand von Normen bestimmbar und müssen dementsprechend mittels repräsentativer Feldmessungen, Nutzung von thermodynamischen Beziehungen oder Modellbildung einzelner Teilsysteme bestimmt werden. Zudem setzt eine Exergieanalyse im benötigten Detailgrad eine erweiterte Instrumentierung verglichen zu Energieanalysen voraus. Es ist bislang nicht vollends geklärt, wie und vor allem in welchem Umfang typische Klimakälteanlagen instrumentiert sind und wie gross der Nachrüstaufwand für eine breite Anwendung des Beurteilungssystems ausfallen würde. Dies ist der aktuelle Stand der Forschung und somit die Grundlage für die vorliegende Untersuchung.

## 2 Ziele der Arbeit

Gemäss dem Forschungsbedarf liegen die Ziele dieses Projektes in der Weiterentwicklung sowie im Proof of Concept des bestehenden Beurteilungssystems und lassen sich in folgende Teilziele zusammenfassen:

- Auswahlkriterien der zu untersuchenden realen Klimakälteanlagen mit Fokus auf Anlagen mit Kälteträgern sind geklärt und festgelegt.
- Liste von ausgewählten realen Klimakälteanlagen für die vor Ort Abklärung bzgl. Ist-Zustand der Instrumentierung und Datenspeicherung von 20 – 30 Anlagen ist erstellt.
- Aktueller Ist-Zustand der einzelnen Anlagen hinsichtlich Instrumentierung und Datenspeicherung ist aufgenommen (15 – 20 reale Anlagen) sowie Best- und Worst-Case Anlage nach Instrumentierung ist bestimmt.
- Grob- und Detailmesskonzept sind erstellt, darauf basierend eine konkrete Kostenabschätzung hinsichtlich Nachinstrumentierung der realen Anlagen vorgenommen (15 – 20 Anlagen) sowie je eine Best- und Worst-Case Anlage nach Nachrüstaufwand bestimmt.
- Anwendung des exergetischen Beurteilungssystems an einer realen Anlage ist durchgeführt (an Best-Case Anlage bezogen auf Ist-Zustand der Instrumentierung und vorhandenen Messdaten).

Durch die erhaltenen Resultate soll am Ende eine Aussage über die Eignung der betrachteten Klimakälteanlagen hinsichtlich der Exergieanalyse möglich sein. Weiter ist der Ist-Zustand der betrachteten Anlagen (Instrumentierung, vorhandene Messdaten sowie Kostenabschätzung für eine Nachinstrumentierung) bekannt. Auf dieser Basis soll abgeschätzt werden, ob sich das künftige Tool für die Beurteilung von bestehenden Anlagen oder ausschliesslich für Neuanlagen eignet. Zusätzlich kann eine Abschätzung für die nächsten Entwicklungsschritte des Beurteilungssystems vorgenommen werden. Durch den Proof of Concept, d.h. der Anwendung und Prüfung des Exergieansatzes auf Basis bestehender Messdaten der Best-Case Anlage (gemäss Instrumentierung und Datenerfassung), kann das Beurteilungssystem mit realen Messwerten überprüft, weiterentwickelt und allenfalls erste Referenzwerte von Teilsystemen gebildet werden. Ebenso soll die Performance und ein allfälliges Optimierungspotential der untersuchten Anlage bestimmt werden.



## 3 Grundlagen und Randbedingungen

Orientiert an den ausgewiesenen Projektzielen im Abschnitt 2 sind die Arbeiten des vorliegenden Forschungsprojektes in folgende drei Arbeitspakete unterteilt:

- **Akquisition:** Eignungsuntersuchung und Auswahl von 20 – 30 realen Klimakälteanlagen sowie vor Ort eine Überprüfung von 15 – 20 realen Anlagen bezüglich Instrumentierung und Datenerfassung / -speicherung für die weiteren Untersuchungen.
- **Messkonzept und Nachrüstaufwand:** Erarbeitung eines Grob- und Detailmesskonzeptes sowie einer konkreten Kostenabschätzung hinsichtlich Nachinstrumentierung der ausgewählten 15 – 20 realen Klimakälteanlagen. Bestimmung der Best- und Worst-Case Anlage gemäss Instrumentierung und Nachrüstaufwand.
- **Proof of Concept:** Anwendung des Exergieansatzes an einer realen Klimakälteanlage (Best-Case Anlage gemäss Instrumentierung und vorhandenen Messdaten).

### 3.1 Akquisition

#### 3.1.1 Auswahlkriterien

Mit Hilfe von Auswahlkriterien wird geklärt, ob sich eine Kälteanlage für die weiteren Untersuchungen eignet. Um eine zu starke Einschränkung in der Auswahl an Anlagen im Vorfeld zu vermeiden, werden lediglich folgende zwei Kriterien als zwingend definiert:

- Die Anlage wird hauptsächlich für Klimakälteanwendungen genutzt (d.h. Kälteanwendungen, welche für die Raumkonditionierung im Komfortbereich eingesetzt werden).
- Die Anlage wird als Kaltwassersatz, mit flüssigem Kälteüberträger betrieben (keine direkt verdampfenden Anlagen).

Zudem sind folgende Kriterien wünschenswert:

- Die Kälteleistung der Anlage ist grösser als 50 kW ( $Q_0 \geq 50 \text{ kW}$ )<sup>1</sup>.
- Die Anlage verfügt über alle im Beurteilungssystem definierten Grundkomponenten (Kältemaschine, Rückkühlung, Kältespeicherung & -transport, Kühlstellen) sowie Zusatzkomponenten (Wärmenutzung, Freecooling) [2, 3].

<sup>1</sup> Häufigkeit von Klimakälteanlagen gemäss Statistik [4]:

- 20 bis 50 kW (13 %)
- 50 bis 100 kW (39 %)
- 100 bis 300 kW (40 %)
- über 300 kW (8 %)

### **3.1.2 Kontaktliste**

Eine Kontaktliste von Firmen aus der Kältebranche, welche auf bestehenden Listen aus Vorarbeiten [1, 3] basiert, dient als Arbeitsgrundlage, um Informationen zu 15 – 20 bestehenden Klimakälteanlagen zu erhalten, welche sich für eine Auswertung (gem. Auswahlkriterien) eignen. Die Unternehmen wurden hierbei in folgende Untergruppen nach Fachgebieten unterteilt und sollten über entsprechende Anlagen verfügen:

- Planer
- Anlagenbetreiber
- Kältemaschinenimporteur / -lieferant
- Kältemaschinenhersteller

Die Synthese aus bestehenden Firmenlisten und der Integration von neuen Unternehmen gemäss Inputs von Experten aus der Branche sowie die Durchführung einer gezielten Marktrecherche vervollständigte die Kontaktliste, welche total 69 Ansprechpartner umfasst. Eine abschliessende Beurteilung zur Eignung einer Anlage kann erst nach konkretem Kontakt geklärt werden. Aus diesem Grund wurden bewusst mehr als 20 Firmen (Zielgrösse) in die Liste aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass sich Anlagen darunter befinden, welche die zwingenden Kriterien nicht erfüllen oder die Unternehmen eine Zusammenarbeit ablehnen.

## **3.2 Messkonzept und Nachrüstaufwand**

### **3.2.1 Messkonzept**

Als Arbeitsgrundlage für die Messkonzepte sowie zur effizienten Erstellung eines Tools für den Proof of Concept wurde ein Kennzahlenkatalog verfasst (siehe Anhang A.2). Dieser enthält sämtliche in den Vorprojekten [2, 3] definierten Kennzahlen und die dazugehörigen notwendigen Messstellen. Der Kennzahlenkatalog dient als Grobmesskonzept und stellt ein strukturiertes und einheitliches Vorgehen bei der Ausarbeitung der Detailmesskonzepte, basierend auf bestehenden Anlageninstrumentierungen, sicher. Mit dem Kennzahlenkatalog konnte zudem eine allgemeingültige Checkliste (siehe Anhang A.5) abgeleitet werden, um die Messausrüstung jeder Anlage zu bewerten.

### **3.2.2 Nachrüstaufwand**

Als Grundlage für die Bestimmung des Nachrüstaufwandes dienen einerseits Erkenntnisse aus dem Vorprojekt [2] sowie der aktive Kontakt mit Planern und Messmittelherstellern.

### 3.3 Proof of Concept

Im vorliegenden Abschnitt werden die Grundlagen der Weiterentwicklungen des bestehenden exergetischen Beurteilungssystems für den Proof of Concept beschrieben. Für Details zum bisherigen Vorgehen und zu den thermodynamischen Grundlagen, welche folgend nicht erwähnt werden, sei auf die Vorarbeiten [2, 3], die detaillierte Beschreibung der Methodik im Kältemaschinenbetrieb [5] sowie Fachliteratur [6, 7] verwiesen.

#### 3.3.1 Optimierungspotentialindex (OPI)

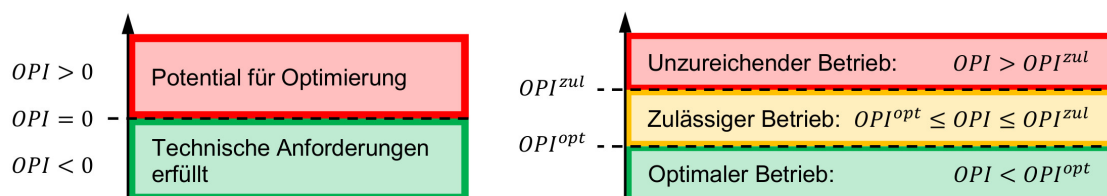
Mit einer Exergieanalyse kann, im Vergleich zur energetischen Betrachtung, die hochwertige Energie (z.B. elektrischer Aufwand des Verdichters  $\hat{=} 100\%$  Exergie) im gesamten System verfolgt und der Ort sowie die Größenordnung der Verluste identifiziert werden, was die Grundlage für Optimierungen darstellt. Im bestehenden Beurteilungssystem wurde jedes Teilsystem der Klimakälteanlage mittels der Kennzahl Zeta ( $\zeta$ ) beurteilt:

$$\zeta = \frac{\eta_{ex}}{\eta_{ex}^*} = \frac{\frac{E_N}{E_A}}{\frac{E_N}{E_A^*}} = \frac{E_A^*}{E_A} \quad (3.1)$$

Wobei  $\eta_{ex}$  den exergetischen Wirkungsgrad des Teilsystems darstellt, welcher das Verhältnis von exergetischem Nutzen  $E_N$  zu Aufwand  $E_A$  beschreibt. Der Referenzwirkungsgrad  $\eta_{ex}^*$  wird mit einem exergetischen Referenzaufwand  $E_A^*$  wo möglich anhand technischen Normen [8, 9, 10] bestimmt. Der exergetische Nutzen soll hierbei unverändert bleiben. Die Referenzwerte sind wichtig, um die Anlage gemäss dem aktuellen Stand der Technik zu beurteilen und um einen absoluten Vergleich verschiedener Anlagen, unabhängig deren Struktur, zu gewährleisten. Die Bewertung kann somit auch dem technologischen Standard (z.B. durch neuere Normen) angepasst werden. Um die Interpretation der Resultate weiter zu vereinfachen, was in der Praxis grosse Bedeutung hat, wird der Optimierungspotentialindex OPI eingeführt:

$$OPI = 1 - \zeta = 1 - \frac{E_A^*}{E_A} \quad (3.2)$$

Erreicht ein Teilsystem einen OPI von 0, so läuft dieses gemäss den technischen Anforderungen. Ein  $OPI > 0$  beschreibt ein mögliches Optimierungspotential und bei einem  $OPI < 0$



**Abbildung 3.1:** Skala des Optimierungspotentialindex für eine grundlegende (links) und erweiterte Auswertung (rechts).



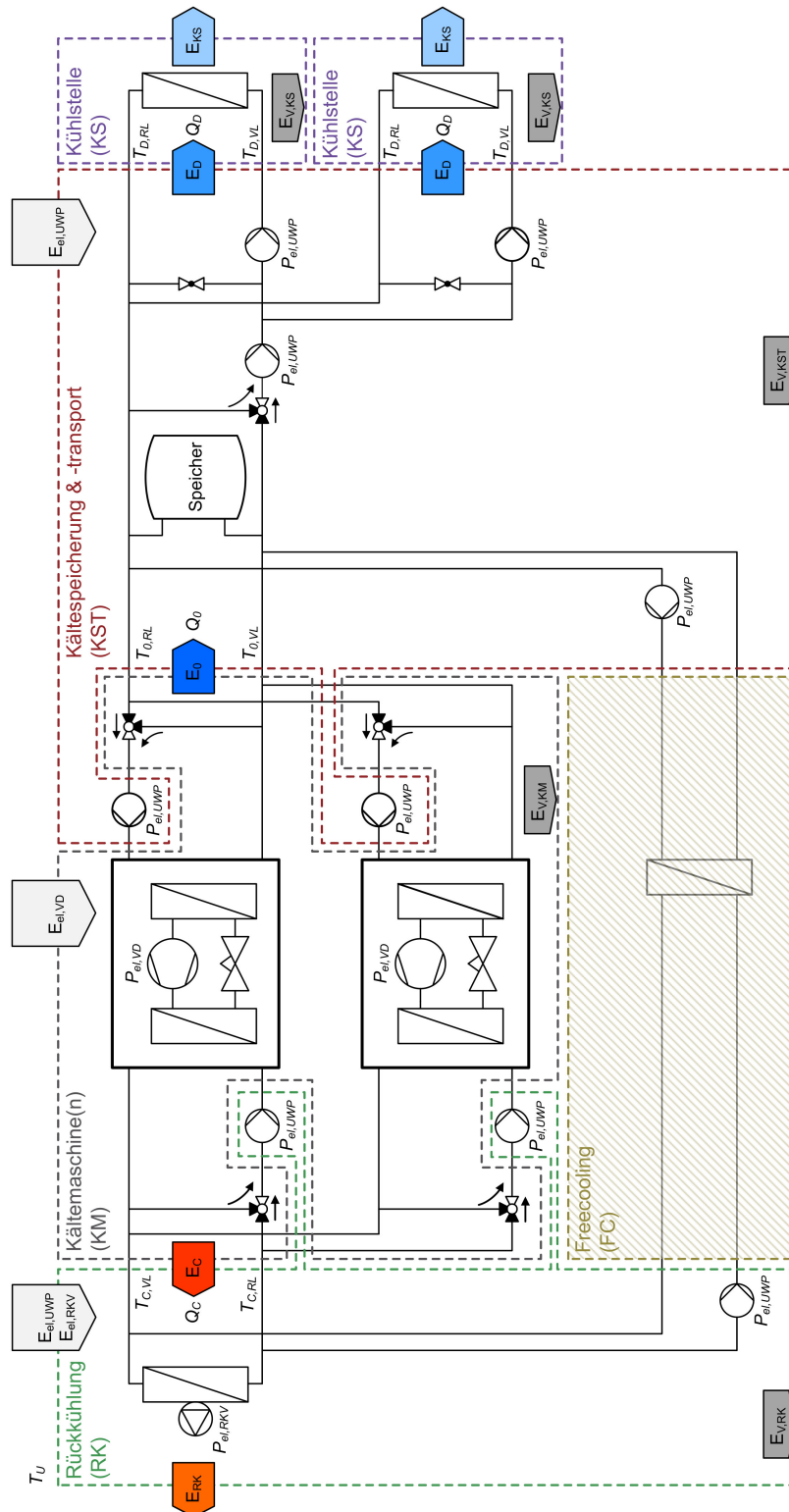
wurden die technischen Mindestanforderungen übertroffen (siehe Abb. 3.1, links). Wie in den Voruntersuchungen erwähnt, ist eine feinere Abstufung der Bewertung anhand Grenzwerten ( $OPI^{zul}$ ,  $OPI^{opt}$ ) angedacht (siehe Abb. 3.1, rechts). Da nicht genügend Normen zur Verfügung stehen, müssen Grenz- sowie Referenzwerte anhand repräsentativen Messungen oder Systemmodellierungen eruiert werden, was auch Teil des vorliegenden Forschungsprojektes darstellt. Da die untersuchte Kälteanlage die technischen Normen weitgehend erfüllt (siehe Abschnitt 5.3), können weitere Referenz- und Grenzwerte definiert werden.

### 3.3.2 Unterscheidung Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb

Im vorliegenden Forschungsprojekt wird beim Beurteilungssystem erstmals zwischen Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb unterschieden. Es werden modifizierte Kennzahlen für letzteren definiert, da sich die Transferrichtung der thermischen Exergie ändert (siehe Abschnitt 3.3.3). Im Kältemaschinenbetrieb ist das Temperaturniveau auf der heissen Seite der Anlage höher und auf der kalten Seite tiefer als jenes der Umgebung. Im Freecoolingbetrieb sind die Temperaturen in der gesamten Kälteanlage höher als die Umgebungstemperatur. Aus Messdaten können die beiden Betriebsarten wie folgt herausgelesen werden: Ist die gemessene elektrische Leistung des Verdichters  $P_{el,VD} > 0$  und die gemessene thermische Energie am Freecoolingwärmetauscher  $Q_{FC} = 0$  so besteht Kältemaschinenbetrieb. Im Gegensatz dazu besteht Freecoolingbetrieb wenn  $P_{el,VD} = 0$  und  $Q_{FC} > 0$ . Der parallele Betrieb der Kältemaschine(n) und des Freecoolings über den Tag (z.B. Vorkühlung) wird im aktuellen Stand des Beurteilungssystems nicht berücksichtigt.

#### Kältemaschinenbetrieb

Anhand der Resultate aus der Abschätzung des Nachrüstaufwandes (siehe Abschnitt 5.2.4) werden im Vergleich zum bisherigen Vorgehen die parallel installierten Kältemaschinen zu einem gemeinsamen Teilsystem zusammengefasst, um die Anschaffungskosten für Wärmezähler zu reduzieren. Auf diese Weise lassen sich die Kältemaschinen nicht mehr einzeln bewerten, jedoch wird dies als eher unkritisch eingestuft. Sind mehrere Maschinen verbaut, so sind diese oft identisch (Redundanzthematik) und weisen dementsprechend die gleichen Betriebsbedingungen auf. In Abbildung 3.2 ist eine typische Klimakälteanlage, unterteilt in die verschiedenen Teilsysteme, im Kältemaschinenbetrieb dargestellt. Die Pfeile repräsentieren den exergetischen Nutzen und Aufwand jedes Teilsystems, wobei  $E_V$  die exergetischen Verluste beschreibt. Die Exergien  $E_{RK}$  und  $E_{KS}$  sind vollständigheitshalber dargestellt, sind für die Berechnung der Kennzahlen jedoch nicht notwendig. Die zu messenden Grössen für die Berechnungen sind kursiv abgebildet (siehe auch Abschnitt 5.2.1 und Anhang A.2). Die hydraulische Schaltung soll nicht die ideale Auslegung, sondern die Zuweisung der einzelnen Hilfsaggregate zu den Teilsystemen aufzeigen. Zudem ist wichtig festzuhalten, dass im vorliegenden Beurteilungssystem, z.B. im Vergleich zur Bewertung mittels  $EER^+$  gemäss SIA 382/1 [8], der Aufwand der Nebenaggregate eindeutig dem Verteilsystem bzw. Rückkühlkreis



**Abbildung 3.2:** Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage im Kältemaschinenbetrieb und die Aufteilung in Teilsysteme. Pfeile zeigen die Exergieflüsse im System und Variablen in kursiv stellen die notwendigen Messgrößen für die Berechnung dar.



zugewiesen wird. Die Kältemaschine wird somit alleinig durch das Verhalten des Kältemittelkreises bzw. über den Aufwand des Verdichters analysiert und es fließen keine anteilmässigen Aufwände der Sekundärkreisläufe in die Bewertung mit ein. Die Beurteilung ist somit eindeutig und die Performance der Teilsysteme kann unabhängig voneinander bestimmt werden.

Wie bisher werden die eingehenden Exergieströme jedes Teilsystems über den Messintervall numerisch integriert und der OPI mit den aufsummierten Exergien tageweise bestimmt. Tabelle 3.1 zeigt zusammenfassend den exergetischen Aufwand und Nutzen sowie die Definition der Kennzahl in jedem Teilsystem. Die \*-Grössen beschreiben jeweils die Referenzexergien (siehe Abschnitt 3.3.1).

Teilsystem	Exergetischer Aufwand	Exergetischer Nutzen	Optimierungspotentialindex OPI
RK	$E_C + E_{el,UWP} + E_{el,RKV}$	$E_{RK}$	$1 - \frac{\sum_{24h}(E_C^* + E_{el,UWP}^* + E_{el,RKV}^*)}{\sum_{24h}(E_C + E_{el,UWP} + E_{el,RKV})}$
KM	$E_{el,VD}$	$E_C + E_0$	$1 - \frac{\sum_{24h} E_{el,VD}^*}{\sum_{24h} E_{el,VD}}$
KST	$E_0 + E_{el,UWP}$	$E_D$	$1 - \frac{\sum_{24h}(E_0^* + E_{el,UWP}^*)}{\sum_{24h}(E_0 + E_{el,UWP})}$
KS	$E_D$	$E_{KS}$	$1 - \frac{\sum_{24h} E_D^*}{\sum_{24h} E_D}$

**Tabelle 3.1:** Exergetischer Aufwand und Nutzen sowie Definition des OPI in jedem Teilsystem im Kältemaschinenbetrieb.

Da die Referenzexergie des Verdichters  $E_{el,VD}^*$  und des Verdampfers  $E_0^*$  bisher aufgrund mangelnder Datengrundlage nicht vorliegen, wird im vorliegenden Projekt der Ansatz verfolgt, diese über eine Exergiebilanz zu bestimmen. Der Referenzaufwand des Verdichters  $E_{el,VD}^*$  ist definiert mit:

$$E_{el,VD}^* = E_0 + E_C^* + E_{V,KM} \quad (3.3)$$

Wobei  $E_0$  den effektiven exergetischen Aufwand des Verdampfers,  $E_C^*$  den Referenzaufwand des Kondensators und  $E_{V,KM}$  die exergetischen Verluste im Teilsystem KM darstellt. Dies entspricht der Situation, dass sich das Teilsystem RK gemäss den technischen Normen verhält. Die Exergieverluste werden als Ansatz identisch wie im effektiven Betrieb definiert, womit die Bewertung strenger ausfällt. Diese berechnen sich gemäss:

$$E_{V,KM} = E_{el,VD} - E_0 - E_C \quad (3.4)$$

Mit dem effektiven exergetischen Aufwand des Verdichters  $E_{el,VD}$  und des Kondensators  $E_C$ . Mit dem gleichen Vorgehen wird der Referenzaufwand des Verdampfers  $E_0^*$  bestimmt:

$$E_0^* = E_D^* + E_{V,KST} - E_{el,UWP}^* \quad (3.5)$$

Wobei  $E_D^*$  den Referenzaufwand der Kälteverteilung,  $E_{V,KST}$  die exergetischen Verluste im Teilsystem KST und  $E_{el,UWP}^*$  den Referenzaufwand der Umwälzpumpen darstellt. Dies entspricht der Situation, in der sich das Teilsystem KS und die Umwälzpumpen gemäss den technischen Normen verhalten. Auch hier werden die Exergieverluste als Ansatz identisch wie im effektiven Betrieb definiert, womit die Bewertung des Teilsystems strenger ausfällt. Die Exergieverluste  $E_{V,KST}$  berechnen sich gemäss:

$$E_{V,KST} = E_0 + E_{el,UWP} - E_D \quad (3.6)$$

Mit dem effektiven exergetischen Aufwand der Umwälzpumpen  $E_{el,UWP}$  und der Kälteverteilung  $E_D$ .

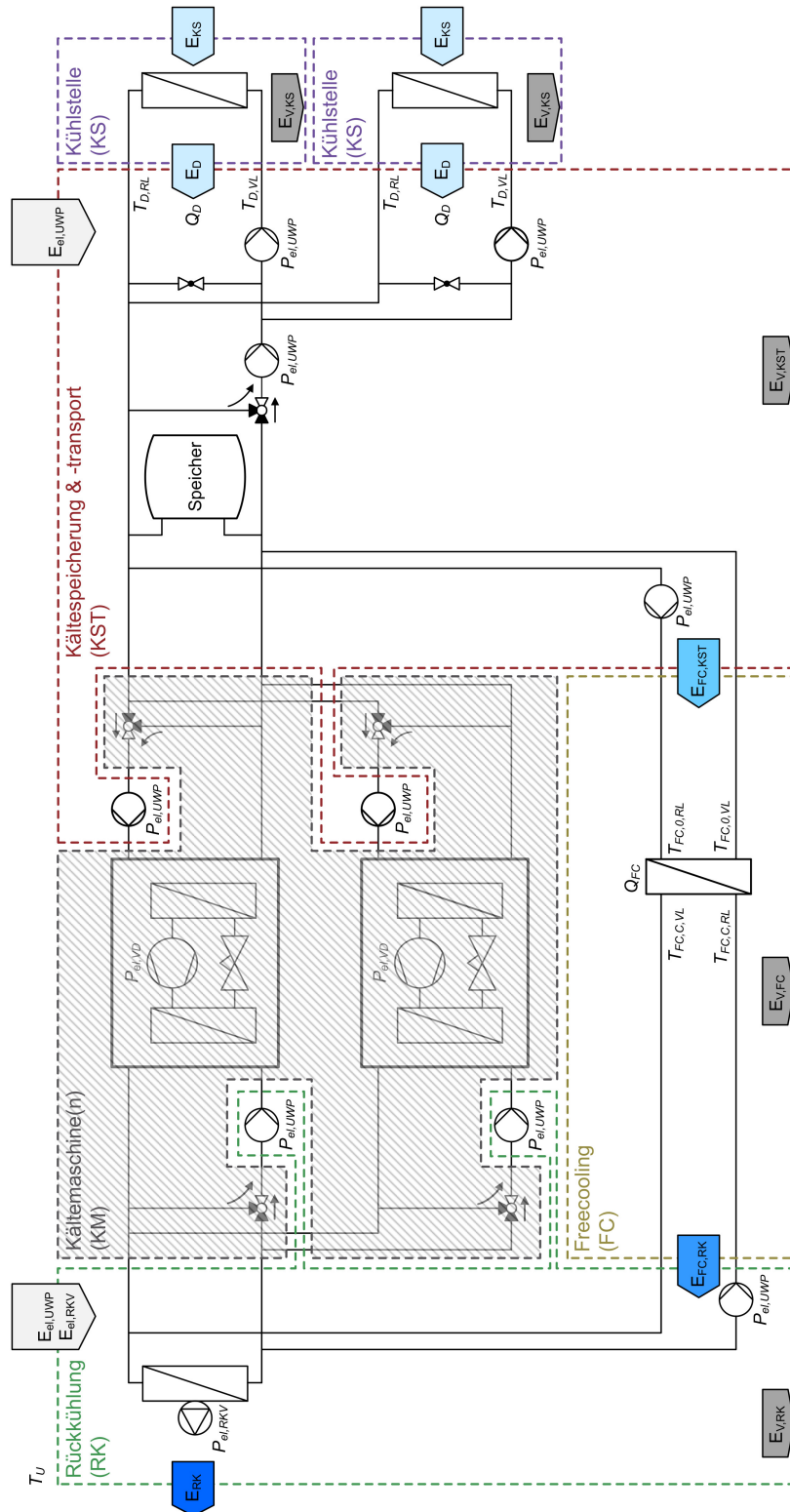
### Freecoolingbetrieb

In Abbildung 3.3 ist eine typische Klimakälteanlage, unterteilt in die verschiedenen Teilsysteme, im Freecoolingbetrieb dargestellt. Das Teilsystem FC ersetzt hierbei das Teilsystem KM. Die Pfeile repräsentieren den exergetischen Nutzen und Aufwand jedes Teilsystems, wobei  $E_V$  die exergetischen Verluste beschreibt. Auch hier ist die Exergie  $E_{RK}$  vollständigkeithalber dargestellt, welche für die Berechnung der Kennzahl nicht notwendig ist. Die zu messenden Grössen für die Berechnungen sind kursiv abgebildet (siehe auch Abschnitt 5.2.1 und Anhang A.2). Erneut soll die hydraulische Schaltung nicht die ideale Auslegung, sondern die Zuweisung der einzelnen Hilfsaggregate zu den Teilsystemen aufzeigen.

Teilsystem	Exergetischer Aufwand	Exergetischer Nutzen	Optimierungspotentialindex OPI
RK	$E_{FC,RK} + E_{el,UWP} + E_{el,RKV}$	$E_{RK}$	$1 - \frac{\sum_{24h}(E_{FC,RK}^* + E_{el,UWP}^* + E_{el,RKV}^*)}{\sum_{24h}(E_{FC,RK} + E_{el,UWP} + E_{el,RKV})}$
FC	$E_{FC,KST}$	$E_{FC,RK}$	$1 - \frac{\sum_{24h} E_{FC,KST}^*}{\sum_{24h} E_{FC,KST}}$
KST	$E_D + E_{el,UWP}$	$E_{FC,KST}$	$1 - \frac{\sum_{24h}(E_D^* + E_{el,UWP}^*)}{\sum_{24h}(E_D + E_{el,UWP})}$
KS	$E_{KS}$	$E_D$	$1 - \frac{\sum_{24h} E_D}{\sum_{24h} E_D^*}$

**Tabelle 3.2:** Exergetischer Aufwand und Nutzen sowie Definition des OPI in jedem Teilsystem im Freecoolingbetrieb.

Der OPI kann mit identischem Vorgehen wie im Kältemaschinenbetrieb für jedes Teilsystem berechnet werden. Auch die Referenzwerte werden wo möglich mit den gleichen Normen bestimmt. Eine Ausnahme bildet das Teilsystem KS, wo im Vergleich zum Kältemaschinenbetrieb  $E_{KS}$  mit der Raumtemperatur bestimmt werden müsste. Da hierzu keine Messdaten zur Verfügung stehen, wird als Ansatz in diesem Teilsystem der Nutzen anstelle des Aufwandes bilanziert. Für zukünftige Analysen des Freecoolingbetriebs kann angedacht werden, die Raumtemperatur ebenfalls zu erfassen. Tabelle 3.2 zeigt zusammenfassend den exergetischen Aufwand und Nutzen sowie die Definition der Kennzahl in jedem Teilsystem.



**Abbildung 3.3:** Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage im Freecoolingbetrieb und die Aufteilung in Teilsysteme. Pfeile zeigen die Exergieflüsse im System und Variablen in kursiv stellen die notwendigen Messgrößen für die Berechnung dar.



Da keine Normen für die Bestimmung des Referenzaufwandes  $E_{FC,0}^*$  vorhanden sind, wird identisch zum Kältemaschinenbetrieb als Ansatz eine Exergiebilanz durchgeführt. Die Exergie  $E_{FC,0}^*$  ergibt sich mit:

$$E_{FC,KST}^* = E_{FC,RK}^* + E_{V,FC} \quad (3.7)$$

Wobei  $E_{FC,RK}^*$  den Referenzaufwand des Freecoolingwärmetauschers auf der Rückkühlseite und  $E_{V,FC}$  die exergetischen Verluste im Teilsystem FC darstellt. Dies entspricht der Situation, dass sich das Teilsystem RK gemäss den technischen Normen verhält. Die Exergieverluste werden als Ansatz identisch wie im effektiven Betrieb definiert, womit die Bewertung des Teilsystems strenger ausfällt. Die Exergieverluste  $E_{V,FC}$  berechnen sich gemäss:

$$E_{V,FC} = E_{FC,KST} - E_{FC,RK} \quad (3.8)$$

Mit dem effektiven exergetischen Aufwand des Freecoolingwärmetauschers auf der Kälteverteilung-  $E_{FC,KST}$  und Rückkühlseite  $E_{FC,RK}$ .

### 3.3.3 Limitierungsfunktion für die thermische Exergie

Im bestehenden Beurteilungssystem wird die elektrische sowie die Exergie von Stoffströmen in den Teilsystemen bilanziert um den OPI zu berechnen. Die von den Stoffströmen übertragene Exergie entspricht näherungsweise der Exergie der übertragenen Wärme (thermische Exergie) bei der mittleren Temperatur der ein- und ausgehenden Stoffströme. Letztere ist wie folgt definiert [7]:

$$E_{th} = Q \left( 1 - \frac{T_R}{T_i} \right) \quad (3.9)$$

Wobei  $Q$  die zu- oder abgeführte thermische Energie,  $T_R$  die Temperatur der Referenzumgebung und  $T_i$  das Temperaturniveau der thermischen Energie darstellt. Der Klammerausdruck wird auch Carnot-Faktor genannt. Wie aus der Gleichung hervorgeht, ist die Exergie von einer Referenzumgebung abhängig. Die Exergie beschreibt den unbeschränkt umwandelbaren Teil der Energie, welcher in einem idealen System nutzbar ist, wenn dieses ins thermodynamische Gleichgewicht mit der Referenzumgebung gebracht wird. Bei Exergieanalysen ist somit die Definition der Referenzumgebung entscheidend, um zuverlässige Auswertungen durchführen zu können. In [11] wurden verschiedene mögliche Varianten überprüft, wobei die aktuell herrschende Umgebung als beste Option angesehen wird. Dementsprechend wird dies in der vorliegenden Arbeit adaptiert und die Referenztemperatur  $T_R$  entspricht der aktuell herrschenden Umgebungstemperatur  $T_U$ .

Wie bereits erwähnt ist das Temperaturniveau der warmen Seite der Klimakälteanlage typischerweise höher und das der kalten Seite tiefer als jenes der Umgebung. Auf der warmen Seite wird der Carnot-Faktor positiv und die Transferrichtung der thermischen Exergie ist identisch zur übertragenen Wärme. Im Gegensatz dazu wird der Carnot-Faktor auf der kalten

Seite negativ und die thermische Exergie weist die entgegengesetzte Transferrichtung auf (siehe auch Abbildung 3.2). Man spricht von warmer und kalter Exergie, wenn  $T_i > T_U$  bzw.  $T_i < T_U$  ist [12]. Im Freecoolingbetrieb (typischerweise Winter) ist die Definition des Optimierungspotentialindex eindeutig, da die Umgebungstemperatur tiefer als die Temperatur der abgeführten Wärme sein muss. Ebenso ist im Kältemaschinenbetrieb die Sommerperiode unproblematisch, da die Temperatur der kalten Seite der Kälteanlage tiefer als jene der Umgebung ist. In der Übergangszeit (Frühling, Herbst) kann jedoch die Umgebungstemperatur im Verlauf des Tages durchaus unterhalb jener der Kühlstelle liegen, womit sich die Transferrichtung der Exergie ändert. Im Bezug zu den definierten Teilsystemen wird der exergetische Aufwand zu einem Nutzen oder umgekehrt. Um dieser Problematik entgegenzuwirken wird eine Limitierungsfunktion eingeführt, wobei die Exergie null gesetzt wird, sobald die Umgebungstemperatur unterhalb der Systemtemperatur liegt:

$$\max(E, 0) = \begin{cases} E & \text{wenn } T_i < T_U \\ 0 & \text{wenn } T_i > T_U \end{cases} \quad (3.10)$$

Die Funktionsweise der Limitierung sei am Beispiel des Teilsystems KS erläutert. Der OPI ist definiert mit:

$$OPI_{KS} = 1 - \frac{\sum_{24h} \max(E_D^*, 0)}{\sum_{24h} \max(E_D, 0)} \quad (3.11)$$

Ist die Referenztemperatur der Kälteverteilung  $T_D^* > T_U$ , so wird der OPI gross und strebt im Grenzfall den Tageswert 1 an, was ein Optimierungspotential darstellt, denn es wäre im Referenzfall Freecooling möglich. Ist die effektive Temperatur der Kälteverteilung  $T_D > T_U$ , so wird die Kennzahl klein und strebt im Grenzfall den Tageswert  $-\infty$  an. Wird der Nenner 0 bedeutet dies, dass das Teilsystem zu diesem Zeitpunkt nicht bewertbar ist, da es gar nicht oder thermodynamisch ungünstig betrieben wurde, wobei genauere Abklärungen nötig sind um die Gründe dafür zu eruieren. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass solche Situationen eine Ausnahme darstellen, denn wenn die Temperatur der Kühlstelle höher liegt wie jene der Umgebung, so läuft die Klimakälteanlage typischerweise im Freecoolingbetrieb.

## 4 Vorgehen und Methode

Wie in Abschnitt 3 beschrieben kann das vorliegende Forschungsprojekt in drei Arbeitspakete unterteilt werden. Das Vorgehen ist in Abb. A.1 schematisch dargestellt und nachfolgend im Detail erläutert.

### 4.1 Akquisition

#### 4.1.1 Kontaktaufnahme mit Unternehmen aus der Branche

Um den Prozess der Akquisition und die dazugehörigen telefonischen Anfragen von Unternehmen effizienter zu gestalten, wurde ein Leitfaden (siehe Anhang A.3) sowie ein Infoblatt mit den wichtigsten Fakten zum Projekt (siehe Anhang A.4) erarbeitet. Letzterer diente als Informationsgrundlage für die zuständigen Personen bei bestehendem Interesse seitens der Unternehmen. Mittels Protokollierung der Anfragen und teilweise erneuter Kontaktaufnahme konnte der Erhalt von genügend Anlageninformationen sichergestellt werden.

#### 4.1.2 Bearbeitung von Anlagendokumenten und Anlagenbesichtigungen

Anhand der erstellten Checkliste (siehe Anhang A.5) wurde, basierend auf den erhaltenen Anlagenschemas, der Instrumentierungsstand eruiert. Zusätzlich wurden offene Fragen und Unklarheiten mittels Anlagenbesichtigungen oder Treffen mit Planern geklärt. In wenigen einzelnen Fällen, bei welchen die Anlagen nicht aktiv betreut werden, musste im Gespräch mit Planern eine bestmögliche Schätzung zur Messstellenverfügbarkeit vorgenommen werden.

### 4.2 Messkonzept und Nachrüstaufwand

#### 4.2.1 Analyse bestehender Messkonzepte

Während der Anlagenbewertung wie auch aus dem Detailmesskonzept (siehe Tab. 5.2) wurde erkannt, dass die Definition der Best- und Worst-Case Anlage nicht rein durch die Anzahl der fehlenden Messpunkte bestimmt werden kann. Es muss ebenfalls dem Nachrüstaufwand bei der Anlagenbewertung grosse Bedeutung zugeteilt werden. Beispielsweise können zwei Anlagen jeweils vier fehlende Messstellen aufweisen, eine mit vier fehlenden Wärmezählern und eine andere mit vier fehlenden Elektrozählern. Werden nur die Messpunkte beurteilt, würden die Anlagen als identisch instrumentiert gelten. Berücksichtigt man jedoch die Kosten für die Nachrüstung, schneidet die Anlage mit den fehlenden Wärmezählern deutlich schlechter ab, da diese um einiges teurer sind (siehe Abschnitt 5.2.3). Aus diesem Grund wurde entschieden, die Anlagen nach Instrumentierung sowie Nachrüstaufwand zu bewerten und daraus die entsprechende Best- und Worst-Case Anlage zu identifizieren (siehe Abschnitte 5.2.5 und 5.2.6).



## 4.2.2 Vorgaben & Annahmen für die Bestimmung des Nachrüstaufwandes

Wie die Bewertung der Klimakälteanlagen gezeigt hat, musste zur Definition von Best- und Worst-Case der Nachrüstaufwand jeder einzelnen bestimmt werden (siehe Abschnitt 5.2.4). Es wurde der Ansatz verfolgt, möglichst allgemeingültige Kostenfunktionen basierend auf Messmittelherstellerangaben zu erstellen und anhand dieser die Nachrüstkosten jeder Anlage zu berechnen. Um eine einheitliche Kostenschätzung und für alle Offerten möglichst gleiche Randbedingungen zu gewährleisten, wurden für die untersuchten Messmittel Vorgaben und Annahmen definiert.

### Allgemein

- Suboptimal platzierte Messstellen werden vollständig durch neue ersetzt. Zum Beispiel sind an einer Wärmezähler-Messstelle zwei Temperatursensoren, jedoch keine Durchflusssensoren vorhanden. Hierbei würde die bestehende Instrumentierung durch einen Wärmezähler mit integrierten Temperaturfühlern ersetzt werden.

### Wärmezähler

- Pro Messstelle soll der Wärmezähler vollständig mit Durchflusssensor, Temperaturfühlern (Tauchfühler) und Rechenwerk offeriert werden.
- Die Genauigkeit der Wärmezähler muss mindestens nach DIN EN 1434-1 [13] erfüllt sein. Es sollen Sensoren mit Genauigkeiten nach marktüblicher Verwendung offeriert werden.
- Nach Möglichkeit sollen magnetisch induktive Durchflusssensoren (MID) verwendet werden.
- Es gilt die Annahme, dass die Messmittel ohne grossen Zusatzaufwand verbaut werden können. Dies bedeutet unter anderem, dass
  - keine Hebebühnen notwendig sind.
  - Isolationen sich leicht entfernen lassen.
  - keine speziellen Schweisstechniken angewendet werden müssen.
- Die Durchflusssensoren werden geflanscht oder geschweisst eingebaut (alle Messstellen haben einen Rohrdurchmesser grösser als DN50).
- Nach Möglichkeit werden die Daten per Modbus<sup>1</sup> ausgelesen.
- Die Inbetriebnahme des Wärmezählers wird vom Hersteller im Werk durchgeführt.

<sup>1</sup> Bei Modbus handelt es sich um ein Kommunikationsprotokoll, welches den Datenaustausch zwischen einem Master und mehreren Slaves ermöglicht. Dies gehört heutzutage zum Industriestandard für die Verbindung von Computern mit Mess- und Regelsystemen.



## Elektrozähler

- Elektrische Verbraucher werden so gut wie möglich zusammengefasst gemessen und die entsprechenden Elektrozähler anhand der summierten Leistungsaufnahme offeriert. Wenn beispielsweise im Kälteverteilsystem vier Umwälzpumpen verbaut sind, werden diese an einer Leitung zusammengefasst und die Leistung dort gemessen.
- Bei einer erwarteten Leistungsaufnahme bis 4 kW an der Messstelle werden direkt messende Elektrozähler verbaut. Bei höheren Leistungen werden zusätzlich Stromwandler eingesetzt.
- Das Auslesen der Daten erfolgt möglichst per Modbus.
- Es wird angenommen, dass die Verkabelung ohne grossen Mehraufwand ausgeführt werden kann. Dies bedeutet unter anderem, dass
  - Steigleitungen sowie Kabeltrassen vorhanden sind.
  - keine unverhältnismässig langen Leitungen zu verlegen sind.
  - der vorhandene Schaltschrank Platzreserven für die geplanten Erweiterungen hat.

## Temperaturfühler

- Es werden nur Tauchfühler eingesetzt.
- Es werden Fühlerarten nach Stand der Technik eingesetzt (oft Pt100).

## Datenerfassung

- Es ist ein gängiges Leitsystem (SPS, SAIA, o.ä.) vorhanden, welches dem Provider der Datenerfassung bekannt ist.
- Es sollen bis zu 100 Messpunkte d.h. 100 Sensoren gleichzeitig aufgezeichnet und deren Daten laufend gespeichert werden. Der Messintervall soll praktikabel anwendbar sein.
- Offerten sollen die Kosten zur Einrichtung und Programmierung einer Datenerfassung mit Speicherung beinhalten. Die Sensor-Verkabelung soll nicht offeriert werden.

### 4.2.3 Offertanfragen an Messmittelhersteller

Die Anlagendokumente dienen als Datengrundlage für Offertenanfragen. Es wurden, wo möglich, benötigte Angaben zur Dimensionierung von Messstellen entnommen und in einer Tabelle zusammengefasst. Für Wärmezähler wurden Nennweite, Medium, Durchfluss und Temperatur an den entsprechenden Messstellen ermittelt und zusammengetragen (siehe Tabelle 4.1).



Leistungsmessung Verdampfer						
Kälteleistung [kW]	Nennweite	Medium	Durchfluss nach Auslegung [m <sup>3</sup> /h]	Erwartete Temperatur [°C]	Wärmezähler-Modell	Kosten für Wärmezähler [CHF]
50	DN65	Wasser	7.4		14	
68	DN80	Wasser	19.3		10	
113	DN65	Wasser	nicht bekannt		14	
125	DN65	Wasser	10.3		46	
128	DN80	Wasser	nicht bekannt		10	
155	DN100	Antifrogen L35	25.0		10	
169	DN80	Antifrogen N30	20.8		9	
189	DN125	Antifrogen N30	30.9		8	
200	DN80	Wasser	28.6		3.5	
223	DN100	nicht bekannt	37.6		6	
226	DN100	Antifrogen N30	37.6		6	
267	DN100	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt		
285	DN125	Wasser	40.8		12	
285	DN125	Wasser	40.8		12	
313	DN100	Wasser	38.4		10	
350	DN125	Antifrogen N30	43.0		9	
400	DN125	Antifrogen N30	57.0		10	
490	DN150	Wasser	71.4		8	
950	DN150	Wasser	135.0		6	
1290	DN200	Wasser	185.0		6	

**Tabelle 4.1:** Auszug aus der erstellten Tabelle zur Kostenermittlung der Wärmezähler am Beispiel der Leistungsmessung am Kältemaschinen-Verdampfer.

Kältemittel	Kälteleistung Gesamtsystem [kW]	Elektrische Leistung KM 1 [kW]	Modell Elektrozähler Verdichter KM 1	Kosten E-Zähler Verdichter KM 1 [CHF]	Elektrische Leistung Umwälzpumpe Kältetransport [kW]	Modell Elektrozähler Umwälzpumpe Kältetransport	Kosten E-Zähler Umwälzpumpe Kältetransport [CHF]
R134a	867	99			4.4		
R134a	155	nicht bekannt			nicht bekannt		
R717	1320	186			nicht bekannt		
R407c, R134a	612	120			nicht bekannt		
nicht bekannt	900	nicht bekannt			nicht bekannt		
R744	20	nicht bekannt			0.19		
R134a	250	nicht bekannt			nicht bekannt		
R744	25	nicht bekannt			nicht bekannt		
R410a	140	20			nicht bekannt		
R410a,R744	140	20			nicht bekannt		
R410a	50	nicht bekannt			nicht bekannt		
R410a	573	70			3		
R134a	494	170			19.4		
R410a	450	90			nicht bekannt		
R410a	189	63			nicht bekannt		
R410a	519	36			11.3		
R134a	570	200			3.1		
R134a	800	nicht bekannt			12		
R407c	288	nicht bekannt			nicht bekannt		
R134a	200	55			nicht bekannt		
R410a	128	20			0.8		
R717	5252	315			46.2		
R717	4750	230			24.2		

**Tabelle 4.2:** Auszug aus der erstellten Tabelle zur Kostenermittlung der Elektrozähler.

Für Elektrozähler wurde, wo möglich, die elektrische Leistungsaufnahme der Messstelle notiert. Für einen Hersteller wurde auf Anfrage zusätzlich die vorherrschende Stromstärke angegeben. Auch in diesem Fall wurden die Informationen in einer Tabelle zusammengetragen (siehe Tabelle 4.2).

Im Gespräch mit Planern wurden diverse Hersteller und Händler von Messmitteln sowie Datenerfassungssystemen ermittelt. Die Firmen wurden telefonisch kontaktiert, um einen ersten

Eindruck der Sensormöglichkeiten sowie wichtige Informationen aus Erfahrungswerten zu erhalten. Anhand dieser Telefonate konnten von erfahrenen Fachkräften Erkenntnisse gewonnen werden, welche später unterstützend zur Berechnung von Installationskosten oder zur Kontrolle der Kostenfunktionen Anwendung fanden. Bei fortwährendem Interesse der Hersteller wurden die entsprechenden Tabellen (siehe Tabelle 4.1 und 4.2) versendet, um ein Angebot bzw. eine ausgefüllte Kostentabelle zu erhalten.

#### 4.2.4 Kostenfunktionen für die Bestimmung des Nachrüstaufwandes

Anhand der erhaltenen Daten konnten für die einzelnen Komponenten spezifische Kostenfunktionen definiert werden, um den Nachrüstaufwand jeder Anlage zu bestimmen. Hierfür wurden in einem ersten Schritt die Angebote der Hersteller zusammengefasst und pro Kälteleistung gemittelt. Anschliessend wurden mittels linearer Regression die Kostenfunktionen der einzelnen Komponenten erstellt (siehe Abschnitt 5.2.3) und der Nachrüstaufwand jeder Anlage berechnet (siehe Abschnitt 5.2.4). Die Streuung jeder Kostenangabe wurde mit der Standardabweichung  $s$ , ausgehend von einer Stichprobe, berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{(n - 1)}} \quad (4.1)$$

wobei  $\bar{K}$  den Mittelwert der Kosten,  $K_i$  die Kosten eines einzelnen Herstellerangebots und  $n$  die Anzahl der Angebote darstellt.

### 4.3 Proof of Concept

Gemäss den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.2 wurde die Anlage Nr. 3 für den Proof of Concept ausgewählt. Diese belegt zwar Rang 2 bezüglich Instrumentierung, entspricht jedoch vollumfänglich den gesetzten Anforderungen und weist eine umfassende Datenspeicherung auf, was für die Anwendung des Beurteilungssystems höchste Priorität hat (entspricht Best-Case bezüglich Datenspeicherung). Zudem sind die zwei fehlenden Messstellen für den Kältemaschinenbetrieb dieser Anlage nicht relevant (Pumpenleistungen werden zusammen geloggt sowie sind keine Pumpen im Teilsystem Kühlstelle vorhanden). Einzig die elektrische Leistung der Winterpumpen wird nicht aufgezeichnet, was einen positiven Einfluss auf die Kennzahl im Freecoolingbetrieb hat (effektiver exergetischer Aufwand wird kleiner im Vergleich zum Referenzaufwand). Das Beurteilungssystem ist aber dennoch anwendbar um die Funktionalität zu überprüfen.

Die untersuchte Klimakälteanlage hat 5 parallele Kältemaschinen mit je 950 kW Kälteleistung und Ammoniak (R717) als Kältemittel verbaut. Die Anlage versorgt 7 Kühlstellen und weist zu-

dem 3 Rückkühler, 2 Kältespeicher sowie 11 Umwälzpumpen auf. Zusätzlich ist ein Freecoolingmodul für den Winterbetrieb vorhanden. Die elektrischen Leistungen der Nebenaggregate (Umwälzpumpen und Rückkühlventilatoren) werden im jeweiligen Teilsystem zusammengefasst. Daraus resultieren für die Auswertung im Kältemaschinen- sowie Freecoolingbetrieb 10 Teilsysteme, welche einzeln beurteilt werden können.

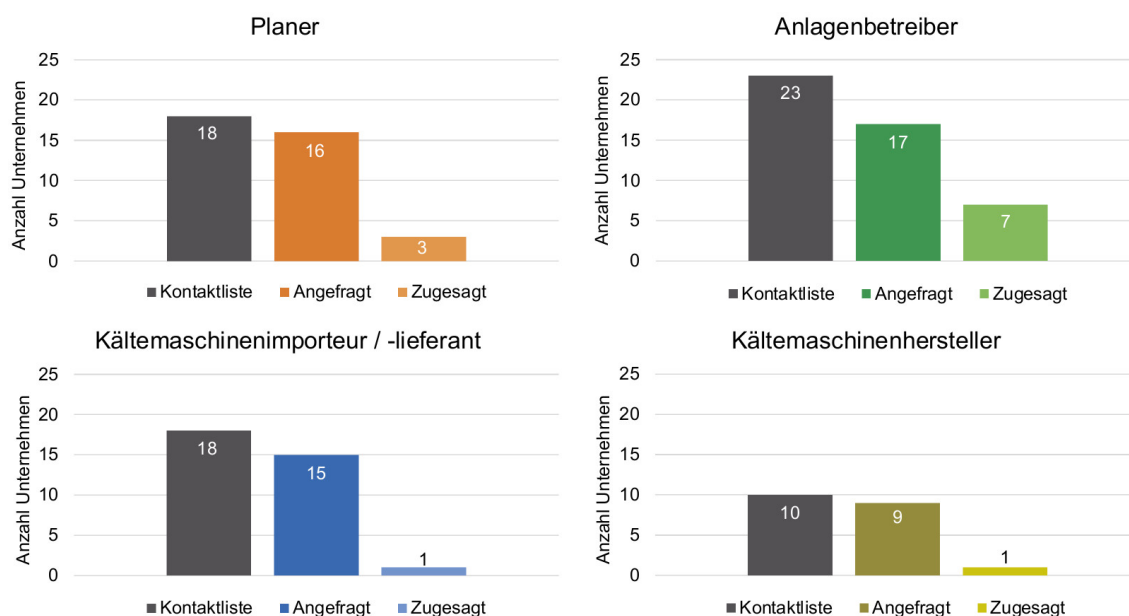
Anhand Testdaten wurde ein Auswertungstool konzipiert und erste Berechnungen durchgeführt, um die Funktionalität des Tools zu verifizieren. Der vorliegende Datensatz für den Proof of Concept umfasst Messungen in einem Intervall von 5 Minuten über das ganze Jahr 2018. Die Daten wurde gesichtet und für die Auswertung aufbereitet. Zwei Kühlstellen waren ab April 2018 und eine ab Mai 2018 in Betrieb. Eine Kältemaschine wurde ebenfalls später eingebaut und lief ab April 2018. Bei einer Kühlstelle fehlten 5 Messpunkte vom 12.04.2018 13:40 bis 12.04.2018 13:55, wobei diese näherungsweise mittels linearer Interpolation ermittelt werden konnten.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Akquisition

#### 5.1.1 Kontaktaufnahme mit Unternehmen aus der Branche

Anhand der erstellten Kontaktliste wurden insgesamt 57 von 69 Unternehmen kontaktiert. Da damit die Zielsetzung von 15 – 20 Anlagen bereits übertroffen wurde und eine breite Auswahl an Kälteanlagen vorlag, wurde auf eine weitere Anfrage der 12 übrigen Firmen verzichtet. Teilweise wurden von einem Unternehmen mehrere Anlagen zur Verfügung gestellt. In Abbildung 5.1 sind die Resultate der Akquisition aufgeteilt nach Fachgebiet dargestellt. Für jeden Bereich ist ersichtlich, wie viele Unternehmen auf der Kontaktliste sind, wie viele angefragt wurden und wo Zusagen vorliegen.



**Abbildung 5.1:** Rücklaufquote der angefragten Unternehmen unterteilt in die verschiedenen Fachbereiche.

Im Allgemeinen fallen die Absagen in jedem Fachbereich relativ hoch aus (Rücklaufquote von 6 – 40 %), wobei die meisten Zusagen bei Anlagenbetreibern vorliegen. Einer der meist genannten Gründe für eine Absage war, dass keine passende Anlage oder kein Zugang zum Gesamtsystem vorhanden ist. Mangelnde zeitliche Ressourcen stellten ebenfalls ein Hindernis für die Teilnahme am Projekt dar. Bei einigen Unternehmen war eine Antwort auch nach der dritten Kontaktaufnahme ausstehend, wobei diese dann nicht mehr angefragt wurden.

#### 5.1.2 Eckdaten der erhaltenen Kälteanlagen

Insgesamt konnten von 12 Unternehmen mehrere Anlagen evaluiert bzw. besichtigt werden, wobei aus der Akquisition schlussendlich 28 Anlagen resultieren. Tabelle 5.1 zeigt eine Über-

sicht der untersuchten Klimakälteanlagen, wobei die Kälteleistungen, die eingesetzten Kältemittel, die Anwendungen und die Standorte aufgeführt sind (für die Auswertung der Instrumentierung siehe Abschnitt 5.2.1).

Anlage Nr.	Kälteleistung [kW]	Kältemittel	Anwendung	Standort	Baujahr
1	200	R134a	Klima	Cham ZG	2016
2	128	R410a	Klima	Zürich ZH	2017
3	4750	R717	Klima	Winterthur ZH	2014
4	5252	R717	Klima	Luzern LU	2016
5	573	R410a	Klima	Zürich ZH	2016
6	449	R410a	Klima	Zürich ZH	2012
7	189	R410a	Klima	Zürich ZH	2012
8	519	R410a	Klima	Zürich ZH	2012
9	570	R134a	Klima	Zürich ZH	2014
10	988	R134a	Klima	Opfikon ZH	2011
11	1320	R717	Klima / Prozess	Schaffhausen SH	2017
12	867	R134a	Klima / Server	Bern BE	2007
13	158	R134a	Klima	Rothrist AG	2014
14	214	R410a	Klima	Winterthur ZH	2016
15	141	R410a, R744	Klima	Uster ZH	2017
16	190	R410a	Klima / Verkauf	Zürich ZH	2018
17	612	R407c, R134a	Klima / Verkauf	Bülach ZH	2015
18	900	nicht bekannt	Klima / Verkauf	Zürich ZH	2015
19	20	R744	Klima	Eglisau ZH	2015
20	250	R134a	Klima / Verkauf	Uster ZH	2016
21	25	R744	Klima / Verkauf	Jona SG	2018
22	50	R410a	Klima / Verkauf	Wollerau SZ	2018
23	800	R134a	Klima / Server	Bern BE	2012
24	288	R407c	Klima / Server	Liebefeld BE	2006
25	43	R410a	Klima / Verkauf	Zumikon ZH	2014
26	194	R410a	Klima / Prozess	Netstal GL	2012
27	nicht bekannt	nicht bekannt	Klima / Verkauf	Zürich ZH	nicht bekannt
28	nicht bekannt	nicht bekannt	Klima	Wädenswil ZH	nicht bekannt

**Tabelle 5.1:** Übersicht und Eckdaten der untersuchten Klimakälteanlagen.

Die Kälteleistungen der Anlagen variieren von 20 – 5'252 kW, was für die vorliegende Untersuchung durchaus wünschenswert ist. Mehr als die Hälfte der eingesetzten Kältemaschinen sind jünger als vier Jahre, wobei Anlagen mit Baujahr 2006 – 2018 vorhanden sind. Zudem kommen bei der Mehrheit der Kältemaschinen die Kältemittel R410a und R134a zum Einsatz. Die meisten dieser Klimakälteanlagen in der Liste sind in Einkaufszentren oder Bürogebäuden verbaut.

## 5.2 Messkonzept und Nachrüstaufwand

### 5.2.1 Analyse bestehender Messkonzepte

Von den insgesamt 28 Anlagen aus der Akquisition wurden 4 aufgrund unzureichender Informationsfülle nicht untersucht. Für die bewerteten Kälteanlagen, gemäss Anlagendokumentationen und Abklärungen vor Ort oder Treffen mit Planern, ist der Instrumentierungsstand

zusammenfassend in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Anzahl der verbauten Kältemaschinen im System und deren totale Kälteleistung wird durch  $n_{KM}$  bzw.  $Q_{0, Sys}$  beschrieben. Die restlichen Variablen in der Tabelle entsprechen den einzelnen Messstellen in den verschiedenen Teilsystemen. Diese Zusammenfassung dient zudem als Detailmesskonzept zur weiteren Verwendung für die Abschätzung des Nachrüstaufwandes.

		Messmittel vorhanden, logbar/gelogg oder berechenbar		Messmittel vorhanden, Messung suboptimal oder nicht abschliessend geklärt		Messmittel nicht vorhanden																																
		Messmittel vorhanden, nicht gelogg				Teilsystem nicht verbaut																																
Anlage Nr.	$n_{KM}$	$Q_{0, Sys}$ [kW]	Kältemaschine							Rückkühlung				Kältespeicher und -transport					Kühlstellen				Wärmenutzung			Freecooling			Logging									
			$P_{el,VD}$	$Q_0$	$T_{0,VL}$	$T_{0,RL}$	$C_c$	$T_{c,VL}$	$T_{c,RL}$	$C_{WA}$	$T_{WA,VL}$	$T_{WA,RL}$	$T_U$	$P_{el,UWP}$	$P_{el,RKV}$	$C_c$	$T_{c,VL}$	$T_{c,RL}$	$T_U$	$P_{el,UWP}$	$Q_0$	$T_{0,VL}$	$T_{0,RL}$	$Q_0$	$T_{D,VL}$	$T_{D,RL}$	$T_U$	$P_{el}$		$C_{WA}$	$T_{WA,VL}$	$T_{WA,RL}$	$T_U$	$P_{el}$	$C_{FC}$	$T_{FC,VL}$	$T_{FC,RL}$	$T_U$
1	1	200																																				
2	1	128																																				
3	5	4750																																				
4	4	5252																																				
5	2	573																																				
6	2	449																																				
7	1	189																																				
8	2	519																																				
9	2	570																																				
10	2	988																																				
11	2	1320																																				
12	4	867																																				
13	1	158																																				
14	1	214																																				
15	2	141																																				
16	3	190																																				
17	2	612																																				
18	2	900																																				
19	1	20																																				
20	1	250																																				
21	1	25																																				
22	1	50																																				
23	2	800																																				
24	3	288																																				

**Tabelle 5.2:** Zusammenfassende Tabelle der untersuchten Anlagen mit entsprechendem Instrumentierungsstand.

Der Überblick über die erfassten Anlagendokumentationen zeigt deutlich, dass grosse Unterschiede in der Instrumentierung und Datenerfassung bestehen. Einige Anlagen sind gemäss Checkliste beinahe vollständig instrumentiert und verfügen über eine umfassende Datenspeicherung. Dementsprechend war der Proof of Concept durchführbar (siehe Abschnitt 5.3). Im Vergleich verfügen andere Anlagen lediglich über eine grundlegende Instrumentierung und keinerlei Datenerfassung. Um erste Eckdaten zu noch nicht abschliessend untersuchten Teilsystemen (aufgrund mangelnder Datengrundlage) zu gewinnen, wurde bei jeder Anlage, wenn vorhanden, die Instrumentierung bei Wärmenutzung und Freecooling mitbewertet. Diese wurden später nicht zur Aufwandsberechnung verwendet, können jedoch für zukünftige Untersuchungen miteinbezogen werden. Aus den Anlagendaten lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- Im Allgemeinen sind die Anlagen sparsam mit Elektrozählern bestückt. Aus Kostengründen wird die elektrische Leistungsaufnahme der Rückkühlventilatoren  $P_{el,RKV}$  und Umwälzpumpen  $P_{el,UWP}$  fast nie einzeln erfasst. Die Leistung der Verdichter  $P_{el,VD}$  wird bei der Hälfte aller untersuchten Anlagen separat gemessen. Dies zeigt das typi-



sche Muster der energetischer Anlagenbewertung: In der Energiebetrachtung sind der Energy Efficiency Ratio (EER) und die Jahresarbeitszahl (JAZ) wichtige Kennzahlen zur Anlagenbewertung. Mit der separat gemessenen Verdichterleistung und der Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  kann der EER bestimmt werden, wobei sich die Beurteilung lokal auf die Maschine beschränkt. Mit der Summe des elektrischen Verbrauchs der Anlage und der thermischen Energie der Kälteverteilung  $\dot{Q}_D$  lässt sich die JAZ von Kälteanlagen ermitteln.

- Bei den meisten Anlagen ist die Kälteleistung bei der Kälteverteilung hin zu den Kühlstellen von Interesse. 18 von 24 Anlagen sind dementsprechend mit Wärmezählern an den Kühlstellen ausgerüstet, entweder einzeln pro Verbraucher oder mindestens als zusammenfassender Zähler über alle Verbraucherguppen.
- Die am besten ausgerüsteten Anlagen stammen von Firmen mit Energie-Contracting.
- Eine ausreichende Datenerfassung gehört heutzutage zum Stand der Technik, ist aber oft nicht eingerichtet. Eine umfassende Datenerhebung und Auswertung interessiert vor allem Firmen im Contracting-Bereich oder solche, welche Anlagen selbst betreiben. Alle untersuchten Kälteanlagen werden mit einem Leitsystem geregelt und wären fähig Daten aufzuzeichnen. Nur bei 7 Anlagen werden Daten effektiv registriert und auf einem Server über längere Zeit gespeichert. Weitere 8 Anlagen haben für die Bewertung mittels Exergieansatz eine unzureichende Datenspeicherung. Bei den meisten ist ein Ringspeicher mit Speicherplatz für Messperioden von einigen Stunden bis zu mehreren Wochen verbaut. Diese werden zur effizienten Störungsbehebung eingesetzt. Bei den restlichen 9 Anlagen ist ein Leitsystem vorhanden, eine Datenerfassung wird aber nicht durchgeführt.

### 5.2.2 Offertanfragen Messmittelhersteller

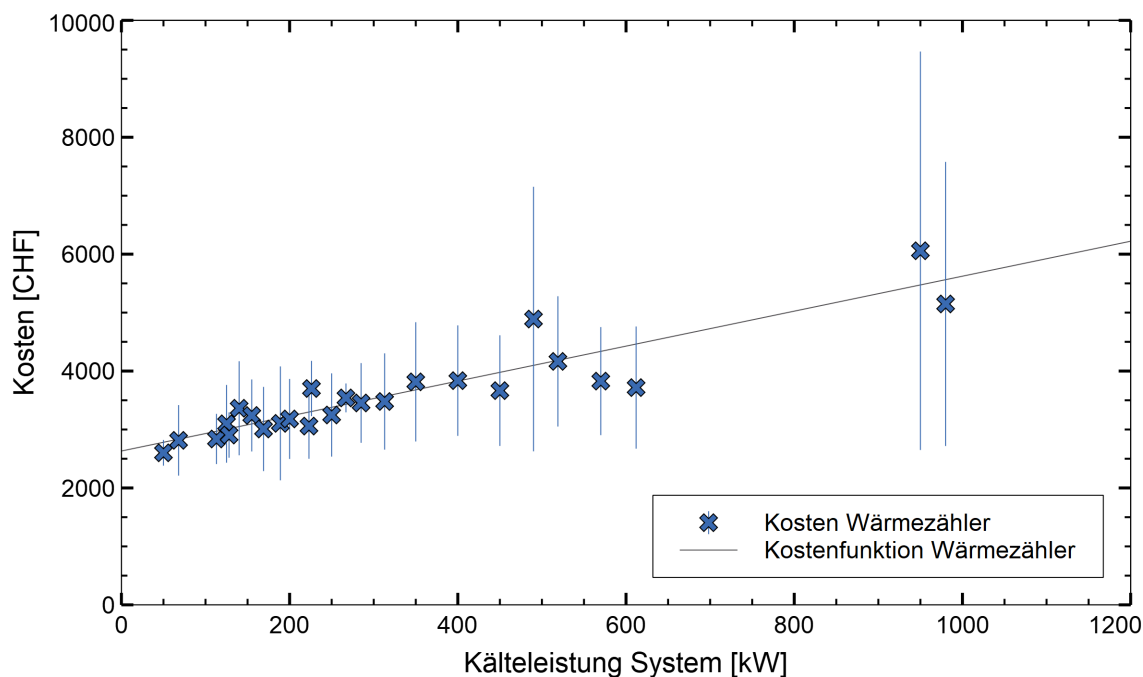
Vier von fünf Wärmezähler-Hersteller sowie zwei von drei angefragten Elektrozähler-Hersteller antworteten mit einem Angebot zu den ihnen angegebenen Messstellen. Zum Datenerfassungssystem konnte lediglich von einem Anbieter telefonisch eine Kostenschätzung abgeholt werden. Es wurde den Herstellern nahegelegt, bei den Offerten Einzelpreise ohne jegliche Hochschulrabatte o.ä. anzugeben. Ein Hersteller gewährte trotzdem einen Mengenrabatt, welcher rechnerisch rückgängig gemacht wurde. Die erstellten Kostenfunktionen widerspiegeln dementsprechend den Aufwand, welche die Messstellen beim Einzeleinkauf verursachen.

### 5.2.3 Nachrüstaufwand einzelner Komponenten und Kostenfunktionen

#### Wärmezähler

Erste Funktionsberechnungen zeigten schnell, dass die Kosten von Wärmezählern in Grossanlagen die Berechnungsfunktion stark beeinflussen. Da nur drei solcher Kälteanlagen in der

Liste sind, wurde entschieden, die Kostenfunktion bis zu einer Kälteleistung von 1 MW zu definieren. Abbildung 5.2 zeigt die mittleren Kosten für Wärmezähler aus Herstellerangeboten (y-Achse) in Funktion der Kälteleistung (x-Achse). Ebenso ist die ermittelte Kostenfunktion sowie die Streuung der Kosten nach 4.2.4 dargestellt.



**Abbildung 5.2:** Kosten für Wärmezähler in Funktion der Kälteleistung des Systems.

Die Kosten für einen nachzurüstenden Wärmezähler  $K_{WZ,HW}$  werden wie folgt berechnet:

$$K_{WZ,HW} = 2.9114 \dot{Q}_0 + 2632.8 \quad (5.1)$$

Wobei  $\dot{Q}_0$  die Anlagen-Kälteleistung und  $K_{WZ,HW}$  die Kosten für den Wärmezähler darstellt. Es ist zu erwähnen, dass die Kostenfunktion nur den Preis für Durchflusssensor, Temperaturfühler, Rechenwerk und Inbetriebnahme miteinbezieht. Die Installation und Verkabelung wurde separat berechnet.

Die Kostenfunktion wurde stichprobenartig an diversen Wärmezähler-Messstellen mit den vorliegenden Mittelwerten aus den Offerten verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Funktion zwischen 2.5 % und 23.2 % von den effektiven Angeboten abweichen kann. Es gibt im untersuchten Portfolio drei Anlagen, welche eine Kälteleistung über 1 MW aufweisen. Von diesen fehlte nur bei Anlage Nr. 4 ein Wärmezähler, dessen Preis durch drei Herstellerangebote direkt bestimmt werden konnte.

Jeder der angefragten Hersteller besagte, dass die Aufwandsberechnung stark von der Bauweise der jeweiligen Anlage abhängt. Dementsprechend war der Installationsaufwand schwer



abzuschätzen. Es wurde versucht, mittels Stundenabschätzung einen durchschnittlichen Kostensatz zu ermitteln. Auch kam von einem Hersteller die Aussage, dass sich aus mehrjähriger Erfahrung zeige, dass sich die Installationskosten zwischen Anschaffungspreis des Wärmezählers und dem doppelten bewegen. Letztere Aussage wurde zur Schätzung verwendet und es gilt für die Wärmezähler-Installationskosten  $K_{WZ,Inst}$  folgender Zusammenhang:

$$K_{WZ,Inst} = 1.5 K_{WZ,HW} \quad (5.2)$$

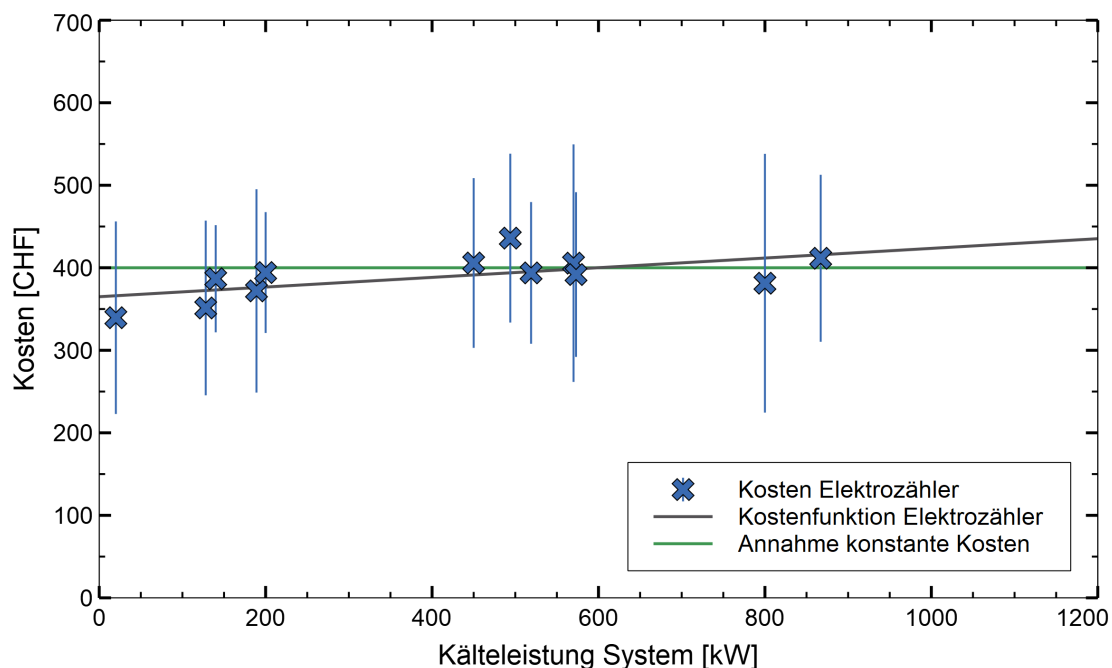
Im Gegensatz zu einem fixen Betrag werden durch diese Kostenfunktion die Mehrkosten bei Grossanlagen berücksichtigt. Es wurde 1.5 angenommen, um einen möglichst repräsentativen Mittelwert für jede Anlage zu verwenden. Zur Berechnung der kompletten Nachrüstkosten für eine Wärmezähler-Messstelle  $K_{WZ}$  wurde somit folgende Gleichung ermittelt:

$$K_{WZ} = K_{WZ,HW} + 1.5 K_{WZ,HW} = 7.2785 \dot{Q}_0 + 6582 \quad (5.3)$$

### Elektrozähler

Wie bei den Wärmezählern wurden auch für die Elektrozähler die Kosten der Messmittel pro Kälteleistung gemittelt sowie die Streuung nach Gleichung 4.1 berechnet. Aus den Telefonaten hat sich ergeben, dass die Kosten für Elektrozähler, im Vergleich zu den Wärmezählern, minimal von der Anlagenkälteleistung abhängen. Der entscheidende Faktor liegt bei der vorliegenden Stromstärke. Ab einer gewissen Grösse müssen Stromwandler verbaut werden, welche die Kosten verdoppeln können. Da im Anlagenportfolio jedoch nur wenige Stromzähler ohne Wandler verbaut werden, sind diese nicht von grossem Interesse. Zudem bedeutet die genannte Kostenverdoppelung in absoluten Zahlen eine Erhöhung von rund CHF 200.- auf CHF 400.-. Angesichts der deutlich höheren Kosten für Wärmezähler ist der Fehler bei Elektrozählern ohne Stromwandler vernachlässigbar klein.

Abbildung 5.3 zeigt die mittleren Kosten für Elektrozähler aus Herstellerangeboten (y-Achse) in Funktion der Kälteleistung (x-Achse). Anhand der ermittelten Kostenfunktion ist deutlich zu erkennen, dass die Preise für Elektrozähler über dem gesamten Kälteleistungsbereich bei nahezu konstant sind. Aufgrund der verhältnismässig kleinen Kostenunterschiede entlang der Funktion wurde entschieden, für jeden Elektrozähler konstante Anschaffungskosten von CHF 400.- anzunehmen.



**Abbildung 5.3:** Kosten für Elektroähler in Funktion der Kälteleistung des Systems.

Ebenso war der Aufwand zur Installation nicht einfach abzuschätzen, auch wenn etwas einfacher als bei den Wärmehählern. Dies bestätigten ebenfalls die Aussagen der Messmittelhersteller. An einer Anlage kann das Verkabeln nur eine Stunde dauern, bei anderen hingegen einen ganzen Arbeitstag in Anspruch nehmen. Einen Arbeitsaufwand von 5 Stunden wurde als gute Schätzung für die durchschnittliche Installationsdauer angesehen. Bei einem Stundensatz von CHF 120.- entspräche dies Installationskosten von CHF 600.- pro Elektroähler. Die Nachrüstkosten für Elektroähler  $K_{EZ}$  sind somit folgend definiert:

$$K_{EZ} = 1000 \quad (5.4)$$

Dies deckt sich mit der Aussage eines Herstellers. Zudem wird diese Angabe von einer Schätzung aus einem Vorprojekt [2] gestützt, wo für Beschaffung und Installation insgesamt CHF 960.- veranschlagt wurden.

### Temperaturfühler

Für die Nachrüstung von Temperaturfühlern wurden aus Erfahrung CHF 250.- für die Beschaffung und ca. eine Stunde Montage angesetzt:

$$K_{TF} = 250 \quad (5.5)$$



### Datenerfassung

Bei der Datenerfassung verhalten sich die Kosten ähnlich den Elektrozählern konstant über den gesamten Leistungsbereich. Die vorliegenden Informationen zeigen, dass erst ab einer grossen Anzahl von Datenpunkten (Grössenordnung mehr als 2'000 Messspunkte) die Kosten für ein Datenerfassungssystem merklich ansteigen. Keine der untersuchten Anlagen würde mehr als 100 Datenpunkte benötigen, auch wenn die grösste Anlage komplett uninstrumentiert wäre. Die Kosten für ein Datenerfassungssystem  $K_{DE}$  berechnen sich wie folgt:

$$K_{DE} = K_{DE, Sys} + K_{DE, Sp} = 6000 + 2000 = 8000 \quad (5.6)$$

Es sind die Initialkosten für ein Datenerfassungssystem  $K_{DE, Sys}$  (inkl. Programmierung, etc.) und die Kosten für eine Speicherinfrastruktur  $K_{DE, Sp}$  vor Ort berücksichtigt. Diese Kosten gelten für die Ausführung der Datenerfassung nach den genannten Annahmen sowie der lokalen Speicherung von Daten. Dies wurde so definiert, da beim Mieten von externen Servern über die durchschnittliche Amortisationszeit von 14 Jahren einer Kälteanlage erhebliche Summen entstehen würden. Eine externe Datenspeicherung sollte schlussendlich auch nicht nötig sein, denn im Endstadium der Entwicklung sollte das Bewertungssystem vor Ort angewendet werden.

#### 5.2.4 Nachrüstaufwand der Anlagen

Anhand Tabelle 5.2 und den ermittelten Kostenangaben / -funktionen wurde für jede Anlage eine Kostenschätzung durchgeführt. Oft ist zu erkennen, dass eine Wärmezähler-Messstelle fehlt, aber die Temperatursensoren vorhanden sind (siehe z.B. Tab. 5.2, Anlage Nr. 1:  $\dot{Q}_0$ ,  $T_{0, VL}$  und  $T_{0, RL}$ ). Dabei handelt es sich um Fälle, bei welchen der Durchflusssensor fehlt und somit die Wärmemenge nicht bestimmt werden kann. Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, würden nach Kostenberechnung solche Messstellen komplett durch neue ersetzt werden. Diese Überinstrumentierung hat kostentechnisch kaum Einfluss, es handelt sich um mögliche Einsparungen von CHF 500.- pro Messstelle. Bei der Kostenschätzung wurde der Preis für fehlende Elektrozähler, Wärmezähler und Temperaturfühler eingerechnet, wobei sich der totale Nachrüstaufwand wie folgt definiert:

$$K_{tot} = \sum_i K_{WZ} + \sum_j K_{EZ} + \sum_k K_{TF} \quad (5.7)$$

Die Datenerfassung gilt als Stand der Technik und könnte bei den meisten Anlagen vereinfacht mit Hilfe des Leitsystems realisiert werden. Die Kostenschätzung sollte den Aufwand für essentielle Nachrüstungen zur Durchführung des Exergieansatzes abbilden und dementsprechend wurden die Kosten für die Datenerfassung  $K_{DE}$  nicht inkludiert.

Anlage Nr.	$n_{KM}$	$Q_{0, Sys}$ [kW]	Summe Nachrüstaufwand [CHF]
1	1	200	21'075
2	1	128	20'027
3	5	4750	2'000
4	4	5252	27'579
5	2	573	33'101
6	2	449	23'477
7	1	189	20'915
8	2	519	24'889
9	2	570	13'731
10	2	988	16'773
11	2	1320	4'000
12	4	867	-
13	1	158	19'464
14	1	214	21'819
15	2	141	19'013
16	3	190	19'042
17	2	612	16'436
18	2	900	26'990
19	1	20	24'183
20	1	250	4'000
21	1	25	5'000
22	1	50	18'892
23	2	800	27'298
24	3	288	26'541

**Tabelle 5.3:** Auflistung des geschätzten Nachrüstaufwandes für jede untersuchte Kälteanlage.

Während der Schätzung ist aufgefallen, dass bei Anlagen mit mehreren Kältemaschinen die Kosten für nachzurüstende Wärmezähler schnell ansteigen. Um eine breite Anwendbarkeit des Beurteilungssystems zu gewährleisten, wurde entschieden, die Kälteleistung mehrerer Kältemaschinen jeweils an der Sammelleitung zu messen. Die Anwendbarkeit des Bewertungssystems ist somit immer noch gewährleistet und die Kosten für nachzurüstende Wärmezähler werden reduziert, wobei jedoch eine Aussage zum Betrieb der einzelnen Kältemaschinen nicht mehr möglich ist. Da in den meisten Fällen die gleichen Kältemaschinen mehrfach verbaut sind und diese ein relativ identisches Verhalten aufweisen (Redundanzthematik), wird der Einfluss dieser Vereinfachung als vernachlässigbar klein angesehen.

Unter Berücksichtigung der erkannten Optimierung, ist in Tabelle 5.3 der geschätzte Nachrüstaufwand für jede untersuchte Anlage aufgelistet (siehe auch Abschnitt 5.2.6). Es ist zu sehen, dass bei Anlage Nr. 12 keine Kosten anfallen, weil keine Messmittel nachgerüstet werden müssen. Währenddessen entstehen bei Anlage Nr. 5 mit CHF 33'101.- die höchsten Nachrüstkosten. Dies zeigt, dass je nach Instrumentierungsstand und Art der fehlenden Messmittel sehr unterschiedliche Auslagen entstehen können. Betrachtet man Anlagen mit Baujahr 2016 und neuer, so betragen die mittleren Nachrüstkosten ca. CHF 14'300.-. Wie bereits erwähnt sind Kälteanlagen im Energie-Contracting am besten instrumentiert, wobei bei diesen der Nachrüstaufwand im Mittel bei ca. CHF 9'500.- liegt. Bei Anlagen welche gemäss dem ak-

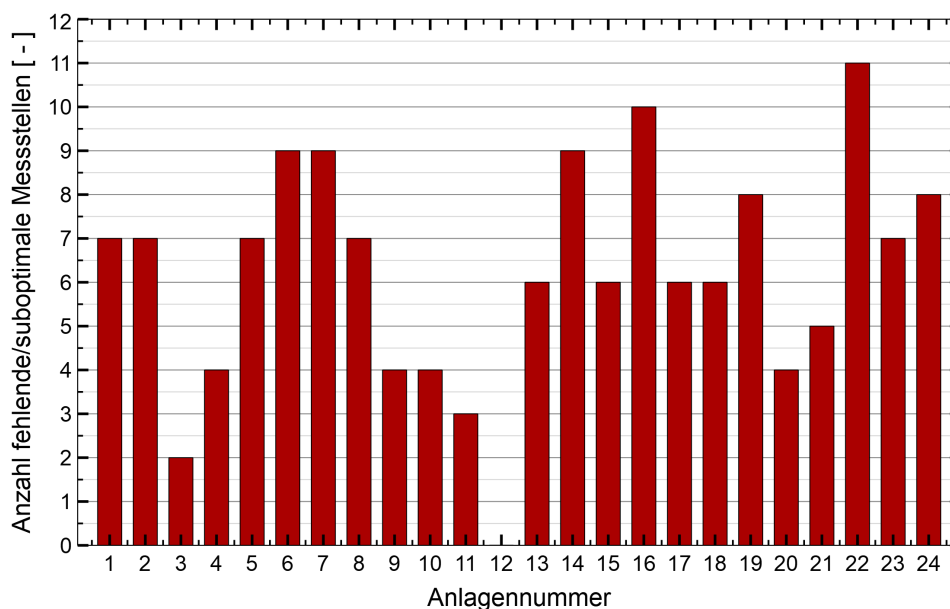
tuellen Stand der Technik ausgestattet sind, d.h. die elektrische Leistung der Verdichter und die Wärmeleistungen werden aufgezeichnet, betragen die mittleren Nachrüstkosten ca. CHF 7'700.-. Zudem kann festgehalten werden, dass bei Planern eine unterschiedliche Priorisierung der erfassten Messgrößen besteht. Würde man sich hier auf eine Standardinstrumentierung einigen, so könnten die Nachrüstkosten um ca. CHF 5'500.- reduziert werden. Ohne Berücksichtigung dieser Detailanalyse beträgt der Mittelwert aller Nachrüstaufwände ca. CHF 18'100.-. Vor allem ältere Anlagen weisen eine begrenzte Instrumentierung auf und es ist davon auszugehen, dass Neuanlagen, auch im Zusammenhang mit der Thematik Industrie 4.0, in Zukunft deutlich besser instrumentiert werden.

### 5.2.5 Best- und Worst-Case nach Instrumentierung

In Abbildung 5.4 ist die Anzahl fehlender oder suboptimaler Messstellen (y-Achse) für jede Anlage (x-Achse) dargestellt. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Anlage Nr. 12 ist nach Instrumentierung der Best-Case
- Anlage Nr. 22 ist nach Instrumentierung der Worst-Case

Anlage Nr. 12 weist keine fehlende Messstelle auf, wobei Anlage Nr. 3 deren zwei aufweist, gefolgt von Anlage Nr. 11 mit drei und Anlage Nr. 4, 9, 10 sowie 20 mit vier fehlenden Messmitteln. Die Hälfte der untersuchten Anlagen weisen 7 oder mehr fehlende Messstellen auf.

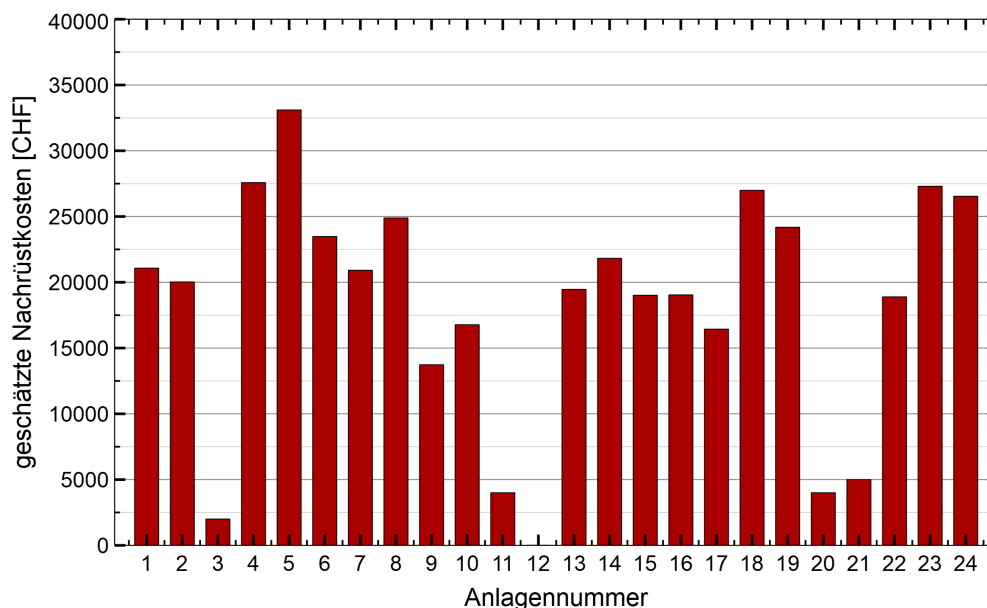


**Abbildung 5.4:** Fehlende / Suboptimale Messstellen pro untersuchter Anlage.

### 5.2.6 Best- und Worst-Case nach Nachrüstaufwand

In Abbildung 5.5 ist der geschätzte Nachrüstaufwand (y-Achse) für jede Anlage (x-Achse) dargestellt. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Anlage Nr. 12 ist nach geschätztem Nachrüstaufwand der Best-Case
- Anlage Nr. 5 ist nach geschätztem Nachrüstaufwand der Worst-Case



**Abbildung 5.5:** Geschätzter Nachrüstaufwand für jede untersuchte Anlage.

Auch hier ist der in Kapitel 4.2.1 genannte Effekt zu erkennen. Anlage Nr. 22 ist nach Instrumentierung der Worst-Case. Da bei ihr aber nur ein Wärmezähler verbaut ist, fallen die Kosten zur Nachrüstung tiefer aus als z.B. bei Anlage Nr. 5. Anlage Nr. 3 belegt nach Anlage Nr. 12 den zweiten Platz und hat wie die Anlagen Nr. 11, 20 und 21 tiefere Nachrüstkosten als CHF 5'000.-. Rund 12 Anlagen weisen Nachrüstkosten über CHF 20'000.- auf (siehe auch Abschnitt 5.2.4).

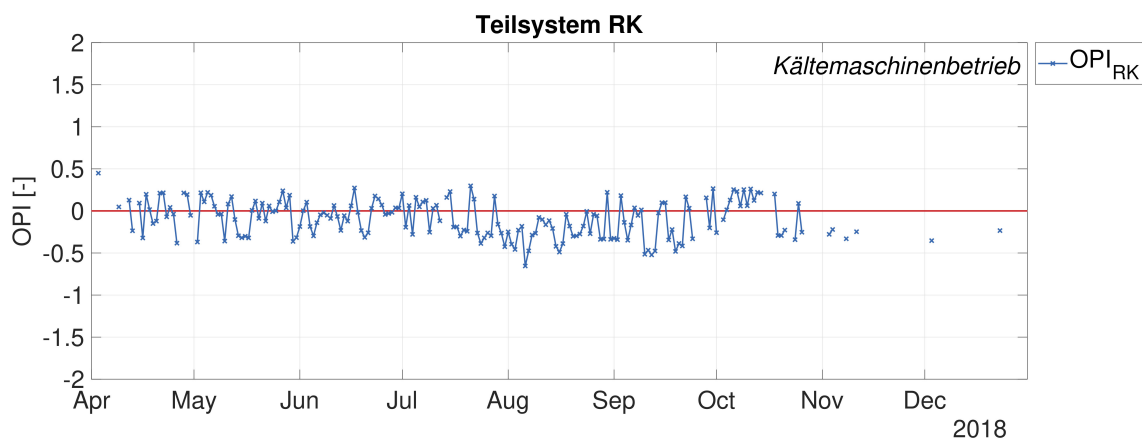
### 5.3 Proof of Concept

Wie in Abschnitt 4.3 erwähnt, wurde die Klimakälteanlage Nr. 3 unter anderem aufgrund ihrer umfassenden Datenspeicherung für die Auswertung ausgewählt. Gemäss den ausgewerteten Daten war der Kältemaschinenbetrieb hauptsächlich von April bis Oktober, mit vereinzelt Tagen im November und Dezember. Im Gegensatz dazu lief die Anlage im Freecoolingbetrieb vor allem von Januar bis April und November sowie Dezember. Zum besseren Verständnis der folgenden Resultate sei erneut auf die Prinzipschemen der Klimakälteanlage verwiesen (siehe Abb. 3.2 und 3.3), welche den Exergietransfer und die Einteilung in die verschiedenen Teilsysteme aufzeigen.

### 5.3.1 Kältemaschinenbetrieb

#### Teilsystem Rückkühlung

Abbildung 5.6 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Das Teilsystem weist einen mittleren OPI von  $-0.09$  auf,

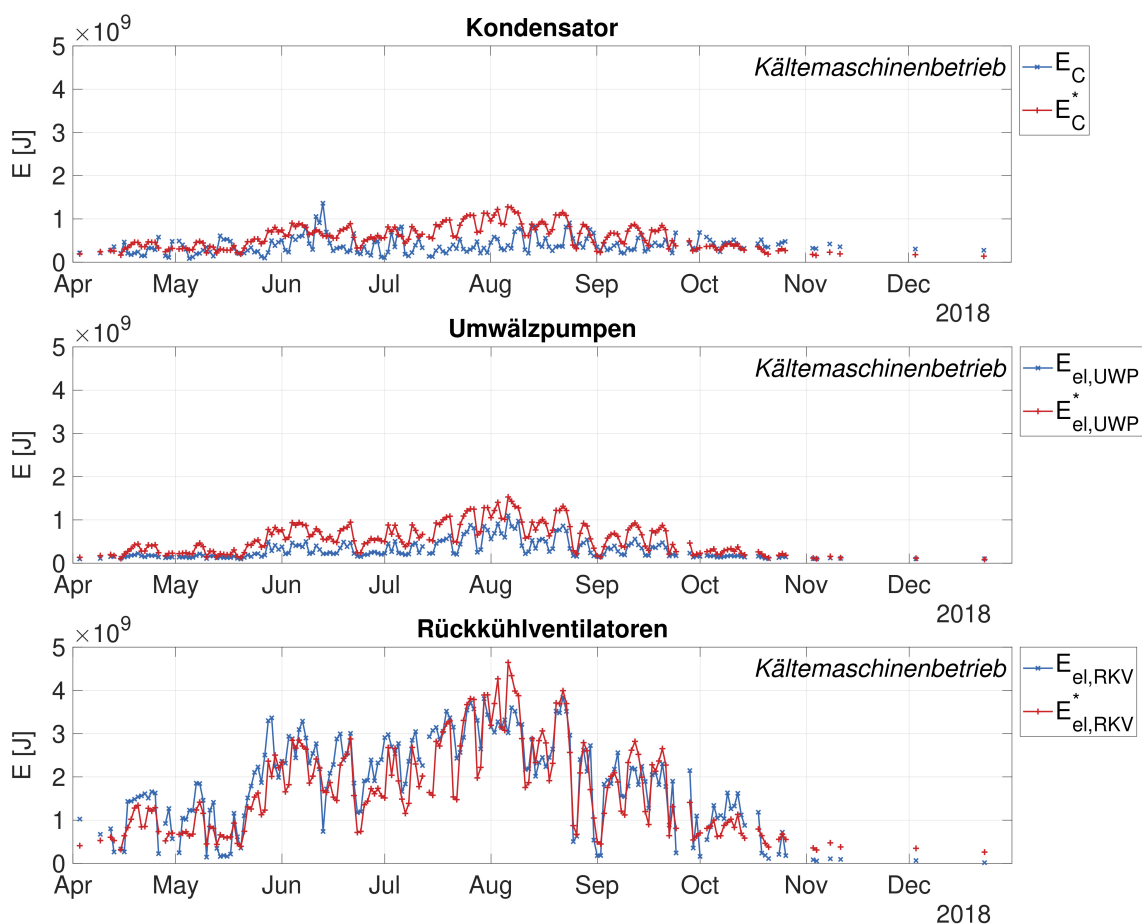


**Abbildung 5.6:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (RK) im Kältemaschinenbetrieb.

wobei dieser zwischen  $-0.65$  und  $0.45$  schwankt. Der  $OPI_{RK}$  liegt im untersuchten Zeitraum zu 61 und 77 % unterhalb von 0 bzw. 0.1 und das Teilsystem erfüllt dementsprechend grösstenteils die technischen Anforderungen. In den Monaten April, Mai und Oktober ist die Kennzahl meistens grösser als 0 und es besteht Optimierungspotential. Ein möglicher Grund für die reduzierte Performance der Rückkühlung könnte eine erhöhte Temperatur im Rückkühlkreislauf sein, hervorgerufen durch einen eingeschränkten Wärmeübergang im Wärmetauscher (ungünstige Umgebungsbedingungen am Ventilator, z.B. Rezirkulation der Luft am Wärmetauschereintritt). Auch eine Auslegung der Rückkühlventilatoren für tiefere Temperaturen könnte ein möglicher Grund sein, wobei dann die benötigte elektrische Leistung an heissen Tagen höher ausfällt, was sich wiederum in der Kennzahl widerspiegelt. Fouling im Wärmetauscher kann als Grund ausgeschlossen werden, da sonst die Kennzahl generell höher ausfallen würde.

Diese Zusammenhänge sind auch bei den exergetischen Aufwänden des Teilsystems Rückkühlung (siehe Abb. 5.7) ersichtlich. So fällt auf, dass die effektiven Exergien des Kondensators  $E_C$  und der Umwälzpumpen  $E_{el,UWP}$  grösstenteils tiefer liegen als die Referenz  $E_C^*$  bzw.  $E_{el,UWP}^*$ , was für den Betrieb der Kälteanlage vorteilhaft ist. Ausserdem sind die Exergien der Rückkühlventilatoren  $E_{el,RKV}$  und  $E_{el,RKV}^*$  bis zu Faktor 4.5 grösser als jene des Kondensators und der Umwälzpumpen. Dies zeigt, dass die elektrische Exergie der Rückkühlventilatoren einen massgeblichen Einfluss auf die Kennzahl hat. Auch wenn der Kondensator und die Umwälzpumpen gemäss Norm betrieben werden, so kann der OPI vereinzelt trotzdem grösser als 0 ausfallen. Zudem ist wichtig zu erkennen, dass in der exergetischen Betrachtung die elektrische Leistung im Vergleich zur thermischen Exergie eine grosse Rolle spielt, wobei sie

bei der energetischen Betrachtung nur einen Bruchteil der thermischen Leistung ausmacht.



**Abbildung 5.7:** Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Rückkühlung (RK) im Kältemaschinenbetrieb.

Da die Nebenaggregate der untersuchten Klimakälteanlage im Kältemaschinenbetrieb die technischen Mindestanforderungen weitgehend erfüllen, können neue Referenzwerte für die Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktoren (ETV) zur Berechnung der Referenzexergien bestimmt werden. Hierfür wird das tägliche Verhältnis der Rückkühlleistung zum elektrischen Leistungsbedarf der Rückkühlventilatoren bzw. den Umwälzpumpen gebildet und über den untersuchten Zeitraum gemittelt.

ETV	Wert nach SIA 382/1	Wert nach Anlagenauswertung
Rückkühlventilator $f_{el,th,RKV}$	$\geq 28$ ( $\approx 3.5\%$ von $Q_C$ )	$\geq 35$ ( $\approx 2.8\%$ von $Q_C$ )
Umwälzpumpe $f_{el,th,UWP}$	$\geq 85$ ( $\approx 1.2\%$ von $Q_C$ )	$\geq 158$ ( $\approx 0.6\%$ von $Q_C$ )

**Tabelle 5.4:** Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktoren für Rückkühlventilatoren und Umwälzpumpen im Teilsystem RK gemäss SIA 382/1 [8] und Berechnungen aus den vorliegenden Daten.

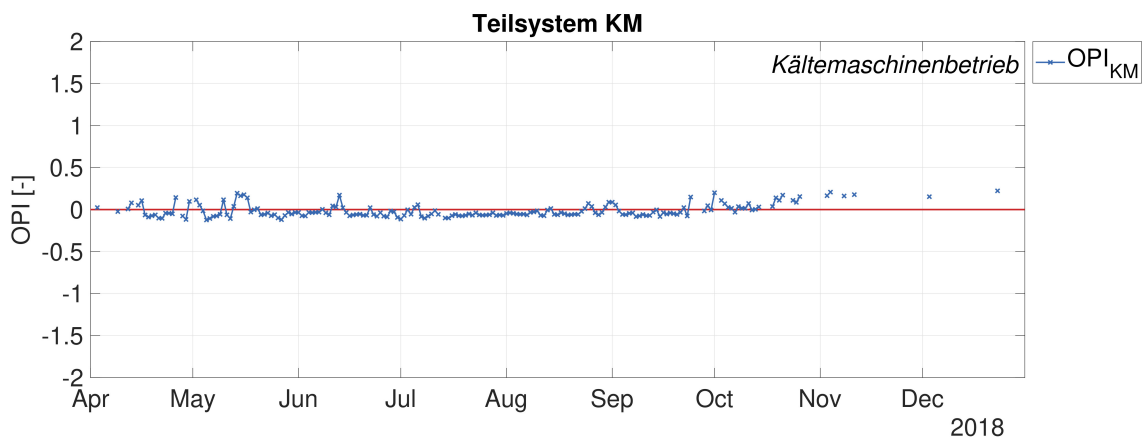
Tabelle 5.4 zeigt die in der bestehenden Analyse genutzten Referenzwerte nach SIA 382/1



[8] sowie die neu berechneten ETV gemäss der Anlagenauswertung. Für zukünftige Untersuchungen kann auf diese zurückgegriffen werden, womit eine erste Abstufung der Auswertung realisierbar ist.

### Teilsystem Kältemaschine

Abbildung 5.8 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältemaschine (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Die Kennzahl weist von Mai bis Oktober näherungsweise



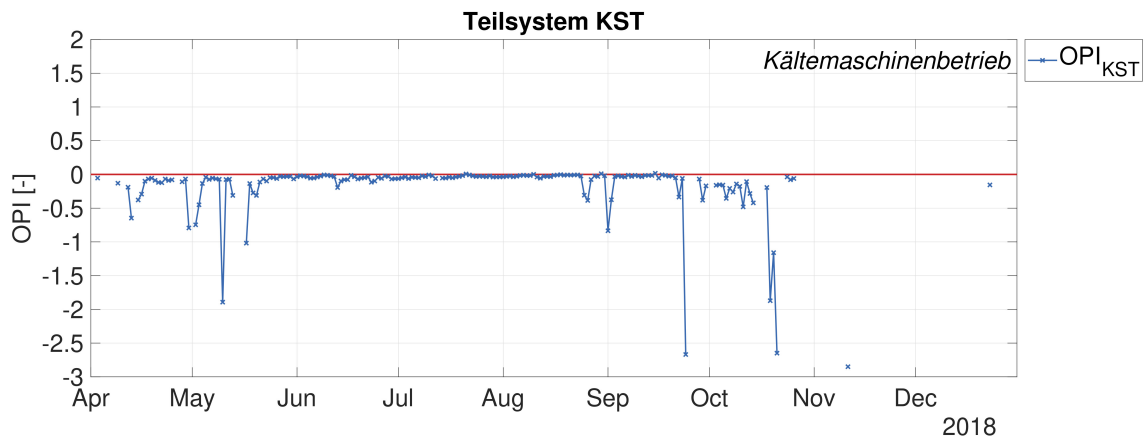
**Abbildung 5.8:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältemaschine (KM) im Kältemaschinenbetrieb.

se ein stationäres Verhalten auf und ist zu ca. 88 % des untersuchten Zeitraumes unterhalb von 0.1 mit einem Mittelwert von ca.  $-0.01$ . Der Minimalwert von  $-0.12$  wird am 5. Mai 2018 erreicht, wobei der Maximalwert von  $0.22$  am 23. Dezember 2018 vorliegt. Die technischen Anforderungen werden prinzipiell erfüllt, jedoch sind vereinzelt Ausreisser vorhanden. Diese sollten nicht zu streng gewichtet werden, denn einzig ein konstant erhöhter Wert oder eine kontinuierliche Verschlechterung des OPI weist auf einen möglichen Fehlbetrieb der Kälteanlage hin. Dies ist z.B. in den Monaten Oktober bis Dezember zu erkennen, wobei ein kontinuierlicher Anstieg der Kennzahl zu verzeichnen ist. In diesem Fall widerspiegelt dies ein mögliches Potential die Anlage mit Freecooling zu betreiben. Dies macht auch insofern Sinn, da die untersuchte Anlage in dem genannten Zeitraum vor allem Freecoolingbetrieb aufweist (siehe Abschnitt 5.3.2).

### Teilsystem Kältespeicherung & Transport

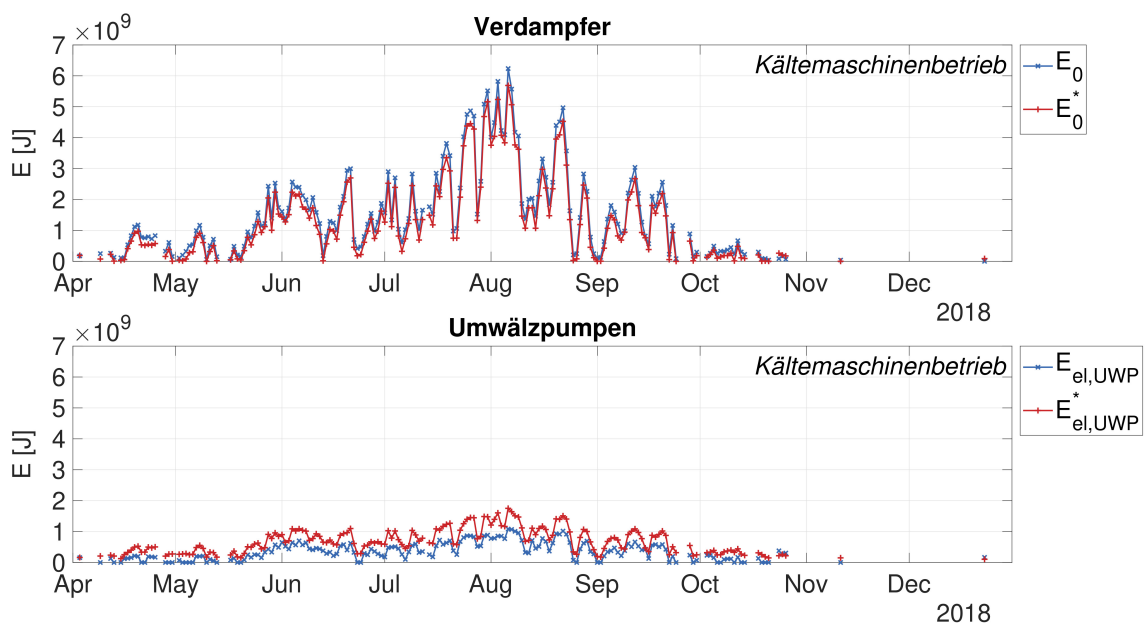
Abbildung 5.9 zeigt vom Teilsystem Kältespeicherung & -transport den Optimierungspotentialindex (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Im Vergleich zu den zwei vorhergehenden ist das vorliegende Teilsystem an 9 Tagen nicht bewertbar, da der  $OPI_{KST}$  überproportional klein wird. Grund hierfür ist, dass an jenen Tagen das Temperaturniveau am Verdampfer  $T_0$  grösstenteils höher liegt wie jenes der Umgebung  $T_U$ . Somit ändert sich die Transferrichtung der Exergie (vgl. Abschnitt 3.3.3), was für einen thermodynamischen ungünstigen Betrieb spricht. Dies ist hauptsächlich in den Monaten November und Dezember der Fall, wobei dies

als Potential für Freecooling interpretiert werden kann. Ansonsten ist der  $OPI_{KST}$  über den gesamten Zeitraum zu 98 % kleiner als 0 und weist einen Mittelwert von  $-0.16$  auf. Es liegt folglich kein Optimierungspotential vor.



**Abbildung 5.9:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältespeicherung & -transport (KST) im Kältemaschinenbetrieb.

Abbildung 5.10 zeigt die Tagessumme der exergetischen Aufwände (y-Achse) der verschiedenen Komponenten im Teilsystem KST in Funktion des Datums (x-Achse). Da die Exergien in den Monaten Mai und Oktober nahe bei 0 liegen, weist die Kennzahl in diesem Zeitraum auch grössere Schwankungen auf. Ähnlich wie im Teilsystem RK fällt die effektive Exergie der Umwälzpumpen  $E_{el,UWP}$  kleiner aus als die Referenz  $E_{el,UWP}^*$ , was sich in einem negativen OPI widerspiegelt.



**Abbildung 5.10:** Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Kältespeicherung & -transport (KST) im Kältemaschinenbetrieb.

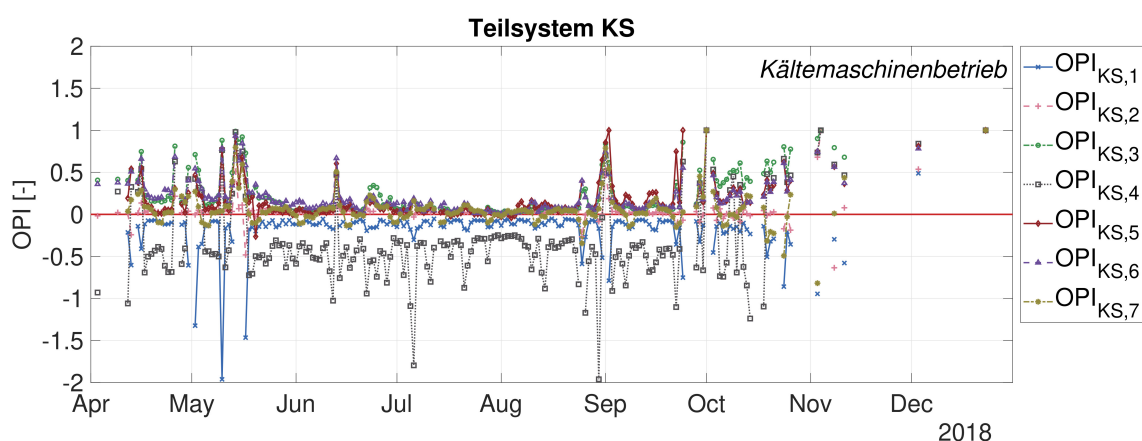
Dementsprechend kann auch hier ein weiterer Referenzwert für den ETV der Umwälzpumpen gebildet werden. Tabelle 5.5 zeigt den in der bestehenden Analyse genutzten Referenzwert nach SIA 382/1 [8] sowie der neu berechnete ETV gemäss der Anlagenauswertung.

ETV		Wert nach SIA 382/1	Wert nach Anlagenauswertung
Umwälzpumpe	$f_{el,th,UWP}$	$\geq 65$ ( $\approx 1.5\%$ von $Q_0$ )	$\geq 170$ ( $\approx 0.58\%$ von $Q_0$ )

**Tabelle 5.5:** Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor für Umwälzpumpen im Teilsystem KST gemäss SIA 382/1 [8] und Berechnungen aus den vorliegenden Daten.

### Teilsystem Kühlstelle

Abbildung 5.9 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Alle Kühlstellen haben gemäss Auslegung eine Referenz-



**Abbildung 5.11:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (KS) im Kältemaschinenbetrieb.

temperatur der Kälteverteilung von  $\approx 13$  °C. Kühlstelle 1 war an sechs und Kühlstelle 4 sowie 7 an je einem Tag nicht bewertbar. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Kühlstellen 1 und 4 mit einem mittleren OPI von  $-0.18$  bzw.  $-0.32$  gemäss den technischen Normen in Betrieb sind. Die eher starken Schwankungen beim  $OPI_{KS,4}$  lassen vermuten, dass die Kühlstelle 4 sehr nahe an der Umgebungstemperatur arbeitet und die Kennzahl daher stark auf Änderungen dieser reagiert. Die Kühlstellen 2 und 7 weisen einen Mittelwert des OPI von  $0.04$  bzw.  $0.06$  auf. Dementsprechend ist das Optimierungspotential gering. Vereinzelt Ausreisser, z.B. Mitte Mai oder Anfang September sind erneut nicht zu streng zu bewerten.

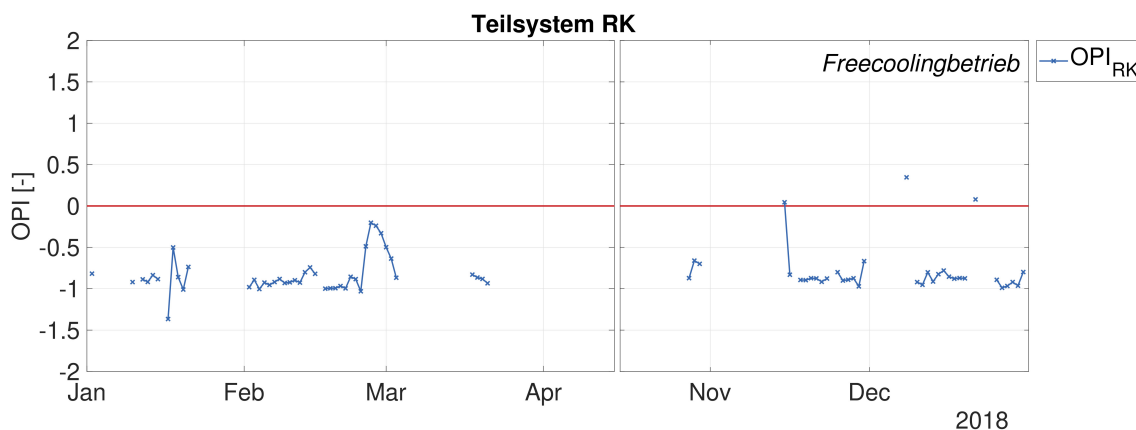
Im Gegensatz dazu stehen die restlichen Kühlstellen 3, 5 und 6. Kühlstelle 3 schneidet am schlechtesten ab mit einem mittleren  $OPI_{KS,3} = 0.23$ , gefolgt von Kühlstelle 6 und 5 mit einem mittleren  $OPI_{KS,6} = 0.20$  bzw.  $OPI_{KS,5} = 0.17$ . Der Optimierungspotentialindex jeder dieser Teilsysteme ist für mindestens 64 % des Zeitraumes grösser 0.1 und somit besteht Optimierungspotential, wobei abschliessend kein möglicher Grund für die schlechte Performan-

ce eruiert werden kann. Ein Defekt im Wärmetauscher der Kühlstellen kann ausgeschlossen werden, da diese in den Monaten Juni bis September näherungsweise gemäss Referenz arbeiten. Ein deutlicher Anstieg der Kennzahlen ist in den Monaten Mai sowie Oktober zu erkennen, was auch hier, ähnlich zum Teilsystem KM und KST, als mögliches Potential für Freecooling interpretiert werden kann. Die Kühlstellen 3, 5 und 6 arbeiten zudem, verglichen zur Referenz, auf einem tieferen Temperaturniveau.

### 5.3.2 Freecoolingbetrieb

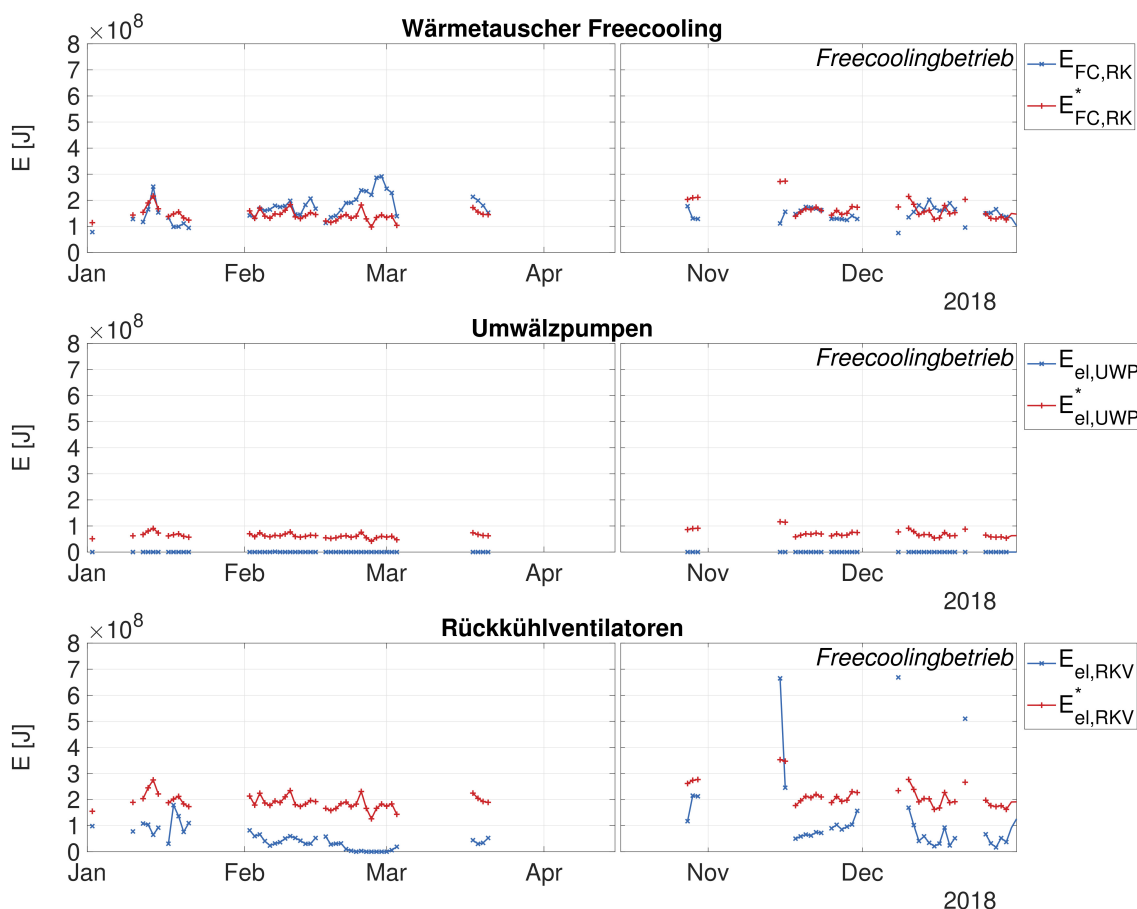
#### Teilsystem Rückkühlung

Abbildung 5.12 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Verglichen zum Kältemaschinenbetrieb liegt die Kennzahl grösstenteils unter 0, erreicht den Minimalwert von  $-1.36$  am 17. Januar 2018 und den Maximalwert von  $0.35$  am 8. Dezember 2018. Betrachtet man die Exergien im Teilsystem RK, so können die Gründe für das Verhalten der Kennzahl eruiert werden.



**Abbildung 5.12:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (RK) im Freecoolingbetrieb.

Abbildung 5.13 zeigt die Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem RK (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Die thermische Exergie des Freecoolingmoduls  $E_{FC,RK}$  entspricht mit ein paar Ausnahmen, z.B. Ende Februar, der Referenz  $E_{FC,RK}^*$ . Ähnlich zum Kältemaschinenbetrieb fällt die elektrische Exergie der Rückkühlventilatoren  $E_{el,RKV}$  im Verhältnis zu jener der Umwälzpumpen  $E_{el,UWP}$  grösser aus und hat einen massgeblichen Einfluss auf die Kennzahl. Der  $OPI_{RK}$  wird folglich an den Tagen grösser 0, an denen die Exergie der Rückkühlventilatoren höher liegt wie die Referenz, auch wenn die Umwälzpumpen und das Freecoolingmodul gemäss den technischen Anforderungen arbeiten. An diesen Tagen besteht Optimierungspotential, z.B. durch eine Reduktion der Lüfterdrehzahl. Denn wird die Rückkühlung mit grossen Ventilator Drehzahlen betrieben, so müsste sich dies in einer Reduktion von  $E_{FC,RK}$  auswirken damit der elektrische Mehraufwand kompensiert wird.

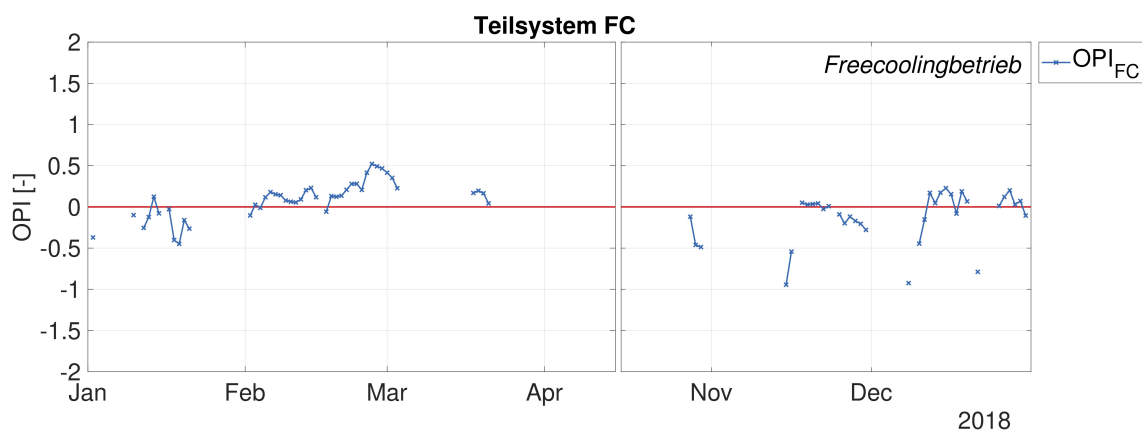


**Abbildung 5.13:** Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Rückkühlung (RK) im Freecoolingbetrieb.

Im Gegensatz dazu steht die elektrische Exergie der Umwälzpumpen. Da wie bereits erwähnt die elektrische Leistung der Winterpumpe nicht aufgezeichnet wird, ist kein effektiver exergetischer Aufwand  $E_{el,UWP}$  im Vergleich zur Referenz  $E_{el,UWP}^*$  vorhanden. Somit resultiert ein OPI kleiner 0 wenn gleichzeitig die Rückkühlventilatoren gemäss der technischen Norm arbeiten, was im untersuchten Zeitraum meistens der Fall ist. Der Mittelwert von  $OPI_{RK}$  beträgt  $-0.81$ , womit, mit Ausnahme der Tage mit erhöhtem Stromverbrauch der Rückkühlventilatoren, kein Optimierungspotential besteht.

### Teilsystem Freecooling

Abbildung 5.14 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Freecooling (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Das Teilsystem weist über den betrachteten Zeitraum einen mittleren  $OPI_{FC}$  von  $-0.01$  auf. Die Kennzahl schwankt von  $-0.95$  bis  $0.52$  und ist zu ca. 40 und 60 % kleiner 0 bzw. 0.1. Das Teilsystem FC arbeitet, mit Februar als Ausnahme, gemäss den technischen Anforderungen. Die erhöhte Kennzahl und das einhergehende Optimierungspotential in diesem Zeitraum kann aufgrund der vorliegenden Datengrundlage nicht abschliessend geklärt werden. Eine mögliche Ursache könnte der vorhandene Tem-

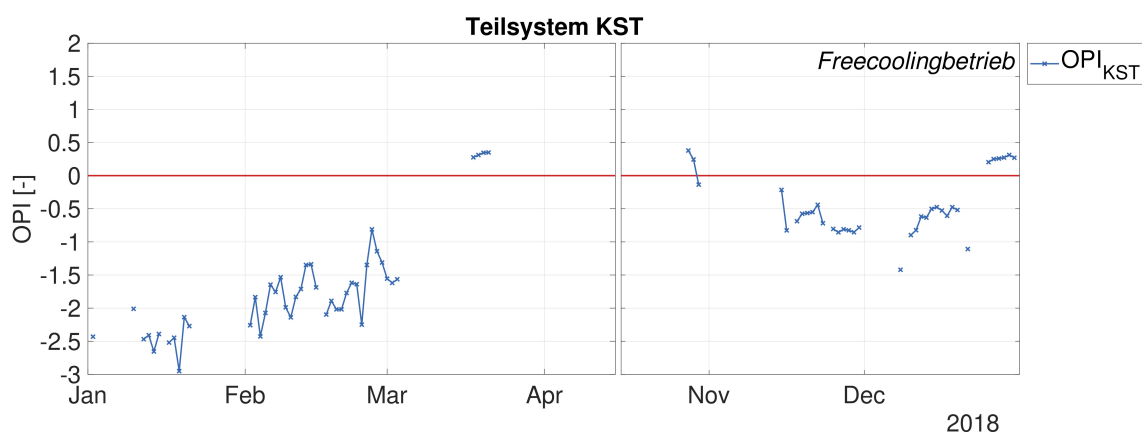


**Abbildung 5.14:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Freecooling (FC) im Freecoolingbetrieb.

peratureinbruch der Umgebung um ca. 5.5 K (Vergleich Mittelwert Januar zu Februar), bei gleichbleibender abzuführender Wärmemenge sein. Erneut ist ein Defekt des Wärmetauschers auszuschliessen, da das Teilsystem sonst gemäss den technischen Anforderungen arbeitet.

### Teilsystem Kältespeicherung & -transport

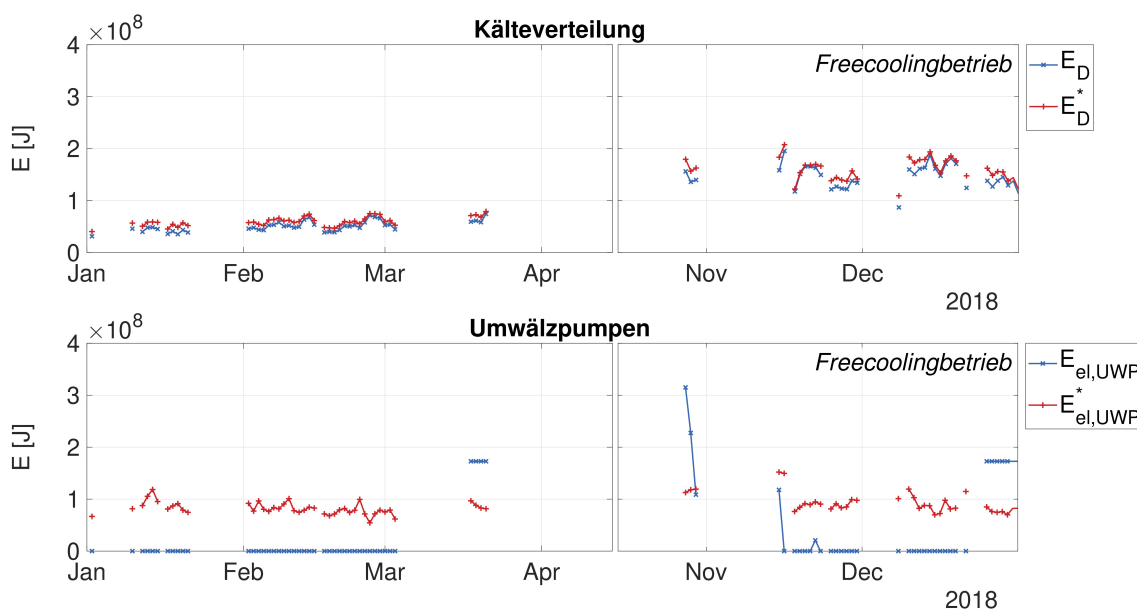
Abbildung 5.15 zeigt vom Teilsystem Kältespeicherung & -transport den Optimierungspotentialindex (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Der  $OPI_{KST}$  ist zu ca. 85 % kleiner 0 und beträgt im Mittel  $-1.16$ , womit das Optimierungspotential über den ganzen Zeitraum gering ausfällt.



**Abbildung 5.15:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältespeicherung & -transport (KST) im Freecoolingbetrieb.

Dieses Resultat ist jedoch mit Vorbehalt zu betrachten. Analysiert man die exergetischen Aufwände im Teilsystem (siehe Abb. 5.16), so ist der Grund für die gute Performance von Januar bis Mitte März ersichtlich. Da wie bereits erwähnt die elektrische Leistung der Winterpumpe nicht aufgezeichnet wird, ist kein exergetischer Aufwand der Umwälzpumpen  $E_{el,UWP}$  in diesem Zeitraum vorhanden, während ein Referenzaufwand  $E_{el,UWP}^*$  gemäss den Normen

vorliegt. Der  $OPI_{KST}$  wird dementsprechend klein. Es ist auch auffallend, dass sich  $E_{el,UWP}$  der zugeschalteten Umwälzpumpen im Monat März und Dezember stationär verhält. Hier könnte ein Fehler in der Datenerfassung vorliegen oder die gemessene elektrische Leistung ist so klein, sodass aufgrund eines definierten Schwellenwertes immer die gleiche Pumpenleistung aufgezeichnet wird. Der Betriebszustand der Umwälzpumpen und deren Einfluss auf die Performance der Anlage kann somit nur bedingt beurteilt werden.

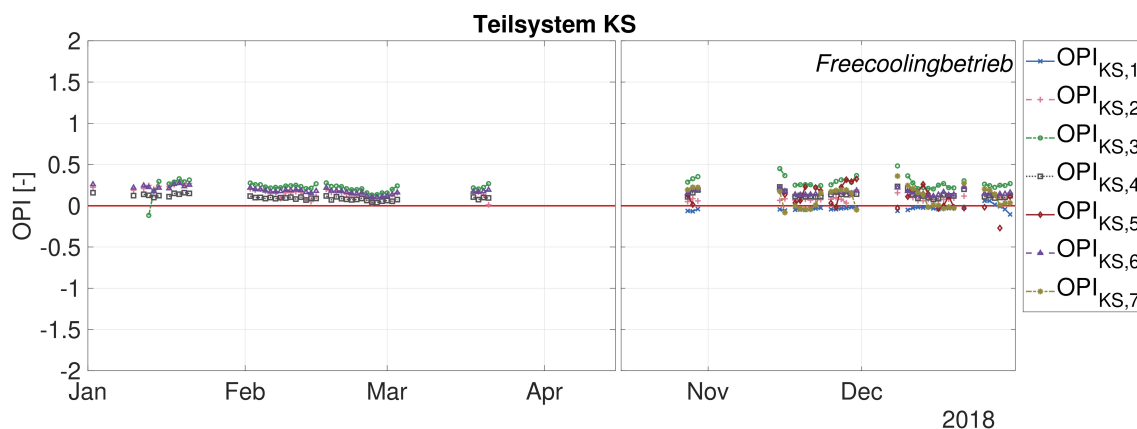


**Abbildung 5.16:** Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Kältespeicherung & -transport (KST) im Freecoolingbetrieb.

Auch ist ersichtlich, dass sich die Exergie der Kälteverteilung  $E_D$  gemäss den technischen Standards verhält, was wiederum für eine gute Betriebsweise des Teilsystems spricht. Die thermische sowie die elektrische Exergie weisen etwa die gleiche Grössenordnung auf (vgl. Teilsystem RK), was die Wichtigkeit eines optimierten Betriebs der Nebenaggregate aufzeigt, um eine gute Performance der Kälteanlage zu erreichen.

### Teilsystem Kühlstelle

Abbildung 5.9 zeigt den Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse). Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wurden die Kühlstellen 1, 5 und 7 erst im April bzw. Mai in Betrieb genommen. Die Kühlstelle 1 schneidet mit einem mittleren Optimierungspotentialindex von  $-0.03$  am besten ab und ist zu 91 % der Zeit kleiner 0. Gemäss der Definition der Kennzahl ist der effektive exergetische Nutzen grösser als die Referenz, was einen optimalen Betrieb darstellt. Die Kühlstellen 2, 4, 5 und 7 (mittlerer OPI von 0.13, 0.11, 0.11 und 0.10) arbeiten nahe der technischen Referenz, wobei die Kühlstellen 3 und 6 mit einem mittleren  $OPI_{KS,3} = 0.24$  bzw.  $OPI_{KS,6} = 0.17$  klar Optimierungspotential aufweisen. Die OPIs der genannten Kühlstellen sind alle mindestens zu ca. 71 und 54 % grösser 0 bzw. 0.1. Die Ursachen für die schlechte Performance der Kühlstellen kann nicht



**Abbildung 5.17:** Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (KS) im Freecoolingbetrieb.

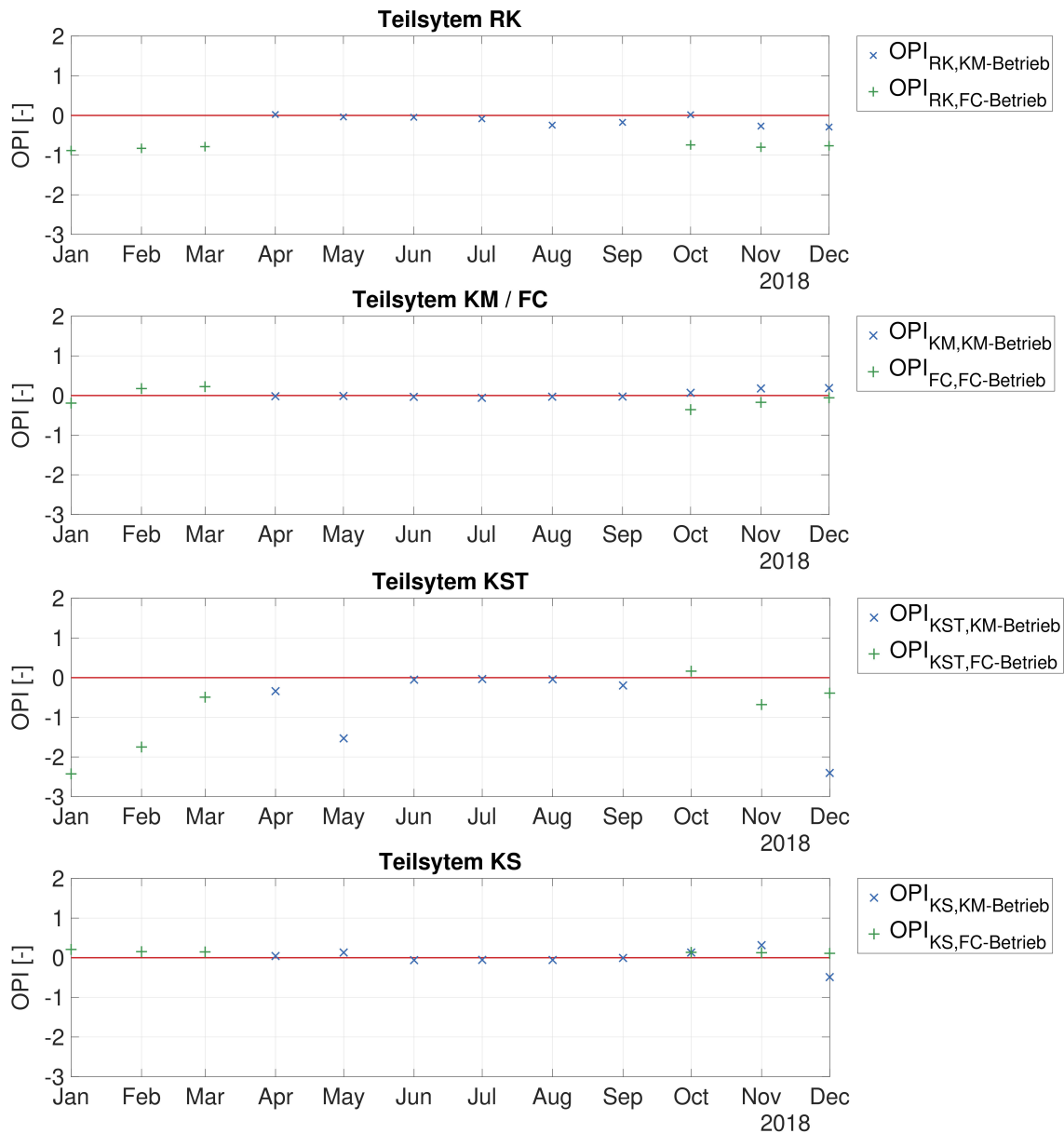
abschliessend geklärt werden. Eine möglicher Grund könnte eine ungünstige Wärmeübertragung sein, da alle Kühlstellen, mit Ausnahme Kühlstelle 1, eine tieferes Temperaturniveau wie jenes der Norm aufweisen und somit näher an der Umgebungstemperatur arbeiten. Dies resultiert in einem reduzierten exergetischen Nutzen im Vergleich zur Referenz, was in einer Kennzahl grösser 0 resultiert. Da in diesem Teilsystem im Freecoolingbetrieb der exergetische Nutzen anstatt des Aufwandes bilanziert wird (siehe Abschnitt 3.3.2), kann auch dies das Verhalten der Kennzahl beeinflussen. Dementsprechend sind hierzu weitere Abklärungen mit zusätzlichen Messdaten notwendig.

### 5.3.3 Vergleich Kältemaschinen- / Freecoolingbetrieb

Abbildung 5.18 zeigt zusammenfassend den monatlich gemittelten Optimierungspotentialindex (y-Achse) in Funktion des Datums (x-Achse) jedes Teilsystems im Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb. Zudem wurde im Teilsystem KS der OPI über jede Kühlstelle gemittelt. Da in den Monaten November und Dezember nur an sechs Tagen Kältemaschinenbetrieb vorlag, sind diese Werte unter Vorbehalt zu betrachten.

Das Teilsystem RK weist im Kältemaschinenbetrieb eine schlechtere Performance im Vergleich zum Freecoolingbetrieb auf, wobei die technischen Anforderungen mit Ausnahme April und Oktober erfüllt werden. Der höchste Wert des  $OPI_{RK,KM-Betrieb}$  wird im April mit 0.02 erreicht, wobei der  $OPI_{RK,FC-Betrieb}$  den Maximalwert von  $-0.74$  im Monat Oktober aufweist. Die gute Performance im Freecoolingbetrieb ist vor allem auf die fehlenden Messdaten der Winterpumpe zurückzuführen (kein Aufwand der Umwälzpumpen im Vergleich zur Referenz vorhanden). Ein weiterer Grund könnte ein reduzierter Stromverbrauch der Rückkühlventilatoren sein, da in den Wintermonaten ein genügend grosser Unterschied zur Umgebungstemperatur besteht, sodass die Rückkühler mit einer reduzierten Lüfterdrehzahl die anfallende Wärmeenergie abgeben können.





**Abbildung 5.18:** Monatlich gemittelter Optimierungspotentialindex der verschiedenen Teilsysteme im Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb.

Das Teilsystem FC weist über den untersuchten Zeitraum gesehen eine leicht bessere Performance als das Teilsystem KM auf. Der mittlere  $OPI_{FC,FC-Betrieb}$  und  $OPI_{KM,KM-Betrieb}$  beträgt  $-0.06$  bzw.  $0.03$ , womit beide Teilsysteme gemäss oder nahe der Referenz arbeiten. Das Teilsystem KM weist vor allem in den Monaten Oktober bis Dezember Optimierungspotential auf, was wie bereits erwähnt ein Hinweis für einen möglichen Freecoolingbetrieb darstellt. Diese Annahme deckt sich auch mit den Messdaten des Freecoolingbetriebs, welcher hauptsächlich in den Wintermonaten auftritt.



Das Teilsystem KST weist im Freecoolingbetrieb eine bessere Performance im Vergleich zum Kältemaschinenbetrieb auf, was erneut auf die fehlenden Messdaten der Winterpumpe zurückzuführen ist. Das Teilsystem weist in beiden Betriebsarten, mit Ausnahme im Monat Oktober, einen Optimierungspotentialindex kleiner 0 auf. Die technischen Anforderungen werden somit erfüllt.

Das Teilsystem KS weist über den untersuchten Zeitraum gesehen eine schlechtere Performance im Freecoolingbetrieb, verglichen mit dem Kältemaschinenbetrieb, auf. Der mittlere  $OPI_{KS,FC-Betrieb}$  und  $OPI_{KS,KM-Betrieb}$  beträgt 0.15 bzw. -0.01. Wie bereits erwähnt wird in diesem Teilsystem im Freecoolingbetrieb der exergetische Nutzen anstatt des Aufwandes bilanziert, wobei dies das Verhalten der Kennzahl beeinflussen könnte. Dementsprechend sind hierzu weitere Abklärungen mit zusätzlichen Messdaten notwendig.

## 6 Schlussfolgerungen

Mittels des Proof of Concept konnte erstmals eine Klimakälteanlage über den Zeitraum eines Jahres komplett analysiert werden. Mit einer Aufteilung der Analyse in Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb ist eine zielführende Bewertung der ganzen Anlage möglich, was die Funktionalität von EXERATE aufzeigt. Mit dem weiterentwickelten Beurteilungssystem ist es möglich, die Performance und das einhergehende Optimierungspotential jedes Teilsystems separat zu bestimmen sowie den Ort der Probleme zu identifizieren. Zudem wurde die Bewertung des Teilsystems Freecooling realisiert und der Optimierungspotentialindex OPI als Bewertungsgrösse eingeführt, um die Auswertung weiter zu vereinfachen. Für die Gewährleistung der Bewertung in der Übergangszeit Sommer / Winter, wurde eine Limitierungsfunktion für die berechneten Exergien angewandt. Die im vorliegenden Projekt untersuchte Klimakälteanlage läuft im Kältemaschinen- sowie Freecoolingbetrieb meistens gemäss den technischen Anforderungen, weist jedoch Optimierungspotential in der Übergangszeit Sommer / Winter auf. Vor allem die Kühlstellen können optimiert werden, wobei die Ursache für den Fehlbetrieb zuerst abschliessend geklärt werden müsste. Im Freecoolingbetrieb kann nicht abschliessend geklärt werden, ob die Bilanzierung des exergetischen Nutzens anstelle des Aufwandes im Teilsystem KS der Grund für erhöhte Kennzahlenwerte ist. Hierzu sind weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Messdaten notwendig. Da die Nebenaggregate im Kältemaschinenbetrieb die Betriebsbedingungen gemäss Norm übertreffen, konnten drei neue Referenzwerte für den ETV anhand den vorliegenden Messdaten definiert werden. Ausserdem hat sich gezeigt, dass in der exergetischen Betrachtung die elektrische Leistung im Vergleich zur thermischen Exergie eine ähnliche Grössenordnung aufweist, während sie bei der energetischen Betrachtung nur einen Bruchteil der thermischen Leistung ausmacht. Dies zeigt die Wichtigkeit den Betrieb der Nebenaggregate zu optimieren, um einen möglichst effizienten Anlagenbetrieb zu gewährleisten und Stromkosten zu reduzieren.

Im vorliegenden Projekt konnten 28 Klimakälteanlagen bezüglich ihrer Instrumentierung und Eignung beleuchtet und analysiert sowie vereinzelt vor Ort begutachtet werden. Durch den Austausch mit den Projektteilnehmern sowie der vorgenommenen Anlagenbeurteilungen zeigt sich, dass ein Grossteil der Anlagen zurückhaltend instrumentiert sind. Viele Messsysteme sind so konzipiert, dass eine grundlegende Überwachung der Betriebssicherheit gewährleistet wird. Das Erkennen von einem möglichen Optimierungspotential gestaltet sich somit schwierig. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass das Interesse am exergetischen Beurteilungssystem und an einer Kostenschätzung zur messtechnischen Nachrüstung für eine zielführende Effizienzbewertung gross ist. Weiter zeigt sich, dass diverse Akteure aus der Branche eine wichtige Rolle spielen und bei der Umsetzung des Bewertungssystems miteinbezogen werden müssen. Beispielsweise haben Planer einen umfassenden Überblick über die Anlagendaten und deren Auslegung, jedoch kaum Zugang zur Datenerfassung. Es müs-



sen daher Synergien der verschiedenen Akteure sinnvoll erkannt, wo möglich geschaffen und anschliessend genutzt werden.

Von den 28 begutachteten Klimakälteanlagen konnten 24 hinsichtlich ihrer Instrumentierung beurteilt und die Nachrüstkosten auf Basis des jeweiligen Grob- und Detailmesskonzeptes ermittelt werden. Während der Projektbearbeitung ist deutlich geworden, dass keine exakte Berechnung der Nachrüstkosten möglich ist. Viele Faktoren, wie z.B. die Zugänglichkeit der Installationsstellen, machen die Kostenentstehung für jede Anlage in gewissem Mass einzigartig, wobei trotzdem eine verallgemeinerte Abschätzung der Kosten ausgearbeitet werden konnte. Aus den Abklärungen ergibt sich, dass Elektrozähler, Temperaturfühler sowie die Datenerfassung unabhängig der Anlagengrösse pauschal beziffert werden können. Einzig die Kosten für Wärmezähler werden anhand einer Kostenfunktion in Bezug zur Kälteleistung bestimmt. Alle Kostenschätzungen von Komponenten wurden in Rücksprache mit Messmittelherstellern oder mittels Vergleich zur Schätzung im Vorprojekt [2] validiert. Bei der Zusammenstellung der Anlagennachrüstkosten wurde erkannt, dass durch die Instrumentierung jeder einzelnen Kältemaschine schnell hohe Summen entstehen. Speziell bei Anlagen mit mehreren Kältemaschinen machen sich fehlende Wärmezähler finanziell stark bemerkbar. Durch messtechnisches Zusammenfassen der thermischen Verdampfer- sowie Kondensatorleistungen mehrerer Kältemaschinen an Sammelleitungen können die Nachrüstkosten jedoch stark reduziert werden, wobei die Aussagekraft des Beurteilungssystems weiterhin gewährleistet ist. Der Mittelwert der Nachrüstkosten beträgt ca. CHF 18'100.-. Eine komplette Nachrüstung von bestehenden Anlagen muss darum jeweils genau beleuchtet werden und rechnet sich wahrscheinlich nur in Einzelfällen. Betrachtet man jedoch Anlagen, welche gemäss dem aktuellen Stand der Technik ausgestattet sind, so fallen die mittleren Nachrüstkosten tief aus und betragen ca. CHF 7'700.-. Ist also bereits ein Grossteil der Messmittel vorhanden und es fehlt z.B. nur die Datenerfassung, so kann sich eine Nachrüstung für die Beurteilung der Anlage mit dem Exergieansatz relativ schnell lohnen.

## 7 Ausblick und weiteres Vorgehen

Der Proof of Concept hat gezeigt, dass das Beurteilungssystem funktionstüchtig ist, dieses eine zielführende Methodik zur Identifizierung von Optimierungspotentialen darstellt und damit die Performance von Klimakälteanlagen bewertet werden kann. Es wird daher vorgeschlagen gemäss dem definierten Vorgehen (siehe Abb. A.2) mit der Entwicklung von EXERATE fortzufahren und in einem nächsten Schritt die Unternehmen mit den vielversprechendsten Anlagen gemäss Anwendung und Nachrüstaufwand zu kontaktieren. Die Bereitschaft für eine Nachrüstung und deren Grössenordnung soll hierbei individuell geklärt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass vereinzelt eine grosse Investitionsbereitschaft vorhanden ist und somit auch Anlagen mit suboptimaler Instrumentierung nachgerüstet werden. Zudem sind anderweitige Finanzierungsmöglichkeiten zu prüfen, damit die Investitionskosten nicht allein durch die Unternehmen zu tragen sind. Nach einer erfolgreichen Nachinstrumentierung müssen die Anlagen über einen längeren Zeitraum, mindestens zwei Jahre, vermessen werden, um eine fundierte Datengrundlage für die Weiterentwicklung des Beurteilungssystems zu bilden. Parallel dazu soll die Implementierung und Anwendung von EXERATE in Neubauten vorangetrieben werden.

Bei der Weiterentwicklung des Beurteilungssystems hat die Definition weiterer Referenz- und Grenzwerte oberste Priorität um eine differenzierte Bewertung zu ermöglichen. Durch die definierte Grenze bei  $OPI = 0$  ist es momentan nicht möglich abzuschätzen, ob Kennzahlenwerte nahe dieser Grenze immer noch einen zulässigen Betrieb darstellen. Ebenso sollten bei den nachgerüsteten Anlagen solche mit Wärmenutzung und Freecooling vorhanden sein, um das Teilsystem Wärmenutzung auszuarbeiten und die Auswertung des Freecoolingbetriebs genauer zu untersuchen. Wenn möglich soll auch die Raumtemperatur geloggt werden, um die Exergie der Kühlstelle  $E_{KS}$  zu bestimmen. In diesem Zusammenhang besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Definition und Variation der Referenzumgebung sowie der Berücksichtigung der Luftfeuchte. Da ungesättigte feuchte Luft immer einen nutzbaren Exergieanteil aufweist [14], muss dieser bei der Raumluftkonditionierung miteinbezogen werden. Der erwähnte Zusammenhang ist auch bei der Beurteilung von Hybridkühlern wichtig, wobei diese bislang in einem ersten Ansatz gleichermassen wie Trockenkühler beurteilt wurden. Für alle erwähnten Untersuchungen ist eine fundierte Datengrundlage essentiell, um auch Zusammenhänge bei verschiedenen Kälteanlagen zu erkennen und für die Auswertung zu nutzen.



## Referenzen

- [1] Stefan Rohrer, Chantal Hablützel, Frank Tillenkamp, and Martin Schneider. Einsparpotential bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen. *BFE Schlussbericht*, 2018.
- [2] Markus Krütli, Chantal Hablützel, and Frank Tillenkamp. Systeme für die Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. *IEFE Energy Papers*, 2(1), 2016.
- [3] Lorenz Brenner, Markus Krütli, and Frank Tillenkamp. Vorprojekt – Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. *BFE Schlussbericht*, 2017.
- [4] Markus Krütli and Frank Tillenkamp. Statistik zum Bestand von Klimakälteanlagen. *IEFE Energy Papers*, 6(1), 2017.
- [5] Lorenz Brenner, Frank Tillenkamp, Markus Krütli, and Christian Ghiaus. Optimization potential index (OPI): An evaluation method for performance assessment and optimization potential of chillers in HVAC plants. *Applied Energy*, 259, 2020.
- [6] Wolfgang Fratzscher, Viktor M. Brodjanskij, and Klaus Michalek. *Exergie - Theorie und Anwendung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.
- [7] Hans Dieter Baehr and Stephan Kabelac. *Thermodynamik*. Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). *Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (SIA 382/1)*. 2014.
- [9] Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA). *Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. Teil 8: Komponenten - Wärmeübertrager (VDMA 24247-8)*. 2011.
- [10] Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (SWKI). *Rückkühlung (SWKI 2003-3)*. 2005.
- [11] Herena Torío and Dietrich Schmidt. Annex 49 final report: Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) - Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Technical report, Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2011.
- [12] Masanori Shukuya. *Exergy: theory and applications in the built environment*. Springer, London, 2013.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *Wärmezähler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (DIN EN 1434-1:2014)*. 2014.
- [14] J. Jilek and J. H. Young. Exergy efficiency of a counterflow air/air heat exchanger with vapour condensation. *Wärme- und Stoffübertragung*, 28(3):123–130, März 1993.

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Skala des Optimierungspotentialindex für eine grundlegende (links) und erweiterte Auswertung (rechts). . . . .	14
3.2	Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage im Kältemaschinenbetrieb und die Aufteilung in Teilsysteme. Pfeile zeigen die Exergieflüsse im System und Variablen in kursiv stellen die notwendigen Messgrößen für die Berechnung dar. . . . .	16
3.3	Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage im Freecoolingbetrieb und die Aufteilung in Teilsysteme. Pfeile zeigen die Exergieflüsse im System und Variablen in kursiv stellen die notwendigen Messgrößen für die Berechnung dar. . . . .	19
5.1	Rücklaufquote der angefragten Unternehmen unterteilt in die verschiedenen Fachbereiche. . . . .	28
5.2	Kosten für Wärmezähler in Funktion der Kälteleistung des Systems. . . . .	32
5.3	Kosten für Elektrozähler in Funktion der Kälteleistung des Systems. . . . .	34
5.4	Fehlende / Suboptimale Messstellen pro untersuchter Anlage. . . . .	37
5.5	Geschätzter Nachrüstaufwand für jede untersuchte Anlage. . . . .	38
5.6	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (RK) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	39
5.7	Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Rückkühlung (RK) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	40
5.8	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältemaschine (KM) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	41
5.9	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältespeicherung & -transport (KST) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	42
5.10	Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Kältespeicherung & -transport (KST) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	42
5.11	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (KS) im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	43
5.12	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Rückkühlung (RK) im Freecoolingbetrieb. . . . .	44
5.13	Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Rückkühlung (RK) im Freecoolingbetrieb. . . . .	45
5.14	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Freecooling (FC) im Freecoolingbetrieb. . . . .	46
5.15	Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kältespeicherung & -transport (KST) im Freecoolingbetrieb. . . . .	46



5.16 Tagessumme der exergetischen Aufwände der verschiedenen Komponenten im Teilsystem Kältespeicherung & -transport (KST) im Freecoolingbetrieb. . . .	47
5.17 Optimierungspotentialindex des Teilsystems Kühlstelle (KS) im Freecoolingbetrieb. . . . .	48
5.18 Monatlich gemittelter Optimierungspotentialindex der verschiedenen Teilsysteme im Kältemaschinen- und Freecoolingbetrieb. . . . .	49
A.1 Flussdiagramm des Vorgehens für das vorliegende Projekt. . . . .	58
A.2 Flussdiagramm des allgemeinen Vorgehens für die Entwicklung des Beurteilungssystems. . . . .	59



## Tabellenverzeichnis

3.1	Exergetischer Aufwand und Nutzen sowie Definition des OPI in jedem Teilsystem im Kältemaschinenbetrieb. . . . .	17
3.2	Exergetischer Aufwand und Nutzen sowie Definition des OPI in jedem Teilsystem im Freecoolingbetrieb. . . . .	18
4.1	Auszug aus der erstellten Tabelle zur Kostenermittlung der Wärmezähler am Beispiel der Leistungsmessung am Kältemaschinen-Verdampfer. . . . .	25
4.2	Auszug aus der erstellten Tabelle zur Kostenermittlung der Elektrozähler. . . . .	25
5.1	Übersicht und Eckdaten der untersuchten Klimakälteanlagen. . . . .	29
5.2	Zusammenfassende Tabelle der untersuchten Anlagen mit entsprechendem Instrumentierungsstand. . . . .	30
5.3	Auflistung des geschätzten Nachrüstaufwandes für jede untersuchte Kälteanlage. . . . .	36
5.4	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktoren für Rückkühlventilatoren und Umwälzpumpen im Teilsystem RK gemäss SIA 382/1 [8] und Berechnungen aus den vorliegenden Daten. . . . .	40
5.5	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor für Umwälzpumpen im Teilsystem KST gemäss SIA 382/1 [8] und Berechnungen aus den vorliegenden Daten. . . . .	43

## A Anhang

### A.1 Flussdiagramme des Vorgehens zur Erarbeitung des Beurteilungssystems

Die Abbildungen A.1 und A.2 zeigen schematisch das Vorgehen im vorliegenden Projekt "Proof of Concept: Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen" sowie der weiteren geplanten Arbeiten.

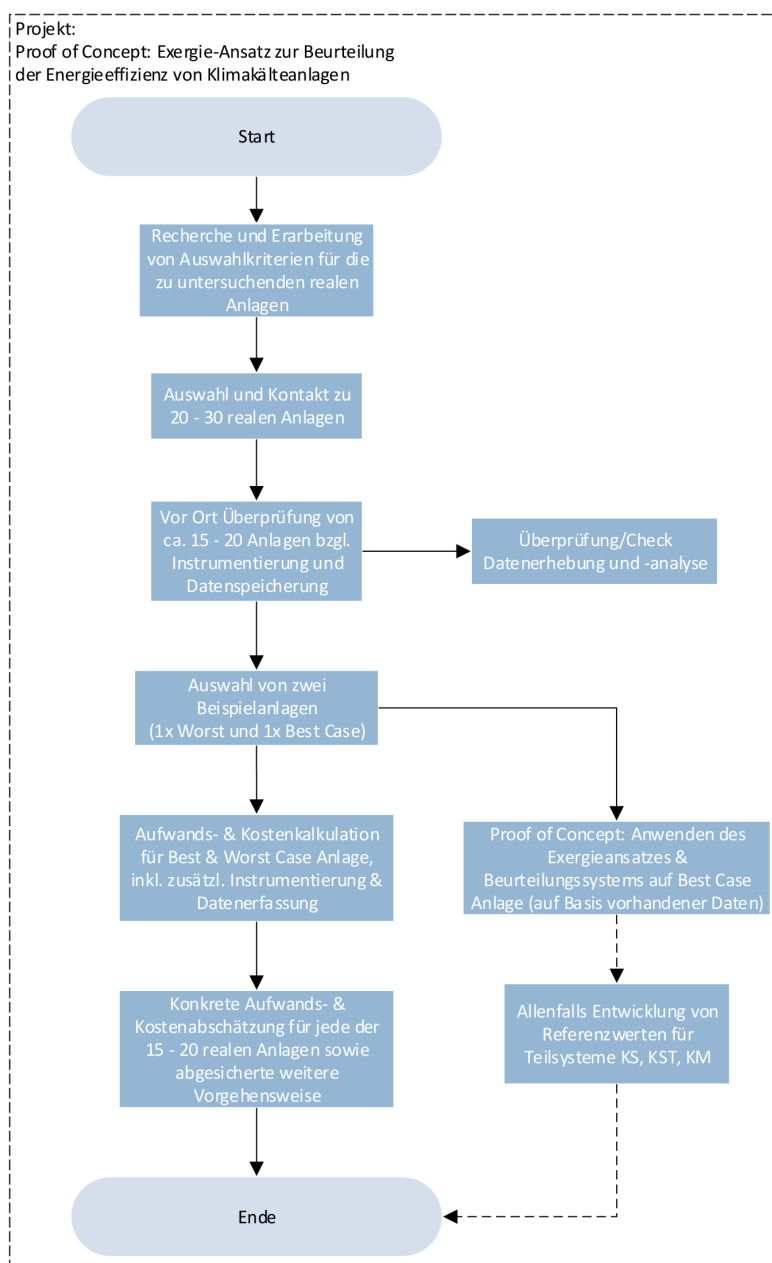
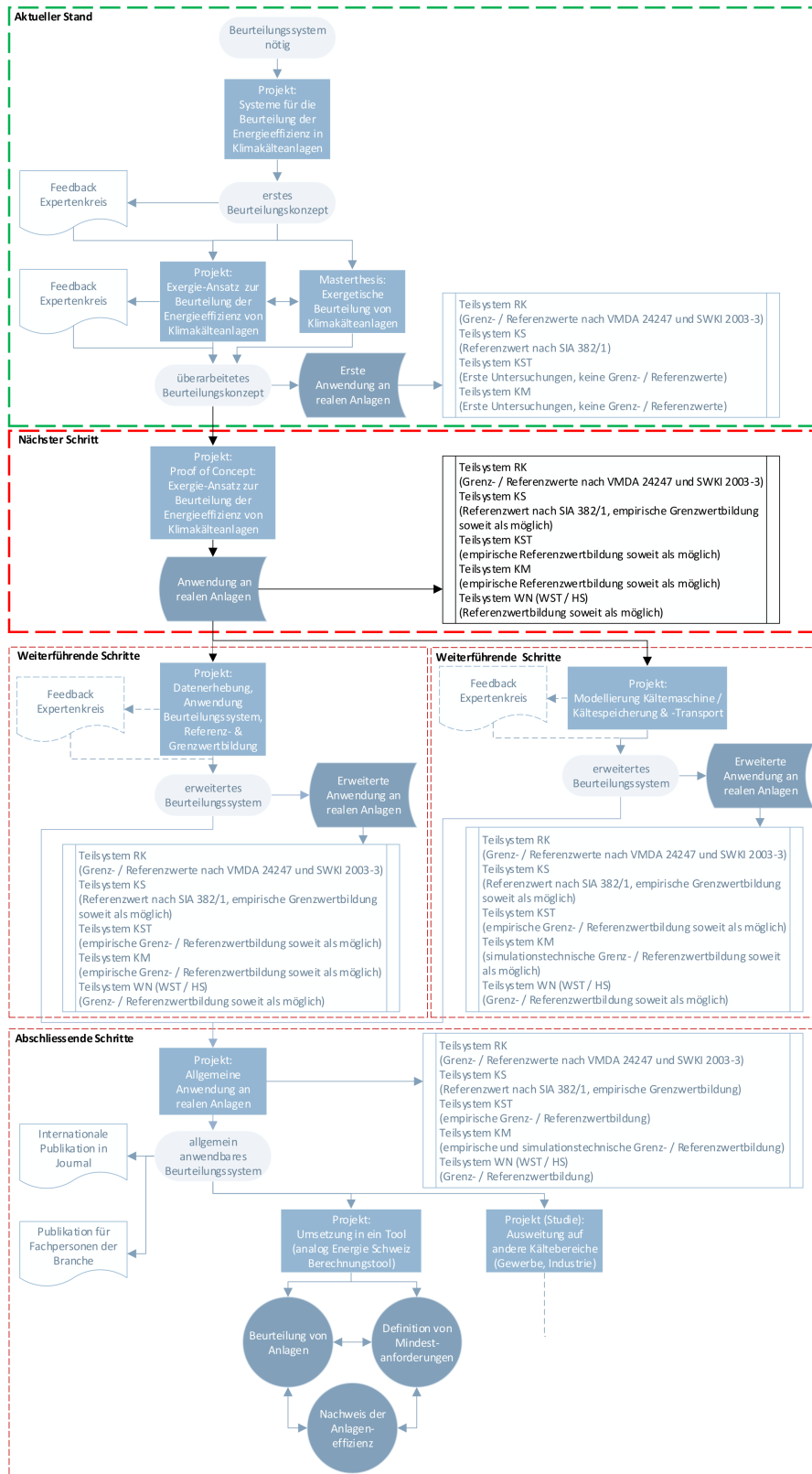


Abbildung A.1: Flussdiagramm des Vorgehens für das vorliegende Projekt.



**Abbildung A.2:** Flussdiagramm des allgemeinen Vorgehens für die Entwicklung des Beurteilungssystems.



EXERATE

## A.2 Kennzahlenkatalog

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



**School of  
Engineering**

IEFE Institut für Energiesysteme  
und Fluid-Engineering

**EXERATE:  
Exergieansatz zur Beurteilung  
von Klimakälteanlagen**

Kennzahlenkatalog



## Symbolverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>SI-Einheit</b>
$E$	Exergie	kJ
$\dot{E}$	Exergiestrom	kW
$f_{el,th}$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor (ETV)	-
$P$	Leistung	kW
$\dot{Q}$	Wärmestrom	kW
$T$	Temperatur	K
$t$	Zeit	s
$\Delta E_V$	innerer exergetischer Verlust	kJ
$\zeta$	exergetische Kennzahl	-
$\eta$	Wirkungsgrad	-
$\tau$	technologischer Gütegrad	-

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
0	Verdampfung
$A$	Aufwand
$C$	Verflüssigung
$D$	Verteilung (Distribution)
$el$	elektrisch
$ex$	exergetisch
$HS$	Heizstellen
$KM$	Kältemaschine
$KST$	Kältespeicherung und -transport
$KS$	Kühlstellen
$m$	thermodynamisches Mittel
$N$	Nutzen
$opt$	optimal
$RK$	Rückkühlung
$RKV$	Rückkühlventilator
$RL$	Rücklauf
$SYS$	System
$U$	Umgebung
$UWP$	Umwälzpumpe



---

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>V</i>	Verlust
<i>VD</i>	Verdichter
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>WA</i>	Wärmeauskopplung
<i>WN</i>	Wärmenutzung
<i>WST</i>	Wärmespeicherung und -transport
<i>zul</i>	zulässig
*	dem technisch-ökonomischen Ideal entsprechend

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>1 Übersicht der Kennzahlen und Exergieströme</b>	<b>1</b>
<b>2 Teilsystem der Kältemaschine</b>	<b>2</b>
<b>3 Teilsystem der Rückkühlung</b>	<b>4</b>
<b>4 Teilsystem Kältespeicher und -transport</b>	<b>6</b>
<b>5 Teilsystem der Kühlstelle(n)</b>	<b>8</b>
<b>6 Teilsystem der Wärmenutzung</b>	<b>10</b>
<b>7 Systemkennzahl</b>	<b>12</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>13</b>

1 Übersicht der Kennzahlen und Exergieströme

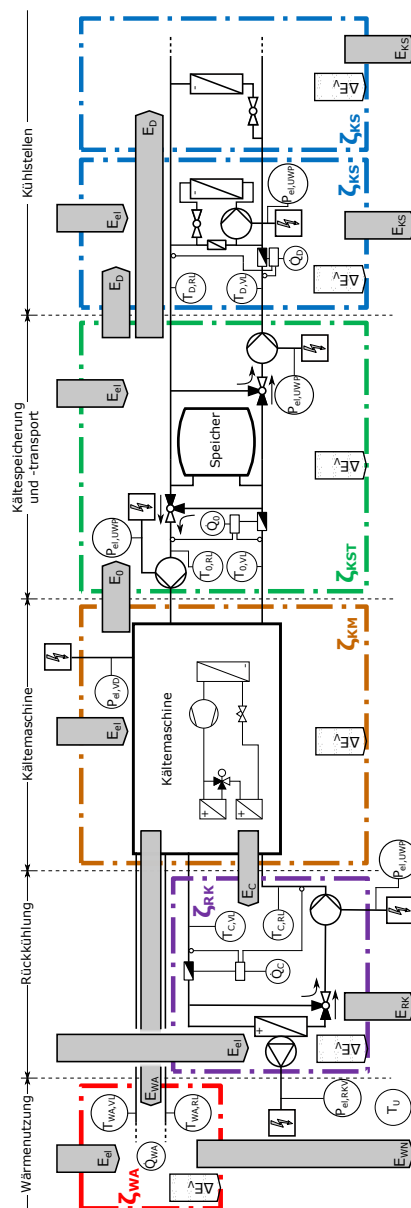


Abbildung 1.1 – Abstrahiertes Schema mit grundlegendsten Anlagenteilen einer Klimakälteanlage, dem Exergietransport in jedem Teilsystem, den verschiedenen exergetischen Kennzahlen sowie Messstellen.





## 2 Teilsystem der Kältemaschine

Die exergetische Kennzahl für das Teilsystem der Kältemaschine  $\zeta_{KM}$  berechnet sich gemäss Gleichung 2.1.

$$\zeta_{KM} = \frac{\eta_{KM}}{\eta_{KM}^*} = \frac{E_{el,VD}^*}{E_{el,VD}} \quad (2.1)$$

Der exergetische Wirkungsgrad für das Teilsystem der Kältemaschine  $\eta_{KM}$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{KM} = \frac{E_0 + E_{WA}}{E_{el,VD}} \quad (2.2)$$

mit

$$E_0 = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_0 dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_0 \left(1 - \frac{T_U}{T_{0,m}}\right) dt \quad (2.3)$$

$$E_{WA} = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_{WA} dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_{WA} \left(1 - \frac{T_U}{T_{WA,m}}\right) dt \quad (2.4)$$

$$E_{el,VD} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,VD} dt \quad (2.5)$$

Der Referenzwert für das Teilsystem der Kältemaschine  $\eta_{KM}^*$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{KM}^* = \frac{E_0 + E_{WA}}{E_{el,VD}^*} \quad (2.6)$$

Die ideal aufzuwendende Exergie  $E_{el,VD}^*$  ist nicht bekannt.

### Benötigte Messdaten

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 2.1 erfasst werden.  $\dot{Q}_C$  kann alternativ auch über die Energiebilanz der Kältemaschine bestimmt werden.

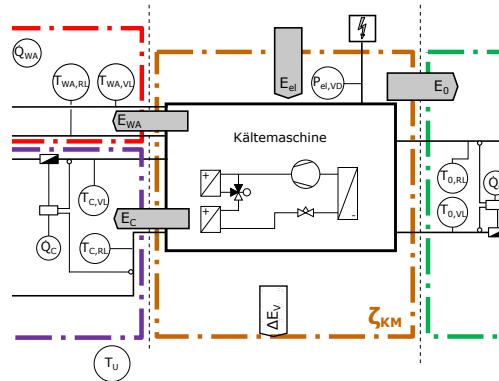


Abbildung 2.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältemaschine.

<i>Abkürzung</i>	<i>Messgrösse</i>
$P_{el,VD}$	Elektrische Leistung Verdichter
$\dot{Q}_0$	Wärmestrom Verdampfer
$T_{0,VL}$	Vorlauftemperatur Verdampfer
$T_{0,RL}$	Rücklauftemperatur Verdampfer
$\dot{Q}_C$	Wärmestrom Kondensator
$T_{C,VL}$	Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{C,RL}$	Rücklauftemperatur Kondensator
$\dot{Q}_{WA}$	Wärmestrom Wärmeauskopplung
$T_{WA,VL}$	Vorlauftemperatur Wärmeauskopplung
$T_{WA,RL}$	Rücklauftemperatur Wärmeauskopplung
$T_U$	Umgebungstemperatur

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
$P_{el,VD}^*$	Ideal aufzuwendende Leistung der Verdichter



### 3 Teilsystem der Rückkühlung

Die exergetische Kennzahl für das Teilsystem der Rückkühlung  $\zeta_{RK}$  berechnet sich gemäss Gleichung 3.1.

$$\zeta_{RK} = \frac{\eta_{RK}}{\eta_{RK}^*} = \frac{E_{el,UWP}^* + E_{el,RKV}^* + E_C^*}{E_{el,UWP} + E_{el,RKV} + E_C} \quad (3.1)$$

Der exergetische Wirkungsgrad für das Teilsystem der Rückkühlung  $\eta_{RK}$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{RK} = \frac{E_{RK}}{E_{el,UWP} + E_{el,RKV} + E_C} \quad (3.2)$$

mit

$$E_{el,UWP} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,UWP} dt \quad (3.3)$$

$$E_{el,RKV} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,RKV} dt \quad (3.4)$$

$$E_C = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_C dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_C \left(1 - \frac{T_U}{T_{C,m}}\right) dt \quad (3.5)$$

Der Referenzwert für das Teilsystem der Rückkühlung  $\eta_{RK}^*$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{RK}^* = \frac{E_{RK}}{E_{el,UWP}^* + E_{el,RKV}^* + E_C^*} \quad (3.6)$$

mit

$$E_{el,UWP}^* = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,UWP}^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \frac{1}{f_{el,th,UWP}^*} \dot{Q}_C dt \quad (3.7)$$

$$E_{el,RKV}^* = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,RKV}^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \frac{1}{f_{el,th,RKV}^*} \dot{Q}_C dt \quad (3.8)$$

$$E_C^* = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_C^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_C \left(1 - \frac{T_U}{T_{C,m}^*}\right) dt \quad (3.9)$$

Die Referenzgrössen können gemäss Normen definiert werden.

### Benötigte Messdaten / Faktoren

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 3.1 erfasst werden.  $\dot{Q}_C$  kann alternativ auch über die Energiebilanz der Kältemaschine bestimmt werden.

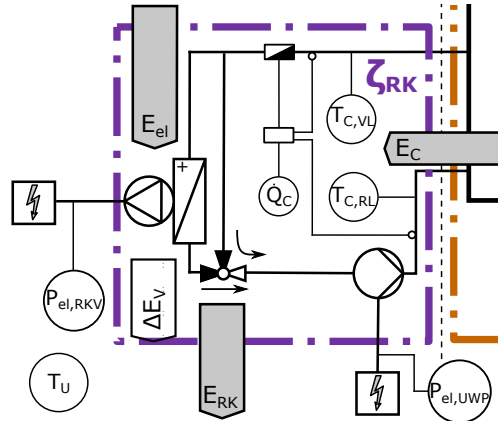


Abbildung 3.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Rückkühlung.

Abkürzung	Messgrösse
$P_{el,UWP}$	Elektrische Leistung Umwälzpumpe
$P_{el,RKV}$	Elektrische Leistung Rückkühlventilator
$\dot{Q}_C$	Wärmestrom Kondensator
$T_{C,VL}$	Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{C,RL}$	Rücklauftemperatur Kondensator
$T_U$	Umgebungstemperatur

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

Abkürzung	Beschreibung
$f_{el,th,UWP}^*$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor der Umwälzpumpen
$f_{el,th,RKV}^*$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor des Rückkühlventilators
$T_{C,VL}^*$	Ideale Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{C,RL}^*$	Ideale Rücklauftemperatur Kondensator



#### 4 Teilsystem Kältespeicher und -transport

Die exergetische Kennzahl für das Teilsystem Kältespeicherung und -transport  $\zeta_{KST}$  berechnet sich gemäss Gleichung 4.1.

$$\zeta_{KST} = \frac{\eta_{KST}}{\eta_{KST}^*} = \frac{E_D + \Delta E_V^*}{E_{el,UWP} + E_0} \quad (4.1)$$

Der exergetische Wirkungsgrad für das Teilsystem Kältespeicherung und -transport  $\eta_{KST}$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{KST} = \frac{E_D}{E_{el,UWP} + E_0} \quad (4.2)$$

mit

$$E_D = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_D dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_D \left(1 - \frac{T_U}{T_{D,m}}\right) dt \quad (4.3)$$

$$E_{el,UWP} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,UWP} dt \quad (4.4)$$

$$E_0 = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_0 dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_0 \left(1 - \frac{T_U}{T_{0,m}}\right) dt \quad (4.5)$$

Durch die Exergiebilanz über das Teilsystem ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$E_{el,UWP} + E_0 = E_D + \Delta E_V \quad (4.6)$$

$$E_{el,UWP}^* + E_0^* = E_D + \Delta E_V^* \quad (4.7)$$

Dementsprechend kann der Referenzwert umgeformt werden.

$$\eta_{KST}^* = \frac{E_D}{E_D + \Delta E_V^*} \quad (4.8)$$

Die idealen inneren Verluste  $\Delta E_V^*$  sind nicht bekannt.

### Benötigte Messdaten

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 4.1 erfasst werden.

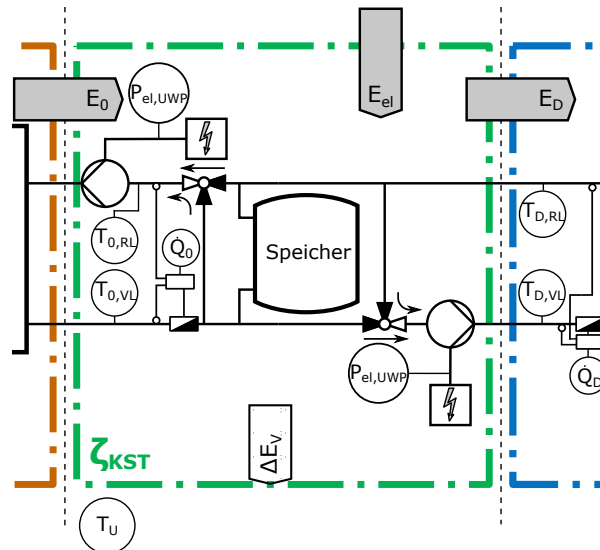


Abbildung 4.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältespeicher und -transport.

Abkürzung	Messgrösse
$P_{el,UWP}$	Elektrische Leistung Umwälzpumpe
$\dot{Q}_0$	Wärmestrom Kondensator
$T_{0,VL}$	Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{0,RL}$	Rücklauftemperatur Kondensator
$\dot{Q}_D$	Wärmestrom Kälteverteilung
$T_{D,VL}$	Vorlauftemperatur Kälteverteilung
$T_{D,RL}$	Rücklauftemperatur Kälteverteilung
$T_U$	Umgebungstemperatur

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

Abkürzung	Beschreibung
$\Delta E_V^*$	Ideale innere Verluste des Teilsystems Kältespeicher und -transport

**5 Teilsystem der Kühlstelle(n)**

Die exergetische Kennzahl für das Teilsystem der Kühlstellen  $\zeta_{KS}$  berechnet sich gemäss Gleichung 5.1 und ersetzt das frühere  $\zeta_0$ .

$$\zeta_{KS} = \frac{\eta_{KS}}{\eta_{KS}^*} = \frac{E_{el,UWP}^* + E_D^*}{E_{el,UWP} + E_D} \quad (5.1)$$

Der exergetische Wirkungsgrad für das Teilsystem der Kühlstellen  $\eta_{KS}$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung.

$$\eta_{KS} = \frac{E_{KS}}{E_{el,UWP} + E_D} \quad (5.2)$$

mit

$$E_{KS} = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_{KS} dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_{KS} \left( 1 - \frac{T_U}{T_{KS,m}} \right) dt \quad (5.3)$$

$$E_{el,UWP} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,UWP} dt \quad (5.4)$$

$$E_D = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_D dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_D \left( 1 - \frac{T_U}{T_{D,m}} \right) dt \quad (5.5)$$

Der Referenzwert für das Teilsystem der Rückkühlung  $\eta_{KS}^*$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{KS}^* = \frac{E_{KS}}{E_{el,UWP}^* + E_D^*} \quad (5.6)$$

mit

$$E_{el,UWP}^* = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el,UWP}^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \frac{1}{f_{el,th,UWP}^*} \dot{Q}_C dt \quad (5.7)$$

$$E_D^* = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_D^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_D \left( 1 - \frac{T_U}{T_{D,m}^*} \right) dt \quad (5.8)$$

Die Referenzgrössen können gemäss Normen definiert werden.

### Benötigte Messdaten

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 5.1 erfasst werden.

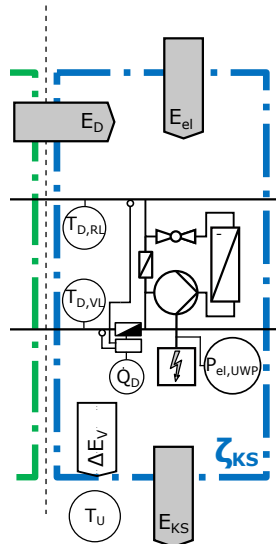


Abbildung 5.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kühlstellen.

<i>Abkürzung</i>	<i>Messgrösse</i>
$P_{el,UWP}$	Elektrische Leistung Umwälzpumpe
$\dot{Q}_D$	Wärmestrom Kälteverteilung
$T_{D,VL}$	Vorlauftemperatur Kälteverteilung
$T_{D,RL}$	Rücklauftemperatur Kälteverteilung
$T_U$	Umgebungstemperatur

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
$f_{el,th,UWP}^*$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor der Umwälzpumpen
$T_{D,VL}^*$	Ideale Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{D,RL}^*$	Ideale Rücklauftemperatur Kondensator



## 6 Teilsystem der Wärmenutzung

Die Wärmeauskopplung kann mit der Definition eines zusätzlichen Nutzens in das Beurteilungssystem integriert werden. So kann mit dem bestehenden Prinzip eine exergetische Kennzahl der Wärmenutzung  $\zeta_{WN}$  gebildet werden.

$$\zeta_{WN} = \frac{\eta_{WN}}{\eta_{WN}^*} = \frac{E_{el}^* + E_{WA}^*}{E_{el} + E_{WA}} \quad (6.1)$$

Der entsprechende exergetischen Wirkungsgrad  $\eta_{WN}$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{WN} = \frac{E_{WN}}{E_{el} + E_{WA}} \quad (6.2)$$

mit

$$E_{el} = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el} dt \quad (6.3)$$

$$E_{WA} = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_{WA} dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_{WA} \left( 1 - \frac{T_U}{T_{WA,m}} \right) dt \quad (6.4)$$

$$(6.5)$$

Der Referenzwert für das Teilsystem der Wärmenutzung  $\eta_{WN}^*$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{WN}^* = \frac{E_{WN}}{E_{el}^* + E_{WA}^*} \quad (6.6)$$

mit

$$E_{el}^* = \int_{1 \text{ Tag}} P_{el}^* dt \quad (6.7)$$

$$E_{WA}^* = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{E}_{WA}^* dt = \int_{1 \text{ Tag}} \dot{Q}_{WA} \left( 1 - \frac{T_U}{T_{WA,m}^*} \right) dt \quad (6.8)$$

$$(6.9)$$

In diesem Fall ist die Referenzwertbildung mit einer gewissen Schwierigkeit verbunden, da bekannt sein muss wie die Wärme weiter genutzt wird. Ist der Nutzen bekannt, so kann auch der entsprechende ideale Aufwand bestimmt werden. Unter Umständen wäre hier eine Einteilung, ähnlich der Kaltwasserseite der Anlage, in die Untersysteme Wärmespeicher- und transport (WST) sowie Heizstellen (HS) mit den exergetischen Kennzahlen  $\zeta_{WST}$  resp.  $\zeta_{HS}$  zielführend.

### Benötigte Messdaten

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 6.1 erfasst werden.

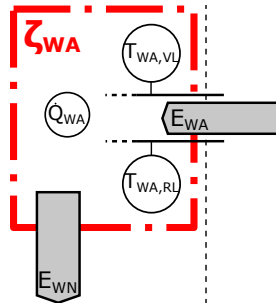


Abbildung 6.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Wärmenutzung.

<i>Abkürzung</i>	<i>Messgrösse</i>
$P_{el}$	Elektrische Leistung
$\dot{Q}_{WA}$	Wärmestrom Kälteverteilung
$T_{WA,VL}$	Vorlauftemperatur Kälteverteilung
$T_{WA,RL}$	Rücklauftemperatur Kälteverteilung
$T_U$	Umgebungstemperatur
$E_{WN}$	Exergie der Wärmenutzung

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
$P_{el}^*$	Ideal aufzuwendende Exergie der Wärmenutzung
$T_{WA,VL}^*$	Ideale Vorlauftemperatur Wärmenutzung
$T_{WA,RL}^*$	Ideale Rücklauftemperatur Wärmenutzung



## 7 Systemkennzahl

Die exergetische Kennzahl für das Gesamtsystem  $\zeta_{SYS}$  berechnet sich gemäss Gleichung 7.1.

$$\zeta_{SYS} = \frac{\eta_{SYS}}{\eta_{SYS}^*} = \frac{E_{el,VD}^* + \sum E_{el,UWP}^* + \sum E_{el,RKV}^*}{E_{el,VD} + \sum E_{el,UWP} + \sum E_{el,RKV}} \quad (7.1)$$

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich gemäss folgendem Zusammenhang:

$$\eta_{SYS} = \frac{E_{KS} + E_{WN}}{E_{el,VD} + \sum E_{el,UWP} + \sum E_{el,RKV}} \quad (7.2)$$

### Berechnung exergetischer Wirkungsgrad $\eta_{SYS}$

Der Referenzwert für das Gesamtsystem  $\eta_{SYS}^*$  berechnet sich gemäss folgender Gleichung:

$$\eta_{SYS}^* = \frac{E_{KS} + E_{WN}}{E_{el,VD}^* + \sum E_{el,UWP}^* + \sum E_{el,RKV}^*} \quad (7.3)$$

Die Berechnung der einzelnen Exergien erfolgt gemäss den Angaben in den vorhergehenden Abschnitten.

### Benötigte Messdaten

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 1.1 erfasst werden.  $\dot{Q}_C$  kann alternativ auch über die Energiebilanz der Kältemaschine bestimmt werden.

<i>Abkürzung</i>	<i>Messgrösse</i>
$P_{el,UWP}$	Elektrische Leistung Umwälzpumpe
$P_{el,RKV}$	Elektrische Leistung Rückkühlventilator
$P_{el,VD}$	Elektrische Leistung Verdichter
$\dot{Q}_0$	Wärmestrom Verdampfer
$T_{0,VL}$	Vorlauftemperatur Verdampfer
$T_{0,RL}$	Rücklauftemperatur Verdampfer
$\dot{Q}_{WA}$	Wärmestrom Wärmeauskopplung
$T_{WA,VL}$	Vorlauftemperatur Wärmeauskopplung
$T_{WA,RL}$	Rücklauftemperatur Wärmeauskopplung
$\dot{Q}_C$	Wärmestrom Kondensator
$T_{C,VL}$	Vorlauftemperatur Kondensator
$T_{C,RL}$	Rücklauftemperatur Kondensator
$T_U$	Umgebungstemperatur

### Faktoren zur Bestimmung der Kennzahl

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
$P_{el,VD}^*$	Ideal aufzuwendende Leistung der Verdichter
$f_{el,th,UWP}^*$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor der Umwälzpumpen
$f_{el,th,RKV}^*$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor des Rückkühlventilators

**Abbildungsverzeichnis**

1.1	Abstrahiertes Schema mit grundlegendsten Anlagenteilen einer Klimakälteanlage, dem Exergietransport in jedem Teilsystem, den verschiedenen exergetischen Kennzahlen sowie Messstellen. . . . .	1
2.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältemaschine. . . .	3
3.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Rückkühlung. . . . .	5
4.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältespeicher und -transport. . . . .	7
5.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kühlstellen. . . . .	9
6.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Wärmenutzung. . . .	11

## A.3 Leitfaden

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



School of  
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme  
und Fluid-Engineering

### BFE-Projekt: Proof of Concept – Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen

#### Anfrage

Interviewer / Datum: \_\_\_\_\_

Kontaktperson / Firma: \_\_\_\_\_

#### 1. Begrüssung

- Begrüssung und bedanken für Gesprächsbereitschaft
- Vorstellung des IEFE
- Vorstellen des BFE Projektes:
  - o Ziele des Projektes
  - o Kurze Erklärung: Exergieansatz zur Bestimmung und Optimierung der Energieeffizienz
- Nutzen der Teilnahme:
  - o Sie erhalten die ausgewerteten Ergebnisse aus erster Hand, sofern Ihre Anlage ausgewählt wird (Best oder Worst Case)
  - o Sie werden über den weiteren Verlauf sowie den Projektfortschritt informiert
  - o Sie können weitere Bedürfnisse und Anliegen bezgl. einer Energieeffizienzbewertung platzieren
- Vertraulichkeit: Sämtliche Informationen werden streng vertraulich behandelt und ausschliesslich für die Erarbeitung des Beurteilungskonzeptes verwendet
- Besteht Interesse an einer Zusammenarbeit?
  - o Ja
    - Für die Vorabklärungen werden ca. 10-15 min. benötigt. Zeitpunkt jetzt ok? Sonst neue Terminvereinbarung:  
Datum und Uhrzeit: \_\_\_\_\_ Kontakt: \_\_\_\_\_
  - o Nein, Gründe: \_\_\_\_\_

#### 2. Vorabklärung

##### In welchem Bezug stehen Sie bzw. Ihr Unternehmen zur Anlage:

- KM-Hersteller
- KM-Lieferant
- Planer
- Energiecontractor/Betreiber
- Facility Management (Betrieb und Unterhalt)
- Investor/Eigentümer

##### Kühlanwendung: Klimakälte

- Raumkonditionierung (Komfort, Betrieb an max. 8 aufeinander folgenden Monaten pro Jahr)
- Andere Anwendungen (Reinraum, Serverraum, ...)

##### Anlagentyp:

- Flüssiger Kälte-träger
  - o Glykol Mischung: \_\_\_\_\_
  - o Wasser
  - o Andere: \_\_\_\_\_

→ Sind die oberen zwei Bedingungen nicht erfüllt (Klimakälteanlage und flüssiger Kälte-träger) Abbruch der Anfrage!

.....

### 3. Anlagendaten

**Kälteleistung:**

- \_\_\_\_ (<50kW)
- \_\_\_\_ (>50kW)

**Ausführung der Klimakälteanlage:**

- Standard
- Sonderanfertigung

**Alter der Kälteanlage:** \_\_\_\_\_**Verwendetes Kältemittel:**

- R134a
- R407C
- R410a
- R717
- Andere: \_\_\_\_\_

**Wärmenutzung vorhanden:**

- Ja
- Nein
- Art der Wärmenutzung: \_\_\_\_\_

**Art der Rückkühlung:**

- Wassergekühlter Verflüssiger
- Luft-Verflüssiger
- Luft-Verflüssiger integriert
- Andere: \_\_\_\_\_

### 4. R&I Schema

**Ist ein R&I Schema vorhanden und darf es an uns und unsere Projektpartner (BFE) weitergegeben werden? (vertraulicher Umgang)**

- Ja
- Nein

**Sind alle Anlagenkomponenten im R&I Schema vermerkt?**

- Ja
- Nein

**Gibt es weiterführende R&I Schemen z.B. der Kühlstellen, Wärmenutzung etc.?**

- Ja
- Nein

**Ist die Instrumentierung (Messstellen und Typen der Messmittel) im R&I Schema vermerkt?**

- Messstellen und Typen vermerkt
- Nur Messstellen vermerkt
- Nein
  - Sind Elektroschemen bzgl. der Messmittel vorhanden?
    - Ja
    - Nein

## 5. Datenerfassung

### Ist eine Datenspeicherung vorhanden? Können Sie Auskunft darüber geben?

- Ja, Datenspeicherung vorhanden
- Nein, keine Datenspeicherung vorhanden
- Falls keine Auskunft möglich von dieser Person:
  - Gibt es jemand anderes der darüber Auskunft geben kann oder darf?
    - Ja → Kontaktdaten: \_\_\_\_\_
    - Nein

### Welche Daten werden aufgezeichnet?

- Sekundär:
  - VL.&RL- Temperaturen
  - Wärmemähler
    - Leistung
    - Temperatur und Durchfluss
  - Elektrische Verbrauch der Pumpen
- Primär:
  - Temperaturen
  - Drücke
  - Elektrischer Verbrauch des Verdichters
- Weitere Daten
  - Speichertemperaturen
  - \_\_\_\_\_

### Angaben zur Datenerfassung:

- Im welchem Intervall werden die Daten aufgezeichnet: \_\_\_\_\_
- In welcher Form werden die Daten aufgezeichnet (Momentan Werte, Mittelwerte): \_\_\_\_\_
- Wie lange werden die Daten gespeichert bzw. wie weit zurück sind die Daten verfügbar:  
\_\_\_\_\_
- In welcher Form werden die Daten gespeichert (csv, Excel etc.): \_\_\_\_\_

## 6. Abschluss

- Bedanken für Gesprächsbereitschaft
- Nach einer Vorauswahl der Anlagen werden wir Sie wieder kontaktieren für die Besprechung des weiteren Vorgehens (Zustellung der Anlagenschemen, Begehung der Anlage etc.)
- Kontaktangaben für weitere Rückfragen/Abklärungen:  
Name, Vorname: \_\_\_\_\_  
E-Mail: \_\_\_\_\_

## A.4 Infoblatt

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



School of  
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme  
und Fluid-Engineering

### BFE-Projekt: Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen

#### Verfasser:

Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE)  
Prof. Dr. Frank Tillenkamp, Institutsleiter  
Besetar Shehu, BSc in Energie- und Umwelttechnik  
Stefan Rohrer, BSc in Maschinentechnik

#### Kontakt:

Besetar Shehu  
E-Mail: [besetar.shehu@zhaw.ch](mailto:besetar.shehu@zhaw.ch)  
Tel. direkt: 058 934 61 83

#### Auftraggeber:

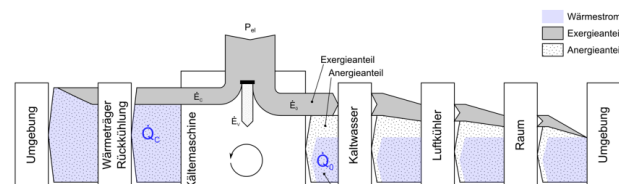
Bundesamt für Energie (BFE)  
Forschungsprogramm Wärmepumpe und Kälte  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Datum: 10.10.2018

#### Ausgangslage

Mit der Energiestrategie des Bundes werden höhere Anforderungen an die Energieeffizienz von Klimakälteanlagen gestellt. Um dem steigenden Energieverbrauch entgegenzuwirken wurde ein Aktionsplan im Rahmen des BFE-Programms EnergieSchweiz ausgearbeitet, welcher Projekte zur Schaffung von Tools sowie Informationsgrundlagen für die verschiedenen Akteure der Branche und zur Umsetzung im Markt beinhaltet. Daraus entstand die Idee eines robusten und marktfähigen Tools, welches auf einer exergetischen Beurteilung basiert. Der Fokus liegt hierbei in der Einfachheit des Systems, wonach die Beurteilung auch von Laien, z.B. mit Hilfe eines Ampelsystems, vorgenommen werden soll.

Die benötigte elektrische Energie ist der Hauptkostenpunkt beim Betrieb von Klimakälteanlagen, weshalb detaillierte Aussagen über die Verluste in der Gesamtanlage eine hohe Relevanz besitzen. Hierfür eignet sich die Exergiebetriebsrechnung, da die elektrische Energie als reine Exergie in das System eintritt und daher ihr Weg durch das System im Fokus stehen sollte.

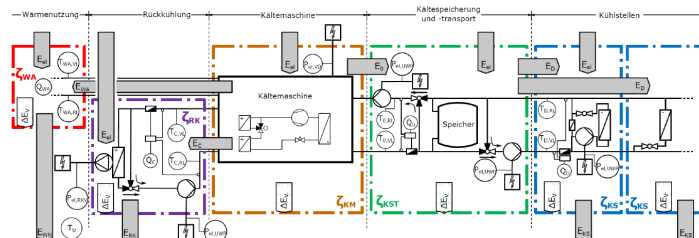


Folglich kann über den Exergiezustand die Wertigkeit der Energie bestimmt und ihre Entwertung im Verlauf durch das Gesamtsystem lokalisiert werden. Dies bildet die Grundlage für zukünftige Optimierungen einzelner Teilsysteme. Herkömmliche, integrale Energiebeurteilungsverfahren bieten die lokalen Informationen nicht.



### Grundprinzip des Exergie-Ansatzes

Das Gesamtsystem einer Klimakälteanlage wird in Teilsysteme unterteilt, um Einzelbewertungen zu ermöglichen. Es werden Kennzahlen für jedes Teilsystem und eine Kennzahl für das Gesamtsystem entwickelt. Um einen allgemeinen Anlagenvergleich zu ermöglichen, werden die exergetischen Wirkungsgrade mit einem technisch ökonomischen Ideal verglichen sowie eine normierte Kennzahl definiert, um die Interpretation der Ergebnisse zu vereinfachen.



Ein konkretes Beispiel liefert das Teilsystem der Rückkühlung. Durch die gezielte Reduzierung der Rückkühltemperatur sind nach ersten Abschätzungen Einsparungen von ca. 10 - 15 % des Gesamtverbrauchs an elektrischer Energie einer Klimakälteanlage möglich. Durch die Optimierung anderer Teilsysteme sind natürlich weitere Einsparungen erreichbar. Jedoch ist zum jetzigen Zeitpunkt deren Grössenordnung nur schwer abschätzbar.

Eine detailliertere Beschreibung des Exergie-Ansatzes, ist unter folgendem Link zu finden:  
<https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/1183>

### Projektziele

Ziel dieses Projektes ist es zunächst, das bisherig erarbeitete Beurteilungskonzept an einer realen Anlage anzuwenden und konkrete Kosten- und Zeitabschätzungen hinsichtlich der Nach-instrumentierung vorzunehmen. Dadurch soll am Ende eine Aussage über die Eignung der betrachteten Klimakälteanlagen hinsichtlich der Exergieanalyse möglich sein und ob sich das künftige Tool für die Beurteilung von bestehenden Anlagen oder ausschliesslich für Neuanlagen eignet. In einem weiterführenden Projekt werden, nach Absprache mit dem BFE, ausgewählte Anlagen instrumental nachgerüstet und ausgewertet. Ziel hierbei ist, das technisch ökonomische Ideal zu entwickeln.

### Grund der Anfrage und Ihr Vorteil

Um die zuvor beschriebenen Untersuchungen durchführen zu können, sind wir auf die Zusammenarbeit und Unterstützung der Branche angewiesen. Konkret benötigen wir Zusagen zu 15 - 20 Klimakälteanlagen, die entsprechenden R&I-Schemen, sowie Informationen bzgl. der vorhandenen Instrumentierung und Messdatenerfassung. Es werden dabei nur Kaltwassersätze, welche für die Raumkonditionierung eingesetzt werden, gesucht. Im Gegenzug erhalten Sie Informationen aus erster Hand sowie die Möglichkeit zu einem späteren Zeitpunkt Ihre zur Verfügung gestellte Anlage mit dem Exergieansatz beurteilen zu lassen. Nicht zuletzt lassen sich auf dieser Basis, wenn gewünscht, einzelne Optimierungsmassnahmen ableiten, die Performance der Anlage verbessern und die Betriebskosten senken.

## A.5 Checkliste

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



**School of  
Engineering**

IEFE Institut für Energiesysteme  
und Fluid-Engineering

### **EXERATE: Exergieansatz zur Beurteilung von Klimakälteanlagen**

Checkliste Messkonzept Anlage



## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	SI-Einheit
$E$	Exergie	kJ
$\dot{E}$	Exergiestrom	kW
$f_{el,th}$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor (ETV)	-
$P$	Leistung	kW
$\dot{Q}$	Wärmestrom	kW
$T$	Temperatur	K
$t$	Zeit	s
$\Delta E_V$	innerer exergetischer Verlust	kJ
$\zeta$	exergetische Kennzahl	-
$\eta$	Wirkungsgrad	-
$\tau$	technologischer Gütegrad	-

Index	Beschreibung
0	Verdampfung
$A$	Aufwand
$C$	Verflüssigung
$D$	Verteilung (Distribution)
$el$	elektrisch
$ex$	exergetisch
$FC$	Freecooling
$FCN$	Freecooling Nutzung
$HS$	Heizstellen
$KM$	Kältemaschine
$KST$	Kältespeicherung und -transport
$KS$	Kühlstellen
$m$	thermodynamisches Mittel
$N$	Nutzen
$opt$	optimal
$RK$	Rückkühlung
$RKV$	Rückkühlventilator
$RL$	Rücklauf
$SYS$	System



---

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>U</i>	Umgebung
<i>UWP</i>	Umwälzpumpe
<i>V</i>	Verlust
<i>VD</i>	Verdichter
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>WA</i>	Wärmeauskopplung
<i>WN</i>	Wärmenutzung
<i>WST</i>	Wärmespeicherung und -transport
<i>zul</i>	zulässig
*	dem technisch-ökonomischen Ideal entsprechend

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>1 Übersicht</b>	<b>1</b>
1.1 Kenndaten Anlage . . . . .	1
1.2 Vorhandene Teilsysteme . . . . .	1
1.3 Allgemeine Bemerkungen . . . . .	1
1.4 Kennzahlen und Exergieströme . . . . .	2
<b>2 Teilsystem der Kältemaschine</b>	<b>3</b>
<b>3 Teilsystem der Rückkühlung</b>	<b>4</b>
<b>4 Teilsystem Kältespeicher und -transport</b>	<b>5</b>
<b>5 Teilsystem der Kühlstelle(n)</b>	<b>6</b>
<b>6 Teilsystem der Wärmenutzung</b>	<b>7</b>
<b>7 Teilsystem Freecooling</b>	<b>8</b>
<b>8 Datenerfassung</b>	<b>9</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>10</b>



---

## 1 Übersicht

### 1.1 Kenndaten Anlage

---

Kälteleistung Verdampfer  
Wärmeleistung Verflüssiger  
Kältemittel  
Standort Anlage  
Betrieber  
Hersteller Kältemaschine(n)  
R&I-Schema erhalten von  
Dateiname R&I-Schema  
Logging  
Baujahr

---

### 1.2 Vorhandene Teilsysteme

---

Kältemaschine  
Rückkühlung  
Kältespeicher und -transport  
Kühlstellen  
Wärmenutzung  
Freecooling

---

### 1.3 Allgemeine Bemerkungen

1.4 Kennzahlen und Exergieströme

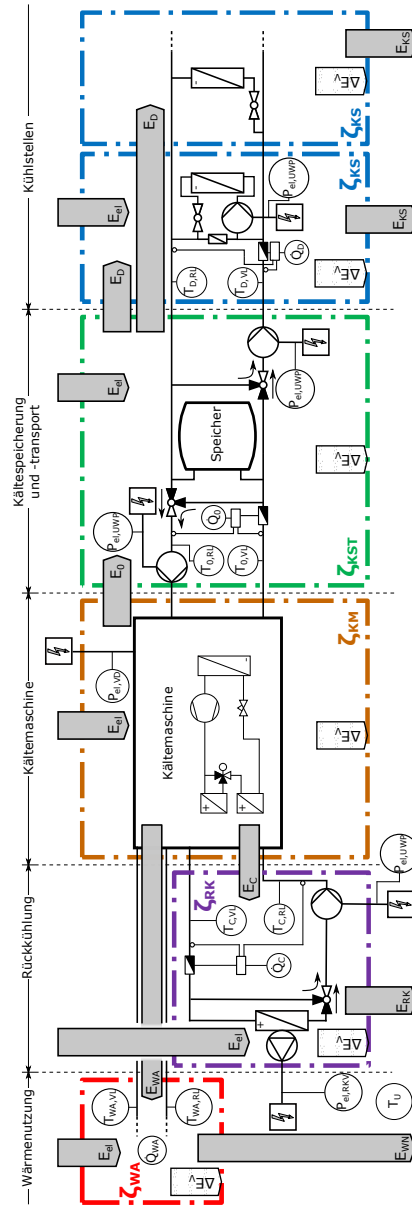


Abbildung 1.1 – Abstrahiertes Schema mit grundlegenden Anlagenteilen einer Klimakälteanlage, dem Exergietransport in jedem Teilsystem, den verschiedenen exergetischen Kennzahlen sowie Messstellen.

## 2 Teilsystem der Kältemaschine

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 2.1 erfasst werden.  $\dot{Q}_C$  kann alternativ auch über die Energiebilanz der Kältemaschine bestimmt werden.

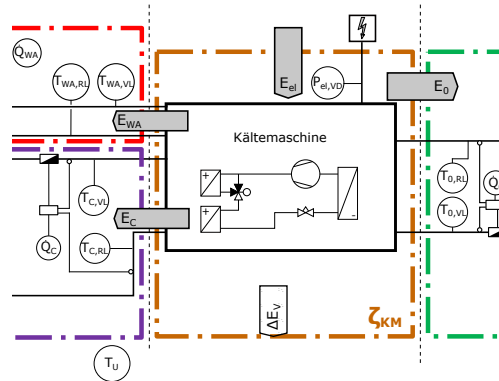


Abbildung 2.1 – Relevante Messstellen und Exergieströme des Teilsystems Kältemaschine.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
			$P_{el,VD}$
			$\dot{Q}_0$
			$T_{0,VL}$
			$T_{0,RL}$
			$\dot{Q}_C$
			$T_{C,VL}$
			$T_{C,RL}$
			$\dot{Q}_{WA}$
			$T_{WA,VL}$
			$T_{WA,RL}$
			$T_U$



### 3 Teilsystem der Rückkühlung

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 3.1 erfasst werden.  $\dot{Q}_C$  kann alternativ auch über die Energiebilanz der Kältemaschine bestimmt werden.

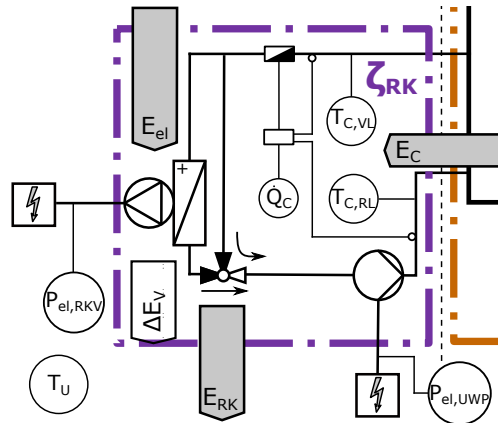


Abbildung 3.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Rückkühlung.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
$P_{el,UWP}$			
$P_{el,RKV}$			
$\dot{Q}_C$			
$T_{C,VL}$			
$T_{C,RL}$			
$T_U$			

#### 4 Teilsystem Kältespeicher und -transport

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 4.1 erfasst werden.

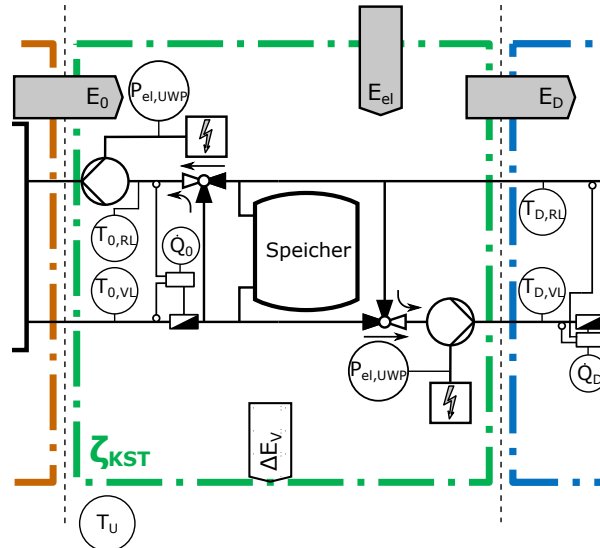


Abbildung 4.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältespeicher und -transport.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
$P_{el,UWP}$			
$\dot{Q}_0$			
$T_{0,VL}$			
$T_{0,RL}$			
$\dot{Q}_D$			
$T_{D,VL}$			
$T_{D,RL}$			
$T_U$			

### 5 Teilsystem der Kühlstelle(n)

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 5.1 erfasst werden.

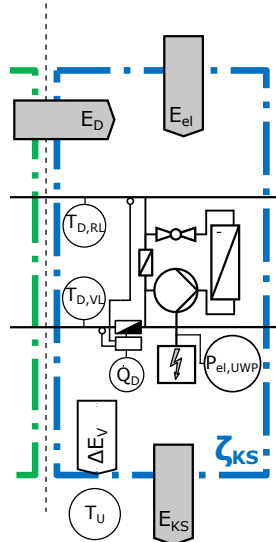


Abbildung 5.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kühlstellen.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
			$P_{el,UWP}$
			$\dot{Q}_D$
			$T_{D,VL}$
			$T_{D,RL}$
			$T_U$

## 6 Teilsystem der Wärmenutzung

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 6.1 erfasst werden.

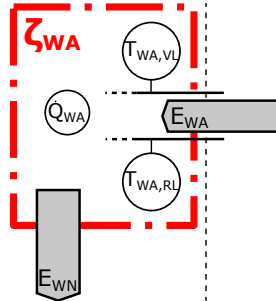


Abbildung 6.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Wärmenutzung.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
$P_{el}$			
$\dot{Q}_{WA}$			
$T_{WA,VL}$			
$T_{WA,RL}$			
$T_U$			

## 7 Teilsystem Freecooling

Es werden folgende Grössen benötigt, welche gemäss Abbildung 7.1 erfasst werden.

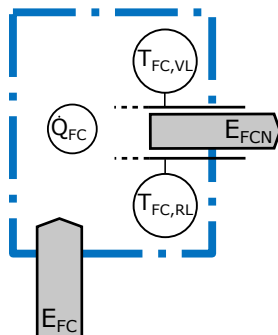


Abbildung 7.1 – Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Freecooling.

Abkürzung	Sensor R&I	Logging	Bemerkung
$P_{el}$			
$\dot{Q}_{FC}$			
$T_{FC,VL}$			
$T_{FC,RL}$			
$T_U$			



### 8 Datenerfassung

Welche Datenpunkte werden aufgezeichnet:

---

---

---

---

---

In welchem Intervall werden die Datenpunkte aufgezeichnet?:

---

---

---

---

---

Können die Daten Exportiert werden (in welcher Form)?:

---

---

---

---

---

Sind bereits Daten vorhanden (Zeitspanne)?:

---

---

---

---

---

Falls keine Auskunft möglich:

Kann ggf. Auskünfte bei einer Drittperson eingeholt werden?

Kontakt:

---

**Abbildungsverzeichnis**

1.1	Abstrahiertes Schema mit grundlegenden Anlagenteilen einer Klimakälteanlage, dem Exergietransport in jedem Teilsystem, den verschiedenen exergetischen Kennzahlen sowie Messstellen. . . . .	2
2.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältemaschine. . . .	3
3.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Rückkühlung. . . . .	4
4.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kältespeicher und -transport. . . . .	5
5.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Kühlstellen. . . . .	6
6.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Wärmenutzung. . . .	7
7.1	Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Freecooling. . . . .	8